

# アラン マイクロエレクトロニクス (AML) 社 真空適合ステッパーモータのためのアプリケーションノート

ページ

- 1 目次
- 2 真空内でのステッパーモータの操作
  - 2 真空環境
  - 2 温度上昇
  - 3 アウトガス (ガス排出)
  - 3 モータを含んだ真空システムのベーキング
  - 3 コロナ放電
  - 3 低温運転
  - 3 磁気環境
  - 4 悪影響を及ぼす化学物質環境
  - 4 ケアとメンテナンス
  - 4 ベアリング損傷
  - 4 モータ内の不純物
  - 4 過熱
- 5 真空適合モータと共に使用されるメカニズムの設計
  - 5 回転 (角度位置制御)
  - 5 回転 (速度制御)
  - 5 搬送
  - 6 リニアガイド
  - 6 減速ギア
  - 6 ベアリング
- 7 共振
  - 7 荷重慣性効果、摩擦と駆動特性
  - 7 共振制御

 **テクノロジーリンク株式会社**  
TECHNOLOGY LINK, LTD.  
〒171-0022 東京都豊島区南池袋 3-18-35  
OKビル2階  
Tel: 03-5924-6750 Fax: 03-5924-6751  
E-mail: [sales@technology-l.com](mailto:sales@technology-l.com)  
URL: <http://www.technology-link.jp>

## 真空内でのステッパーモータの操作

これからのご説明は、読者はUHV製品に精通し、UHV機器取り扱いの経験があるものと想定します。

ここでの記載内容はハイブリッドステッパーモータの動作理論を議論するものではありません。

### **真空環境.**

真空ステッパーモータを上手に使うには温度（発熱）と機械的な特性に付いての理解が必要です。大気中でのモータ運転時に役に立つ冷却方法は真空環境ではあまり効果がありません。また、Bシリーズモータが開発される以前は、連続運転は達成できませんでした。

低温でのモータの運転は排ガス性能が良くなります。この理由で、モータの稼働時間と駆動電流は常に最小限が求められます。できる限り容量の大きなモータを使用すれば、長く稼働し、モータ温度も低く、その結果排ガスも最小限に抑えられます。これは、大型モータの大きな質量と高効率によるものです。

負荷の動作中、ステッピングモータが唯一有効な動作をします。これは、各ステップは僅か数ミリ秒の間隔しかありませんが、コントローラ SMD2 ユーザは「h」コマンドで各ステップ後の相電流を減らし、保持トルクを発生することができます。これはプルアウトトルクとディテント（静止トルク間移行時の保持トルクで、それに伴ってパワーが減少します。

低速度では、モータトルクはほぼ相電流に比例し、モータパワーは相電流の2乗に比例します。負荷慣性がシステムの動特性を支配している状況では、相電流を減少させることができます。但し、モータがゆっくりと加速していく事が条件です。

たくさんの用途で連続動作が要求されます。例えば蒸着やインプラネーション（メッキ）など均一性を維持するためのサブストレートの回転等は低いデューティサイクルで断続した短いステッピング間隔にて同様に旨く実行出来ます。これで、温度上昇が抑えられます。

断続動作が必要な状況では、静止続けるために必要なトルクをなくすために可能な限り荷重バランスが取れたメカニズムの設計をして下さい。代替案として、モータのディテントトルクで、パワー無しでも位置の保持ができるようシステム内の静止摩擦を増やす或いは減速ギアを追加して下さい。

AML 社モータの最大効率はコントローラ SMD2 にて、フルステップレートで 500KHz から 1KHz です。

### **温度上昇**

AML 社モータの推奨動作時最高温度は内蔵された K タイプ熱電対で計測して 175° C です。熱電対に接続される測定機器はモータ駆動中に内部の高電気ノイズに影響を受けないように注意して下さい。

巻き線絶縁の不可逆性劣化は 230°C 以上で発生し、モータはそれに伴い低温状態でも大量のガスを排出します。

代表的なドライバーで、ステップ間の相電流設定が構築できない場合は、ステップ周波数が 1KHz 以上になると温度上昇が次第に減少します。

改良型 B 及び C-シリーズモータはエッチング表面のダイヤモンド様コーティング(DLC)の放射率を増やすことで、表面放射が増え、内部熱インピーダンスを下がり、巻き線容量が増え、巻き線抵抗値が減っています。

低ガス排出での連続稼働は中程度の相電流にて容易に得られます。高い電流を使用する際はモータ端のフランジにヒートシンク（放熱板）を追加すれば使用可能です。

予想された温度上昇は真空チャンバー内の他の発生源からの熱線放射がモータへ入ると増加します。遮蔽が必要になるかもしれません。

## ガス放出

新品のモータはガスを放出します。主にポリイミド内の残留水蒸気です。材質が微孔性なので、水分は急速に放出され、放出レートは数時間で沈静します。放出レートはモータを動かして自己発熱させると加速できる場合もあります。

## モータを含んだ真空システムのベーキング

AML 社モータの真空ベーキング温度は最高 200° C です。モータ回りのポンプの排気能力が 100 リットルだとすると、この温度で 24 時間のベーキングでガス放出が通常最小レベルまで下がります。測定ポイント間のコンダクタンスが限られた、ガス放出テストチャンバーではモータの完全なガス排出レベルまでに、ベーキングは数日或いは数週間掛かります。

モータは通常真空チャンバー壁からある程度の距離をおいて稼働します、そこには熱源がありベーキング温度が最も頻繁に制御される場所です。チャンバーからモータまでの熱伝導度が低ければモータが所要の温度まで上昇しないかもしれません。都合良く、モータ内の熱電対で温度の監視ができるので、ガス排出が十分かどうかコントロールできます。

ベーキング中のモータ内蔵熱電対による温度表示がベーキング時間内で十分高くない場合はモータに電流を流して温度を 175°C に上げる事ができます。この作業の実施には SMD2 の「b」コマンドの活用がお勧めです。これはモータをハーフステップ位置で静止させ両方の相を励磁する方法です。温度が 175°C に達するまで電源が供給され、達成後は遮断されます。「b」コマンド実行中にもし、温度が 165°C 以下に下がったら再度電源が供給されます。他の真空機器の冷却中は、モータはこの方法で高い温度を保つことをお勧めします。これでモータへの凝結が防げます。これはモータが大抵の用途でチャンバーより高い温度で稼働するので、重要です。

ベークアウトに内蔵の近赤外ヒーターが使用される場合は、直に放射熱がモータに当たらないようシールドし、ベーキング中にモータを稼働して所要の温度を達成することを勧めます。

## コロナ放電

電圧源が 100V 迄のスイッチモードのステッパモータドライバでは十分高圧放電が発生する可能性があります。これは大抵フィードスルーの隣接ピン間で起きますが、モータ巻き線の絶縁されていない結び目や絶縁部の小さな穴などでも起こり得ます。このタイプの放電に対して保護対策が取られていないドライバーでは損傷が発生する可能性があります。常に放電が発生する場所に近い絶縁材には次第に劣化が生じます。

## 低温での稼働

AML 社モータは 77K での稼働に適合している事を保証しており、低温環境での使用に適合しています。低温環境ではモータリードが非常にもろくなるので、柔軟さが無くなります。全ての材質での通常の機械的、電気的特性は室温に戻れば回復します。

低温では巻き線抵抗が小さいので、モータ効率は常温よりもずっと良くなります。SMD2 へ通常の負荷となるように各巻き線に直列で数オームの抵抗を接続しなければなりません。電圧源となるドライバーで、相電流を決定するために抵抗のみに頼っているタイプは低温用途には使用すべきではありません。

## 磁気環境

モータは 50 ミリテスラ (500 ガウス) 以上の磁場環境では磁場が発生している間、性能に影響を及ぼすので使用できません。これよりずっと大きな磁場ではロータに部分的な消磁が発生し、トルクが減少します。消磁したモータは AML 社へご返却頂ければ回復できます。

モータの漏洩磁場はモータ中心から 10 cm のところで軸方向で 1 ミリテスラ (10 ミリガウス) オーダで、モータに電源が入ってなくても存在します。励磁状態では交流要素がステップ周波数に追加され、ハーモニクス (高調波) は最高で数 KHz になります。漏洩磁場はモータの側面をミュールドールや同様の透磁性フォイルで簡単に遮蔽することができますが、シャフトの延長軸回りではもっと難しくなります。近傍の機器の浮遊磁場の相互作用については早期に検討される事をお勧めします。

## 有害化学環境

AML ステッパーモータはクリーンなUHV環境にて使用されるよう規定されていますが、頻繁に蒸着システムに使用されます。モータを蒸着源の視野内から遮蔽ができる場所であれば必ず実施して下さい。化学物質蒸気が使用されている場所ではモータ材質への影響を考慮しなければなりません。AML 社では一般的に有害化学物質の影響についてはお答えできませんが、テストのためのサンプル材を提供する事ができます。モータに使用されている材質の露出表面領域の概略の降順は以下の通りです：

- ポリイミド
- ダイヤモンド様カーボン
- SUS 材 440, 304, 316, 303
- シリコンステール
- サマリウムコバルト
- ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)
- 450G A アルミナセラミック
- シリコン窒素セラミック
- 銀
- フッ化エチレンプロピレン (FEP). (放射線硬度モータには不使用)
- 銅
- クロメル/アルメル (クロメル及びアルメルは Hoskins Manufacturing 社の登録商標です)

## VCSM (真空適合モータ) の手入れと保守

VCSM は内在的に堅牢でありボールベアリングで支えられたシンプルなロータアセンブリーで構成される唯一の可動要素しかありません。このタイプのモータの最高速度は非常に低いので、ベアリングは真空環境で極めて長い動作寿命があります。コンピューターやスリップリング或いは、同様に表面を擦って接触する要素がありません。操作時に通常のケアがされていれば特にメンテナンスの必要はありません。

ステッパーモータはロータの永久磁石が部分的に消磁し、永久的にトルクが低下しますので、分解してはいけません。

真空モータは分解前に消磁され修理後に再磁化され洗浄されます。これらの理由で、不具合があるモータは修理のために AML 社へ返送が必要です。以下に良くある問題を避けるためのガイド情報と診断上の助言をお知らせします。

## ベアリング損傷

ベアリング内のセラミックボールは非常に強いが、鋼製のボールよりずっと脆いです。モータの端面を下に落とすと多分何個かのボールが破損します。破損状態はたまに目視認識できますが、シャフトを手で回して粗さを感じたら何かが起こっていることを示しています。

## モータ内の不純物

排気孔やベアリングの隙間からモータ内部へ異物が侵入する可能性があります。特に磁性材分子は排気口から引き寄せられ易く、その結果ロータとステータ間の隙間に紛れ込みます。これはロータ 1 回転に一、二カ所で引っかかり動作が生じます。これは特定の回転方向においてのみ感じられる事が多いです。大きなモータでは、都合良く異物をすりつぶして微粒子にするだけのトルクがあります。

## 過熱

230°Cまで過熱されるとその後、モータはもっと多量のガスを発生しますが、電気機械的性能には影響しません。巻き線が変色したら、巻き線をまき直しすることで、真空性能は著しく改善されます。もし、巻き線の色が金-茶色から黒っぽくくすんだら、そのモータの修理はできません。極端なケースでは絶縁材が剥離してモータケース内部に黄色い粉として蒸着、或いは排気孔へ続いた箇所への冷却表面に蒸着する事もあります。

モータは真空内では極めて急速に加熱しますが、コントローラ SMD2 に正しく結線されていればこのような急激な加熱は生じません。相電流が 1 アンペア以上供給するドライバーは使用しないで下さい。また、温度が 175°Cを超えた値が表示されたら即電流を遮断するよう気をつけてください。

## 真空適合モータ(VCM)と一緒に使用されるメカニズムの設計

以下の章では題目の案件を紹介し、様々なタイプのメカニズムに関する主要な機械上或いは真空上の考察をご提示します。機械的知識或いは真空構築技術は持っておられるものと仮定します。AML 社は一連の標準メカニズムをご提供致しますが、特注仕様や特別設計のメカニズムや機械要素も承ります。

### 回転動作 (位置決め制御)

モータのシャフトに結合される負荷イナーシャはモータのロータイナーシャと比較して理想的に小さくしなければなりません。モータイナーシャの倍か、3 倍までの負荷イナーシャであれば無負荷モータにて得られる最高始動速度や加速度にあまり大きな差が無く駆動できます。モータイナーシャの凡そ 10 倍の負荷イナーシャも完全同期して駆動できますが、この場合はミニステップや加速パラメータの設定に注意が必要です。更に大きな負荷の場合は減速ギアを介しての駆動が必要です。

水平面での回転でない場合は重心が軸上になければなりません。

モータシャフトの角度分解能は  $1.8^\circ$  のシングルステップに制限されます。ステップ内の実際の残りの位置は主に負荷摩擦及びモータが停止中の負荷により課されたトルクにて決まります。もし、ロータ位置が通常のステップ位置から  $\theta^\circ$  ずれている場合は、戻そうとする力は  $\sin(100 \times \theta)$  に概ね比例して増加します。ハーフステップ位置での最大トルクはモータが停止時に通電しているかどうかでディテント（静止）トルクかまた保持トルクと同じになります。静止摩擦やバランスが取れていない負荷容量によるトルクが分かっている場合は上記の概算式にて残りの位置エラーの推測ができます。モータベアリング内の摩擦は非常に小さいので、完全に無負荷の C17.2 モータでは 300Hz のフルステップ速度で突然停止した場合、所要位置から  $0.2^\circ$  以内で停止します。角度分解能は減速ギアにて改善されることがありますが、これは以下の項で説明します。

角度の分解能をステップの分割にて行うこと（ミニステップやマイクロステップ等）は真空用途ではお勧め出来ません。なぜならモータはミニステップ位置を維持するために常に励磁されなくてはなりません。残留位置の不正確さが著しく増えるので、この方法で得られる絶対的な改善は少ないです。

### 回転動作 (速度制御)

幾つかの用途では回転負荷の精密な位置は余り重要ではありません。また別の方法で実行できます。しかし回転速度は正確に制御しなければなりません。蒸着の均一性を制御するビームチョッパーやサンプルローテータがこのタイプの用途です。モータのステッピング動作を滑らかにするために負荷イナーシャを増やすことが必要かもしれません。長い加速度ランプを使ってモータのイナーシャの約 1000 倍までの負荷が制御できます。数ステップは加速時に失ったり、負荷による遅れが生じるかもしれませんが、固定ステッピング周波数での正確な同期性が簡単に得られ認識されます。

非常におきな回転負荷は少なくともモータシャフトに出力されるトルクがモータのディテントトルクより小さくなる程度までバランス取りが必要です。モータトルクに要求される事は、負荷を加速するために必要なトルクが得られるかどうかです。

### 搬送

搬送はリードねじ及びナット、ワイヤ及びドラム、ラック及びピニオンなどのメカニズムで実施される場合が多いです。その選択は精密度、搬送長さ、搬送力及び速度によります。

リードねじをベースとした搬送系ではステップ辺りの分解能がミクロン単位で、力はキログラムまで得ることができます。精密リードねじでは 300 mm 迄のストロークが得られます。モータとリードねじ間のバックラッシュキャンセルギアで、ミクロン分解能が実用化できます。

バックラッシュキャンセルナットは垂直動作の場合は通常不要です。従来のナットがリードねじに使用されている場合は摩擦が負荷の大部分を占めます。特に、リードねじとモータシャフトの間に減速ギアを使った場合は対象の負荷イナーシャが小さくなります。潤滑による制約とUHVメカニズムの低速度のために、通常静摩擦が動摩擦よりずっと重要になります。ナット用に最適な材質はリン青銅で、リードねじ用にはダイヤモンド様コーティング(DLC)されたステンレススティールが最適です。DLCは真空内では摩擦係数が非常に小さくなります。純粋な二硫化モリブデンのバニシング又はスパッタリング薄膜を施したリードねじが摩擦及び摩耗を減らすのに有効です。これらの材質間の摩擦係数は0.1で研磨された台形ねじにて代表的な摩擦係数はその40%です。リードねじの摩擦熱による排ガス負荷は通常モータの負荷よりも幾分小さいです。この値はリードねじのコーティングを二硫化モリブデン又は二硫化タングステンに変更すれば更に小さくできます。

分解能が数ミクロンの短い搬送用途に AML 社ではモータシャフトの延長としてリードねじを組み込んだモータを提供できます。これで、カップリングや個別リードねじの支持に必要な追加のベアリングが不要になります。

真空用途のための循環ボールナットも用意しています。これは非常に高い効率が得られますが、高価です。摩擦が小さくキログラムの1/10程度の力で駆動できるので、排ガス負荷が非常に小さくなります。バックラッシュを減らすために選別したボールを充填すると数値が非常に小さい値になります。このような特別仕様のリードねじには長尺タイプも用意されています。

ドラムやラック駆動の摩擦に拠る損失は従来のリードねじ駆動よりも小さく、通常イナーシャが大きな要因です。ラック&ピニオン駆動は数100ミリの搬送に適しており、ワイヤ&ドラム機構は数メートルまでの搬送系が可能です。これらの代替搬送駆動系の繰り返し精度とバックラッシュはねじ駆動系よりもずっと粗くなります。

### リニアガイド

低価格搬送機構として研磨されたステンレス棒にシンプルなブッシュを使った駆動系が可能です。PEEK材等の様な、様々な強化炭素ポリマー材がブッシュに適しています。但し、リン青銅よりも高価です。

もっと精密な搬送系の場合は「V」溝ローラ&トラックやクロスローラガイドが最適です。前者は1メートル辺りの搬送に実用的で搬送距離に対する全長が最も短くなります。クロスローラライドはもっと堅牢で大きな荷重を支えることができますが、価格が高いです。両方の機構も予圧調整が可能です。「V」ローラは小さな荷重ベアリング表面が小さくローラの接点が一点なので、大きな荷重が掛かると摩耗が大きくなります。

### 減速ギア

減速ギアで結合された負荷イナーシャは減速比の二乗に比例して低減されます。負荷との適合のために減速ギアが使用される場合、モータピニオン(小歯車)と噛み合う平歯車は通常負荷イナーシャに依存するので歯車の直径はなるべく小さくすることが重要です。バックラッシュ防止ギアや標準ピニオンはメカニズム内のいかなる共振も打ち消すように歯車列に配置されなければなりません。UHV環境で使用されるギアは潤滑無しでも低摩擦なデザインが必要です。また、冷間圧接を避けるために接点には異なる(非同類)材質を使用しなければなりません。回転表面の窒化イオンメッキやギア全体のチタン窒化コーティングはこの目的を達成するのに効果的な方法です。他の好ましい特性としてはギアトレイン(歯車列)が全てステンレススティールで構成されていることです。

### ベアリング

UHV環境で使用されるベアリングはシールド無しでステンレススティール製のケージと軌道輪を使用してください。ボールは他の材質でコーティングされたステンレスか又はセラミック製にしてください。代替案として軌道輪(ボールへ変換されるよう指定されたもの)にPTFE複合構成部品を使用した全ステンレスベアリングも適しています。

注記: PTFE=Polytetrafluoroethylene, ポリ四フッ化エチレン(テフロン)

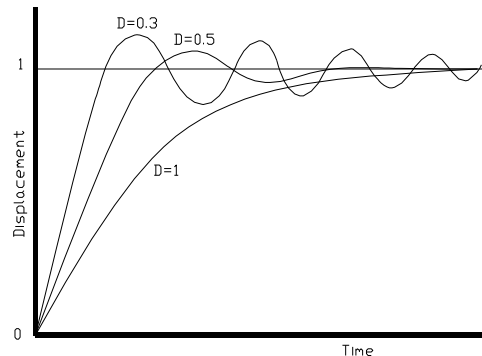
## 共振

ステッパーマータの最も共通した用途上の問題点は共振に関連した問題です。

ステッパーマータは古典的二次システムで、一個或いは複数の自然共振周波数を持っています。これらは無負荷モータでは通常 50 から 100 Hz 領域にあります。これらの周波数近くで運転では共振が起こり、結果出力トルクが非常に小さくなり、分割も誤動作します。他の共振領域は 1-2 KHz の範囲ですが、ここでは通常余り実際上の問題点は生じません。

### 負荷イナーシャ、摩擦及び駆動特性効果

第一（低次）共振周波数に関しては正確に述べることはできません。と言うのは、これは摩擦や負荷イナーシャ、モータ温度、及び駆動装置（ドライバー）の特性にて修正されるからです。負荷イナーシャへ接続すると共振周波数が減りダンピング要素も減少します。負荷摩擦はダンピングを大きくします。SMD2 の駆動回路は大きなダンピングを生じる相電流を制御します。ドライバーで電源を有し、相電流を決めるのにモータの巻き線やその他抵抗値に依存しているタイプはダンピング低減要素が低いです。



モータのシングルステップでのダンピング応答の修正効果がダイアグラムに示めされています。します。

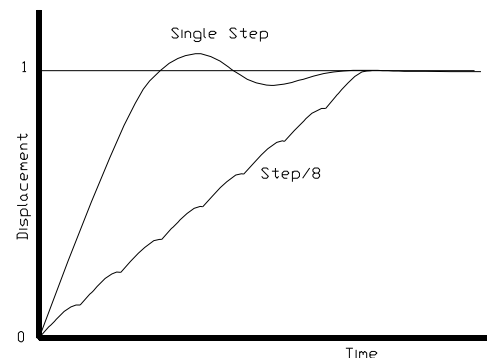
### 共振の制御

共振制御の最も簡単な方法は共振周波数近辺での操作を避けることです。負荷イナーシャが小さい場合は、通常 300 Hz 以上のレートからスタートすることで第一次共振領域を完全に避けることができます。モータ速度が加速状態或いは共振周波数領域での遅れに関しては、共振は通常問題になりません。SMD2 は始動速度や加速度プロファイルのステップ番号を個別に選択できます。

低速動作や大きな負荷イナーシャでの操作が必要な場合は SMD2 のステップ分割（ミニステップ）機能が役に立ちます。この機能はステップ分割要素によりステップングレートを増やし、共振を励起する変移の振幅を減らします。このことが以下のダイアグラムに示されています。両方の相がミニステップにて励起されるので、そのほか幾つかの巻き線間のエネルギーの交換プロセスが生じます。この交換プロセスはシングルステップモードでは起こりません。そしてダンピング要素を増やします。

特に難しいケースでは、ステップ分割（ミニステップモード）の転移が生じるステップ周波数を改良する事が役に立ちます。

度を超えた周波数までステップ分割を指定するのは注意してください。これはトルクを減らす事になります。ステップ分割の周波数はステップ周波数の産物であり、フルステップの中のミニステップ数です。一般的な指針として 500 Hz が役に立つ最高周波数の限界です。



シングルステップの代表的なモータ応答と 8 個の分割されたミニステップの応答がダイアグラムに示されています。