

精密位置決めについて

Introduction to Positioning Equipment

このチュートリアルは光学機器コンポーネントが持つ機構の原理を紹介し、一般的に使用されるテーブルトップコンポーネントの選択にあたり考慮すべき論点を理解して頂くためのガイドです。ここでは、数値的に厳密な説明よりも実用上の問題点に重点をおいて説明します。

性能を表すパラメータ

位置決めコンポーネントの選択にあたって考慮すべき性能の尺度は何通りも存在します。各種パラメータの定義をよく理解し、それがコンポーネントの性能にどのような影響を及ぼすかを明確に把握することが選択を容易にしてくれます。

材料と安定性

光学機器コンポーネントの大部分はアルミニウム、黄銅、またはステンレスで作られています。したがって、以下の項目ではこれらの材料に的を絞って材料特性の比較を行います。

材料を選択するときにはしばしば行われる方法は、特定の項目（例えば熱膨張）だけに注目して特性を比較することです。しかし、この方法では一般的に使用するコンポーネントを選択する良い方法とはいえません。関連するすべての材料特性を考慮しなければなりません。

剛性 (Stiffness)

剛性とは、一定量の歪み（標準化された変形）を引き起こすために必要な圧力（単位面積当たりの力）を表します。圧力と歪みは比例し、 $\sigma = E\varepsilon$ という式で表されます。は圧力、は歪みを表し、Eはヤング率で物質によって異なります。物質はEの値が大きいほど剛性が高く、Eの値が小さいほどしなやかになります。たとえば、ステンレス鋼の剛性はアルミニウムの約3倍（表参照）です。一方、アルミニウムは真鍮よりも約1.3倍しなやかです。固有の剛性（ヤング率を物質の密度で割った値）が重要になるのは、安定するまでに要する時間や耐振性が問題となる場合です。形が同じで、固有の剛性が同じ部品は、共振周波数も同じです。固有の剛性が高いほど共振周波数が大きく、安定するまでに要する時間が短く、振動による乱れは小さくなります。

材料特性	アルミニウム	ステンレス鋼	真鍮
剛性、k (MPSI)	10.5	28	14
密度、 ρ (lb/in. ³)	0.097	0.277	0.307
固有の剛性、 k/ρ (M in.)	108	101	45.6
熱膨張係数、 α (μ in./in./°F)	12.4	5.6	11.4
熱伝導係数、c (BTU/hr-ft-°F)	104	15.6	67
相対熱ひずみ (α/c)	0.12	0.36	0.17

熱膨張 (Thermal Expansion)

温度が変動するとマウントコンポーネントの寸法と形状も変化します。この変化の大きさはコンポーネントのサイズと温度変動の大きさ、および使用する材料に依存します。寸法の温度に対する変化は $\Delta L = \alpha \Delta T$ で記述され、 α は材料の種類に依存する定数であり熱膨張係数（coefficient of thermal expansion）と呼ばれます。ステンレススチールの熱膨張係数の大きさはアルミニウムの約半分です。光の干渉を利用するアプリケーションではマウントコンポーネントの熱膨張の大きさが非常に重要です。また、コンポーネント全体を通して温度変化が一樣ではない条件下での、最良の材質はアルミニウムです。このような状況は、例えばレーザーダイオードなどのパワー源をマウントする場合などに起こります。ダイオードは環境温度よりもかなり熱くなり、コンポーネントを通して熱を散逸しようとするためコンポーネント内に温度勾配を発生させます。アルミニウムの熱伝導率はステンレススチールの10倍にもなりますから、熱がより効率的に散逸して温度勾配と歪みを小さく抑える効果があります。均一でない温度変化によって引き起こされる歪みの大きさは、熱膨張率を熱伝導率で割った値に比例します。したがって、均一でない温度環境に置かれた場合、アルミニウムの歪みの大きさはステンレススチールの1/3以下になります。黄銅の熱膨張はアルミニウムとほぼ同程度ですが、熱伝導率は約1/2程度にすぎませんから温度の不均一な環境での使用にはアルミニウムの方が適しています。

コンポーネントの操作環境温度が室温から大きく異なる場合には、2種類上の材料から作られたコンポーネントの使用について十分な注意を払わなければなりません。リニアステージを例として考えてみます。ステージがアルミニウム製でベアリングがステンレス製であったとすると、温度変化に対して両者は異なる割合で膨張し、その結果として両材質の接触面に応力が集中してステージのベアリングが予圧を失ったり、ステージにそりが生じたりします。

材料の不安定性

材料の不安定性とは、時間経過とともに発生する物理的寸法変化を意味し、コールドフロー (coldflow) またはクリープ (creep) と呼ばれます。アルミニウムや黄銅、ステンレススチールの場合、ユーザーに分るようなクリープが現れるまでには通常数ヶ月または数年の期間を要します。

通常は、コンポーネントの機械的設計における良し悪しの方が、材質の選択以上に材料の不安定性に対し影響を及ぼします。例えば、マイクロメータのネジの潤滑油が時間の経過とともに移動を始め、それによってマイクロメータ内で微妙なシフトが起こります。また、直進ステージのベアリングの硬度が十分でなかった場合には、長期間動かさなかった後の直進操作によってベアリングがその接触点において局所的な偏りを起こすことがあります。

材料評価のまとめ

位置決めコンポーネントに使用する材料は、それぞれが固有な長所と短所を持っています。残念ながら、すべての要求できる材料というものはありません。この章では材料特性について概略を述べます。

アルミニウム：アルミニウムは軽量でありながら耐クリープフロアー、耐クリープ特性を持ち、しかも優れた剛性/比重比を備えた素材です。アルミニウムは比較的大きな熱膨張係数を持つ反面、熱伝導率も大きいので、熱勾配がある場合や温度変化に素早く順応する必要のあるアプリケーションに適しています。切削加工が容易で比較的安価なアルミニウムはコンポーネントの構造材料として広く用いられています。アルミニウムは耐食性があり、特別な表面保護処理を施さなくても通常の実験室環境で腐食が問題になることは殆どありません。また、アルマイト処理によって優れた仕上面が得られます。ただし、アルマイト表面は非常に多孔質ですから真空での使用には適しません。真空条件でのアプリケーションには表面仕上げをしていないアルミニウムを使用する必要があります。

ステンレススチール：スチールは大きな弾性係数（modulus of elasticity）を持つことから、剛性（アルミニウムのほぼ3倍）と材料の安定性に優れた素材です。また、熱膨張率がアルミニウムの約半分にすぎないスチールは、温度がほぼ一定に変化すると期待される一般的な実験室環境での優れた選択肢となります。しかし、アルミニウムよりも機械加工に時間を要するため、スチール製コンポーネントはかなり割高になってしまいます。スチールは腐食という重大な問題をかかえています。しかし、ステンレス合金ならば他のスチールのような腐食は問題になりません。ステンレススチールは高真空下でのアプリケーションにも適していますが、コンポーネントの設計にあたって他の多くの要素も考慮しなければなりません。（「真空仕様について」の項参照）

黄銅：黄銅はスチールよりもさらに密度が高く、重い材料です。切削性に優れていますが、剛性/比重比はそれほど良くありません。黄銅の熱膨張はアルミニウムと同程度ですが、熱伝導率はアルミニウムの半分程度にすぎません。黄銅の利点はその優れた磨耗特性にあります。黄銅は主として減摩材として使用され、しばしばスチールやステンレススチールスクリューの自己溶接作用を避けるための異種金属として利用されています。また、高度な耐クリープ特性が要求される高精度アプリケーションには黄銅が使用され、目的によってはダイヤモンド切削によって非常に滑らかな表面に仕上げられます。

表面仕上げ

アルミニウムをアルマイト処理することにより、優れた耐食性を持つ良好な表面仕上げが得られます。光学マウントの場合にはほとんど黒色アルマイト仕上げが用いられます。ただし、アルマイト表面は高度に多孔質であることに注意しなければなりません。この理由により、アルマイト仕上げをしたアルミニウムを高真空アプリケーションで使用することはできません。逆に、表面が多孔質であるために光を反射しにくい特性があり、光学マウントには非常に適しています。アルマイト処理は表面を硬くするため、傷や磨耗への耐性を高めてくれます。

通常、スチール部品にはメッキまたは塗装を施します。通常使用するメッキはクロム、ニッケル、ロジウムまたはカドミウムです。スクリューとマウントハードウェアには防錆用黒色酸化仕上げがよく用いられます。塗装膜はやがて剥離して光学部品やポジションの可動部分を汚染する原因になりますから、このような箇所への塗装部品の使用は避けた方が良いでしょう。

しかし、ステンレス合金ならば他のスチールのように腐食が問題となることはありません。ステンレスは素材自体がクリーンであるため表面に特別な保護を施す必要もありません。ガラスビード（glass-bead）を吹き付けた表面は半光沢となり光を反射しません。

光学部品として使用する場合、黄銅部品の表面は通常黒色に着色されます。それ以外の場合には表面の耐久性を向上させるためにクロムやニッケルでメッキすることもあります。

真空仕様について

このカタログで仕様する多くの製品には真空仕様品が用意されています。特定の製品の仕様をご覧になるときに「**真空仕様 (Vacuum Compatible)**」表記があるかどうかを確認してください。「**真空仕様**」製品は 10^6 Torrでの使用を想定して設計されています。 10^3 Torrで使用する特殊仕様品、または 10^6 以上の高真空で使用する製品をご希望の場合は弊社の技術スタッフへ見積もりをご請求ください。

特に真空仕様として設計されていない製品であっても、真空条件で使用できる製品を製作できる場合があります。そのような場合には別途特注費用が必要となることがありますから、お客様の希望される仕様について弊社セールスエンジニアへお問い合わせください。

真空への対応

真空条件に対応させるための方法は要求される真空度によって異なります。したがって、単に「真空」と言うだけでは、そのアプリケーションが必要とする条件を特定することはできません。どの程度のがス放出（outgassing）、質量損失、揮発/再凝縮物質の存在が許されるかはアプリケーションの性質や排気容量、温度等の条件によって異なります。したがって、コンポーネントを真空環境に設置する前に、要求される条件をよく検討して理解しておくことが何よりも重要です。

10^3 Torr環境：一般的に、 10^3 Torr程度の真空環境で使用する場合には製品にほとんど改造を加える必要はありませんが、潤滑剤だけはそのまま使えないことがあります。このような環境ではアルマイト処理をした部品や、部分的にプラスチック製の部品を使用することは一般的にそれほど問題ではありません。

10^6 Torr環境： 10^6 Torrの真空で使用するコンポーネントは真空環境用に特別に設計されたものでなければなりません。標準コンポーネントが使用する材料は高真空下でガスを放出するため、「実質的」にリークが発生したのと同じ現象を引き起こして真空度を維持できなくなります。特にアルマイト表面は多量の空気分子をトラップしますから、真空中に大量のガス放出を起こします。このカタログで「**真空仕様 (Vacuum Compatible)**」と表記してあるコンポーネントには以下に仕様する処置が施されています。

- 標準品がアルマイト処理されている場合は、アルマイト処理を行いません。真空仕様品に使用するのにはアルマイト処理されないアルミニウム、ステンレススチール、またはそれらと同等の材料だけです。
- プラスチック製ノブやハンドル類は取り除くか、または高真空材料（デルリンまたはスチールなど）の同等品に交換します（追加費用にて）。場合によっては、代替品の設計に関わる費用を考慮して一部のプラスチックノブを残しておくことも可能です。プラスチックは通気性がありますが、その絶縁特性と価格の面から真空システム内でもプラスチック部品を使用するのが一般的です。
- 標準品では貫通していないタップ穴には通気孔を開けるか、または特別な通気孔付ハードウェアを使用します。
- ハードウェアと潤滑剤を真空仕様品に交換します。
- 完成したユニットを完全に清浄にしてから適切な梱包材に入れて封止します。

真空対応のための追加処理、たとえば 10^{-6} 以上の高真空に対応するためには製品を真空中で焼き付けするなどの処置が必要になります。このようなレベルでの処置が必要な場合は、可能なオプションとそれに伴う費用について弊社のセールスエンジニアにご相談ください。

光学マウント

キネマティックマウント

光学マウントの位置を一意に定義するには、6つの独立座標、すなわち任意の固定座標系について3つの直進座標と3つの回転座標の値を指定する必要があります。あるマウントの持つ自由度（自由に動かせる軸の数）と物理的拘束条件の数が全部で6個になる場合、そのマウントをキネマティックであると呼びます。この条件は、課される物理的拘束が独立している（冗長度がない）ことと同じです。したがって、キネマティック光学マウントも6個の独立して拘束条件を持ちます。

最も一般的なタイプのキネマティックマウントは、図1に模式的に示す「円錐（con）、溝（groove）、平面（flat）」マウントです。光学部品が図に示す3個の球から成る座標システムに置かれており、対応するマウントが円錐、V字溝、平面を持っているとします。最初に光学部品を円錐に据付けると、それによって冗長性無しに3つの自由度（X,Y,Z方向への直進）が失われます。

この時点では、光学部品はまだ全部の軸に対して回転の自由度は持っています。次に、2番目の球を円錐に向かって配置されたV字溝に据付けます。図に示すように、この拘束条件によってさらに2つの自由度（ピッチとヨー）が失われます。さらに1つ以上の直進の自由度を殺して過拘束とならないためには、V字溝が円錐を向いて配置という条件が重要です。ここで残っている拘束可能な自由度は、X軸中心の回転（ロール）の自由度ただ1つです。これを実行するには第3の球を平面上に据えます。6つの非冗長拘束条件が存在することから、このマウントはキネマティックマウントです。

キネマティックマウントの持つ利点は次のとおりです；光学部品マウント時に歪みが発生せず、さらにキネマティックベースを併用すれば、光学部品を位置決め精度を失うことなく取外し/再取付けを実行できます。図1に示すマウントから容易に想像で

きるように、円錐とV字溝、平面を含む面が光学部品そのものとは異なる割合で熱膨張したとしても、それによって光学部品を歪ませる負荷は発生しません。第2と第3の球はそれぞれV字溝と平面上をスライドするだけですから、マウントは単に球と円錐の周りで膨張するに過ぎません。もしマウントが非キネマティックであったとすれば（例えば、V字溝がZ軸中心に 90° 回転されていたとすれば）、プレートがX軸方向へ膨張/収縮したときに第2の球が溝に従ってスライドできませんから、光学部品を歪ませる力が働くことになります。

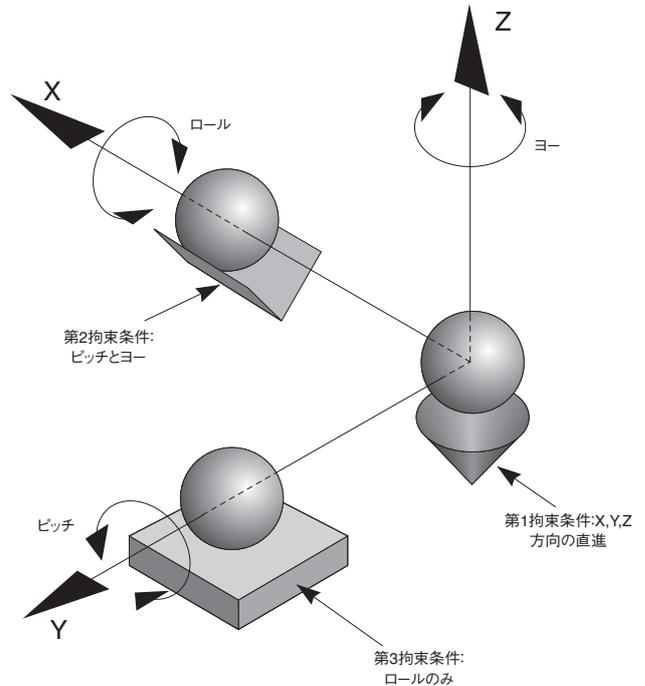


図1：キネマティック制約

ギンバルマウント

キネマティックマウントでは一般的に第2と第3の球（図1参照）にスクレイドライブを付加して、光学部品をベースに対して角度調整できるようにします。Newportのキネマティックミラーマウントではこれが設計の基礎になっています。しかし、このタイプのマウントではマウントの軸回転の位置と方位が一般的に光学部品の後ろに位置し、しかも固定ではないという欠点があります。すなわち、調整を行うたびに軸が移動します。軸の移動は次の2つの問題を生じ、これらを解決する必要があります。第1に、軸が移動するために軸と光軸との直交関係が保たれず、調整中に両者の動作がクロスカップリングを起こします。光軸に直交する方向の純回転であっても、キネマティックマウントの両軸の調整が必要になります。第2に、調整作業時に回転軸が光学部品の後ろにあるため、光学部品の回転と直進の両方が起こってしまいます。

ギンバルマウントを使用すればこの2つの問題を解決することができます。ギンバルマウントとは、回転軸が直交し、空間的に固定されているマウントであると定義できます。ギンバルマウントならば、マウントした光学部品の前面上の中心で軸を交差させたときに、直進動作を起こさせずに単に回転だけを調整することが可能になります（図2参照）。

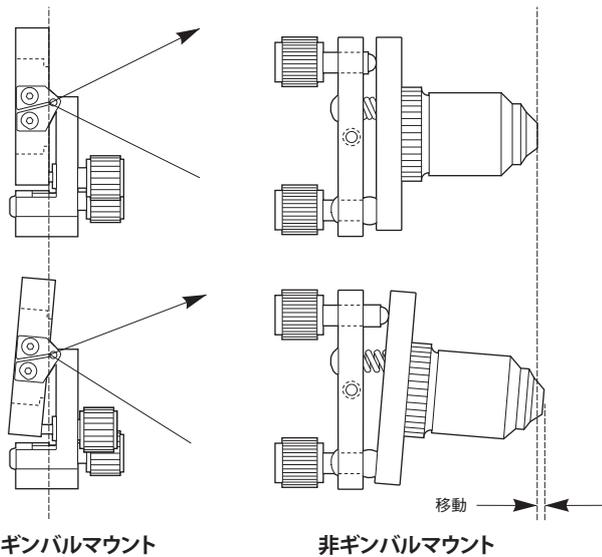


図2：ギンバルマウント

用語解説

バックラッシュ (Backlash)：入力を反転させたときの不応性を表します。例えば、モーター駆動エンコーダーを装備した単純なモータライザは、入力を反転したときに数ミクロンの位置変化を示してから実際の変化に追従して位置変動を出力し始めることがあります。この現象を表現する用語として、デッドゾーン (dead zone)、ステイクション (静摩擦stiction)、弛み (looseness)、スロップ (slop)、自由遊び (free play) など頻りに使用されます。

クロスカップリング (Cross-Coupling)：XYステージやキネマティックミラーマウントなどの多軸デバイスにおいて、ある軸を調整したときに別な軸に発生する移動量を表します。例えば、XYステージのY軸ドライブを調整したときにX軸に発生する移動量です。クロストーク (cross-talk) とも言われます。

ヒステリシス (Hysteresis)：入力を反転させたときの動作の不一致を表します。ほとんどの動作デバイスではバックラッシュとステイクション (静摩擦) がヒステリシスの主要な原因となります。一方、ミクロン以下の微調を行う動作デバイスなどでは、不適切な材料の使用による結果、非弾性回復がヒステリシスの原因になることもあります。圧電素子デバイスでは、材料特性としてヒステリシスが現れます。

最小移動量 (Minimum Incremental Motion)：デバイスが実行可能な最小移動量。分解能とは異なることに注意してください。分解能とは一般的に最小表示刻みを表し、システムが実行可能な最小移動量よりも1桁以上大きなことがあります。最小移動量は重要な仕様項目ですが、一般には公表されないことが多いようです。

ピッチ (Pitch)：横軸、すなわちY軸中心の回転。ピッチは、特にギンバル型マウントでは、「エレベーション (elevation)」としても知られています。

遊び (Play)：機械部品の弛緩による制御できない動き。しっかりと組み立てられた部品ならば遊びはほとんどありませんが、使用時間が長くなるにつれて (特に荒い操作や過負荷で使用すると) 遊びが大きくなります。

精度 (Precision)：同一入力 (誤差がないとします) に対する出力位置の偏倚範囲。精度の意味で「再現性」と言うこともあり、一般には両者を区別せずに使用することもあります。厳密な用法では精度と再現性は同じではありません。

再現性 (Repeatability)：同じコマンドを何度実行しても正確に同じ位置へ移動できる能力。メーカーが規定する再現性はしばしば一方方向への再現性 (unidirectional repeatability) を意味します。これは1つの方向だけに限定して移動を繰り返すものです。一方方向への再現性ではバックラッシュやヒステリシスの問題が起きませんから、この定義は基本的に不十分です。はるかに重要な性能仕様は双方向再現性 (bi-directional repeatability) ですが、あいにくほとんどのメーカーははるかに厳しい移動性能仕様であるこの値を公表していません。

表示分解能 (Resolution, Display)：アクチュエータの表示もしくは読み取り可能な最小移動ステップ。ほとんどのマイクロメータタイプのアクチュエータでは、表示分解能は標準でもバーニアでも最少目盛となります。例えば、SM-25のような標準のマイクロメータでは、10 mという標準の目盛ですが、バーニアは1 mであり、最良の表示分解能は1 mとなります。ほとんどのマイクロメータの感度は表示分解能または目盛と比べ同等かそれより良くなります。

ロール (Roll)：縦軸、すなわちX方向移動軸中心の回転。

感度 (Sensitivity)：手動的に動作した装置に関連して、最少の直線あるいは角運動は区別されます。この言葉は分解能として参照されることも多いですが、目盛または表示分解能とよく混同されます。手先の器用さは人によって異なり、人の指先は非常に敏感ですから、調整スクリューの1°の回転でも区別することができます。その指の感度が非常に高いことを利用して、AJS調整スクリューの分解能を表示するときはスクリューの1°の回転による移動量を記載してあります。感度は主に静摩擦によって制限されます。

ステイクション (Stiction)：ステイクション (静摩擦) は静止摩擦係数が常に動摩擦係数よりも大きいことによって発生します。停止状態にあるステージに、力を加えゆっくりと力を強くしても、最初はステージが全く動きません。しかし、力があるレベル (しきい値) を超えると突然動き出します。このように、コンポーネントは最初ジャンプするように動き、非線形で再現性がありません。この影響で最小移動量の大きさを制限します。

ヨー (Yaw)：垂直軸 (Z軸) 中心の平面上回転。ヨーは方位角とも呼ばれます。光学マウント上のオプティクスの回転についてもこの用語を使用します。