50 kg 級小型衛星 SOHLA-1 構体外装パネルの振動特性評価^{*1}

Vibration Characteristics Assessment of External Store Panels Furnished in a 50 kg-Class Micro-Satellite “SOHLA-1”

酒 井 健^{*2}・園 田 裕 介^{*2}・垣 内 喝^{*2}・杉 山 吉 彦^{*3}・本 田 尚 義^{*3}
Takeshi SAKAI, Yusuke SONODA, Katsu KAKIUCHI, Yoshihiko SUGIYAMA, Hisayoshi HONDA,
守 部 浩 平^{*4}・千 葉 正 克^{*5}・中 村 揚 介^{*6}
Kohei MORIBE, Masakatsu CHIBA and Yosuke NAKAMURA

Key Words: Vibration Characteristics, Grid Panel, Micro-Satellite, Impulse Test, Magnesium Alloy

Abstract: The paper reports the vibration characteristics assessment of grid panels which were furnished in the main structure of 50 kg-class micro-satellite “SOHLA-1”. Three different types of grid panels with dimensions of 141.1 × 423.0 × 10.0 mm, triangle-grid-type panel, rectangle-grid-type panel and frame-type panel, were investigated to find their dynamics through impulse test. Vibration characteristics were also simulated by a FEM computer soft NASTRAN. Application of flame-retardant type magnesium alloy to the panel was made to confirm the structural effectiveness of magnesium alloy panel.

1. は じ め に

本報告では、50 kg 級スピン安定化小型衛星「SOHLA-1」の構体外装パネルの振動特性に関する評価を報告している^{1, 2)}。「SOHLA-1」は、開発中のコードネームであり、2009 年 1 月 23 日、H-IIA 15 号機によって打ち上げられ、軌道上では「まいど 1 号」とよばれている。

「SOHLA-1」の概観ならびに外装パネルのイメージを、第 1 図に示す。「SOHLA-1」には、機軸対称に 2 式のブームが搭載されている^{3, 4)}。これらのブームは、4 枚ある外装パネル内の、機軸対称に配置された 2 枚の外装パネルに装着されている。ブームの開発においては、ブームを外装パネルに取り付けた状態で、各種の実証試験を実施した。たとえば、振動試験では、外装パネルに搭載した状態でのブームの振動特性を評価して、当該ブームが、打ち上げ中の振動環境に耐え得ることを、実証した^{5, 6)}。この場合、外装パネル（約 620 g）単独の振動特性と、外装パネルとブーム本体（約 560 g）からなる動的システム（約 1180 g）の振動特性との相関性を評価するためにも、外装パネル単独の振動特性を確認しておくことが重要である。外装パネルは、3 形式のパネルが設計された。まず、その設計変更の経過を報告する。「SOHLA-1」の開発のスケジュールの制約から、外装パネルの振動特性は、NASTRAN による振動解析の

結果のみを参考にして、開発が進められた。そこで、本報告では、その後に行った外装パネルのインパルス試験の結果と振動解析の結果とを比較検討した結果を報告する。さらに、「SOHLA-1」搭載のブームの材料は、アルミニウム合金 7075 材であったが、外装パネルの材料として、軽量化の観点から、別途マグネシウム合金を使用して外装パネルを製作した。最後に、アルミニウム合金パネルとマグネシウム合金パネルの振動特性の比較検討を行った結果を報告する。本報告は、今後の中小企業や大学による小型衛星開発の参考資料を提供することを目的とする。

2. 外装パネルの設計

外装パネルは、軽量化ならびに、外装品を取り付ける機能などを考慮して、BBM (Bread-Board Model) から FM (Flight Model) までに、2 回設計変更され、3 形式の“グリッド+薄板”構造のパネルが設計・製作された。材質は、すべてアルミ 7075 材である。設計された 3 形式の外装パネルは、以下のようなものである。

- ① 軽量化を優先した、三角形グリッドのアイソグリッドパネル（外装パネル BBM：パネル I）
- ② 機器搭載用のボスを基準に考えた、四角形グリッドの格子型グリッドパネル（外装パネル EM：パネル II）
- ③ 多層断熱材 (MLI) と配線 (ハーネス) の取り付け・配置など、システム統合を配慮した、グリッドのない枠組薄板一体 (削り出し) パネル (外装パネル PM, FM：パネル III)

外装パネルは、軽量化を優先したアイソグリッド構造様式から、外装品を取り付けるという外装パネルとしての機能ならびにシステム統合の健全性を配慮した構造様式へと

*1 © 2009 日本航空宇宙学会

平成 21 年 4 月 1 日原稿受理

*2 龍谷大学大学院機械システム工学専攻

*3 龍谷大学理工学部機械システム工学科

*4 大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙海洋系専攻

*5 大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野

*6 宇宙航空研究開発機構研究開発本部

第 1 図 「SOHLA-1」の概観図；ブームと外装パネル

第 2 図 3 形式の外装パネル

第 1 表 パネルの諸元

	Panel I	Panel II	Panel III
Grid type	Triangle-grid	Rectangle-grid	Frame
Size [mm]	141.4×423.0×10.0		
Mass [g]	552.6	559.1	620.5

設計変更された。第 2 図に、3 形式の外装パネルの概観を示す。第 1 表に、その諸元を示す。

3. NASTRAN による振動解析

まず、構造解析ソフト Femap with NX NASTRAN を用いて、外装パネルの固有振動数と振動モードの解析を行った。解析モデルは、3DCAD ソフトを使用して作成した。パネルの境界条件として、三周辺固定の場合で考えた。三周辺固定の境界条件は、外装パネルが「SOHLA-1」の 1 次構造に取り付けられる実装支持条件⁴⁾である。三周辺固定の方法は、パネルによって少し異なる。パネル I とパネル II では、3 周辺を 7 点で固定する。パネル III では、第 3 図のように、3 周辺を 8 点で固定する。

3.1 振動解析結果 第 2 表に、振動解析による固有振動数を示す。第 4 図に、パネル III の振動モードを示す。1 次から 3 次までの固有振動数と振動モードのみを示している。以上の解析の結果により、固有振動数と振動モードの計算予測値が得られたので、次にインパルス試験を行い、実験的に振動特性を調べた。

4. インパルス試験

インパルス試験を行い、作製した試験外装パネルの固有振動数と振動モードを調べた。まず、全周辺自由の境界条

第 3 図 三周辺 8 点固定

第 2 表 各パネルの固有振動数：NASTRAN 解析

Nominal order	Natural frequency [Hz]			Mode
	Panel I	Panel II	Panel III	
1	337	307	276	Bend: 1st
2	676	643	643	Bend: 2nd
3	1068	1035	957	Bend: 3rd

第 4 図 パネル III の振動モード：NASTRAN 解析

件の場合に対し、NASTRAN による振動解析とインパルス試験を実施した。この境界条件の場合、振動解析とインパルス試験の結果は、ほぼ一致していることを確認した。ここでは、パネルの境界条件が三周辺固定の場合の結果を報告する。

4.1 試験方法 応答を計測する加速度ピックアップ (PCB-352C22, 0.5 g) の位置を固定し、インパルスハンマーで打撃を加える位置を変化させ、各打撃応答に対する周波数応答関数 (FRF) を求めた。計測点は 15 点とした。また、1 点について 5 回の打撃加振を行い、得られた FRF の平均値をデータとして用いた。ただし、コヒレンス値が 1 から離れている場合、再度試験を行い信頼性の高いデータを取得するようにした。第 5 図に、インパルス試験の試験装置のブロックダイアグラムを示す。第 5 図に示すように、パネルを治具に固定し、防振テーブル上に設置して試験を行った。試験によって得られた FRF から ME'scope を用いてモード解析を行い、固有振動数と振動モードを求めた。

4.2 試験結果 第 3 表に、試験によって得られた固有振動数を示す。第 6 図に、パネル III の振動モードを示す。各パネルにおいて、解析結果と試験結果はほぼ一致していた。したがって、NASTRAN による振動解析の予測結果を、インパルス振動試験によって検証することができた。

5. マグネシウム合金製外装パネル

小型衛星の外装パネルに搭載されるブーム系の開発では、外装パネルの軽量化ならびに振動特性の改善も望まれる。ここでは「SOHLA-1」の開発とは別に、研究としての視点から、軽量化と減衰能の改善を期待して、マグネシウム合

第5図 インパルス試験のブロックダイアグラム

① Test structure, ② Jig, ③ Isolation table (DT-7060M-D(HERZ)), ④ Impulse hammer (PCB-086C01), ⑤ Acceleration pick up (PCB-352C22), 0.5 g, ⑥ Amplifier (PCB-482A16), ⑦ FFT analyzer (Ono Sokki CF-360), ⑧ 2DD FD, ⑨ PC Pro3550DB-SP, ⑩ PC SOTEC NOTE.

第3表 各パネルの固有振動数：インパルス試験

Nominal order	Natural frequency [Hz]			Mode
	Panel I	Panel II	Panel III	
1	339	288	279	Bend: 1st
2	718	623	632	Bend: 2nd
3	1160	1080	948	Bend: 3rd

第6図 パネル III の振動モード：インパルス試験

第4表 Al 合金と Mg 合金の物性値

	Al alloy (7075)	Mg alloy (AMX602)
Density ρ [kg/m ³]	2.80×10^3	1.81×10^3
Elastic modulus E [GPa]	71	45
Specific rigidity E/ρ	2.54×10^7	2.49×10^7

第5表 Al パネル III と Mg パネル III の諸元

	Al panel III	Mg panel III
Size [mm]	141.4×423.0×10.0	
Mass [g]	620.5	384.9

金での外装パネルを検討した。マグネシウム合金製外装パネル（このパネルを Mg パネル III とよぶ）の加工・試験を行い、どのような振動特性を示すのかを調べた。Mg パネル III は、アルミニウム合金製のパネル III（このパネルを Al パネル III とよぶ）と同じ形態と寸法のものを製作した。第4表に、Al 合金と Mg 合金の公称物性値を、参考までに示す。マグネシウム合金は、その密度がアルミニウム合金の 2/3 以下で、より軽量である。マグネシウム合金の縦弾性係数は、アルミニウム合金の 2/3 以下であり、剛性は低い。第5表に、Al パネル III と Mg パネル III の寸法

第6表 Al パネルと Mg パネルの固有振動数と減衰率：インパルス試験

Nominal order	Al panel III		Mg panel III	
	Natural frequency [Hz]	Damping [%]	Natural frequency [Hz]	Damping [%]
1	279	1.66	265	1.17
2	632	0.415	610	0.0889
3	948	0.232	944	0.0927

と質量を示す。パネルの軽量化に限って評価すれば、パネル 1 枚で 236 g の軽量化となり、1 対 2 枚では、472 g の軽量化となる。

同一形状・寸法で Al 合金のパネルと Mg 合金のパネルを作製する場合、固有振動数は、縦弾性係数 E と密度 ρ との比によって決まる。第4表の最下段に示した、Al 合金と Mg 合金の比剛性 E/ρ の値の比較から、Al 合金パネルと Mg 合金パネルは、ほぼ同じ固有振動数を示すことがわかる。

5.1 パネルの加工 マグネシウム合金材料を小型衛星システムへ適用・使用する研究は、東京工業大学の松永らによって行われた。その研究の結果・知見では、マグネシウム合金材料の加工上の問題点が指摘されている^{7,8)}。具体的には、加工費用がかなり高いこと、また、マグネシウム合金を加工できる業者が少なく、加工経験に乏しいこと、などが指摘されている。本報告では、これらの問題点に対する龍谷大学での試みを報告する。本研究では、マグネシウム合金製外装パネルの加工を、龍谷大学のデジタル・クリエイションホールに設置されているマシニングセンタ (NV4000DCG, 森精機製作所) を用いて、学生自身の手で行った。マグネシウム合金加工の際に発生する微細切り屑は、燃焼・火災の危険があり、安全管理上の問題がある⁹⁾。そこで、以下の工夫を行った。

1) マグネシウム合金材料としては、Ca を 1.5~2.5% 含む難燃性マグネシウム合金 (AMX602, ケーエステクノス) を使用する。

2) 切り屑の飛散が考えられるため、側面カバーのある NC 工作機械で加工を行う。

3) 水がかかると水素が発生するため、水溶性切削油を使用せず「ドライ加工」とする。

4) 加工中に加工ワークの上に切り屑が溜まらないように、作業者がその都度切り屑を除去しながら、注意深く断続切削を行う。

5) 切削条件は、超硬エンドミルを使用し、送り速度、回転数はアルミニウムの半分以下、軸方向切込は直径の 1/2 以上、半径方向切込は直径の 1/2 の条件で、細かい切り屑が出ないように加工する。

6) 加工の際はエアコンを使用し、湿度を 30% 以下に抑えて加工する。

7) 切り屑は、他の金属の切り屑と混ざらないように専用保管容器に入れて保管しておき、材料購入業者に引き取りを依頼する。

第 7 図 Al パネルと Mg パネルの固有振動数と減衰率

8) 金属火災用特殊放射器 (MX-20, 初田製作所) を設置する。

加工は、デジタル・クリエイションホールの指導員の管理下で学生が行い、問題なく安全に完了することができた。Mg パネル III は Al パネル III に比べて 38% の軽量化になった。完成加工品は、乾燥材を入れたビニール袋で密封し、ジュラルミンケースに入れて保管した。

5.2 インパルス試験結果 第 6 表に、Al パネル III と Mg パネル III のインパルス試験結果を示す。第 7 図 (a) に、Al パネル III と Mg パネル III の固有振動数を示し、第 7 図 (b) に、減衰率を示す。振動モードは、第 6 図と同じであった。Al パネル III と Mg パネル III を比較すると、固有振動数はほぼ同じであった。減衰率は、Mg パネル III の方が少し小さかった。ここで、減衰率は、臨界減衰に対する比 (%) である。

5.3 電磁加振機による加振試験 Al パネル III と Mg パネル III の加振応答を調べた。第 3 図に示すように、治具に固定されたパネルを電磁加振機に取り付けて、パネルに対して垂直方向に正弦波加振した。加振は、加振振動数範囲 50 ~ 2000 Hz, 掃引速度 1.0 oct/min, 加速度 0.5 Grms で掃引した。その結果、Al パネル III と Mg パネル III の応答ピークの加速度値を比較すると、ほぼ同じであった。

6. ま と め

以上の結果をまとめると、以下のようである。

1) 外装パネルの設計の過程においては、軽量化を優先したアイソグリッド構造様式のパネルから、外装パネルとして外装品を取り付けるという機能、ならびにシステム統合の健全性を配慮した枠組パネル構造様式へと、設計の基本方針が変わっていった。

2) 開発スケジュールの制約から、外装パネルの振動特性

は、NASTRAN による振動解析の結果に基づいて開発を進めたが、その後のインパルス試験の結果、振動解析の予測をインパルス試験によって検証することができた。

3) マグネシウム合金を用いて外装パネルを作製するに際して、マグネシウム合金パネルの加工を外注するのではなく、大学のマシニングセンタを利用して、学生自身が加工する安全な加工方法を確立した。

4) 軽量化と減衰能の向上をめざして、マグネシウム合金材で外装パネルを製作して、振動特性の評価を行った。その結果、軽量化の観点からは、38% の軽量化が可能なが確認された。この場合、固有振動数で評価した剛性の低下は、あまりないことを確認した。しかし、減衰能の向上については、マグネシウム合金の使用による効果は、ほとんどないことを確認した。

以上、これらの技術データが、今後の小型衛星開発において参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 部谷智史, 杉山吉彦, 守部浩平, 千葉正克, 中村揚介: 50 kg 級小型衛星 SOHLA-1 構体外装パネルの振動特性評価, 第 49 回構造強度に関する講演会講演集, 2007, pp. 116-118.
- 2) 園田裕介, 垣内 喝, 酒井 健, 杉山吉彦, 本田尚義, 古川琢也, 藤本卓也, 千葉正克, 中村揚介: 50 kg 級小型衛星 SOHLA-1 構体外装パネルの振動特性, 日本機械学会関西支部第 84 期定時総会講演会論文集, 2009, p. 14-6.
- 3) 白子正高, 荒木孝二, 杉山吉彦, 本田尚義, 中村揚介, 岩丸康範, 棚橋秀行: 50 kg 級小型衛星搭載ブームの開発と振動試験, 日本航空宇宙学会論文集, 55 (2007), pp. 406-410.
- 4) 中村真人, 古川琢也, 千葉正克, 大久保博志, 秋田 剛, 杉山吉彦, 中村揚介, 今村博昭, 梅原伸仁: 50 kg 級小型衛星構体の振動低減対策, 日本航空宇宙学会論文集, 56 (2008), pp. 244-247.
- 5) Sakai, T., Kakiuchi, K., Sonoda, Y., Sugiyama, Y., Honda, H., Nakamura, Y., Nakaya, K. and Kawamae, T.: Vibration-Testing-Based Development of Space Boom for a 50 kg-Class Micro-Satellite, 15th International Congress on Sound and Vibration, Daejeon, Korea, T0352, E-Proceedings, 2008, pp. 1973-1980.
- 6) 垣内 喝, 酒井 健, 園田裕介, 杉山吉彦, 本田尚義, 中村揚介, 岩丸康範, 中谷幸司, 河前拓郎: 50 kg 級小型衛星搭載ブームの開発と振動試験, 第 50 回構造強度に関する講演会講演集, 2008, pp. 184-186.
- 7) 松永三郎, 古谷 寛, 小木曾望: Mg 合金材料を使用した小型軽量宇宙システムの開発から得た知見, 「高性能マグネシウムの新展開—21 世紀の超軽量金属材料—」平成 13 年度科学研究費補助金特定領域研究 (B) に係る研究経過等の報告書, 2002, pp. 64-68.
- 8) 松永三郎, 古谷 寛, 澤田弘宗: 小型宇宙システムへのマグネシウム合金の適用効果, 第 44 回構造強度に関する講演会講演集, 2002, pp. 232-234.
- 9) 日本塑性加工学会: マグネシウム加工技術, コロナ社, 東京, 2004.