

ホワイトペーパー： 最適な熱的性能のためのエンコーダ スケールの取付け

機械の温度が変化すると、その機械の構成部品の長さが熱膨張により変化する。

どんなエンコーダスケールも、機械構成品と同様に、温度が変化すると熱伸縮しスケール長が変化する。発生する誤差を許容することや機械の稼働環境を制御することをできる場合もある。しかし、たった 1°C の温度変化であっても、10µm/m を超える測定誤差が生じる可能性がある。本ホワイトペーパーでは、スケールの熱膨張を管理する方法について説明する。熱が原因でスケールに生じたひずみの算出および補正方法などについても記載している。また、スケールと機材間の膨張差がエンコーダシステムの全体性能に与える影響についても考察する。

1. 熱を考慮した取付け方法

熱が原因でスケールに生じたひずみは算出および補正が可能である。通常は、測定した温度と熱膨張率を基にスケールと機材の長さの変化を算出し、補正する。スケールの熱ひずみは取付け方法（下記に詳述）に依存する。なお、関連する機械構成品の温度を（該当する場合はワークの温度も）正確に測定しておくことが重要である。どちらかに誤差があると熱補正に影響が出る可能性がある。

例 1: 動作温度範囲 15～25°C の長さ 1m の直線軸を実装したアルミニウム製機械。アルミニウムの熱膨張率はおよそ 23ppm/°C と比較的高い。1m の直線軸は ±5°C につき ±115µm ($1 \times 23 \times 10^{-6} \times 5 = 115 \times 10^{-6} \text{m}$) ずつ伸縮する。

リニアエンコーダスケールの素材にはステンレススチールが採用されている場合がほとんどであり、ステンレススチールはアルミニウムとは異なる熱膨張を示す。仮にステンレススチールスケールが 20°C でこの軸に取り付けられた場合、熱の影響を軽視すると大きな位置決め誤差が全体的に生じる可能性がある。上記のアルミニウム製の 1m の直線軸の場合、スケール取付け方法によっては 5°C の温度変化で 115µm の位置誤差が生じる可能性がある。

そこで、スケールを機材にしっかりと両端留めして固定するか（マスタリング）、機材の上にスケールを一点留めするか（フローティング）を選択する必要がある。

1.1 マスタリング

温度上昇に伴って機械が 115µm ずつ膨張する場合でも、どの温度であっても同じ物理位置に移動していることが望ましい（ワークが機械の特定の位置に固定されている場合など）。このような場合、スケールは伸縮性があり機械に合わせて伸縮できる必要がある。

この取付け方法は「マスタリング」と呼ばれ、スケールが機材に制御されることになり、機材と同じ割合で膨張するようになる。

1.1.1 マスタリングスケールの選定

マスタリングスケールは下記などの多くの場面に適する。

絶対位置よりも機械座標系が望ましい場合 (機械ベッドの定位置に配置したワークまで移動する場合など)

ワークの熱膨張率と機材の熱膨張率がほぼ一致しておりそのワークと機材が同じ温度で保持される場合、スケールとワークの膨張もほぼ一致する。そのため、その温度での機材の長さの変化は、スケール長の同程度の変化によって自動的に補正される。

機械軸が長くなっても、マスタリングスケールであれば不確かさは増大しない。一方で、フローティングスケールの場合軸が長くなるにつれ増大する。

熱伝導率が低く熱質量が高い機材の場合 (厚みのある花こう岩など)、気温が短期的に変動しても機材温度はほとんど変化せずわずかしかな膨張しない。そのため、このような短期的な温度変化は無視してもよい。一方で、長期的な温度変化は依然として考慮する必要がある。機材の平均温度が重要であるが、長期的な温度変化の適切な測定は困難な場合がある。そのため、寸法のわかった標準器との定期的な比較などのように、より直接的に長さを測定するほうが適切な場合もある。

1.2 フローティングスケール

フローティングスケールと呼ばれるスケールは、機材から大部分を離して独自に伸縮できるよう取り付け。そのため、フローティングスケールの熱膨張は、スケール自体の熱膨張率と温度により決まる。例 1 の機械は、約 23ppm/°C と熱膨張率が高いアルミニウム製である。スチールスケールのほうがおよそ 10.1ppm/°C と熱膨張率が低いいため、5°C あたりの膨張がアルミニウム製機材の 115μm と比較して 50.5μm と低い。膨張しにくいスケールを採用したうえに熱補正を行うことで、いっそうの性能向上が可能となる。

フローティングスケールはスケール自身の温度に応じて伸縮する。フローティングスケールは薄く (1.5mm 未満)、熱伝導率が比較的高いものが多い。そのため (薄いため)、スケールの温度が均一であると仮定できる。スケールの温度が均一であれば、関連温度の測定が容易になる (さらに熱補正の精度も向上する)。フローティングスケールは機材から大部分が独立しているため、機材の膨張を正確に把握しておく必要は必ずしもない。

フローティングスケールの熱補正は、熱膨張率が低いスケールを採用することで精度を向上できる。補正量が基本的に小さくすむため、温度測定が不正確だった場合に生じる補正誤差も小さく抑えられる。これは、温度測定が不正確な場合や機械内で温度のばらつきがある場合に特に大きな利点である。

どのようにスケールを取り付けたとしても、機材の膨張が多少なりとも影響するため、スケールはスケール単体の熱膨張率のみで厳密に想定されるようには膨張しなくなる。スケールを完全に浮かせた場合に想定される位置と、実際のスケールの差を外乱と呼ぶ。この外乱は、フローティングスケールを採用している場合は優先的に補正する必要がある。なお、熱膨張率が非常に低いスケールであっても、この外乱により実際の最低熱膨張率が制限されることに留意しておく必要がある。さまざまな条件下でスケールの外乱を抑えるために、レニショーは 2 種類のフローティングスケール取付け方法を考案している。両面テープを使用する方法と、軸の動きからスケールを物理的に離す方法 (薄いスケールにはクリップを使用し、スチールテープスケールには FASTRACK™ を使用する。これをメカ取付けと呼ぶ) である。次項にて、完全に浮かせた場合には発生しないスケールの外乱について詳細に解説する。

2. フローティングスケールの外乱

2.1 スケールの外乱

レニショーでは、両面テープ取付けとメカ取付けの2種類の取付け方法で生じる外乱の数学的モデルを構築し、実験により検証している。モデルは極めて複雑であるためここでは詳細を記載しないが、非直線でない結果もある。例えば、スケール端で位置誤差が最も大きくなるが、この誤差はスケール長に沿って単純に線形補間できない。

下記に記載する式から、スケール端で生じる最悪の場合の外乱を予測する。

2.1.1 キーワード

外乱: スケール端の位置誤差。スケールの膨張と機材の膨張を部分的に一致させる取付け方法で生じる。

理論上完全に浮かせたスケールと実際のスケールの長さにおける差を指す。一般的な測定単位は μm で、本書では u で示す。

相対膨張: 図 1 に示すような、温度変化が原因で生じたスケールの熱膨張と機材の熱膨張の相対的な変化。本書では ρ で示し、測定単位は ppm としている。下記のように定義する。

$$\text{相対膨張率} = \rho = \Delta T (\text{CTE}_{\text{substrate}} - \text{CTE}_{\text{scale}})$$

記号の意味:

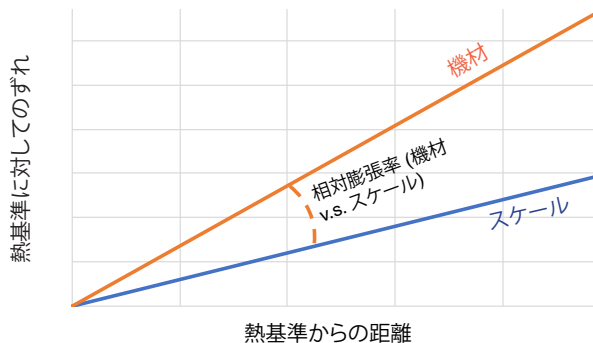
ΔT : 規定温度 (通常は取付け温度の 20°C) からの温度変化。

$\text{CTE}_{\text{substrate}}$: 機材の熱膨張率 ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$)

$\text{CTE}_{\text{scale}}$: スケールの熱膨張率 ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$)

自由長: スケールが機材に固定されている点 (熱基準点。詳細はセクション 3.1 を参照) から最も遠いスケールの固定されていない端部までの距離。一般的には、熱基準点はスケールの中央であるため、自由長はスケール全長の半分となる。本書では自由長は z で示し、単位を m とする。

膨張差: 熱基準点と最も遠い固定されていない端部との間の、スケールの熱膨張と機材の熱膨張の差。 $z\rho$ で算出。



2.1.2 式

引数

下記引数を以降の式で使用する。

E = スケールの弾性係数 (Pa)

A = スケール断面積 (m^2)

L = スケール全長 (m)

z = スケールの全長 (m) (中央に基準があるスケールの場合は $z = L/2$)

u = 外乱 (μm)

ρ = 相対膨張 (ppm)

q = メカ取付けによって生じる単位長さあたりの摩擦抵抗 (Nm^{-1})

k = 両面テープ取付けによって生じる単位長さあたりのテープのせん断剛性 (Nm^{-2})

メカ取付けのスケールの場合:

メカ取付けのスケール (クリップ固定および FASTRACK) に対しては、下記式からスケール外乱 (u) の推定が可能である。

$$u = \frac{qz^2}{2EA}$$

上記式は、下記式から算出される閾値を、相対膨張が超えていれば成り立つ。

$$\rho \geq \frac{qz}{EA}$$

この条件は実際の状況のほとんどで成立する。上記からわかることとして重要なのは、外乱は相対膨張からは一般的に独立しているということである。

また、外乱は自由長の2乗によって決まることもわかる。

両面テープ取付けのスケールの場合:

両面テープ取付けのスケールの外乱はおおよそ下記である。

$$u = \frac{\rho kz^3}{3EA}$$

メカ取付けからは大きく2点が異なる。外乱が相対膨張に影響を受けることと、自由長の2乗ではなく自由長の3乗で決まることである。

境界の条件:

下記の場合に、2 種類の取付け方法で外乱が理論上は同一となる。

$$z\rho = \frac{3q}{2k}$$

この臨界値よりも膨張差 (自由長×相対膨張) が小さい場合、両面テープ取付けのほうがメカ取付けよりも外乱が小さくなる。そして、膨張差が大きくなるとこの逆になる。

その分岐点は q と k 以外では変動しない。そのため、 q と k を把握できれば、どのようなスケール構成であってもこの分岐点となる膨張差を把握できる。

また、この膨張差の分岐点を用いることで、両面テープ取付けのスケールとメカ取付けのスケールどちらのほうが所定の条件下で外乱が小さくなるかを判断できる。膨張差の分岐点は、RTL テープスケールで 20 μ m、REL および RSL スケールで 500 μ m である。

外乱/相対膨張のグラフ

以降のグラフに、取付け方法によるスケール端部のずれへの影響を記載する。これらグラフは、選定した取付け方法からのシステム精度への影響度の予測にも活用できる。グラフには、各種スケール長ごとに両面テープ取付けとメカ取付けそれぞれでの外乱と相対膨張の相関曲線を記載する。

外乱が低いほう (パフォーマンスが良好なほう) の取付け方法を実線で記している。

図 2 のグラフは、所定の相対膨張に対して外乱が低いほうの取付け方法の特定に活用できる。

例えば、RTL スケール 1m (熱膨張率 = 約 10ppm/°C) をアルミ機材 (熱膨張率 = 約 23ppm/°C) に、中央にデーターを配置して取り付けて 5°C ずつ温度を上昇させる場合、相対膨張は $(23-10.1)\times 5$ で 65ppm となる。

図 2a のグラフから、FASTRACK (約 0.18 μ m) のほうが両面テープ取付け (約 0.28 μ m) より外乱を抑えられることがわかる。

グラフの黒線より右上の領域は、スケールと機材間の過剰な膨張差により両面テープが不具合を起こす可能性がある領域である。

なお、グラフはすべてスケール全長 L を中央で固定した場合または一切固定していない場合 ($z = L/2$) を基準にしている。その他の場合でも、自由長 z (固定点から自由端まで) が明確であれば $L = 2z$ をグラフに適用すればよい。

メカ取付け時の摩擦による影響の特定はやや困難である。本グラフは設計時の目安にはなるが、具体的な誤差補正に用いるべきではない。

2.2 ヒステリシス

メカ取付けのスケールの外乱は、スケールの温度変化の履歴に影響を受ける可能性もある。この影響を理解するには、熱膨張率がゼロのメカ取付けのスケールを熱膨張率がゼロではない機材に取り付けた場合をイメージしてみるのがよい。システムの温度が上昇する。最初は、熱応力がメカ取付けの摩擦より弱いためスケールが機材とほぼ一体化している。初期加熱により機材の熱膨張率に従ってスケールが膨張する (図 3 のステップ 1)。

やがて、生じた熱応力が大きくなりスケールが機材上ですれる。そしてスケールがスケール自身の熱膨張率 (この例ではゼロ) で膨張するようになる (ステップ 2)。

RTL テープスケールに対する相対熱膨張率と外乱の相関図

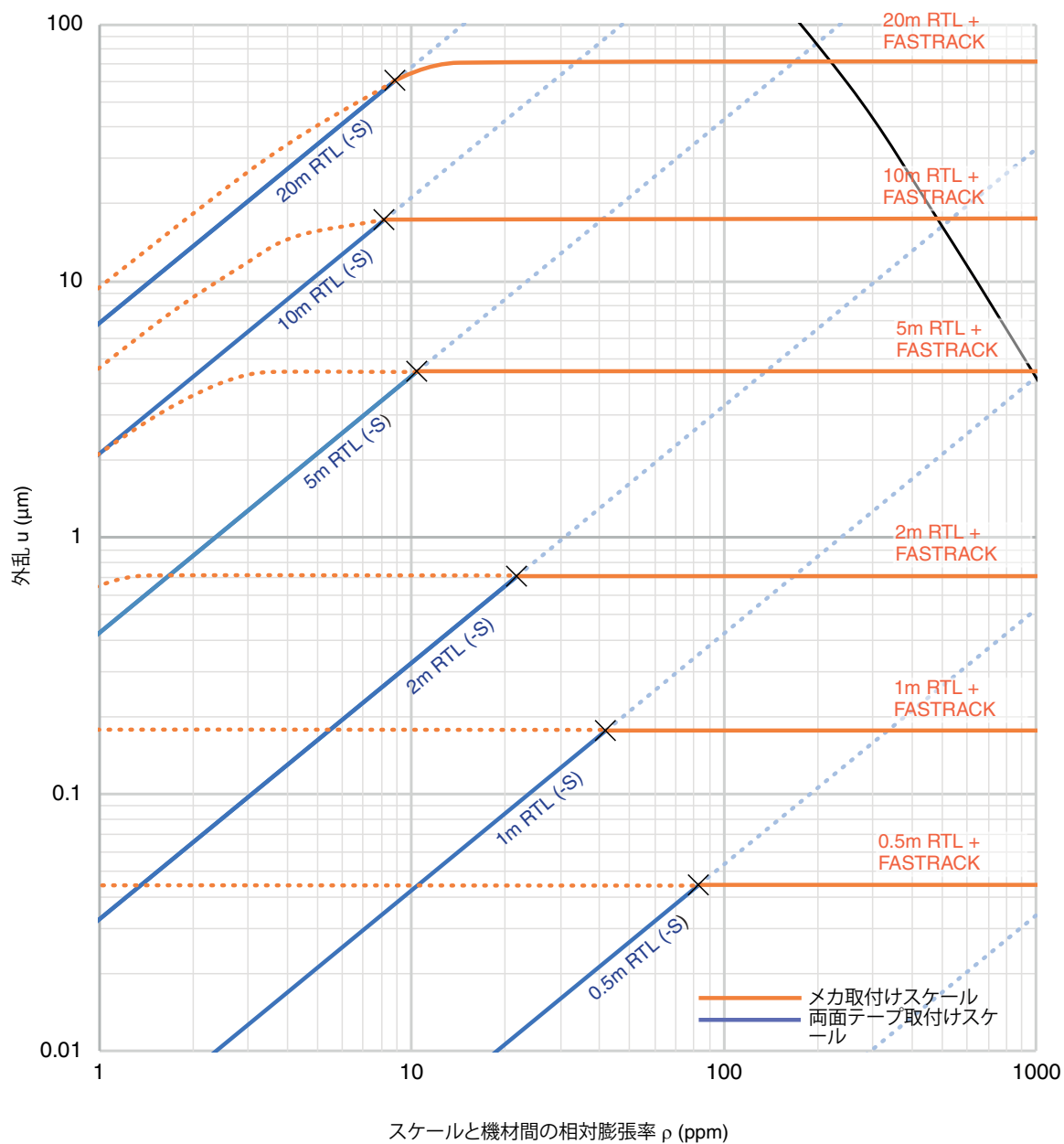


図 2a. RTL スケールの長さ別および取付け方法別の、既知の相対熱膨張率から生じた外乱。
グラフには、中央を固定した場合と固定を一切していない場合を図示。

REL および RSL スケールに対する相対熱膨張率と外乱の相関図

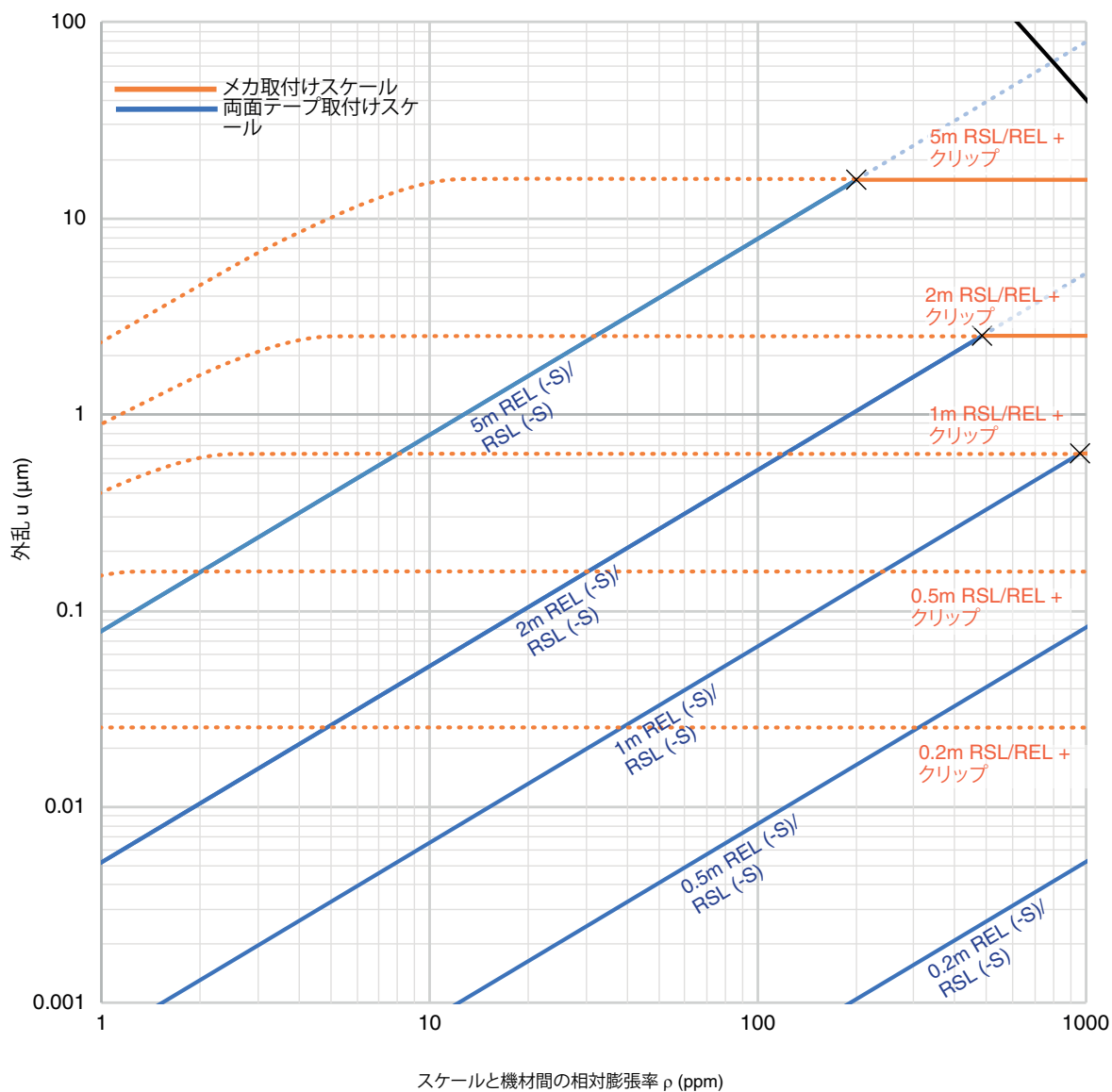


図 2b. RSL および REL スケールの長さ別および取付け方法別の、既知の相対熱膨張率から生じた外乱。
グラフには、中央を固定した場合と固定を一切していない場合を図示。

その後温度が低下すると、スケールが取付け面の摩擦を超えて、機材上を移動できるようになるまで冷却された後、逆の現象が起こる(ステップ3と4)。そのため、スケールの位置はシステムの過程に依存することになり、これは取付けヒステリシスと呼ばれる。取付けヒステリシスにより、スケールの熱膨張の不確かさが多少大きくなる。この影響度は、メカ取付けのスケールに見られる外乱の最大量と同等である。通常、両面テープ取付けのスケールには機械的な摩擦がないため、取付けヒステリシスは存在しない。

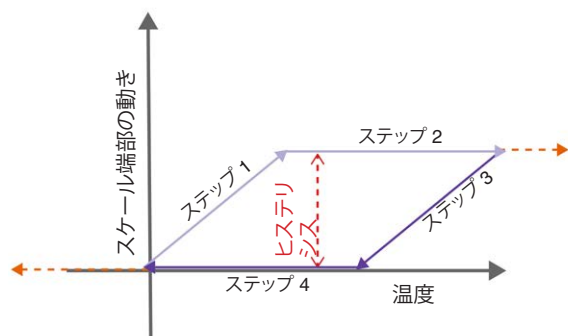


図3. 熱膨張率がゼロのメカ取付け式スケールと、熱膨張率がプラスの機材の場合の、温度変化に伴うスケール端の挙動

3. スケール取付け時のその他留意事項

3.1 基準点

フローティングスケール使用時には、熱基準点の使用を推奨する。熱基準点とは、スケールと機材がずれないようスケールを機材にしっかりと固定する1点のことである。

一般的に、熱基準点はスケール長の中に配置することが推奨される。自由長を抑えることができ、それによりスケールの外乱を総体的に抑えられるためである。

セクション2.1.2に記載のとおりスケール端での外乱は、メカ取付けスケールの場合は自由長の2乗に、両面テープ取付けスケールの場合は自由長の3乗に依存する。

レニショー製のスケールを熱基準点を設けずに取り付けてもよいが、複数の理由から推奨はしない。熱基準点を使用しない場合、スケールが機材に対して固定されているポイントを把握できなくなる。対称性に基づいた根拠からすると、熱基準点はスケール長の中間にあることになるが、スケール長に沿って温度勾配がある場合や取付けや機材の特性にばらつきがある場合には、熱基準点は中間ではなくなる。また、熱基準点を設けておくと、軸の加速時にスケールの動きを抑えやすくなる。

3.1.1 取付け精度の確認:

FASTRACK およびクリップ取付け

メカ取付けスケール使用時、取付けの質が摩擦抵抗、ひいては外乱に影響する可能性がある。機材が取付け前に汚れていないこと、取付けが直線になっていること、跡が残るような液体が取付け面にかかっていないこと、そしてほつれるおそれのある布での表面のふき取りは最小限に抑えることが重要である。

FASTRACK またはクリップ取付けのスケール使用時は、スケールにデータムを取り付ける前に軸のすべり力を確認しておくことが重要である。すべり力をその取付けに対して想定される力 (RTL の場合: 0.3Nm^{-1} 以下、薄型スケールの場合: 25Nm^{-1}) と比較することで、計算上の外乱が実際に発生するかを確認できる。取付け誤差が発生するときもあるが、すべり力が確認されないため検出されず、スケールの外乱の著しい拡大につながる可能性がある。クリップ取付けスケールの摩擦ひいては最大外乱は、該当スケールのインストレーションガイドに記載されているように、スケールの位置固定に使用しているクリップの数を減らすことで低減が可能である。

3.1.2 両面テープ取付けスケール: 最大膨張差

両面テープ取付けスケールの最大膨張差は、図2a および2b 右上の黒線で示すように、どのような状態でも1mmを超えないようにする必要がある。それを超えると、両面テープ取付けスケールの機械的性能が保証できなくなる。

3.1.3 マスタリングスケール: RKL および RGS

マスタリングスケールであるRKLまたはRGSを使用する場合、スケールを機材へ固定する2点としてエポキシ接着のエンドクランプを適用することが重要である。両面テープだけでは機材への固定が不十分であるが、エンドクランプを使うことでスケールの適切な機材への一体化を確保できる。

4. スケール選定ガイド

下記に、想定する用途に最適なスケールと取付け方法の選定に役立つフローチャートを記載する。

スケールタイプ:

RTL: スチールテープフローティングスケール

RKL: スチールテープマスタリングスケール

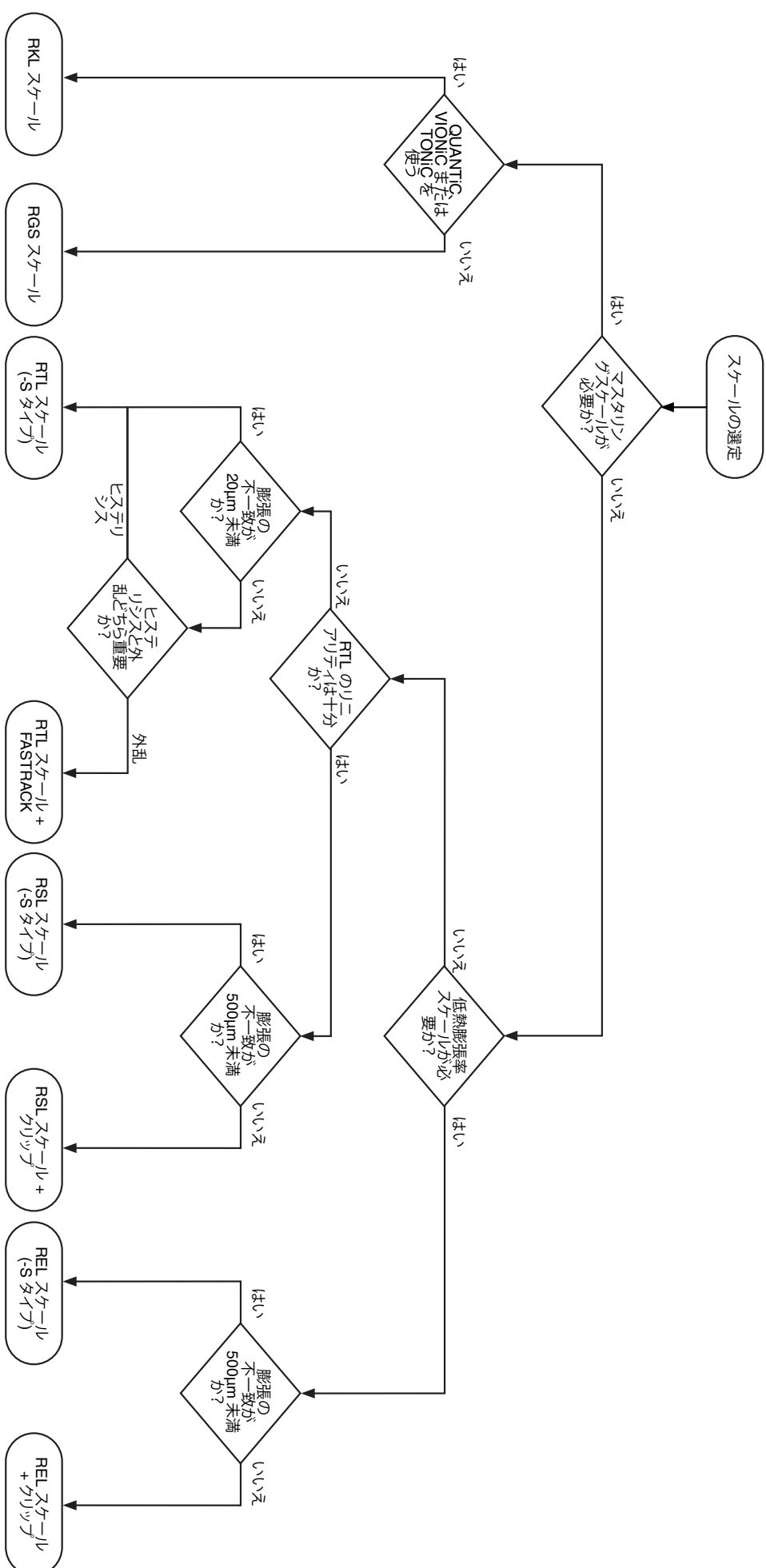
REL: 低熱膨張のスチールフローティングスケール

RSL: スチールフローティングスケール

RGS: スチールテープマスタリングスケール

-S: 両面テープで取り付けるスケールに記載

(注: RKL スケールおよび RGS スケールはすべて両面テープ取付けのため、-S は付加していない)



マスタリングスケールまたは低熱膨張率のスケールを使用したい場合は、セクション 2.2 および 2.3 を参照のこと。
メカ取付けのほうか外乱がいずれでも、両面テーブ取付けのほうか適切な場合もある。両面テーブ取付けたとヒステリシスがな
く、用途によってはそれが重要だからである。

5. 用語集

用語	定義
両面テープ取付けスケール	長さ方向に沿って貼り付けた両面テープで固定するスケール
熱膨張率	物体が温度に合わせて寸法を変化させる度合い。一般的に、ppm/°Cで表記する。
膨張率	ある物体の長さを元の長さで割った変化率。
相対膨張率	機材とその機材に取り付けたスケールの膨張率の差。
外乱	取付け方式ごとに生じる、スケール端部での位置誤差。理論上完全に浮かせたスケールとスケール端部の実際の位置の差。
膨張の不一致	熱基準点と最も遠い固定されていない端部間の、スケールの熱膨張と機材の熱膨張の差。
フローティング	スケールの熱膨張をスケール自身の性質に依存させ、機材からの影響をほとんど排除した方式。
自由長	フローティングスケールの熱基準点から最も遠いスケール端部までの距離。熱基準点がない場合は、熱基準点は軸の中央にあるものとして算出する。
取付けヒステリシス	高い温度からまたは低い温度から単一温度に近づく際の、その単一温度におけるスケールの純膨張の差。
マスタリング	スケールの熱膨張を機材の膨張に一致させる方式。
メカ取付けスケール	機械的なガイドで固定するスケール。ガイドとして、テープスケールには FASTRACK を、薄いスケールにはクリップとクランプを使用する。
熱基準点	フローティングスケールが機材にしっかりと固定されている点。スケールが機材から、また機材がスケールからずれることはない。そのため、この点を基準にして機材に対してスケールが膨張する。

www.renishaw.com/jp/optical-encoders-scale-range--36031



#renishaw

☎ 03-5366-5315

✉ japan@renishaw.com

© 2024 Renishaw plc. 無断転用禁止。RENISHAW® およびプロープシンボルは、Renishaw plc の登録商標です。レニショー製品の名称および呼称ならびに「apply innovation」マークは、Renishaw plc およびその子会社の商標です。その他のブランド名、製品名または会社名は、各々の所有者の商標です。Renishaw plc. イングランドおよびウェールズにおいて登録会社登録番号: 1106260。
登録事務所: New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK

本書作成にあたり細心の注意を払っておりますが、レニショーは、法律により認められる範囲で、いかなる保証、条件提示、表明、損害賠償も行いません。

パーツ No.: PD-9574-0175-01-A