

## 第4章 M2052合金の制振性

### 4.1 制振合金 M2052の物性

M2052合金とは、川原らによって開発された高い制振性を持つ合金である[10]。以下の図4.1にM2052を含めた主な制振合金の減衰性能と強度を示す。制振合金のその他に高い減衰性能を持つ物質として、ゴムやゲル等の高分子物質がよく挙げられるが、これらは強度が金属に比べ劣る上に、低温下では減衰性能が大きく下がる問題がある。CIBER-2では観測時に装置を低温に冷やす上、打ち上げ時に非常に強い振動が発生するため、高分子物質による減衰は期待できない。M2052はゴムやゲル並みの減衰性能を持つ上に、図4.2に示すように低温下でもその性能が期待できる[11]。また図4.3に示すように、M2052は低温下でQTレベルの振動に耐えうる十分な強度を持っている。

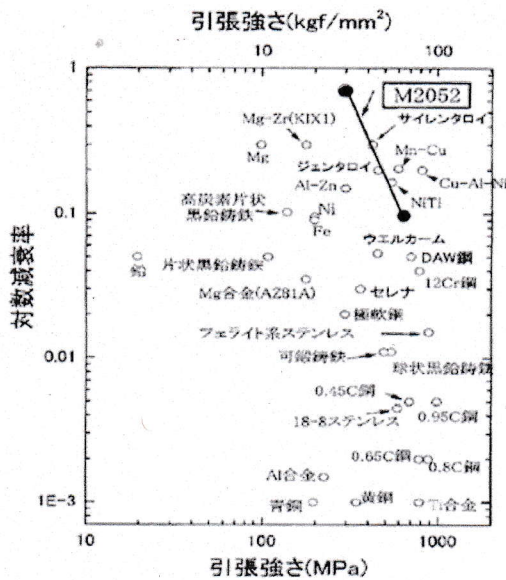


図4.1：主な制振合金の減衰性能と強度[12]

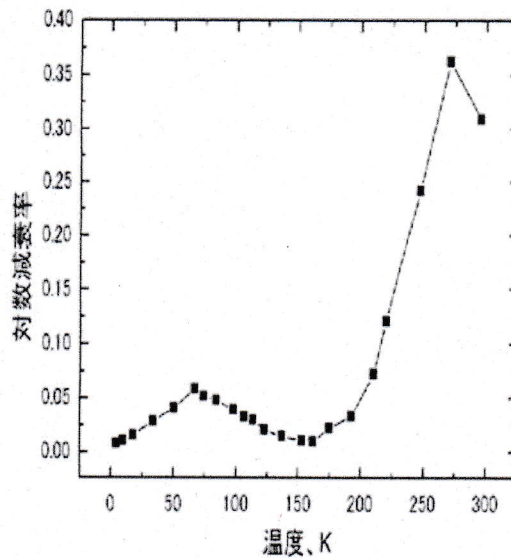


図4.2：4.2Kから300KでのM2052の減衰性能[13]

表4.1にM2052の主な物性値を示す。熱伝導率は室温でしか測定されておらず、低温から常温にかけての熱伝導率の測定は第5章で行う。

表 4.1 : M2052 合金の主な物性値

項目	条件	データ
許容応力	引張り強度 圧縮	540MPa
縦弾性率	3点曲げ 圧縮 引張り 超音波	67.7GPa 35.1GPa 47.8GPa 104GPa
横弾性率 注 <sup>a</sup>	引張り 超音波	17.8GPa 46GPa
ポアソン比	引張り	0.338
弾性限	引張り	300MPa
耐力 (0.2%)	引張り	205MPa
疲労限 (曲げ)	応力 歪、 $\mu$	160MPa $5 \times 10^5$
硬さ	Hv	100~130
線膨張係数 注 <sup>b</sup>	300K	$22.4 \times 10^{-6}/\text{deg}$
比熱 注 <sup>c</sup>	300K	512.7J/Kg · K
熱伝導率 注 <sup>d</sup>	300K	10W/m · K
磁性		常磁性/反強磁性
密度 注 <sup>e</sup>		7.25gr/cm <sup>3</sup>
固体内音速	縦波 (5MHz) 横波 (5MHz)	7000m/s 4310m/s

注<sup>a</sup>:ポアソン比から算出

注<sup>b</sup>:Al,Mg,Pb,Sn と同等

注<sup>c</sup>:Fe,Ni,Ti と同等 注<sup>d</sup>:Bi,Sb,Ti と同等

注<sup>e</sup>:Cr,Fe,In,Sn,Zn と同等

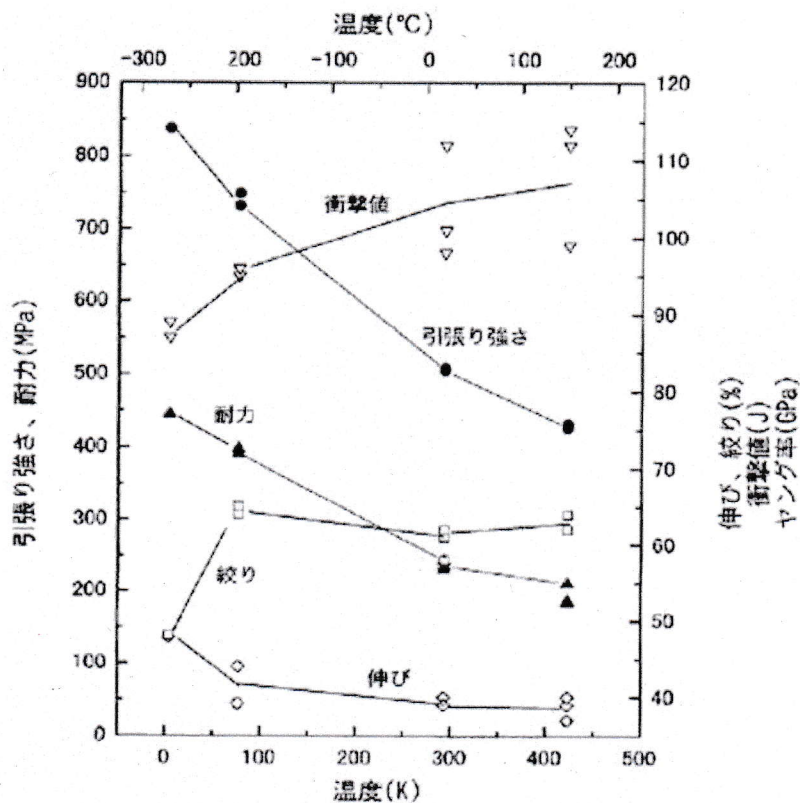


図 4.3 : M2052 の主な物性値の温度依存性。液体ヘリウム温度から 150 度までのデータである。一般的な合金と同じく温度が下がるほど強度は増している。

## 4.2 M2052 合金を用いた振動試験

共振の制振機構として JTQ 株式会社から提供された M2052 合金を組み込んだ望遠鏡単体の振動試験を 2 度行った。1 度目は、室温下で M2052 の制振性を実測するための試験を行い、2 度目は低温下で M2052 の制振性を実測するための試験を行った。試験のセットアップは 3 章で述べた望遠鏡単体振動試験の時と同じであるが、3 箇所の主鏡の支持足とフレクシャの接触面の間に厚み 1mm の M2052 製のプレートを含み込んでねじ止めしてある点とフレクシャの材料が A6061-T6 から A7075-T651 に変更している点が異なる。M2052 プレートの取り付け位置を図 4.4 に示す。また、低温振動試験では図 4.5 に示すようなこれまでとは異なる加振装置を使用する。2 度の振動試験において、ベースプレート底面に対して QT レベルの 10%、30%、60%、80%、100% の合計 5 つの加速度入力を行った。また、低温振動試験では、ベースプレートの上面部に白金抵抗 Pt100 を取り付けて抵抗値をモニターし続け、温度が 217K になった時点で測定を開始した。望遠鏡の冷却は加振装置を接続する恒温槽内の大気で行われる。

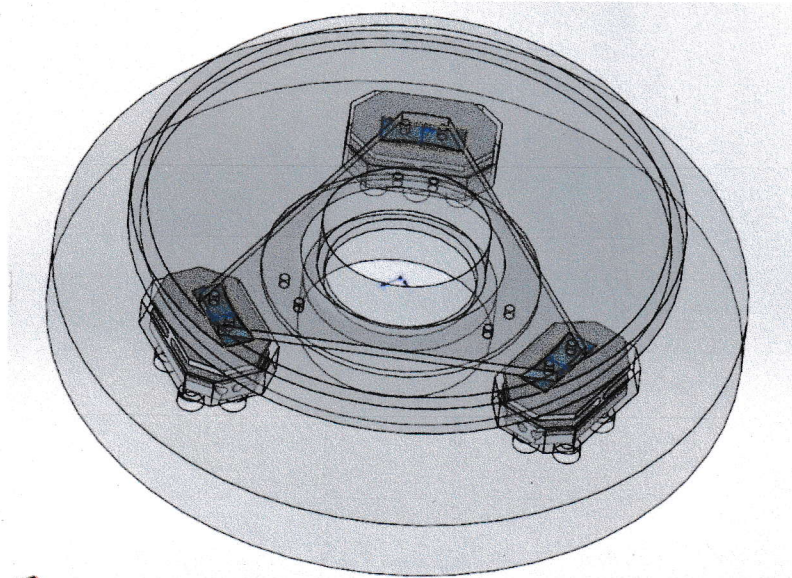
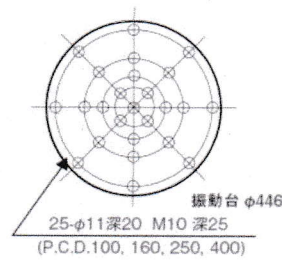


図 4.4 : M2052 プレート取り付け位置。青色で表示しているのが M2052 プレートである。

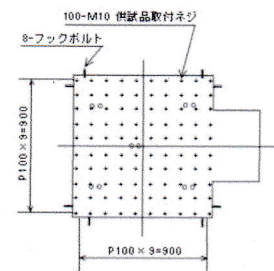
**A74/EM10HAM/H10/C 大阪テストラボ**



振動発生機 本体可動部



水平補助テーブル ネジパターン



**仕様表**

特長	振動数範囲 (~Hz)	最大加振力			最大加速度			最大速度		最大変位 (mmp-p)	質量(kg)	最大搭載 質量(kg)	許容偏心 モーメント (N・m)	振動台寸法 (mm)
		正弦波 (kN)	ランダム波 (kN rms)	ショック波 (kN)	正弦波 (m/s <sup>2</sup> )	ランダム波 (m/s <sup>2</sup> rms)	ショック波 (m/s <sup>2</sup> peak)	正弦波 (m/s)	ショック波 (m/s peak)					
大型機器 温湿度会記録 高速度衝撃試験	2600	74	74	180	855	598	2080	2	2.5(3.5)	76.2	86.5	1000	1550	φ446

**水平補助テーブル**

寸法 (mm)	質量 (kg)	ピッチモーメント (N・m)	最大搭載質量 (kg)
950x950	150	7700	2000

**恒温恒湿槽**

型名	内径 (W×D×H) (mm)	温度範囲 (°C)	温度変化率 (°C/min)	湿度範囲 (%RH)
Syn-4HW-70-VH	1250×1250×1200	-70°C~+180	3	20~98

図 4.5 : 低温試験で使用する加振装置仕様[9]

### 4.3 試験結果

2018年6月に実施した室温振動試験と2018年7月に実施した低温振動試験それぞれの試験結果を示す。ベースプレートに取り付けた制御センサーによる加速度 PSD と主鏡側面に取り付けたセンサーによる加速度 PSD を図 4.6 から図 4.9 にかけて示す。その次の図 4.10 に示す伝達関数は、QT レベルでの主鏡側面の Z 方向加速度 PSD を制御センサーの Z 方向加速度 PSD で除して平方根を取ったものであり、共振振動数付近の振動数帯で拡大している。QT レベルの 10% から 80% の低レベル試験の結果についてはグラフは省略する。

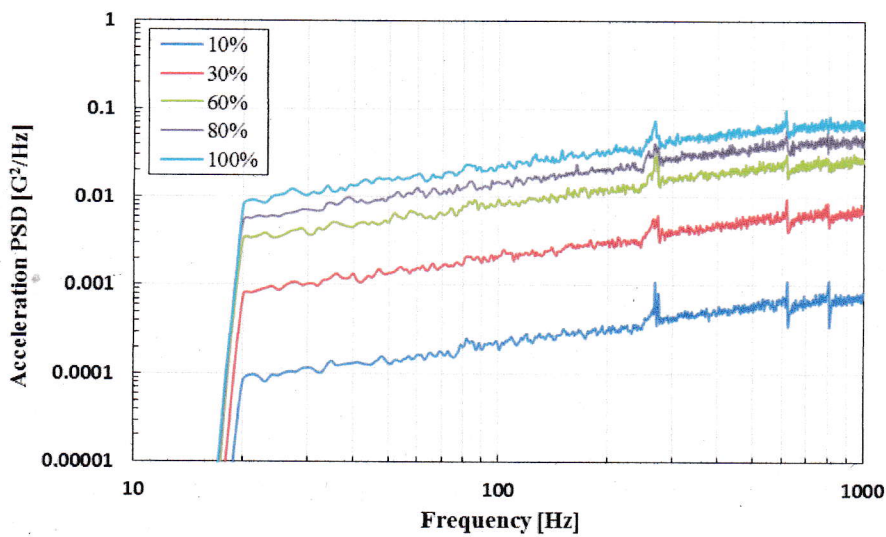


図 4.6 : 室温でのベースプレートに取り付けた制御センサーの加速度 PSD

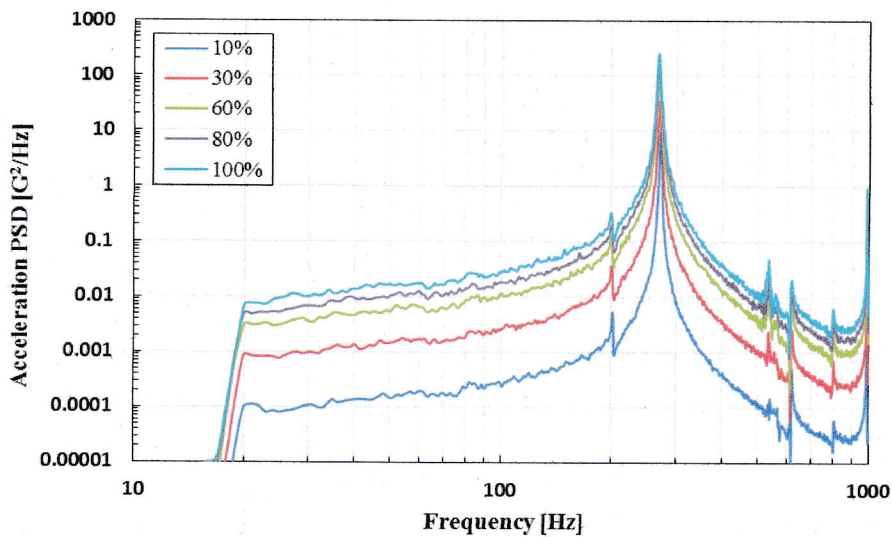


図 4.7 : 室温での主鏡に取り付けたセンサーの加速度 PSD

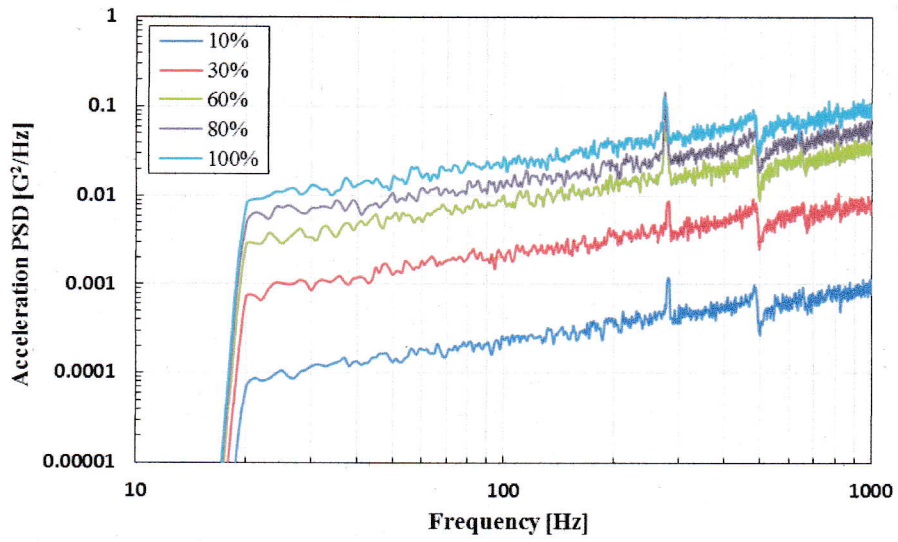


図 4.8：低温でのベースプレートに取り付けた制御センサーの加速度 PSD

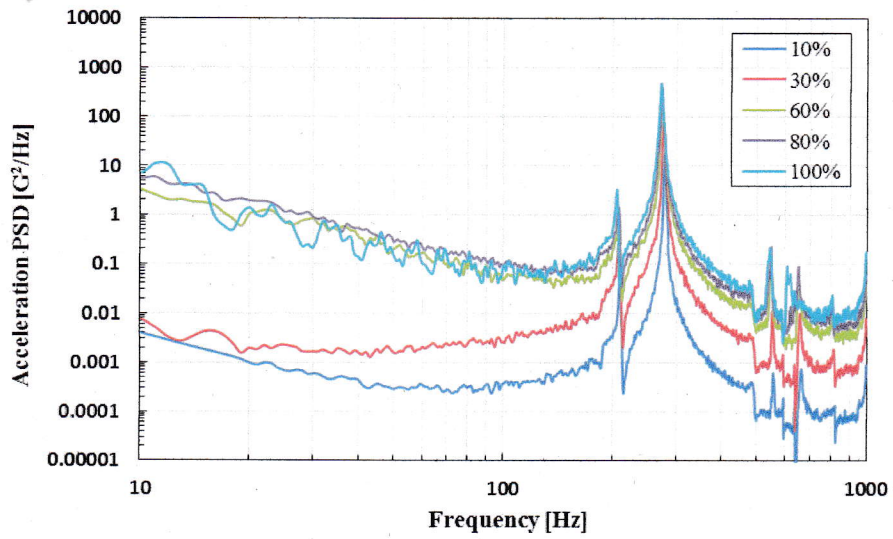


図 4.9：低温での主鏡に取り付けたセンサーの加速度 PSD

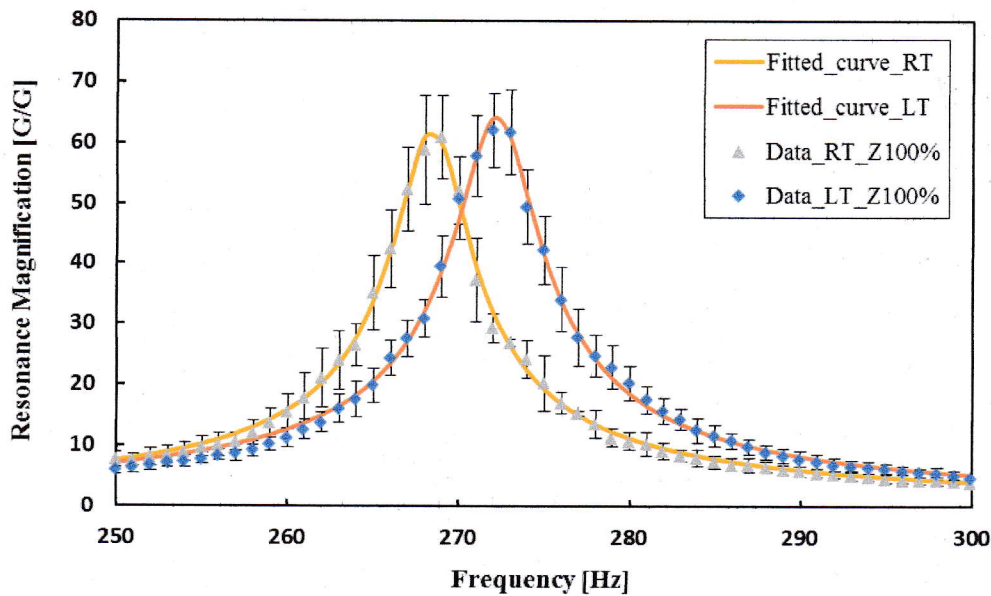


図 4.10： 望遠鏡に QT レベルの Z 方向加振を与えた時の  
室温と低温での主鏡の Z 方向加速度伝達関数

ただし、試験で得られたデータに対して、次式の関数でフィッティングを行っている。

$$\rho(\omega) = \frac{1}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega_0\omega/Q)^2}}$$

それぞれのデータプロットに対するフィッティング関数のパラメータを次の表 4.2 にまとめる。

表 4.2 伝達関数のフィッティングパラメータ

	パラメータ	Z10%	Z30%	Z60%	Z80%	Z100%
RT(297K)	$\omega_0$ [Hz]	270.00±0.14	269.05±0.08	267.94±0.13	268.16±0.27	268.39±0.13
	Q値	147.26±29.24	87.06±21.43	62.66±15.69	57.41±9.47	61.38±8.93
LT(218K)	$\omega_0$ [Hz]	277.68±0.08	276.20±0.08	274.59±0.08	273.24±0.13	272.18±0.08
	Q値	157.82±28.49	118.71±15.33	47.61±15.72	50.36±16.52	56.99±6.86

Y 方向加振についても同様に QT レベルの伝達関数を算出した。その結果を次の図 4.11 に示す。

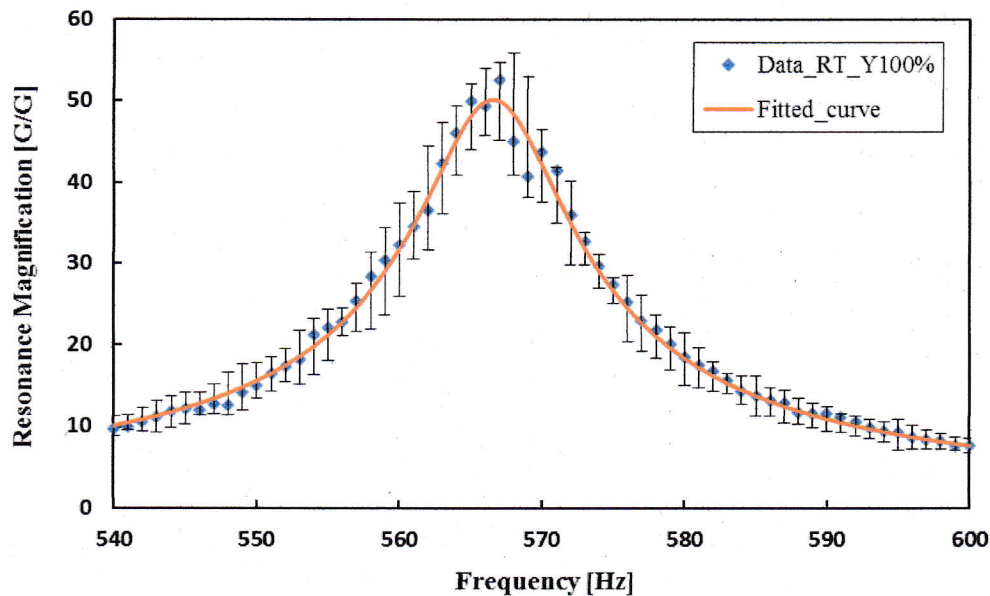


図 4.11： 望遠鏡に QT レベルの Y 方向加振を与えた時の  
室温と低温での主鏡の Y 方向加速度伝達関数

ただし、試験で得られたデータに対して、次式の関数でフィッティングを行っている。

$$\rho(\omega) = \frac{1}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega_0\omega/Q)^2}}$$

データプロットに対するフィッティング関数のパラメータを次の表 4.3 にまとめる。

表 4.3： 伝達関数のフィッティングパラメータ

パラメータ	Y100%_RT(297K)
$\omega_0$ [Hz]	566.61±0.45
Q 値	53.17±4.12

この試験で得られた伝達関数と M2052 を取り付けしていない試験で得られた伝達関数の比較を Z 方向について図 4.12 に、Y 方向について図 4.13 に示す。M2052 の制振効果によって、Z 方向の約 270Hz の共振の Q 値と Y 方向の約 600Hz の共振の Q 値が 100 以下に抑えられていることが分かる。



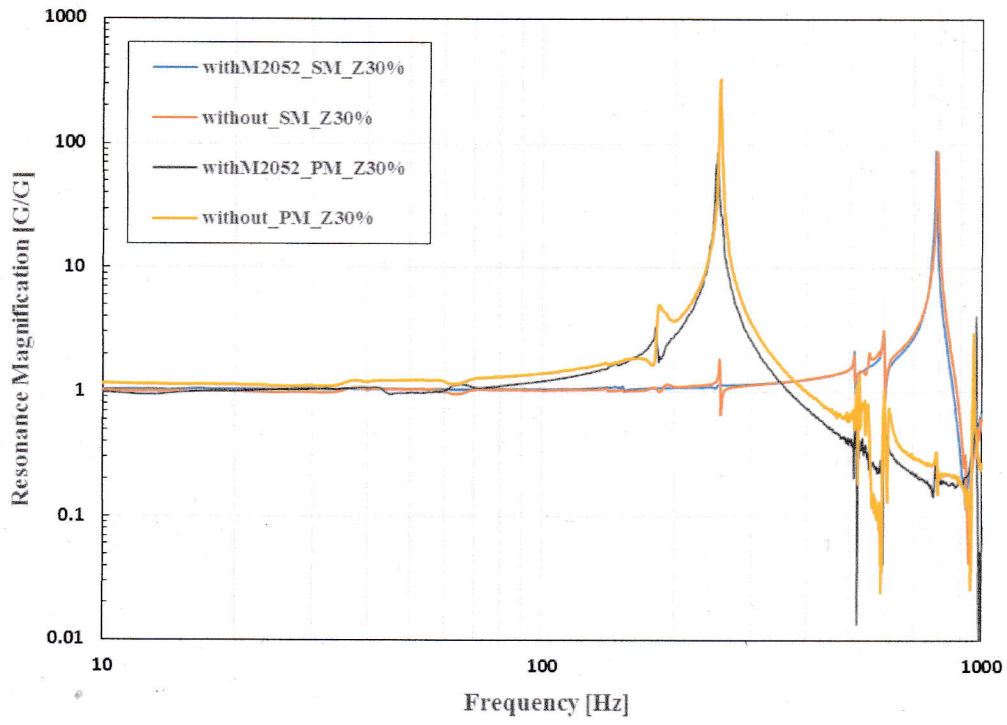


図 4.12 : M2052 の有無での主鏡の Z 方向加速度伝達関数の比較

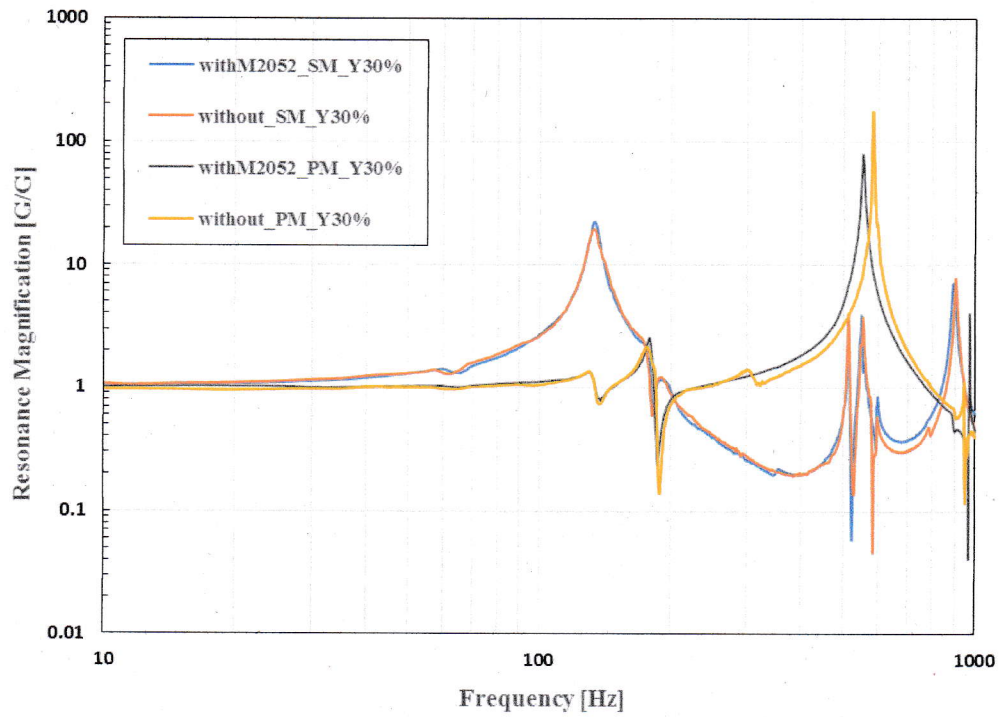


図 4.13 : M2052 の有無での主鏡の Y 方向加速度伝達関数の比較

#### 4.4 データ解析

この試験結果からFEMを用いて、QTレベルの振動で主鏡やフレクシャにかかる応力を計算する。試験結果に対して関数フィッティングすることによって得られたQ値を用いてQTレベルのランダム振動シミュレーションを行った。シミュレーションと試験結果の比較を図4.14と図4.15に示す。

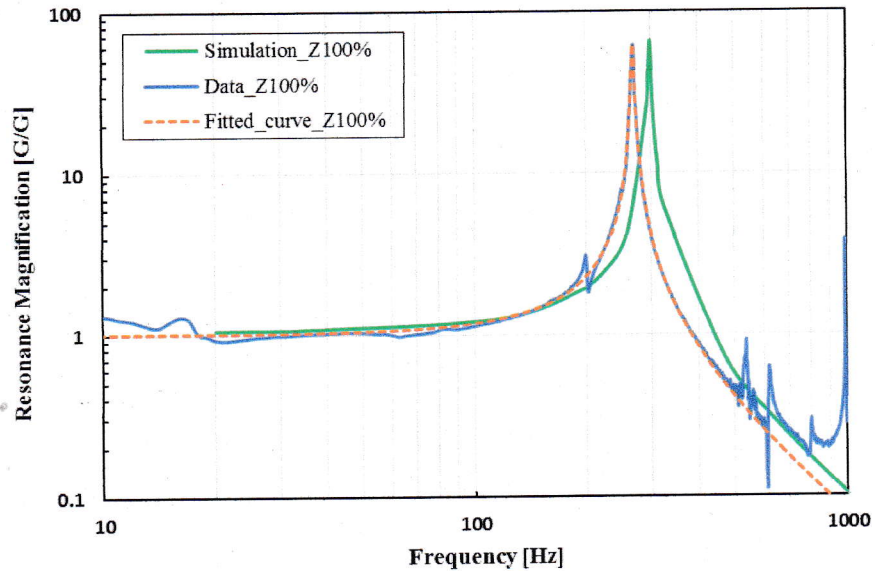


図 4.14：シミュレーションと実測値の加速度伝達関数比較(QTレベル Z 方向加振時)

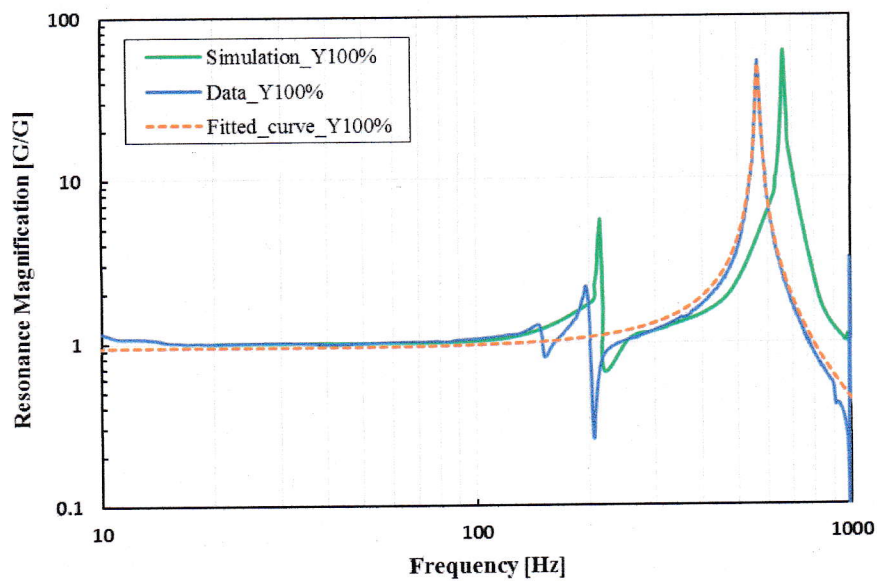


図 4.15：シミュレーションと実測値の加速度伝達関数比較(QTレベル Y 方向加振時)

この QT レベルのランダム振動シミュレーションは実験データをよく再現しているため、望遠鏡各所にかかる応力はシミュレーションから計算できる。望遠鏡の主鏡とフレクシャにかかる応力 PSD を図 4.16 と図 4.17 に示す。

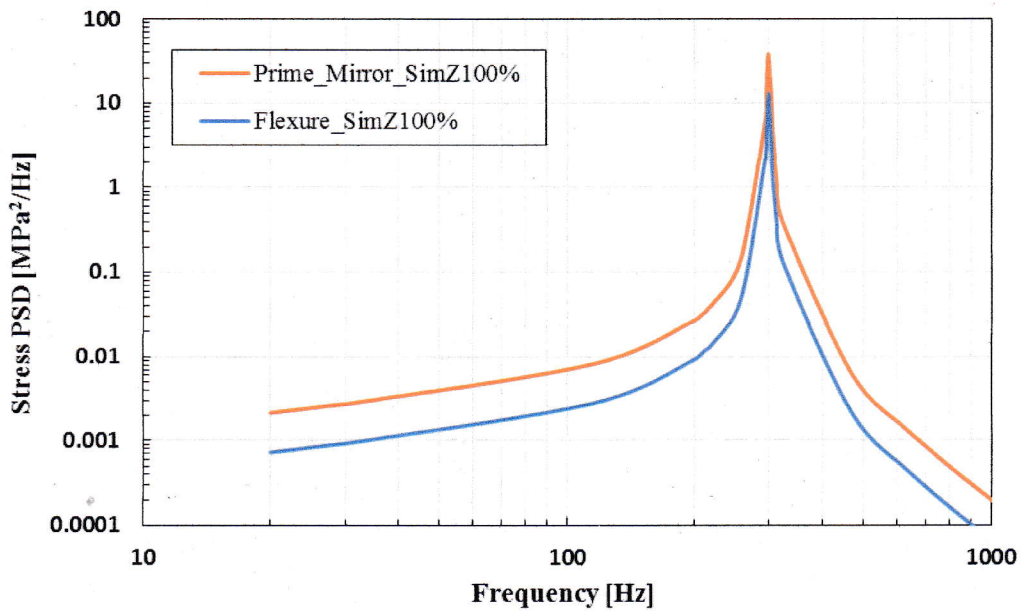


図 4.16 : QT レベル Z 方向加振時の応力 PSD

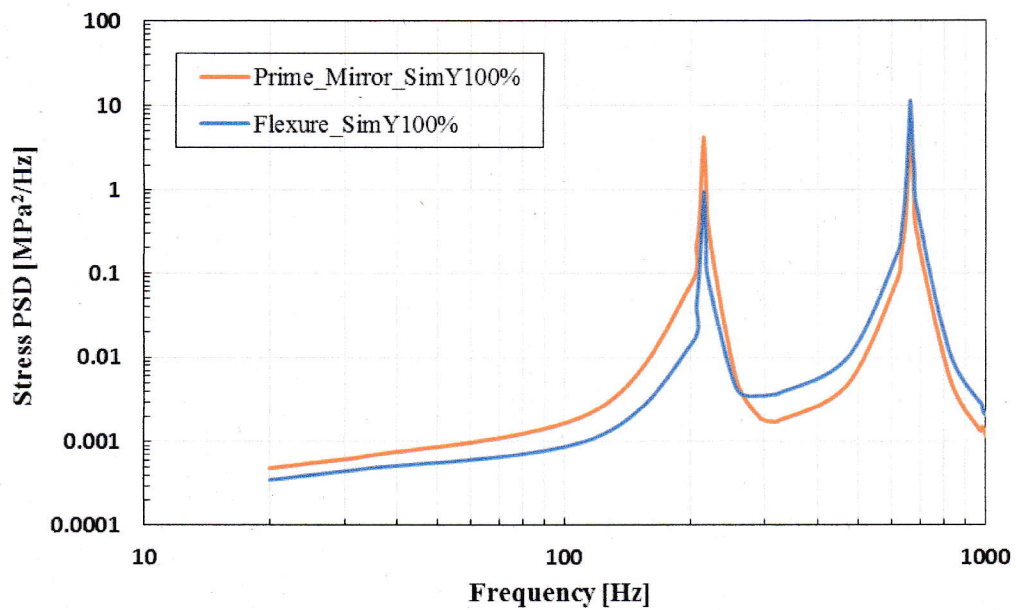


図 4.17 : QT レベル Y 方向加振時の応力 PSD

ランダム振動において、有限の振動回数 $N$ までに確率 $P$ で材料の降伏応力 $\sigma_{yield}$ を超えないという条件下で、許容される応力の標準偏差値 $\sigma_{allow}$ は次式で表される。

$$\sigma_{allow} = \frac{1}{\sqrt{2 \ln\left(\frac{N}{1-P}\right)}} \sigma_{yield}$$

ここで振動回数 $N$ は、物体の固有振動数 $\omega_0$ に振動させる時間を乗算することで求めることができる。本研究での振動試験では、ランダム振動時間は各軸 10 秒で定義されているが、QT レベルの 100%の振動を与える前に、QT レベルの 10%から 80%までの振動を与える低レベル試験を望遠鏡に実施するため、振動時間には 10 倍のマージンを取ることにする。確率 $P$ について、本研究では 99.7%を常に考える。この式を用いて主鏡とフレクシャの許容応力を計算する。またシミュレーションによって得られた図 4.16 と図 4.17 の応力 PSD 曲線から、主鏡とフレクシャにかかる応力を計算する。これらの応力の比較を次の表 4.4 に示す。

表 4.4：許容応力とシミュレーション応力

	主鏡	フレクシャ	Q値
Z加振応力 [MPa]	61.30	74.00	450
Y加振応力 [MPa]	61.30	121.40	200
Z加振応力(ダンパー) [MPa]	34.30	31.40	150
Z加振応力(M2052) [MPa]	19.26	11.24	61
Y加振応力(M2052) [MPa]	12.47	16.16	53
許容応力 [MPa]	50.18	92.14	

表 4.4 には制振構造を組み込んでいない望遠鏡にかかる応力と、ダイナミックダンパーを組み込んだ望遠鏡の応力も載せてあるが、M2052 を取り付けた場合がもっとも応力は小さくなる。M2052 合金の制振効果によって、望遠鏡の共振の鋭さが抑制され、主鏡とフレクシャにかかる応力は許容応力を下回ることがシミュレーションから明らかとなった。よって、M2052 合金を制振構造として望遠鏡に搭載することは効果的であり、低温でもその制振効果が実測された。

表 4.2 の試験結果から、入力加振レベルが大きくなるにつれて望遠鏡の共振振動数と Q 値は小さくなっていくことが読み取れる。共振振動数と Q 値の関係を次の図 4.18 に示す。

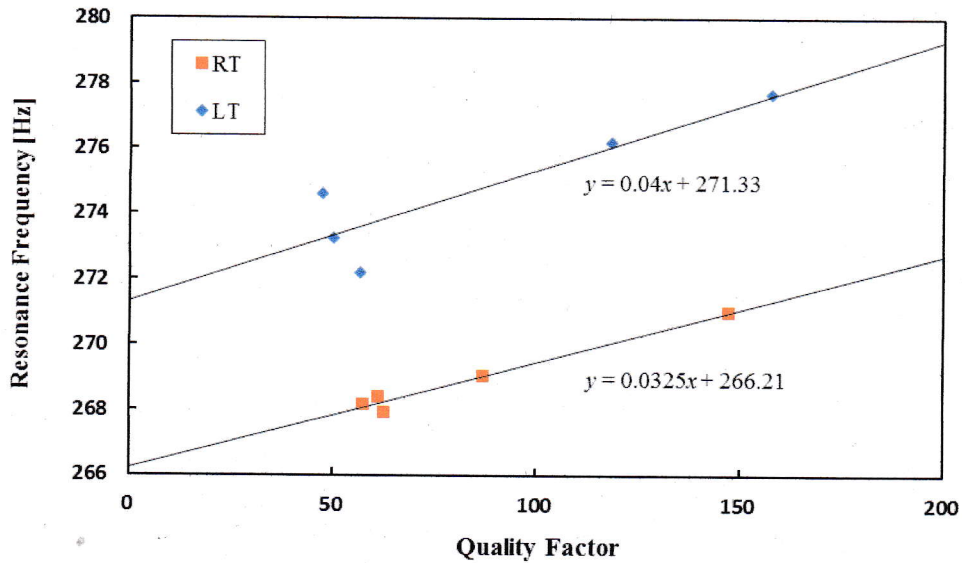


図 4.18：共振振動数の Q 値依存性

室温と低温で共振振動数に差があるのは、弾性係数に温度依存性があるためである。一般にアルミニウム合金のような原子が金属結合している物質は、温度の減少とともに弾性係数は上昇する。したがって、室温に比べて低温の共振振動数の方が大きな値を持つ。

周期的な強制力がはたらく減衰する振動系の共振振動数は次式のように Q 値の依存性を持つ。

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$$

今回の試験結果では Q 値が最低でも 60 程度なので、この式によると Q 値の共振振動数への影響は非常に小さく図 4.18 の直線の傾きの大きさは Q 値だけでは説明できない。したがって、共振振動数は別のパラメータにも依存していることが分かる。この試験において変化させたパラメータは入力する加振レベルであるから、系の加速度応答もそれに伴い変化する。したがって、共振振動数は発生する加速度つまり、振幅に依存すると考える。共振振動数と加速度応答の関係を次の図 4.19 に示す。

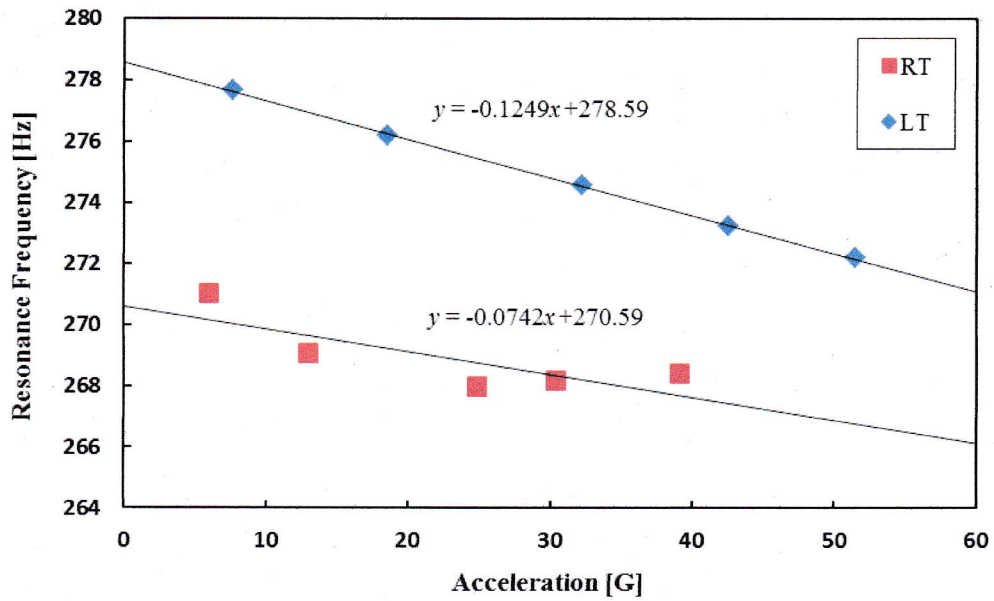


図 4.19：共振振動数の振幅依存性

振幅が大きくなるほど共振振動数は低くなり、その関係は線形である。Q 値と共振振動数の関係は非常に小さいことが分かったので、Q 値が振動レベルに対して変化するのは、Q 値も振動の振幅に依存性を持つからだと考えられる。Q 値と加速度応答の関係を次の図 4.20 に示す。

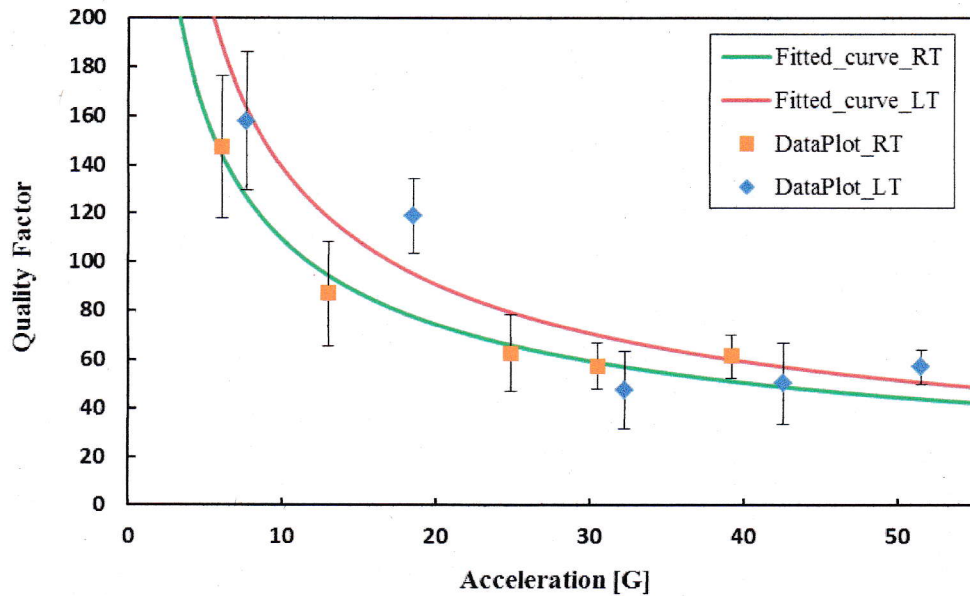


図 4.20：Q 値の振幅依存性

Q 値は振幅が大きくなるに従って小さくなり、その関係は非線形である。この関係を次の冪関数

$$Q(A) = \alpha A^{-\beta}$$

で表されると仮定して最小二乗法でフィッティングを行った。室温の時のフィッティングパラメータは、

$$\alpha_{RT} = 389.29, \beta_{RT} = 0.55$$

となり、低温の時のフィッティングパラメータは次のように求められた。

$$\alpha_{LT} = 566.98, \beta_{LT} = 0.61$$

図 4.19 と図 4.20 から、共振振動数と Q 値の振幅依存性はそれぞれ低温の方が室温より若干高いが、その差はほとんどない。

定義より、Q 値は固有振動数を減衰係数  $\gamma$  で除したものであるから、減衰係数  $\gamma$  に振幅依存性があると考えると、減衰係数  $\gamma$  は  $\gamma(A) \propto A^\beta$  と書ける。M2052 合金を搭載した CIBER-2 望遠鏡においては、フィッティング結果によると  $\beta \approx 0.5$  となる。

M2052 合金は、内部で双晶活動が起こることで振動エネルギーを散逸させる。結晶に外力が加わると弾性変形するが、弾性域を超えるような強い外力がかかると双晶が発生する。それ以上の負荷をかけると、その双晶が成長、または他の場所に新たな双晶が発生する。外力を取り除くと双晶は縮小あるいは消失する。振幅が大きな振動であるほど高いエネルギーを持つため、より多くあるいは大きな双晶を生み出すと考えられる。よって減衰性能は振動振幅が大きくなるほど増す。周期的な外力による共振の振動エネルギーはこの双晶活動によって消費される。また、一般的に振動エネルギーは振幅の 2 乗に比例することから、この減衰メカニズムによるエネルギーの散逸も振幅の 2 乗つまり、 $\beta = 2$  が期待される。しかしながら、結果から  $\beta \approx 0.5$  であるから期待される依存性より小さい。これは、M2052 の双晶活動以外の減衰メカニズムが存在することを示唆する。この内部摩擦メカニズムとして、例えば、M2052 が反強磁性を持つことから、結晶に応力を与えた時に磁化の強さが変化し非弾性的なひずみが生じるビラリ現象などが挙げられる[11]。

ここまでの結果より、Q 値が振幅依存性を持っており、Q 値が小さい時は振動の振幅は大きい。共振振動数も同様に振幅依存性を持っており、振幅が大きくなるほど共振振動数は小さくなる。すなわち、図 4.18 は共振振動数が Q 値と振幅に依存性を持っており、振幅の寄与の方が大きいことを示す。

これまでの M2052 単体の減衰性能の研究結果によると、共振振動数と Q 値は振動振幅に大きく依存することが報告されていることから[14]、今回の CIBER-2 望遠鏡と M2052 の振動系について過去の報告と矛盾のない結果が得られた。

図 4.20 より、入力振動の加速度が約 30G で M2052 を取り付けした CIBER-2 望遠鏡の減衰比は約 0.01 となる。例えば天然ゴム単体の減衰比は 0.02~0.07 とされているので、この M2052 を搭載した望遠鏡は十分高い減衰比を持つ。

このように M2052 は金属であるため高い強度を持ち、大きな振幅を持つ振動への高い減衰性能を持つので、打ち上げ時に強い振動を受けるロケットに搭載する構造物の制振構造としては非常に優秀である。