

単結晶形状記憶合金の超弾性特性を利用したエンジンマウント振動減衰器の試作と振動試験

著者	樋口 健, 勝又 暢久, 佐藤 伸平, 川村 萌
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2018
ページ	67-71
発行年	2019-09
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010136

単結晶形状記憶合金の超弾性特性を利用したエンジンマウント振動減衰器の試作と振動試験

○樋口 健（航空宇宙システム工学ユニット 教授）

勝又 暢久（航空宇宙システム工学ユニット 助教）

佐藤 伸平（航空宇宙総合工学コース 博士前期2年）

川村 萌（航空宇宙システム工学コース 学部4年）

1. はじめに

小型無人超音速実験機オオワシ2号機に搭載される新開発のGG-ATRエンジンに起因する振動が機体構造や搭載機器へ及ぼす影響を軽減することを検討しておく必要がある。GG-ATRエンジンマウント部は高温になることが予想され、耐熱性のない高分子材料やオイルダンパーは使用しづらと考えられる。高温部でも使用可能な全金属製の振動減衰器により機体に伝達される振動絶縁装置を試作し振動試験により伝達特性の評価を試みた。ここでは、単結晶形状記憶合金（SCSMA：Single-Crystal Shape Memory Alloy）の超弾性特性を利用した減衰器を用い、減衰性能や振動応答を評価すること、およびオオワシ2号機にSCSMA減衰器を搭載した際に予測される振動応答及び固有振動数を検討し、実機の振動応答を予測することを目的としている。

2. 単結晶形状記憶合金（SCSMA）

SCSMAはCu-Al-Ni系単結晶形状記憶合金であり、相変態による「形状記憶効果」と応力誘起による「超弾性」との2種類の力学的特性を持つ。減衰金属として利用するのは超弾性特性であるので、変態点温度を常温より低く設定してオーステナイト相で利用する。超弾性体が負荷により応力誘起マルテンサイト変態し、変形の際に描くヒステリシスループの閉曲線で囲まれた面積の分だけ1サイクル毎にエネルギーを散逸する。

SCSMAは、工学的によく使われているTi-Ni形状記憶合金に比べ、以下の特徴的な機械的特性を持つ。

- ①マルテンサイト変態開始応力が低い
- ②負荷と除荷のヒステリシスループ応力幅が狭い
- ③ひずみ回復率（超弾性）が高い（約9%）

つまり、小さい応力変化で大きなひずみ量の変化を得ることができ、小さい応力振幅でヒステリシスループを描くことができるため、防振材料として期待できる[1,2]。

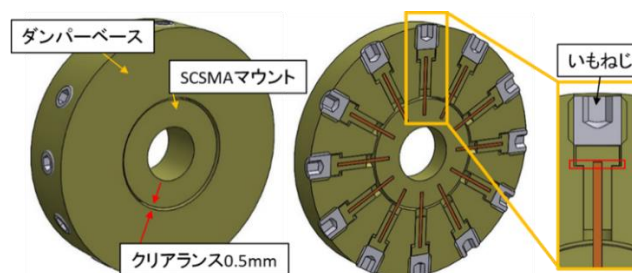


図1 減衰器の構成

この特性を利用した減衰器の構成を図1に示す。エンジンから推力と振動を伝えるエンジンサポートピンはドーナツ型の減衰器の中心を通る。SCSMA 減衰器のいもねじを締めることでSCSMA ピンに初期ひずみを与え、全てのクリアランス 0.5 mm に保つことにより初期ひずみがヒステリシスループの真ん中になるように調整する。

オオワシ 2 号機エンジンマウント部では、エンジンから伸びるエンジンサポートピン（図2）が減衰器中心の穴にささり、エンジンサポートピンが変位すると減衰器内部の SCSMA ピン軸方向の繰り返しひずみが生じて減衰を得る。減衰器内には放射状に 12 本の SCSMA ピンが入っており（図1）、エンジンマウント部に 90 度位相ごとに取り付けることであらゆる振動方向に対して減衰が可能である（図2）。

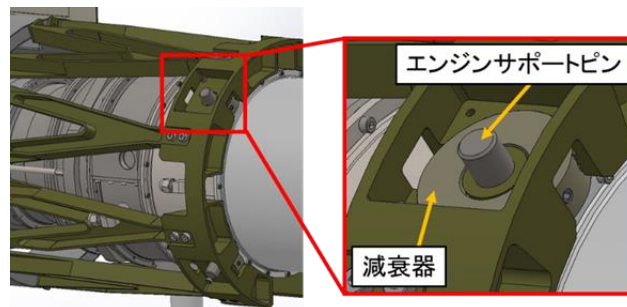


図2 エンジンサポートピン

3. 加振振動数掃引試験

3-1. 試験方法と加振条件

振動試験機上に設置された試験供試体と加振治具を図3に示す。加振方向は垂直方向であり、加振方向に対して減衰器内に SCSMA ピンを上下 1 本ずつ取りつけた状態で使用した。また加振条件を表1に示す。

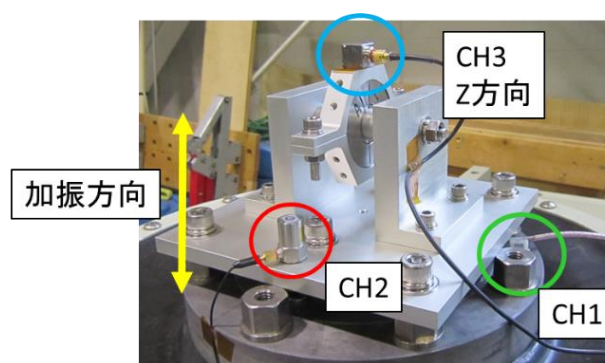


図3 振動試験機上に設置された試験供試体と加振治具

表1 加振条件

加振質量[kg]	0.24, 0.34, 0.44
加振レベル[G]	0.5, 1.0, 2.0, 4.0
周波数範囲[Hz]	100~1500
掃引方向	UP, DOWN

3-2. 試験結果

入力レベルを変化させた場合の応答曲線を図4に、加振質量を変化させた場合の応答曲線を図5に示す。図4は加振質量 240 g, 掃引速度 1 oct/min の場合の加速度応答倍率である。図5は加速度振幅 0.5 G, 掃引速度 1 oct/min の場合の加速度応答倍率である。

同じ加振質量で入力加速度レベルを変化させた場合、応答倍率に振幅依存性があることを確認できた。また同じ入力加速度レベルにおいて加振質量を変化させた場合、加速度応答倍率は固有振動数に依存することが確認できた。

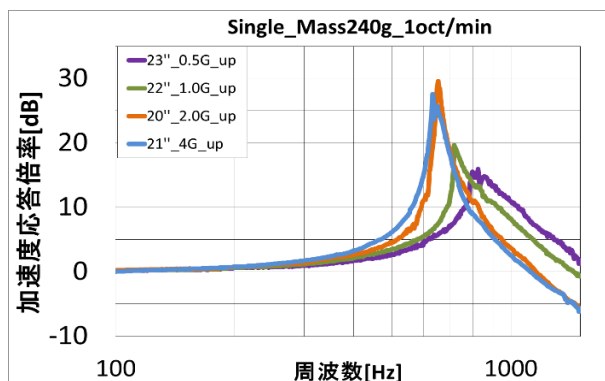


図4 入力加速度変化に対する応答曲線

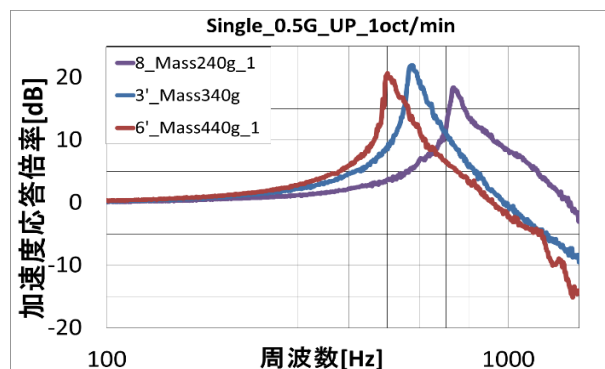


図5 加振質量変化に対する応答曲線

4. オオワシ2号機に搭載した際の減衰予測

振動試験結果を利用して、オオワシ2号機にこのSCSMA減衰器を搭載した際に、振動試験におけるヒステリシスループに対する応力・ひずみ状態が実機エンジン搭載時においても再現すると仮定して、実機で想定される伝達特性を検討した。

振動試験における加振質量 m を実機エンジン質量 M に、振動試験での減衰器剛性 k をオオワシ2号機で使用する減衰器剛性 K に変更する。振動試験での固有振動数を f_0 、実機での共振振動数を f_n とする場合、 f_0 、 f_n はそれぞれ式(1)のように書ける。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad , \quad f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1)$$

さらに m と M の比 (質量比 A) と k と K の比 (剛性比 B) を用いて f_n を書き直すと式(2)となる。

$$A = \frac{M}{m}, \quad B = \frac{K}{k}, \quad f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Bk}{Am}} = \sqrt{\frac{B}{A}} \times f_0 \quad (2)$$

加振質量 m は 240 g, 340 g, 440 g の 3 種類であり, エンジン質量 M を 40 kg と仮定して質量比 A を算出した. 今回の振動試験時の減衰器の SCSMA ピン本数は上下 1 本ずつであり (図 6 左), オオワシ 2 号機に搭載する場合の減衰器の SCSMA ピン本数は 12 本である (図 6 右). これらの換算パラメータを表 2 に示す.

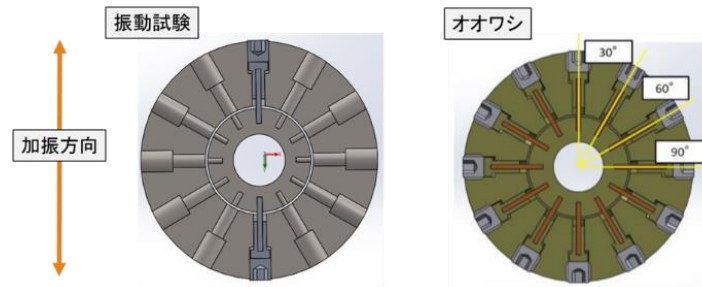


図 6 試験と実機での SCSMA ピン本数の違い

使用した振動試験データを表 3 に, 振動試験結果を実機に換算した固有振動数を表 4 に示す.

表 2 振動試験から実機への換算パラメーター

	加振質量 m [kg]	エンジン質量 M [kg]	質量比 A [-]	剛性比 B [-]
①	0.24	40	166.7	10.0
②	0.34	40	117.6	10.0
③	0.44	40	90.9	10.0

表 3 換算に使用した振動試験データ

振動試験結果 (Single 0.5G Up 1oct/min)			
加振質量 m [kg]	①0.24	②0.34	③0.44
固有振動数 f_0 [Hz]	740	578	505
固有角振動数 ω_0 [rad/s]	4649.6	3631.7	3173.0

表 4 実機エンジンを搭載した場合の減衰器固有振動数

オオワシエンジンの場合の予想			
	固有振動数 f_n [Hz]	固有角振動数 ω_n [rad]	回転数 [rpm]
①	181.3	1138.9	10875.7
②	168.5	1058.8	10110.9
③	167.5	1052.4	10049.4

予想された固有振動数 ($f_n=167.5\sim 181.3$ Hz, すなわち 10049~10875 rpm) を冷走試験結果[3]に重ね書きしたものを図 7 に示す. 紫色の曲線は応答倍率 [dB], 紺色の縦線は危険回転数と定格回転数, 赤色の横線は応答倍率 0 dB (1 倍) をそれぞれ示している. 応答倍率を表 5 に示す.

表5 実機搭載状態でのエンジンマウント部応答倍率

オオワシエンジンの場合の予想		
	応答倍率[dB]	応答倍率[倍]
固有振動数	18	7.94
1次危険回転数	13	4.47
2次危険回転数	11	3.55
定格回転数	-3相当	0.7相当

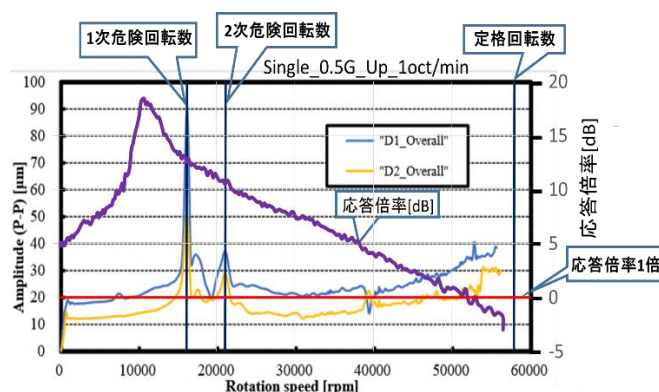


図7 実機エンジンを搭載した場合の減衰性能予測

図7と表5より、冷走試験での一次危険回転数（250~266 Hz）とエンジンの固有振動数（167.5~181.3 Hz）とは50~70 Hz外れていること、定格回転数では応答倍率が1以下になること、危険回転数では応答倍率が1以上であることが予想される。

5. まとめ

オオワシ2号機に本減衰器をそのまま実機に使用した場合の、固有振動数と減衰性能を加振振動数掃引試験の結果を用いて予測した。エンジン定格回転数においては応答倍率が1倍以下であるが、危険回転数通過時の応答倍率は1倍を超えることが予想される。SCSMAピンの本数を減らす、細くする、長くすることなどにより剛性を下げ、固有振動数を下げることにより危険回転数での応答倍率を下げることは可能である。

参考文献

- [1] 倉富剛, 渡辺和樹, 「Cu-Al-Ni系単結晶形状記憶合金を用いた制振装置の開発と特性評価」, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 1H02, (2016).
- [2] 吉野香南, 「オオワシエンジンマウント部 SCSMA 保持器の振動減衰特性」, 平成29年度卒業研究論文, (2018.3).
- [3] 橋本啓吾, 「GG-ATRエンジンの軸系モデリングとその挙動に関する研究」, 平成29年度卒業研究論文, (2018.3).