

同調質量ダンパー — FORTiS™ の 高い振動耐性を実現する技術

「振動とは、機械加工者が直面するあらゆる問題の中で、最も目立たず、最も注意が求められる問題である」— 1907年、アメリカの機械工学士 Frederick Winslow Taylor 氏が、加工時に発生する振動について述べた言葉である。レニショーは50年近くにわたって加工を続け、世界各地の顧客拠点と密接な関係を築いてきた。その我々としては、彼の言わんとすることがよくわかる。CNC 工作機械は100年以上もの間で進化し、高度化、高速化を成し遂げたものの、依然として振動という問題から解放されていない。荒削り加工、断続切削、薄肉ワークの切削、特に硬く特殊な素材の加工、典型的にはこういった場面で振動が生じるおそれがある。振動を抑えるためには、適切な工具を使い、最適な送り速度と主軸速度を用いることが必要不可欠である。機械のモーションコントロールシステムの最適なパフォーマンスを引き出すため、そしてひいては機械のアウトプットを最大化するには、サイクルタイムと精度、仕上げ品質のバランスをとる必要がある、という事実は依然として存在している。

Paul Maxted (Director of Industrial Metrology applications – Renishaw plc)

問題

動作中、工作機械からは大きな振動が生じることがある。機械の振動が大きくなると、機械に搭載されたクローズドタイプエンコーダへ悪影響が出て、計測精度が低下してしまう。軸の位置計測の精度は、加工精度や表面処理といったプロセスの品質に直結する要素である。振動の影響を抑えるよう位置計測を改善することで、生産の品質を大幅に向上することができる。工作機械で発生する振動の主な原因としては、以下が挙げられる。

i. 工具のチャタリング（一定の条件下での切削工程で発生）。硬い素材のワークをミーリング加工する際、過剰な切削力によってワークや工具がたわむ場合などである。

ii. 加工対象ワークの材料の不均一と切削工具の構成刃先。加工難度が急激に上がり、衝撃力が生じる。この衝撃力によって振動が発生する。

iii. 断続切削（ミーリング加工で一般的）によって、衝撃力が生じる。この衝撃力によって振動が発生する。

iv. 不均等な回転質量、ベアリングの摩耗などの伝達減衰の変化、ワーク固定の不良によって生じる外乱。

v. 工作機械の消耗やメンテナンス不良、最適化されていない切削工具の使用、最適化されていない主軸速度や送り速度。

ソリューション

レニショーが、大手工作機械メーカーやエンドユーザーからの協力を得て開発したのが FORTiS™ クローズドタイプエンコーダである。工作機械の振動に対する設計が組み込まれている。具体的には 3 点の特徴があり、これらによって振動に対する耐性を高め、位置制御ループへの高振幅の外乱が侵入することを防いでいる。

1. 従来の光学式クローズドタイプエンコーダでは、ばねとホイールを使ったキャリッジによって、スケール上を移動するリードヘッドが支えられている (図 2a)。一定の駆動周波数では、リードヘッドを支えるガイドウェイの振動の振幅と位相 (V_g) がエンコーダスケールや筐体のそれら (V_m) からズれることになる (スケールや筐体はそれぞれ機械の取付け面に固定)。この振幅と位相の差異は、ホイール付きキャリッジのたわみ (図 1 の青丸) とカップリング (図 1 の赤丸) によって吸収されなければならない。一方 FORTiS では、リードヘッドを筐体から効果的に切り離す非接触設計を採用している (図 2b)。

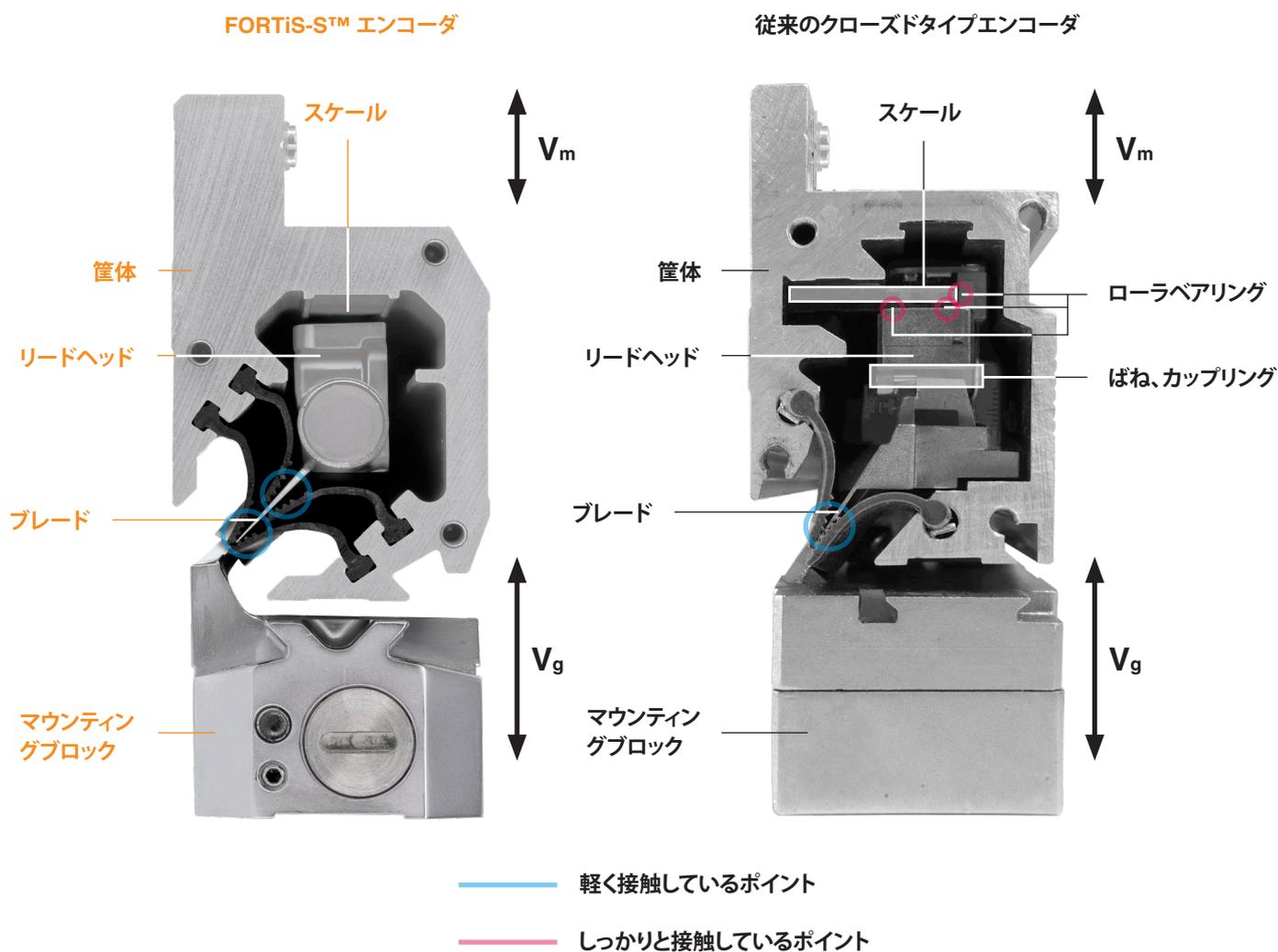


図 1: FORTiS-S と従来のクローズドタイプエンコーダの断面図

- 従来の光学式クローズドタイプエンコーダでは、比較的質量の大きなガラススケールが採用されており、このスケールが筐体の片面に貼り付けられている。一方 FORTiS では、軽量なスチールスケールを筐体内部でフルストロークにわたって固定している。この構造により、スケールの振動によって筐体内で振動が発生することを防いでいる。
- 最後の特徴が同調質量ダンパーである。同調質量ダンパーを搭載することで振動を大幅に抑制している。縦軸と横軸の振動を抑えるために、合計で 2 個のダンパーが実装されている。

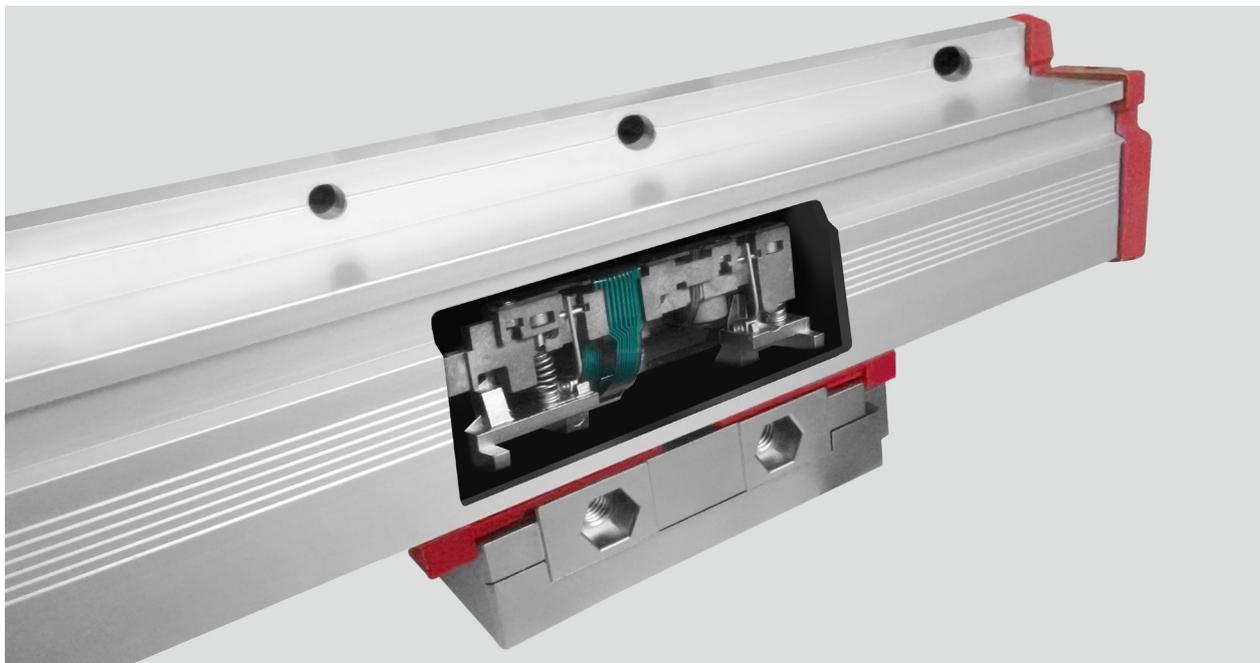


図 2a: 筐体内のリードヘッド本体とホイールキャリッジを露出した従来のクローズドタイプエンコーダ。なお、リードヘッドの機構は、筐体内に入った異物に対して完全に無防備である。



図 2b: 筐体内の非接触式リードヘッドを露出した FORTiS-S。リードヘッドは密封されている。

同調質量技術について

同調質量ダンパーは、物体内の振動を共振周波数で制御することが重要な場所で広く用いられている。その最も有名な例は、台北 101 などの超高層建造物であろう。強風や地震で生じる建物の振動を低減するために、巨大な同調質量ダンパーが用いられている (図 3)。他にも、送電線、航空機の翼、車のクランクシャフト、橋、そしてもちろん FORTiS で使われている。

FORTiS のリードヘッドでは、縦軸 (Z 軸) と横軸 (Y 軸) 方向に同調質量ダンパーが装着されている。両端面それぞれに O リングが付いたこのダンパーがポケットに取り付けられ、O リングの圧迫が制御されている (図 4)。

FORTiS に最適な同調質量ダンパーを開発し、実装できたことで、取付け位置から最も離れたリードヘッド (光学部品のキャリア) の端部におけるピーク加速度を 5.3 分の 1 に抑えることができた。



図 3: 台北 101 の同調質量ダンパー

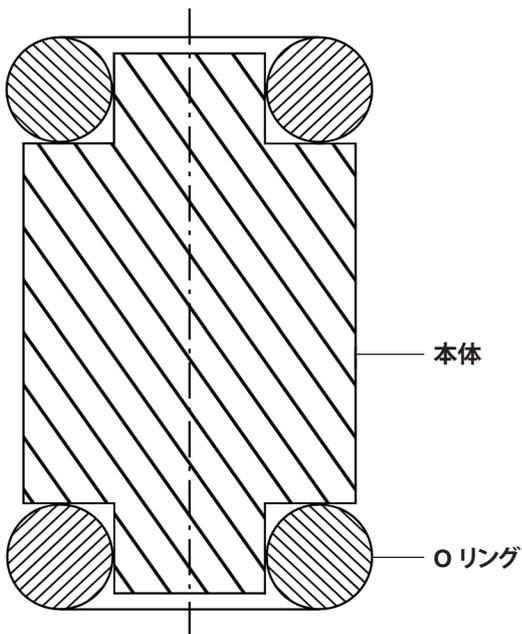


図 4: FORTiS の同調質量ダンパーの断面図
(両端に O リング装着)

同調質量ダンパーの原理

1 自由度系の同調質量ダンパーの基本原理について解説する。入力に対して高振幅の振動を発生するシステムにおいて、頻繁に問題となるのが共振である。

共振系は、剛性ばね (k) に取り付けられた質量 (m) などのような、駆動された単調和振動子を考えてみると理解できる (図 5)。この場合、単振動の一般的な数式が適用される (x : 静的平衡からの直線変位)。

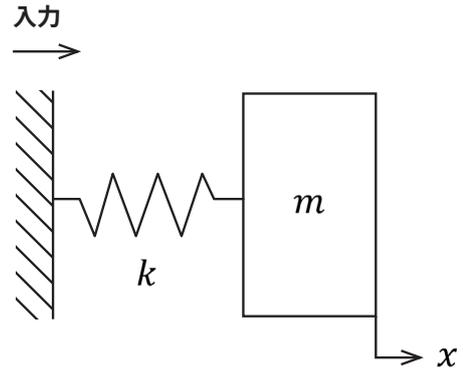


図 5: 1 自由度の質量/ばねシステム

$$\text{式 1: } m\ddot{x} + kx = \text{input}$$

式 1 からは、ばね上の質量が式 2 で示される正弦波応答の固有周波数を持つことがわかる。

$$\text{式 2: } \text{frequency (Hz)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$$

入力される力または変位の周波数が式 2 の共振周波数に近い場合、共振応答が大きくなり、場合によっては破壊的な結果が生じることもある (図 6)。

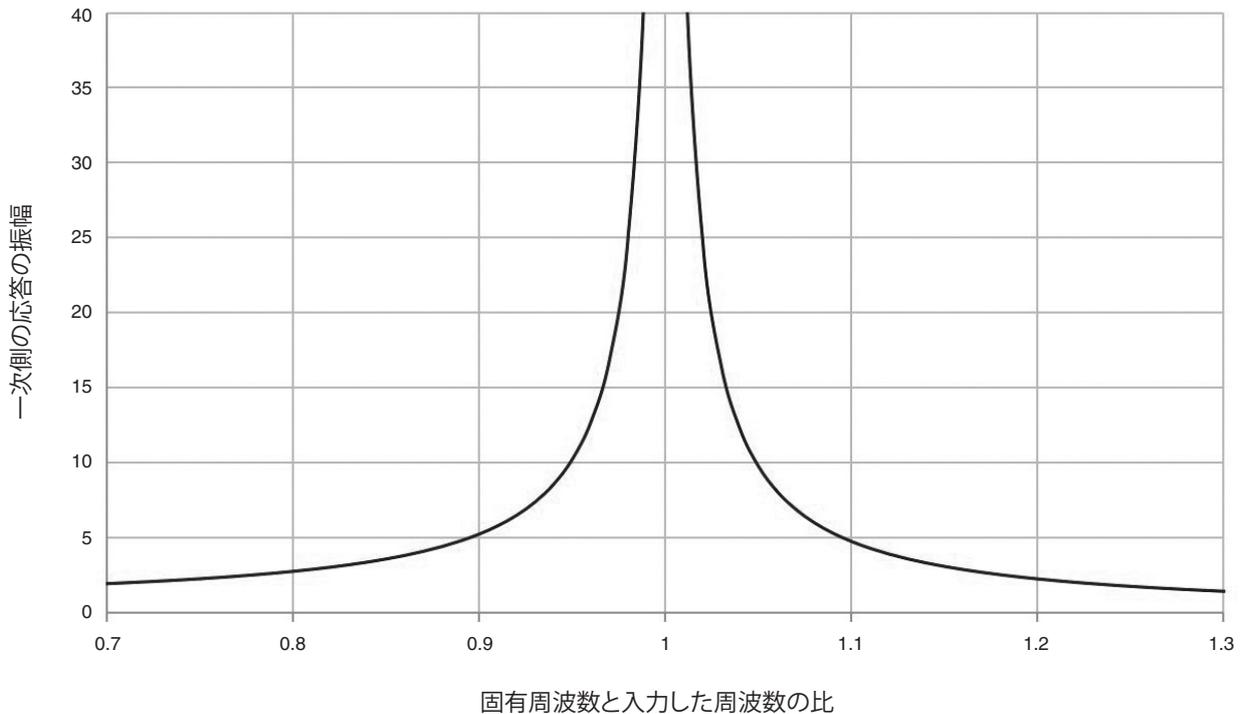


図 6: ばねに付けられた質量の共振応答

その対処方法として、機械的減衰器を追加し、システムの固有周波数をシフトさせて加振周波数から遠ざける手法が一般に用いられている。この方法で十分な効果を得られることが多い。

一方、この方法を採用できない場合もある。例えば、鉄骨の超高層建造物は自身の固有周波数で揺れ、補強または減衰のためのアンカーとして機能させられるものが近くに存在しない。このようなケースで期待できるのが同調質量ダンパーである。

FORTIS エンコーダでは、リードヘッドの質量がブレードで保持されている。このブレードは、エンコーダの密封性を損なわないよう薄く仕上げられており、ばねのように作用する。加工時に生じる外部からの振動によって、不要な共振が生じることがあるが、リードヘッド内に同調質量ダンパーがあることでこの共振が制御されている。

同調質量ダンパーを実用的に設計、採用することは簡単ではないが、基本的なコンセプトは、減衰機構を備えていない質量/ばねの構造とその固有周波数での共振の問題から考えてみるとわかりやすいであろう。

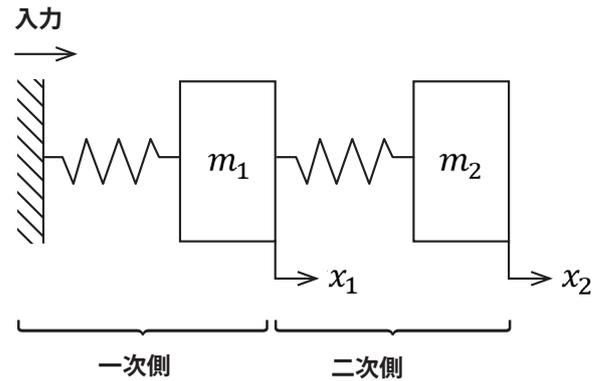


図 7:2 自由度の質量/ばねシステム

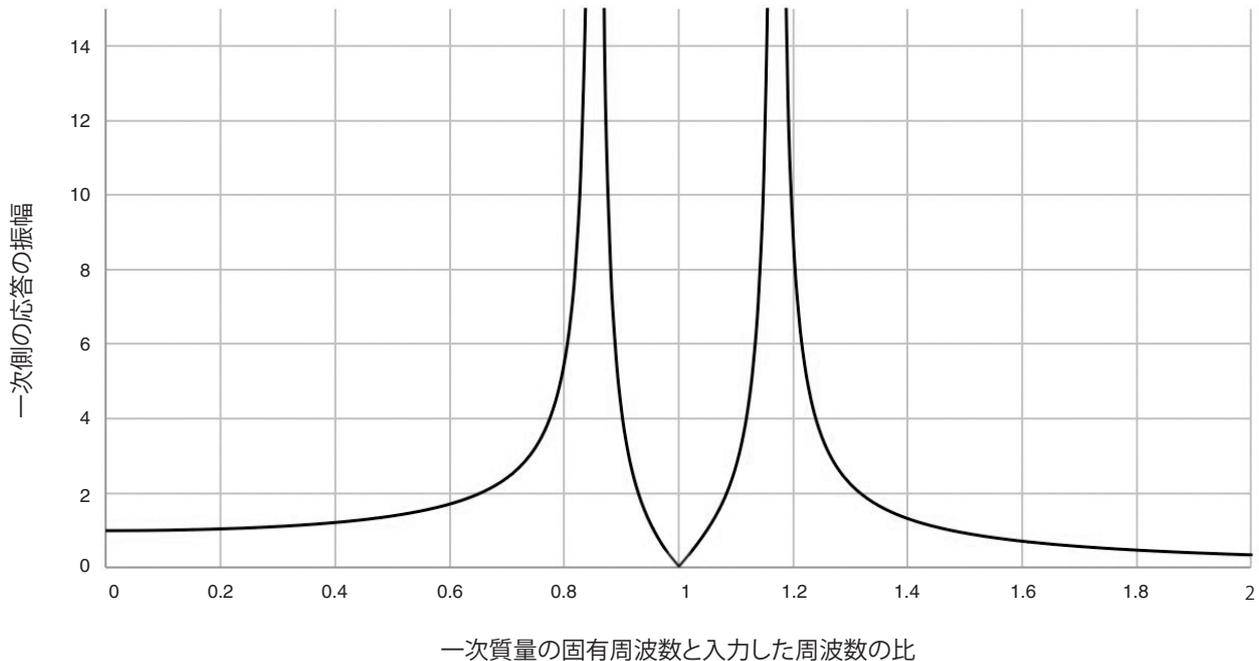


図 8: 減衰措置をとっていない 2 自由度の質量/ばねシステムの共振応答

比較的小さな二次質量 (m_2) と一次 (オリジナル) 質量 (m_1) をばねで連結し、このばねによって二次質量に一次質量と同じ固有周波数が付与される場合を例として挙げる。連結したことでシステム全体としては「2 自由度」を持っていると考えられる (図 7)。そして元々はひとつであった共振ピークがふたつに分かれる。ひとつ目の (低いほうの) 固有周波数にて両方の質量が同相で同方向に動き、ふたつ目の固有周波数にて反対方向に動く。

そこからひとつ目の(低いほう)固有周波数で駆動されると一次側の振幅がゼロになり、二次質量は有限振幅で振動する。そのため、別々の周波数の無限共振がふたつ生成されるものの、一次質量の共振は抑制される(図 8)。

そのまま放置されると、このふたつの共振が破壊的になりうる。この共振は、二次質量を支えるばねに同調質量ダンパーを取り付けることで局所的に制御できる(図 9)。これが同調質量ダンパーの主な利点である。

同調質量ダンパーは基礎的な設計面で、一次質量と二次質量の比 (m_2/m_1)、一次質量と二次質量の固有周波数比(同調周波数)、ダンパーの減衰係数の 3 点を調整できるものである。

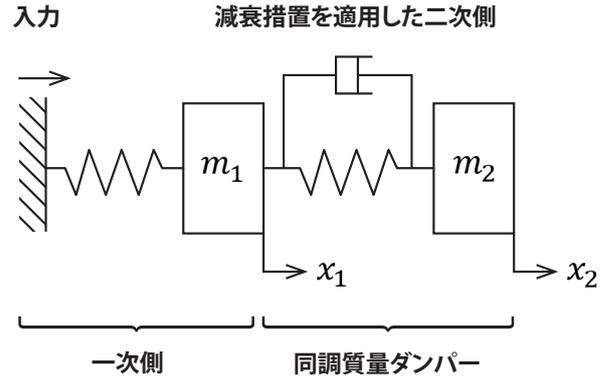


図 9: 2 自由度の同調質量ダンパー

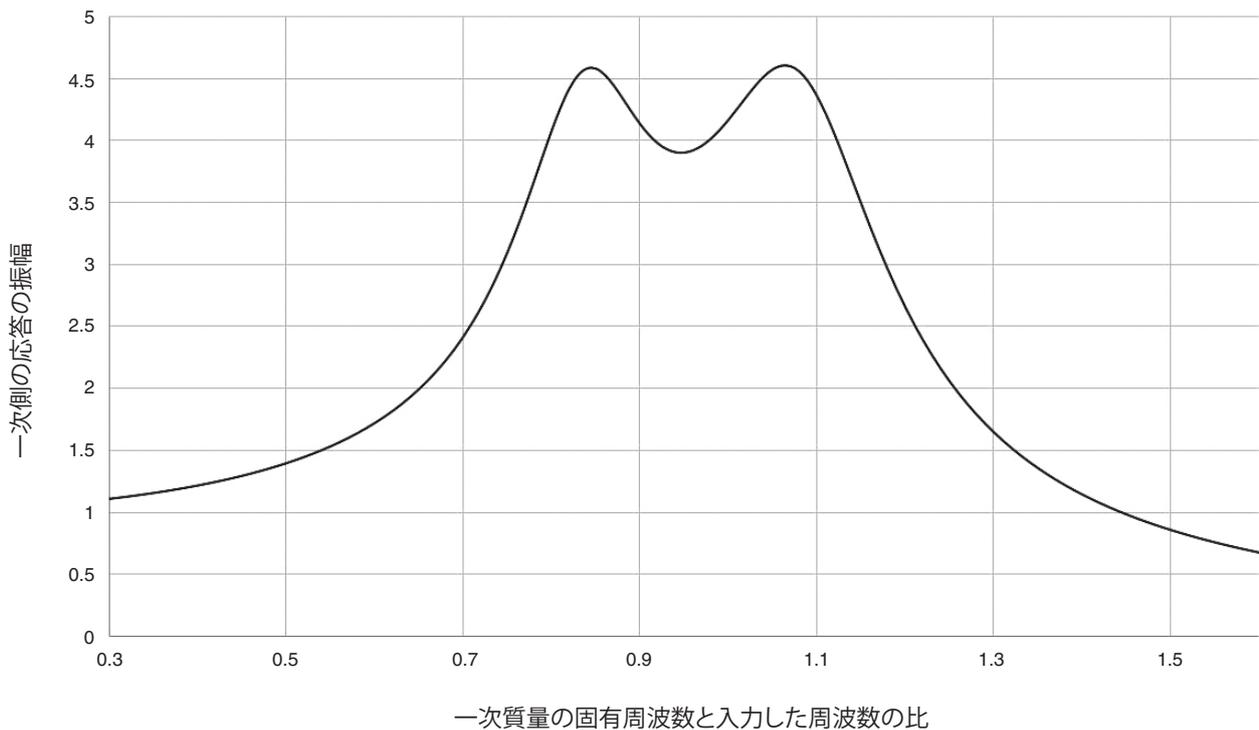


図 10: 10%質量比、ダンパーによって二次側を一次側の共振周波数の 91% に調整済み。図 6 および図 8 で見られる無限応答に対し、一次側の応答が 4.6 倍以下に抑制されている。

二次質量には実用上の制限があるものの、一次質量の 10%の二次質量でも良好な結果を得ることができる。最適な同調周波数は、質量の比に応じて一次側の共振周波数よりも低くなる。最後に、二次側の減衰係数は、2 点のピークの応答を最小限に抑え、他のすべての周波数でも振幅応答を制御できるように選定する。

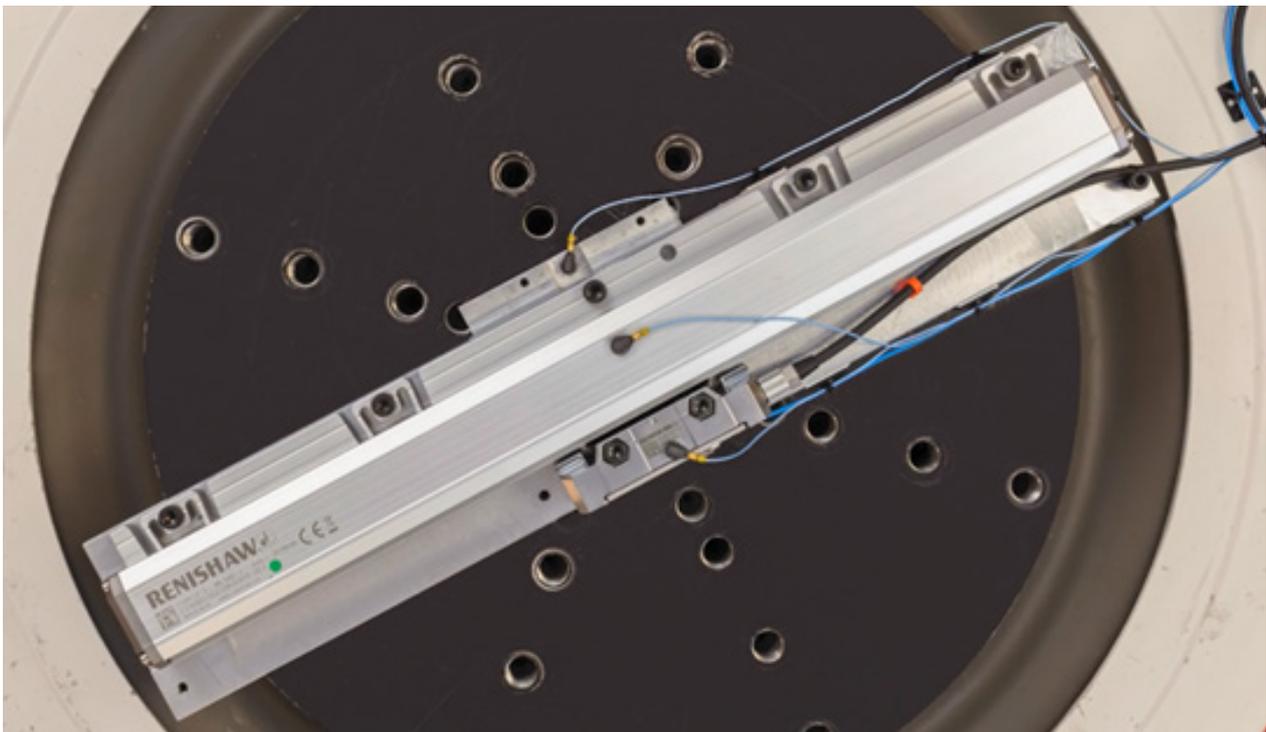
動的な条件下における、Oリングの候補材料の性質を想定すること。これが同調質量ダンパーを設計する際に我々が最初に直面した最も大きな課題のひとつです。ゴムの最適な硬さを決めるためのシミュレーションを行うために想定する必要性がありました。硬さが最適であれば、周波数応答を分散でき、Oリングのサイズの差による影響を抑えることができます。

また、有限要素解析を行うための材料特性の定義づけも難題でした。そして最終的に、テストデータをもとにシステムの最適化と調整を行い、リードヘッドの共振周波数範囲において、ベストのモデル形状を最終設計で得ることができました。同調質量ダンパーの残りの周波数応答も、振動レベルが異なるときに有効です。

Krys Jurczyk – FORTiS Senior Mechanical Design Engineer

振動テスト: 正弦波振動テスト

FORTiS で、絶対位置の読取り誤差テストを実施した。50Hz~2000Hz の周波数範囲の正弦波振動を 1G、3G、5G、10G、15G、20G、25G の各振幅で与え、無負荷状態と比較した。30G~75G の範囲でもテストを行ったが、本書では解説しない。また、ハイレベルの不規則振動でもテストを実施している。

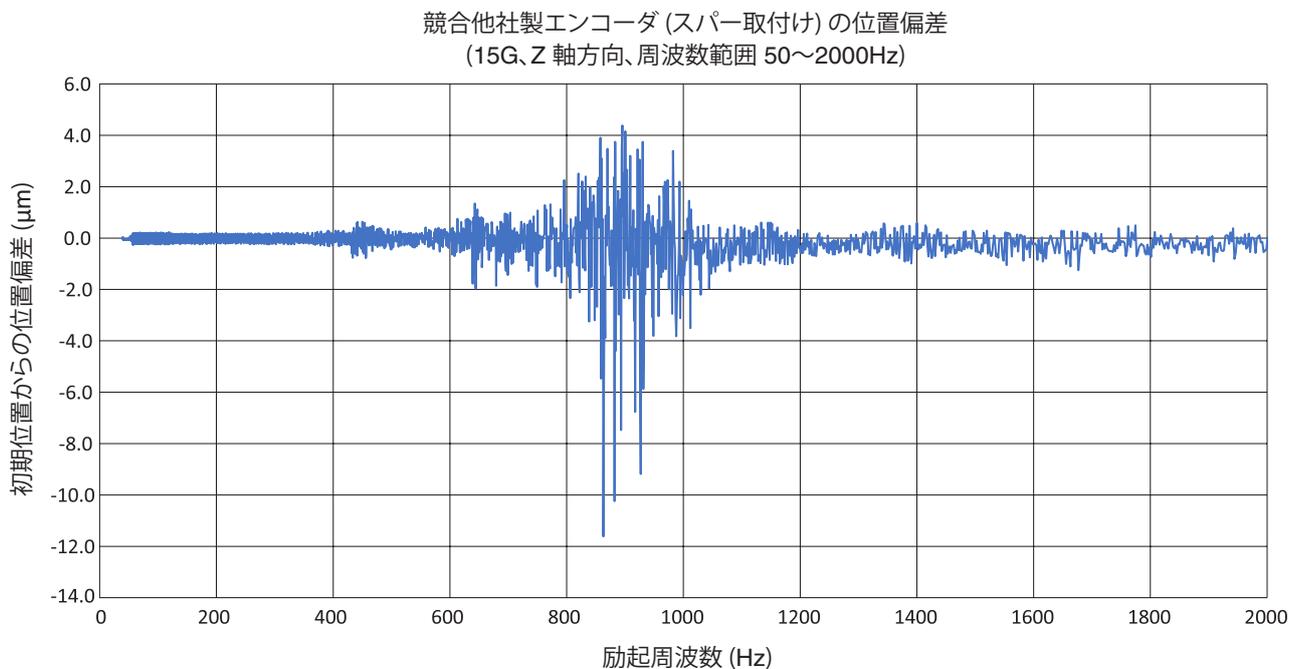
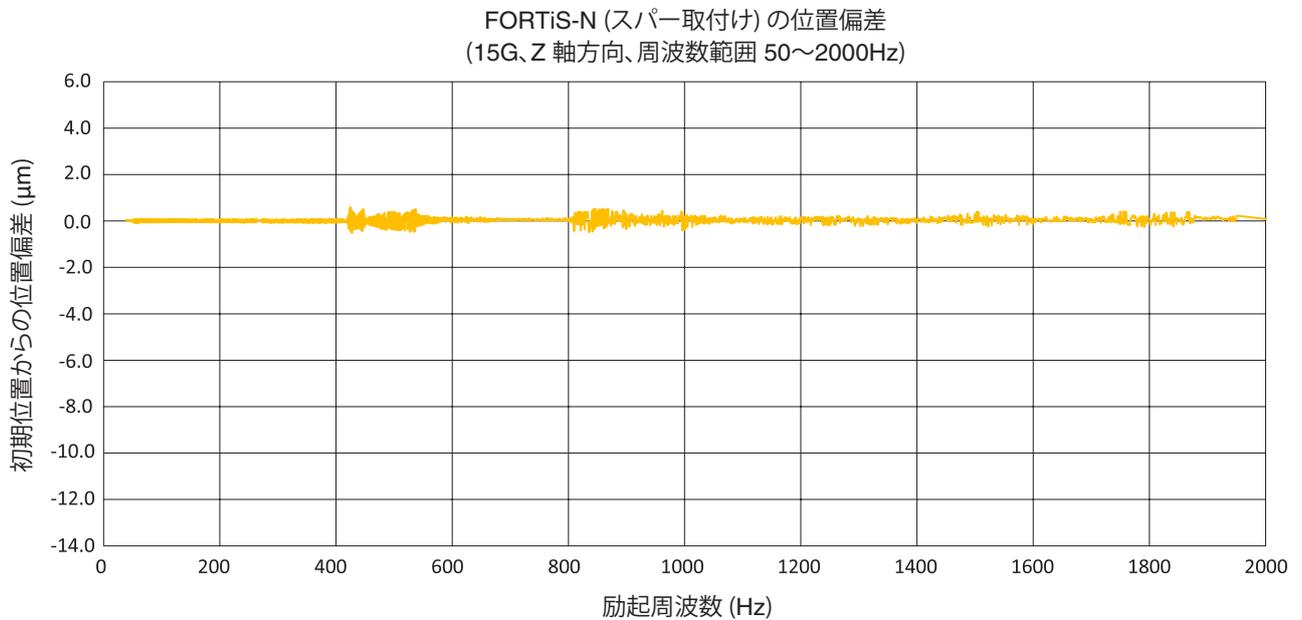


テスト対象としたのは、機材に直接取り付けられた FORTiS-S と FORTiS-N™、そしてマウンティングスパー取り付けにした FORTiS-N である。FORTiS-N は FORTiS-S とは性能面では同等だが、薄型設計のため省スペース性に優れるモデルである。

なお、同等仕様の競合他社製の従来式クローズドタイプエンコーダでも、同等の取り付け方法でテストを行い、比較した。

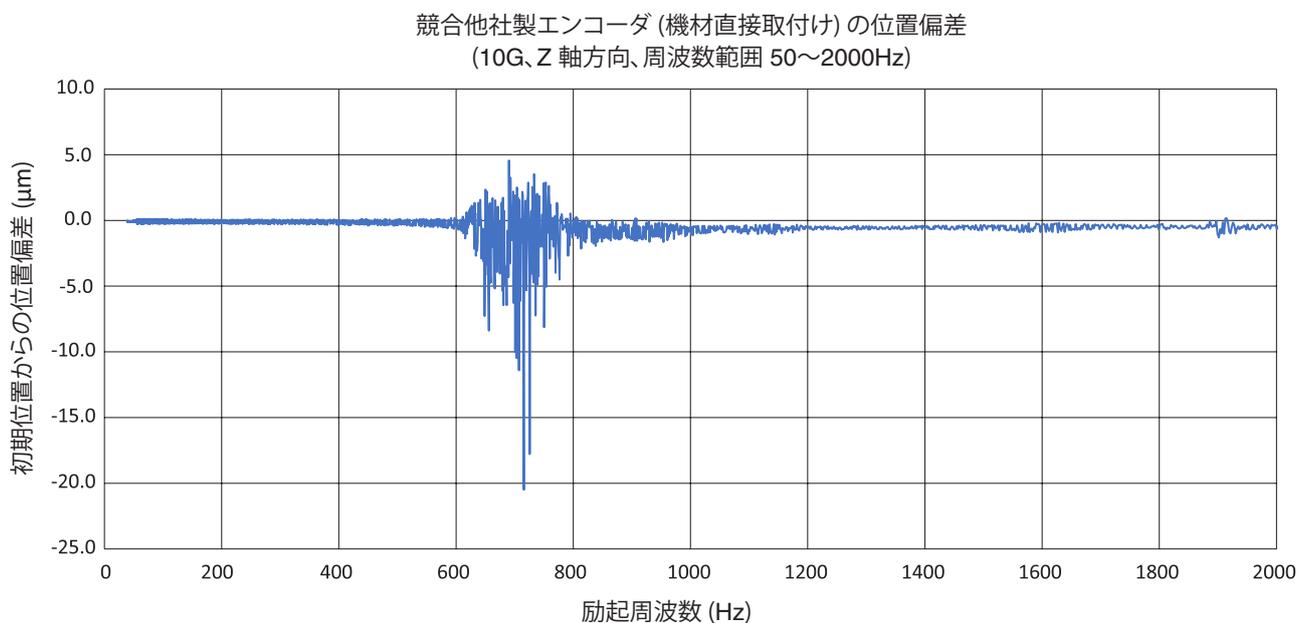
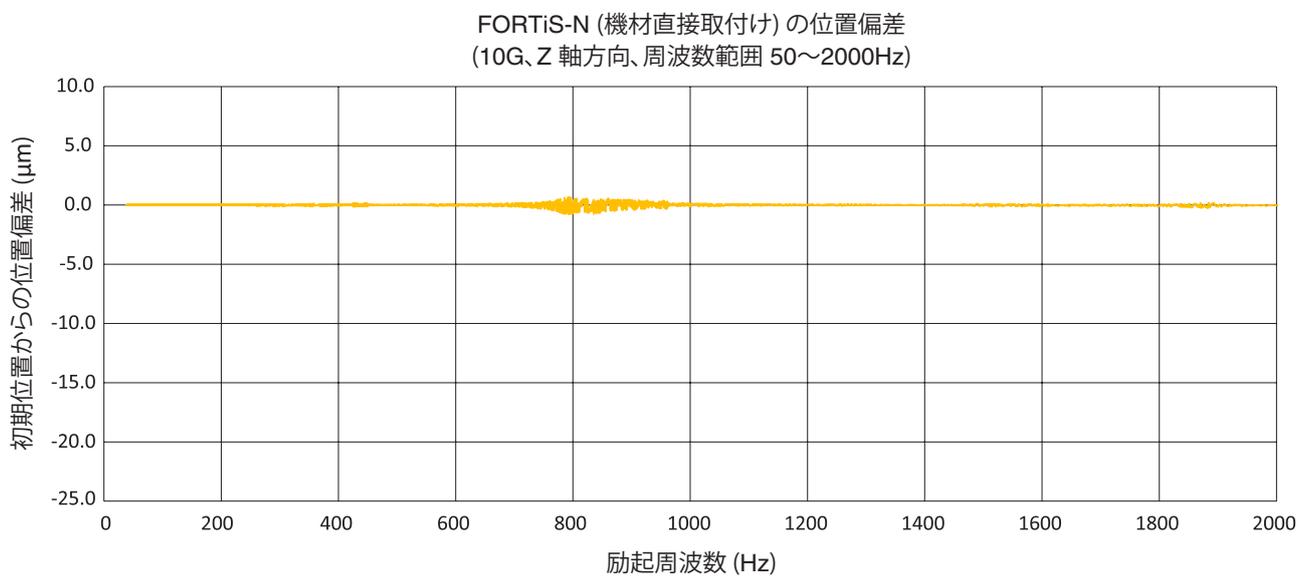
FORTiS-N と競合製品の比較 (スパー取付け)

位置偏差について、FORTiS-N と競合製品の比較を以下のグラフで示す。どちらのエンコーダもマウンティングスパー取付けである。振幅は 15G、Z 軸方向の正弦波振動 (エンコーダスケール内) の結果である。



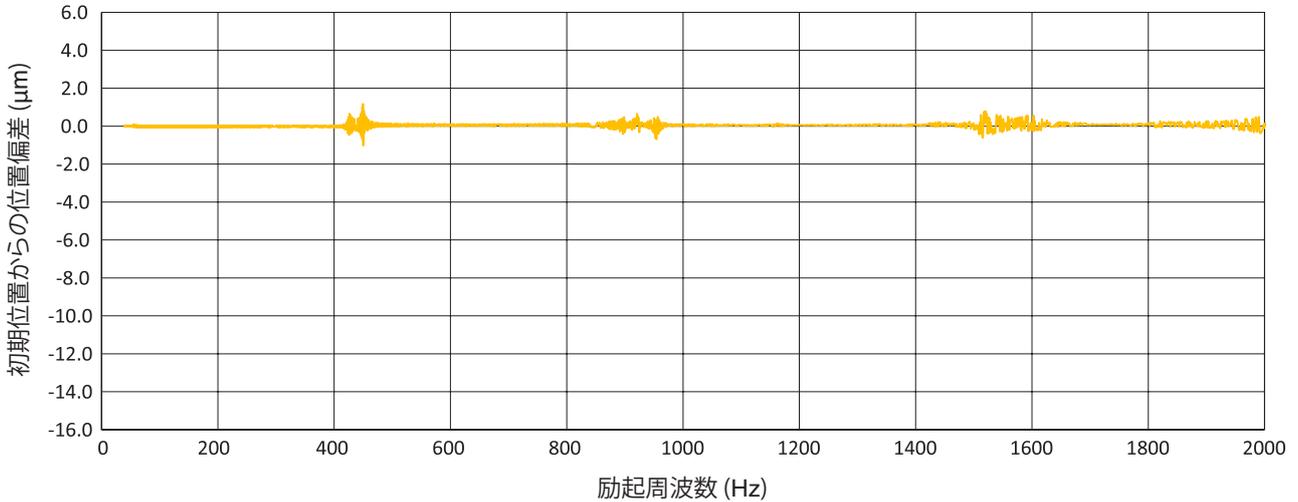
FORTIS-N と競合製品の比較 (機材直接取付け)

機材に直接取り付けられた場合の FORTIS-N と競合製品の位置偏差の比較を以下のグラフで示す。振幅は 10G、Z 軸方向の振動の結果である。

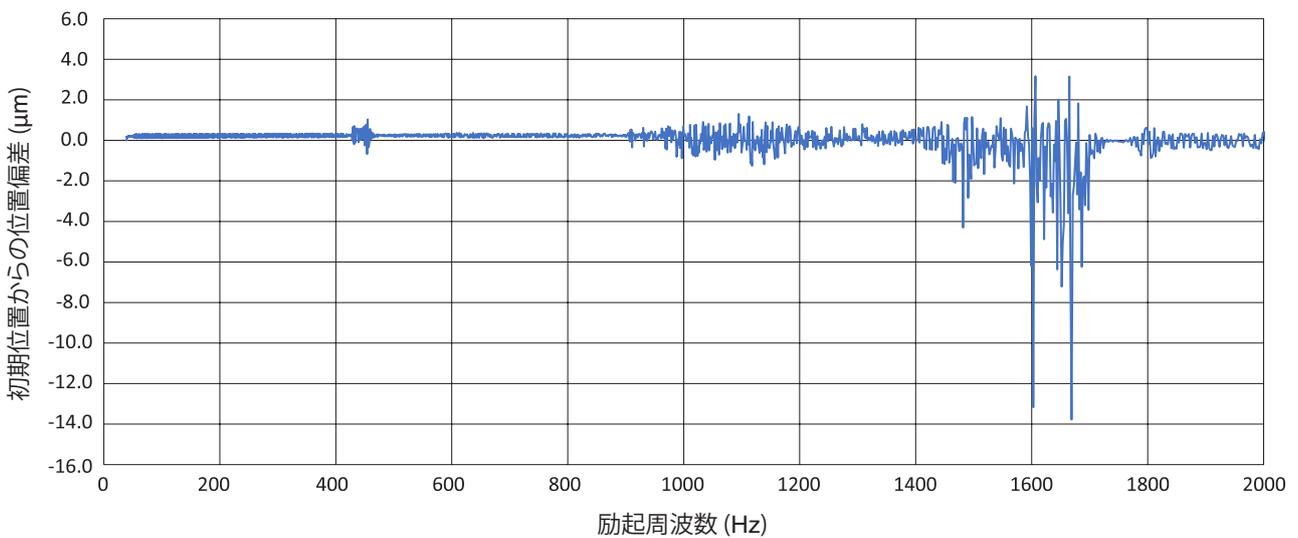


最後に、位置偏差について、FORTiS-S と競合製品の比較を以下のグラフで示す。標準的なサイズの各エンコーダを機材に直接取り付けた。振幅は 25G、Z 軸方向の振動の結果である。

FORTiS-S (機材直接取付け) の位置偏差
(25G、Z 軸方向、周波数範囲 50~2000Hz)



競合他社製エンコーダ (機材直接取付け) の位置偏差
(25G、Z 軸方向、周波数範囲 50~2000Hz)



最後に

本書では、50Hz~2000Hz の周波数範囲の幅広い振幅の振動に対して、FORTiS が高い位置の安定性と動作の安定を有していることを示した。

同調質量ダンパーを実装していない従来式のクローズドタイプエンコーダとの比較により、耐振動という点で FORTiS の優位性が明確になった。FORTiS エンコーダは、優れた位置安定性を発揮し、工作機械によるプロセスコントロールを向上することが期待できる。

www.renishaw.jp/fortis

#renishaw

03-5366-5315

japan@renishaw.com

© 2023 Renishaw plc. 無断転用禁止。RENISHAW® およびプローブシンボルは、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-6517-9062-01-A