

M2052 のスプリングによる防振系の評価実験について

東京大学 三尾典克

BB マテリア、川原博士の御厚意によりいただいた M2052 合金製のスプリングを用いた防振系の測定に関する結果をまとめる。スプリングは線径 1mm の M2052 をコイル径 10mm で密巻きしたもので、合計 5 本用意していただいた。それを用い、振動減衰の評価と防振特性の評価を行なった。

1 振動減衰の評価

M2052 の振動減衰の評価を行うために、コイルスプリングとおもり使った振動子を作成し、その自由振動を測定した。この振動の変位を読み取るために、本実験では永久磁石とピックアップコイルによる動電型センサーを用いた。そして、センサーの出力は AD 変換 (12bit) されてパソコンに取り込まれた。

まず、参照用にステンレス製のコイルスプリング (線径、コイル径巻き数などは M2052 スプリングと同じもの) の測定を行った。その結果を図 1 に示す。この時のおもりは質量 398g で、振動子の共振周波数と Q は測定したデータを、

$$V(t) = V_0 + \exp(-\alpha t)[A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t] \quad (1)$$

という関数に最小二乗法でフィッティングし、

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}, \quad Q = \frac{\omega_0}{2\alpha}. \quad (2)$$

という関係で求めた。

結果は $Q = 1530$ とかなり大きな Q を持っていることがわかった。図中の黒丸は測定データで、この場合はサンプリング間隔は 0.02 秒で、減衰振動とのおなりようなものが見える。また、実線はフィットして求めた関数を描いたものである。空気中の測定であるが Q が 1000 以上の値を示しているため、これより小さな Q を求める場合には、その影響は無視できることがわかる。また、センサーの損失なども問題にならないことを示している。

次に、M2052 のスプリングによる振動子の減衰を測定した。M2052 の場合には、おもりを 2 種類用意した ($m = 104\text{g}$ と $m = 61.4\text{g}$)。その結果を図 2 と図 3 に示す。測定された Q は非常に小さく、 $Q < 20$ ということからステンレスのばねに比べて非常に大きな減衰を持っている。また、対数減衰率を γ とすると

$$\gamma = \frac{\pi}{Q} \quad (3)$$

となる。この γ に直せば、 $\gamma > 0.16$ となり、文献 [1] の値 (0.72) と比較すると約 5 分の 1 の値となっている。

また、ばね定数は $1.5 \times 10^2 \text{ N/m}$ と計算され、ステンレスのばねの値 ($3.9 \times 10^2 \text{ N/m}$) よりもかなり小さな値となっている。

しかし、フィットした関数とデータとのずれが、時間の経過に伴い増大していることが読み取れ、その振動は単純な減衰振動になっていないことを示している。これは、既に M2052 合金の特性として報告されているもので、減衰が振動振幅の関数になっているという点である。図 4 は、 $m = 104\text{g}$ の振動子のデータ（4 秒間）に対して、最初の 0.8 秒間のデータを使ってフィットした場合（上の図）と最後の 0.8 秒間のデータを使ってフィットした場合（下の図）を表している。それぞれのフィットした関数は、使用したデータの付近ではよく一致しているが、それ以外の点ではずれが大きくなっている。また、 Q のみならず、共振周波数も変化しているように見える。

そこで、この測定を繰り返し（20 回）、各データを 5 分の 1 ずつに分割して振動振幅（実際にはセンサーの出力電圧）と共振周波数及び Q の関係を調べた。その結果を図 5 に示す。明らかに振動振幅が小さいと Q は大きくなり、共振周波数は高くなっている。ただ、その変化量を見ると、 Q の依存性はかなり大きく、振幅が小さくなるに連れて発散するようにも見える。下図中の直線は

$$Q = AV^\alpha \quad (4)$$

のように、べき関数で表されると仮定してフィットした場合のもので、 $\alpha = -1.16$ という値が得られた。したがって、微小な振動の防振を行なうような用途では、このような Q の変化を十分考慮して設計を行なわないといけない。

2 防振系の性能評価

この M2052 のスプリングを 4 本使い、簡単な防振系を組み立てその性能を評価した。評価法は、防振装置を加振器に取り付け、支持枠と防振されるおもり（今回はアルミの板）に加速度計を取り付け、振動振幅の比を測定する。おもりの質量は、約 400g で基本の共振周波数は約 6Hz であった。その測定結果を図 6 に示す。

このデータは、加振器を垂直に振動させ、加速度計も垂直方向の振動に敏感な方位で設置した。参考のためにステンレスばねの防振系のデータも測定した。ここで、注意したいのはステンレスのばねを使用した方が、基本振動数（約 4Hz）が低いので、その分、防振比がよくなっているという点と共振点で、M2052 の方は振動振幅が測定範囲に収まっていたが、ステンレスの方は、非常に大きな振幅になり正確に測定されていないという点である。

これをみると、ばねのサージ振動の幅が M2052 の方が広く、その影響で高周波数での減衰特性がむしろ劣化しているという点が目に付く。これは、そもその損失の大きな材料を利用しているので仕方ない点であるが、今回のようなコイルばねを使った防振系には、高損失材料は向かないということを示唆するものかもしれない。

図 7 は、防振台を水平に加振し、水平方向の加速度を測定して、防振比を計算したものである。基本共振モードは、振り子運動に相当するものであるが、ばねの伸びの振動モードやサージなどが見えている。ばねの加工や取り付けの精度の問題か、サージの周波数は 4 本のばねで異なる周波数をもち、100Hz を越えるあたりからいくつもの共振ピークが測定された。

3 まとめ

M2052 は、ステンレスなどに比べて、はるかに大きな振動減衰能を持つことが再確認された。また、文献で報告されるように、非線形の応答を示すことも再現された。

最後に、測定終了時にばねを取り外したところ、かなり塑性変形していることがわかった。文献 [1] には、塑性変形を起こすと減衰特性が劣化するとの記述があり、今回の測定で、文献値より減衰特性がよくないデータが得られたのは、このあたりが原因かもしれない。

ただ、今回のような吊り下げ型の防振系では、大きな荷重がかかることが避けられない（基本周波数を低くするため）ので、この制振合金の特性を十分活かせる系ではなかったのかもしれない。むしろ、構造体として利用し、スプリアスな共振による影響を取り除く方向で利用を考えるべきかもしれない。

なお、本実験は、東海大学 工学部精密機械工学科津田展宏教授のご協力を得て、研究室所属の東海林氏、鈴木氏、金子氏の 3 名を共同実験者として行なった。また、防振比の測定では、東京大学理学系研究科物理学専攻、坪野公夫助教授のご協力により、加振装置、および測定器類を拝借した。また、同研究室の大学院博士課程在籍の高森氏には、測定に関して全面的にお世話になった。サンプルを提供して下さった BB マテリアの川原博士、そして協力を頂いた皆様に感謝します。

参考文献

- [1] 川原浩司、殷福星：真空 Vol.42 (1999) 11.

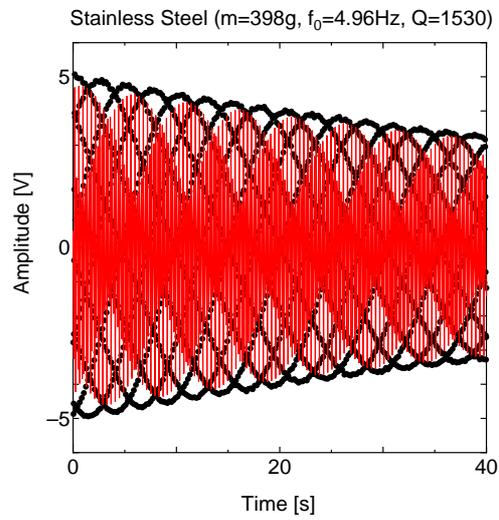


図 1: ステンレススプリングの減衰振動

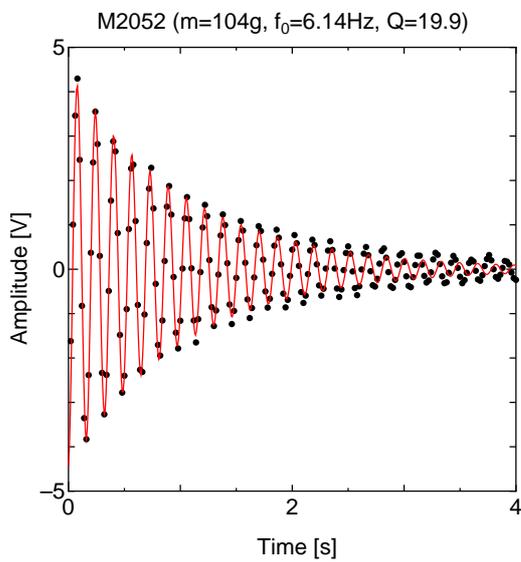


図 2: M2052 スプリングの減衰振動
($m = 104\text{ g}$)

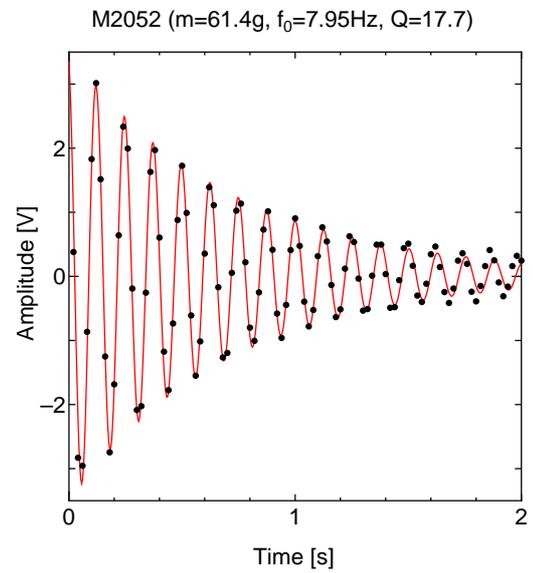


図 3: M2052 スプリングの減衰振動
($m = 61.4\text{ g}$)

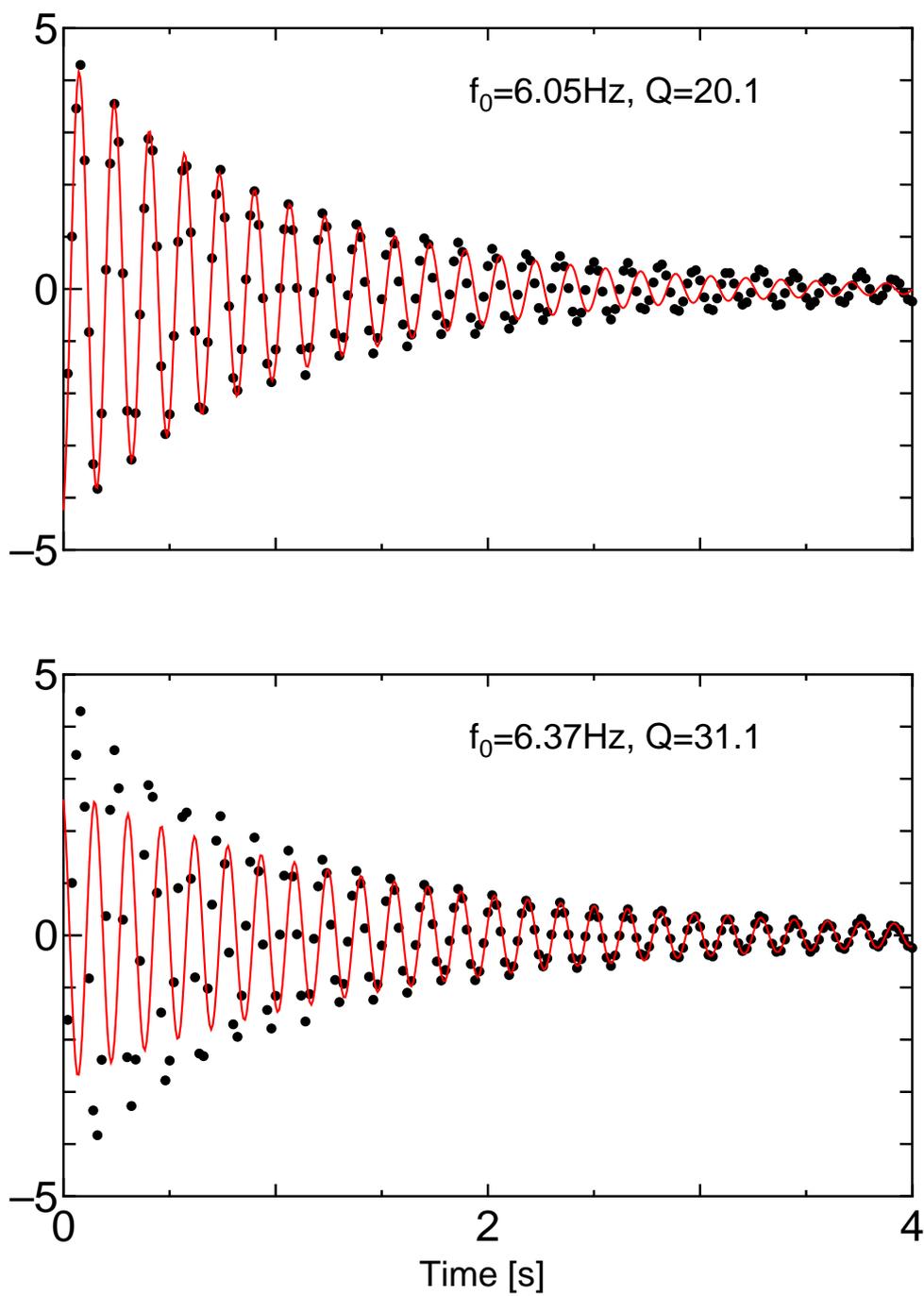


図 4: 振動減衰の振幅依存性。最初の 0.8 秒間のデータを使ってフィットした場合（上の図）と最後の 0.8 秒間のデータを使ってフィットした場合（下の図）

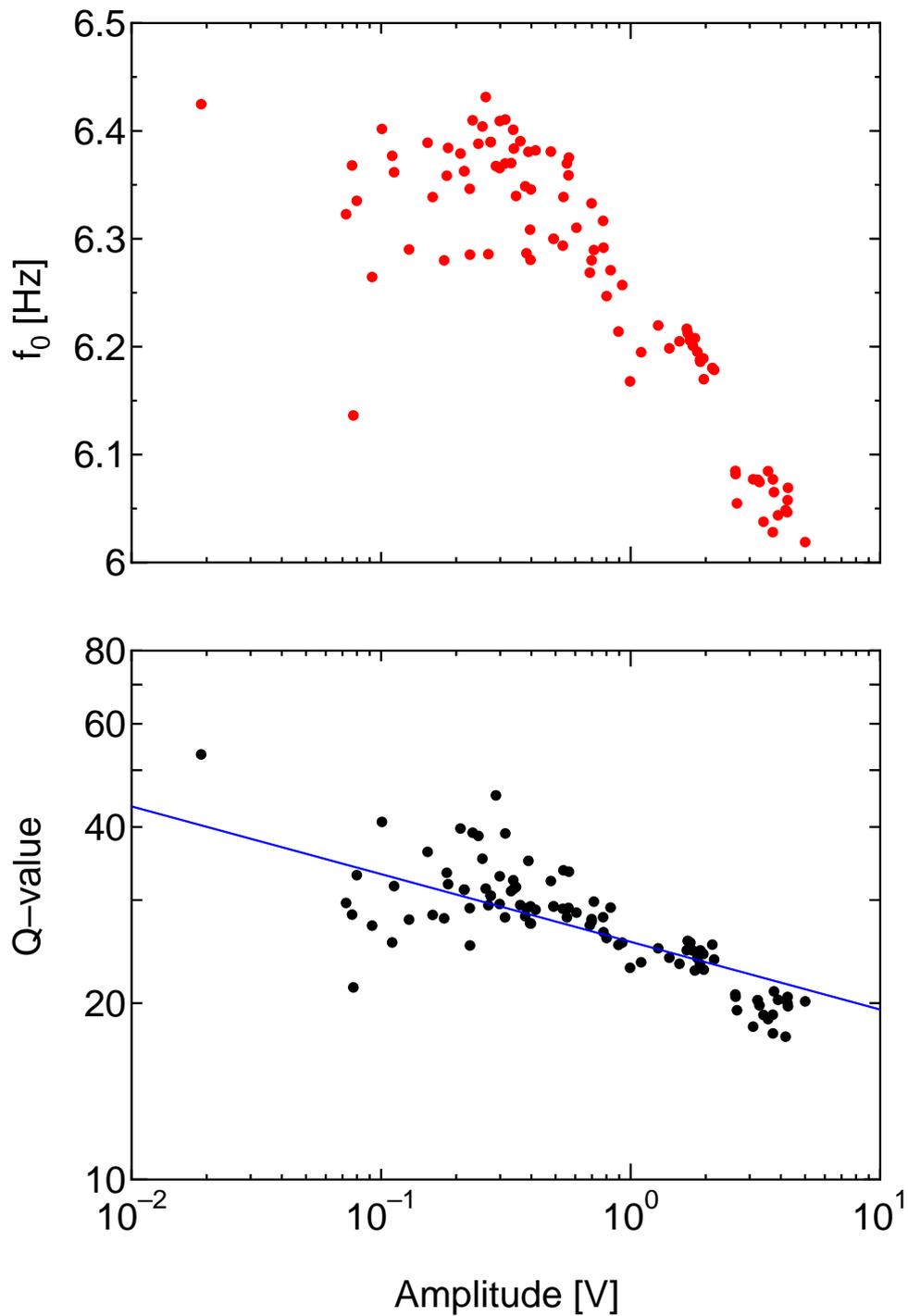


図 5: 共振周波数と Q の振幅依存性。下図の直線は Q を振幅のべき関数としてフィットしたもので、指数は-1.16 であった。

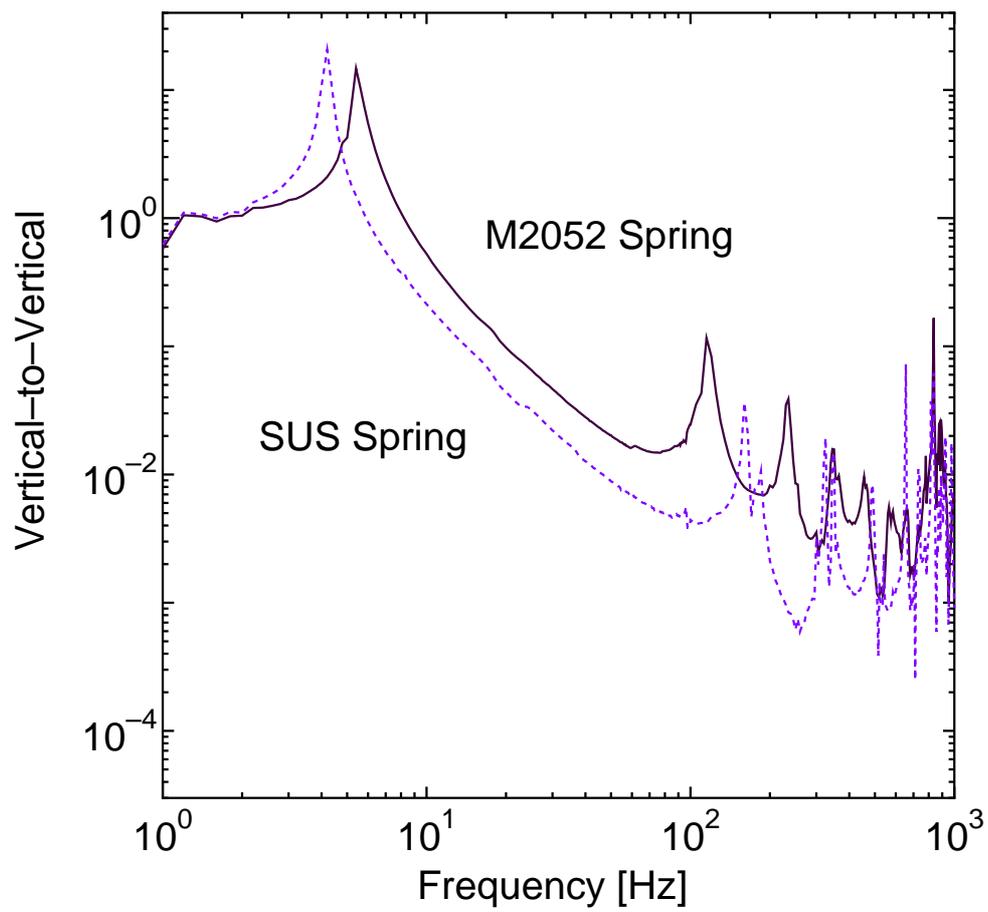


図 6: 垂直振動の防振特性

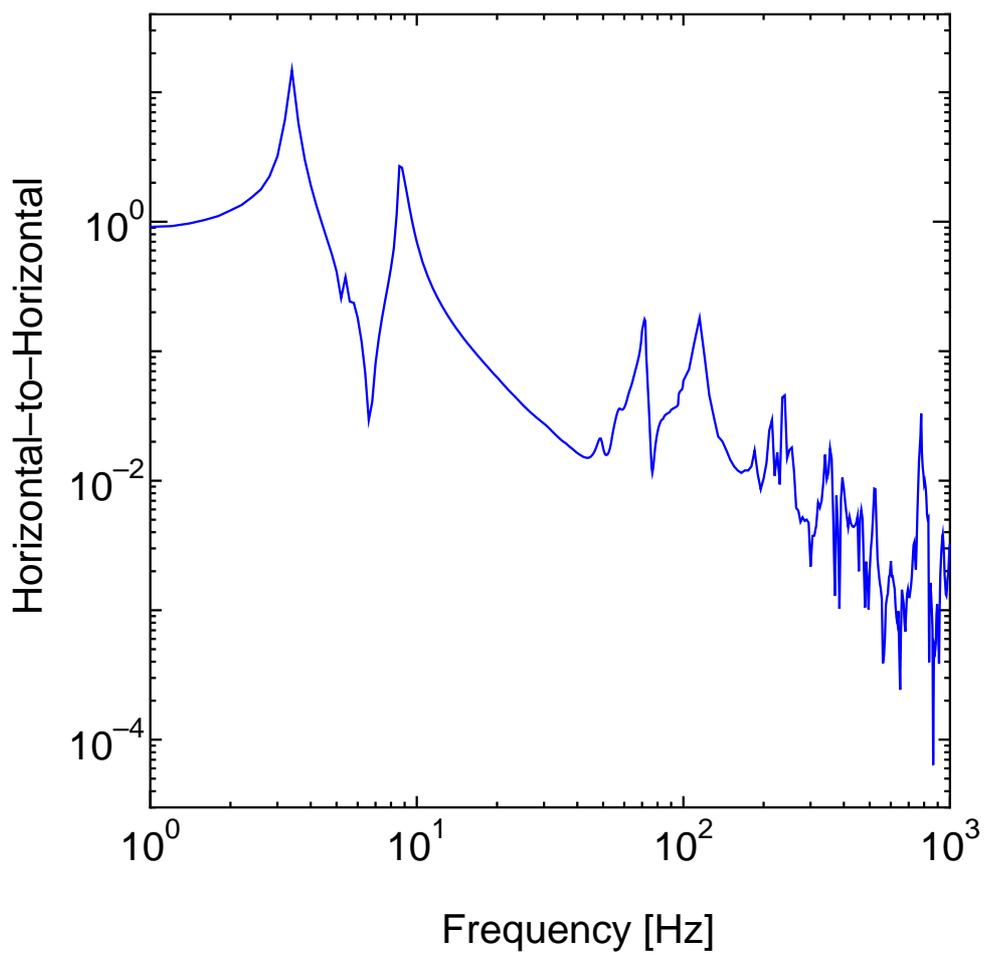


図 7: 水平振動の防振特性