

第 2 章 構造解析

2.1.目的

FITSAT-1 の外郭構造が、打ち上げ時の加速度等によって発生する局所的な応力、及び温度変化によってビスに発生する引っ張り応力に対して、十分な強度を有することを明らかにする。解析には SolidWorks2011 を用いた。

2.2.適用文書

(1)JMX-2011303B: JEM 搭載用小型衛星放出機構を利用する小型衛星への構造・フラクチャコントロール計画書

(2)JMX-2010292: JEM ペイロードアコモデーションハンドブック Vol.8

2.3.解析

2.3.1 構造の概要

図 2.1.1 に「外郭躯体(C)」及び「支柱(P)」, 図 2.1.2 に「上板(U)」及び「底板(B)」, を示す。C は U または B と 4 本の支柱 (P) を介して結合されている。U および B は, により合計 16 本のビス (M3, 上面 : 2 本組×4 箇所, 下面 : 2 本組×4 箇所。図 2.1.8 の+Z Plane および-Z Plane において赤丸で囲まれた部分。) で P と締結されている。Z 方向の荷重は P も一部受け持つが, この計算では P はこの荷重を受け持たないとして計算し, 安全側の評価とした。

一本の P と C は合計 4 本のビス (M3) で締結されている。従って, C と 4 本の P は合計 16 本のビスで締結されている。これらのビスは止ビスとして用いられているので, 構造解析の対象とはしていない。

2.3.1.1 外郭躯体(C)

外殻躯体(C)は外形寸法 100mm×100mm, 厚み 3mm, のアルミ押し出し角パイプを基に製作した。材質は A6063-S-T5 である。軽量化のため角部の 9mm 幅を残して 4 面とも 1.5mm の厚みまで研削されている。溶接等の継ぎ目がない一体構造である。

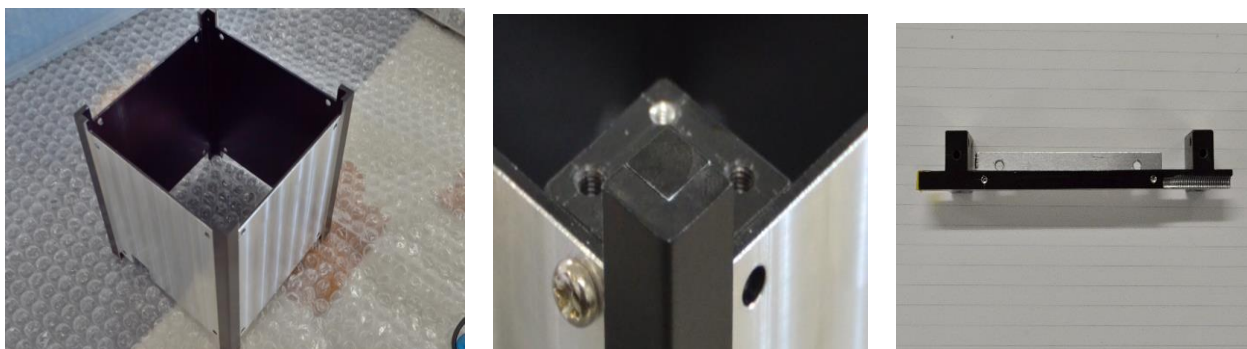


図 2.1 外郭躯体(C) 支柱(P)

2.3.1.2 上板(U)及び底板(B)

上板と底板は共に 2mm 厚のアルミの板であり, 材質は A6061-P-T6 である。100mm 角の板材から 4 隅を図 2.2 のように切り取り, この部分が外郭躯体(C)に当たっているため, U 及び B に作用す

る荷重のうち X 及び Y 方向成分はこの部分で受け止めるのでビスにせん断応力は作用せず，引っ張り応力のみが作用する．

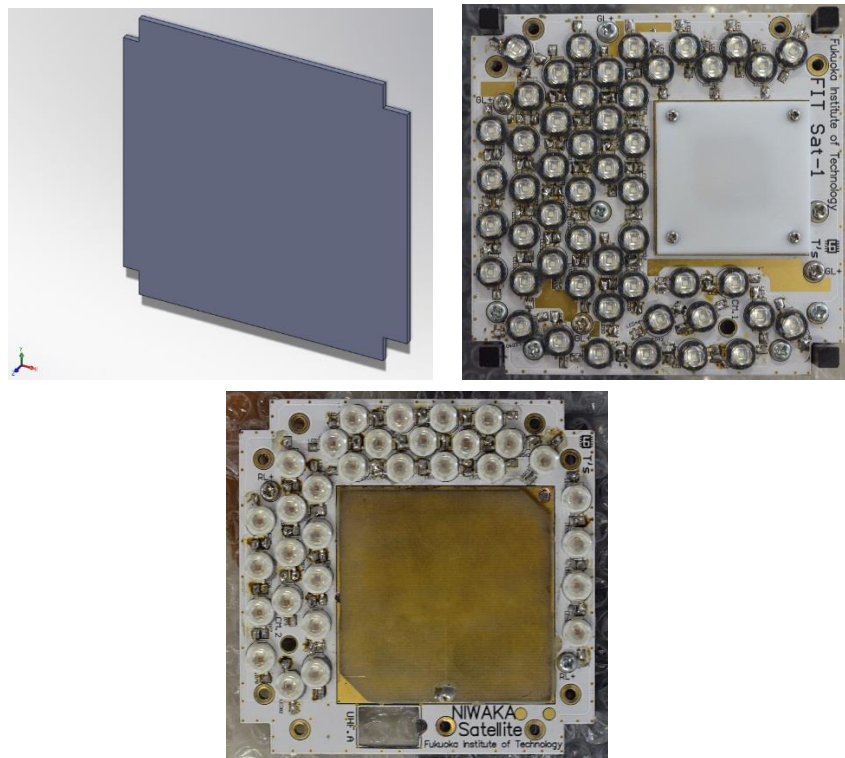


図 2.2 上板(U)及び底板(B) (厚さ 2mm)

2.3.2 解析

解析は SolidWorks2011 の機能を用いて行った．SolidWorks2011 における安全率の定義は，安全率＝終極強度／最大応力である．

2.3.2.1 外郭躯体

材料の終極強度を $\sigma_{tu} = 185$ (N/mm²)とする．(5 項表 1 参照)

(1) X 方向に最大加速度が働くとき

$$X \text{ 軸方向の荷重} = \text{終極安全係数} \times \text{衛星の質量} \times 81.8 \text{m/s}^2,$$

より最大荷重は

$$2.0(-) \times 1.33(\text{kg}) \times 81.8(\text{m/s}^2) \doteq 218(\text{N})$$

となる．

ここで，終極安全係数 2.0 は，適用文書(1)表 7.1-1 に規定されている，構造強度を解析のみで検証する場合に適用される安全係数である．また，81.8m/s²は，適用文書(2)に規定される打上げ時の加速度であり，軌道上加速度はこれに包絡される．

外郭躯体の X 方向に荷重 218N をかけた時の最大応力は 40.4N/mm^2 となり, 材料の終極強度 σ_{tu} から求めた安全余裕(MSu)は, 3.58 となる.

$$MSu = 185 / 40.4 - 1 = 3.58$$

なお, この計算での拘束条件は, レール両端の 4 箇所 の 8.5mm 角の部分のみ (レールの中間の側面では支持しない) を固定している. 計算結果を図 2.1.3 に示す.

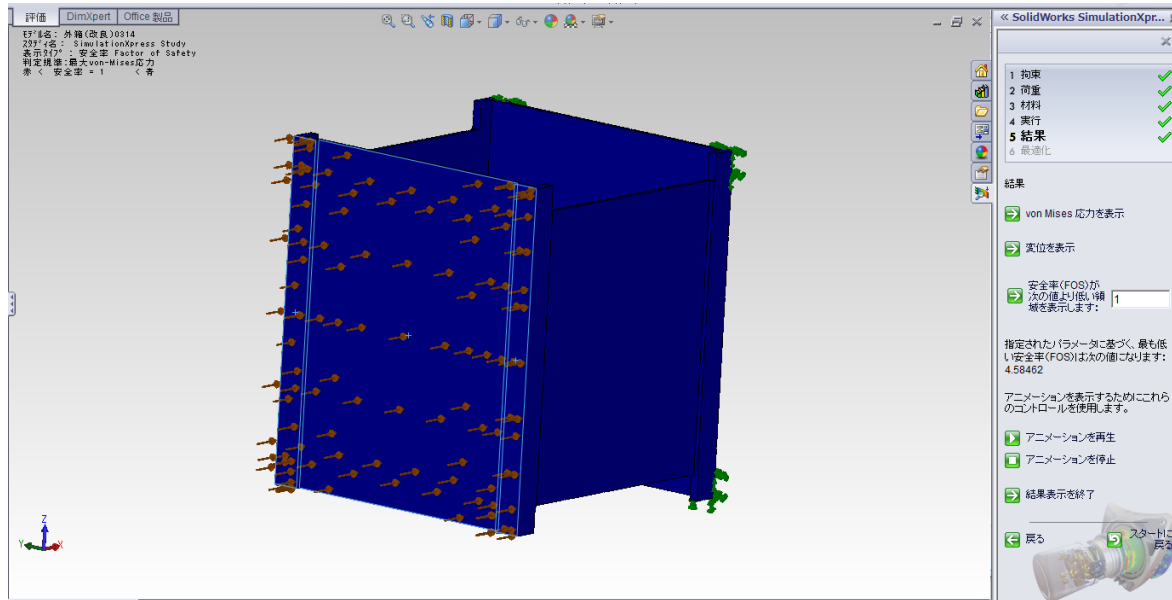


図 2.3. X 軸方向に最大加速度が働くときの計算結果

(2) Y 方向に最大加速度が働くとき

前項と同様にして, 荷重 218N をかけた時の最大応力は 41.1N/mm^2 となり, 材料の終極強度 σ_{tu} から求めた安全余裕(MSu)は, 3.50 となる.

$$MSu = 185 / 41.1 - 1 = 3.50$$

この時の計算結果を図 2.4 に示す. この計算での拘束条件は, レール両端の 4 箇所 の 8.5mm 角の部分のみ (レールの中間の側面では支持しない) を固定している.

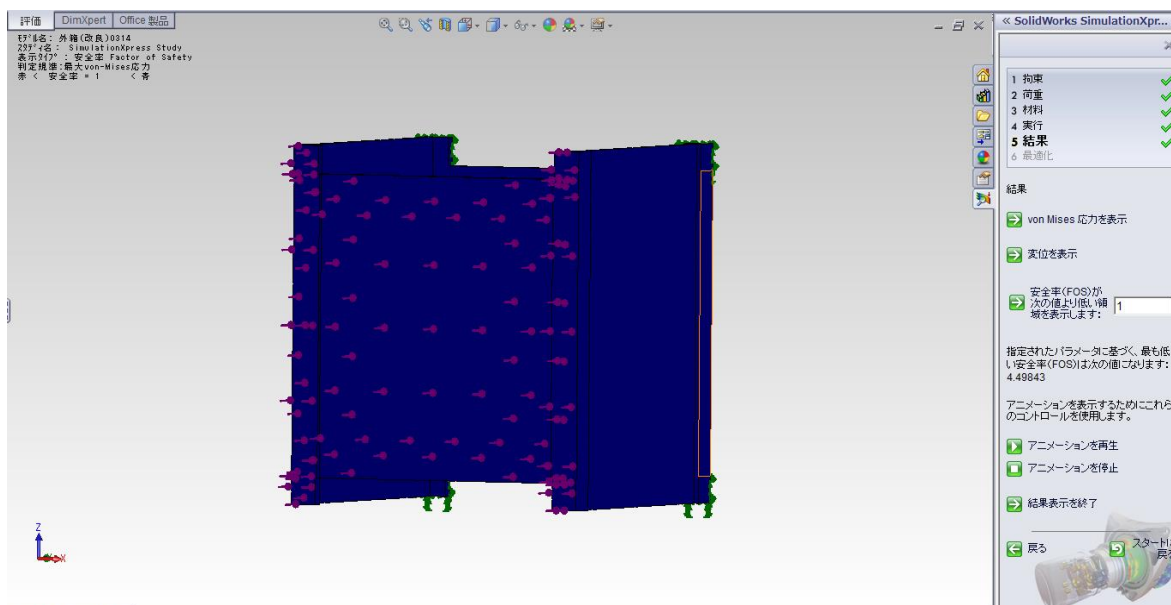


図 2.4. Y 軸方向に最大加速度が働くときの計算結果

(3) Z 方向に最大加速度が働くとき

Z 軸方向の荷重 = 終極安全係数 ×

(衛星の質量 × 衛星の個数(3) × 81.8m/s² / レールの本数 + レール拘束荷重)

となる。

ここで衛星はもっとも荷重を受ける位置(すなわち最下層)にあると考え、衛星 3 個分の荷重を受けるとする。1 本の柱にかかる荷重は、

$$2.0 \times (1.33(\text{kg}) \times 3/4 \times 81.8\text{m/s}^2 + 46.6(\text{N})) \div 255(\text{N})$$

となる。

ここで、46.6N は、適用文書(2), 2.1.9(2)項に規定される衛星放出機構側のプリロードボルトおよびメインスプリングからレール 1 本あたりにかかる最大荷重である。

荷重 255N をかけた時の最大応力は 25.4N/mm² となり、材料の終極強度 σ_{tu} から求めた安全余裕(MSu)は、6.28 となる。

$$MSu = 185 / 25.4 - 1 = 6.28$$

この計算での拘束条件は、4 本の柱の荷重のかかる反対側の面を固定している。

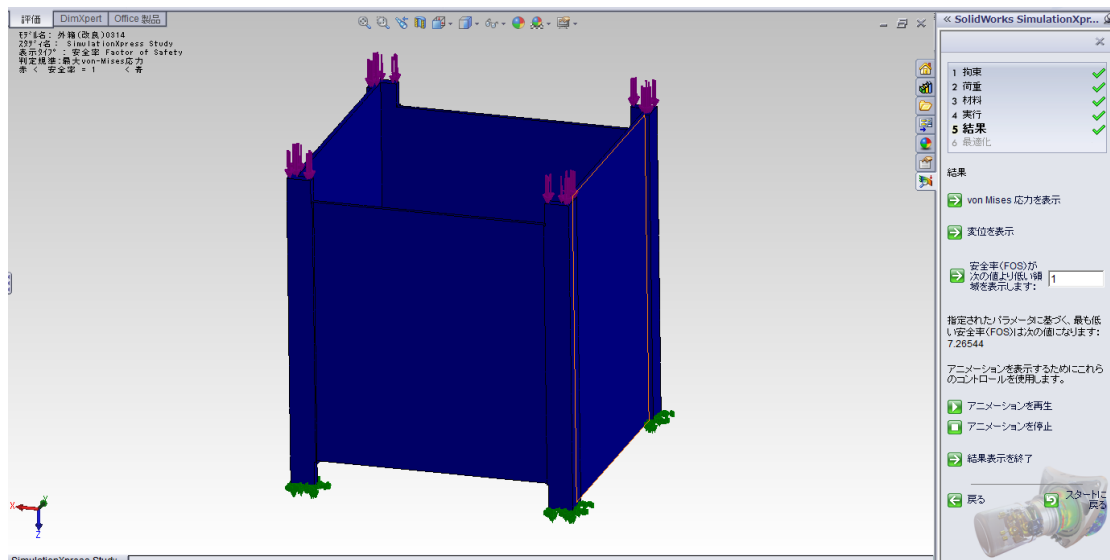


図 2.5 Z 軸方向に最大荷重が働くときの計算結果

2.3.2.2 上板・底板

材料の終極強度を $\sigma_{tu} = 310$ (N/mm²)とする。(5 項表 1 参照)

(1)上板

安全のため、衛星のすべての荷重が均等に上板にかかるを考える。上板にかかる最大荷重は、
最大荷重=安全係数×衛星の質量×81.8(m/s²),

となり

$$2.0 \times 1.33(\text{kg}) \times 81.8(\text{m/s}^2) \doteq 218(\text{N})$$

上板に荷重 218N をかけた時の最大応力は 42.5N/mm² となり、材料の終極強度 σ_{tu} から求めた安全余裕(MSu)は、6.29 となる。

$$\text{MSu} = 310 / 42.5 - 1 = 6.29$$

この計算での拘束条件は、実機に合わせ一片を除く周辺部を支持している。この時の応力分布の様子を例として図 2.1.7 に示す。

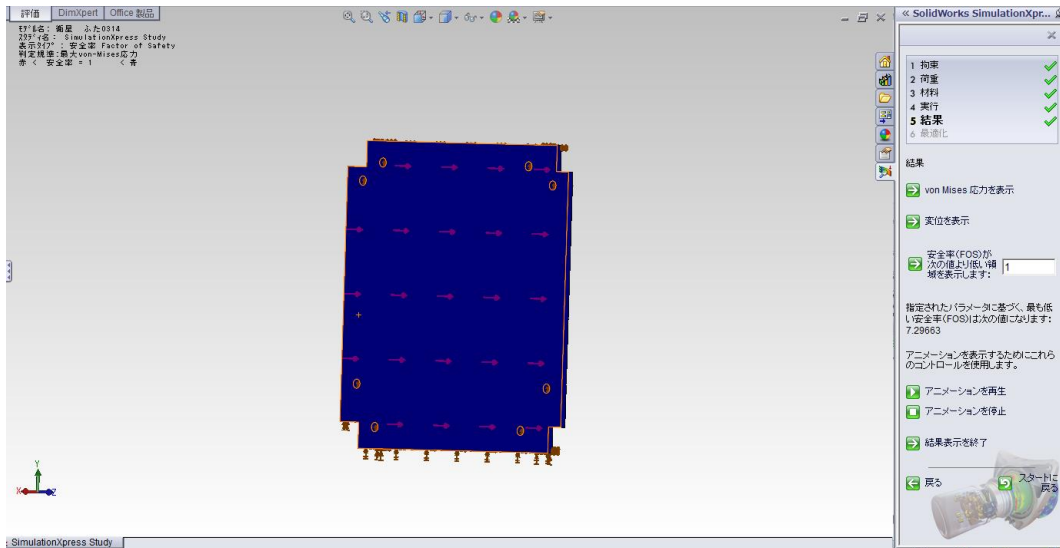


図 2.6. 上板に最大荷重(218N)がかかるときの計算結果

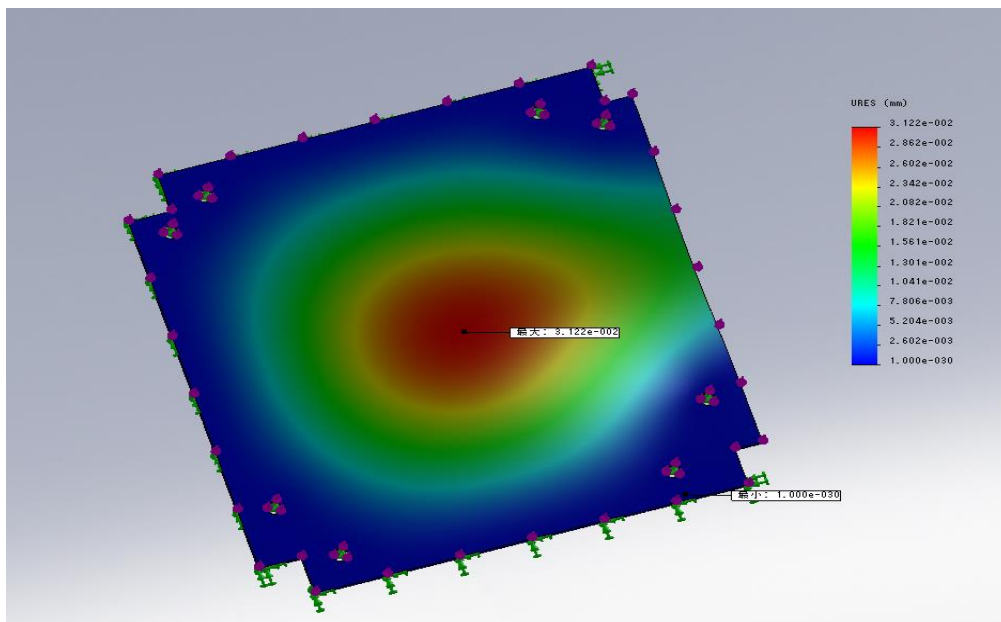


図 2.7. 上板に最大荷重(218N)がかかるときの応力分布

(2)底板

前項と同様に計算を行い安全が確認された (結果は省略)。

2.3.2.3 ビス類

上板Uを4本の支柱に取り付けている8本のビスについて解析を行なう。底板については、同様の計算なので省略する。ビスの配置を図 2.1.8 に示す。解析対象は、+Z plane および-Z plane におい

All screws in red circles are M3 nojilock.

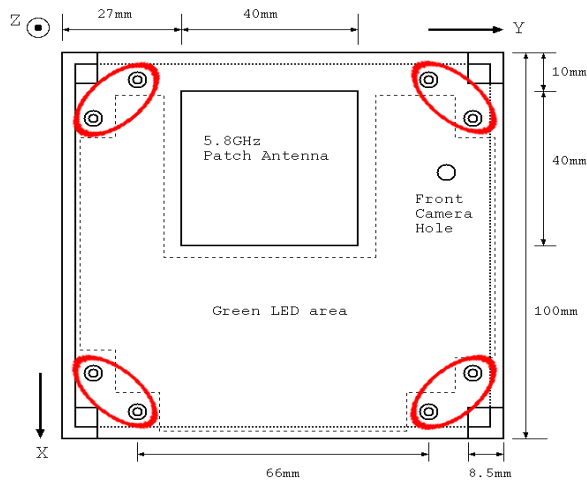


Figure 1: +Z plane

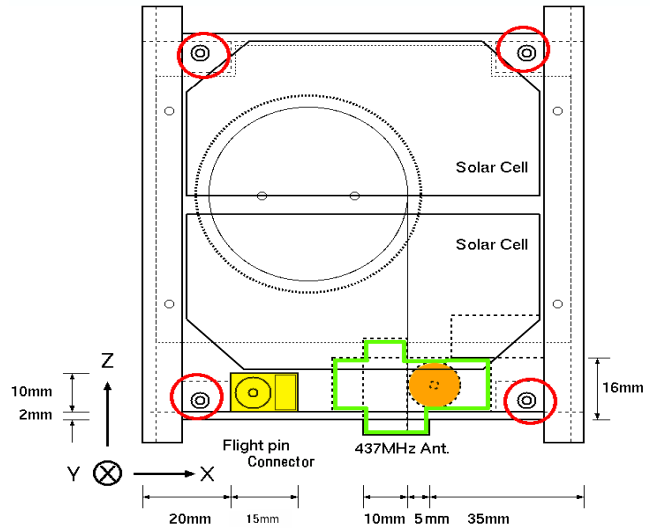


Figure 3: -Y plane

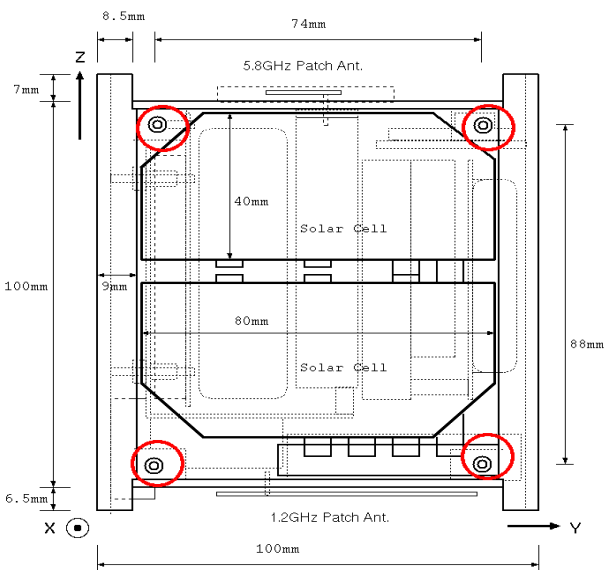


Figure 2: ±X, +Y plane

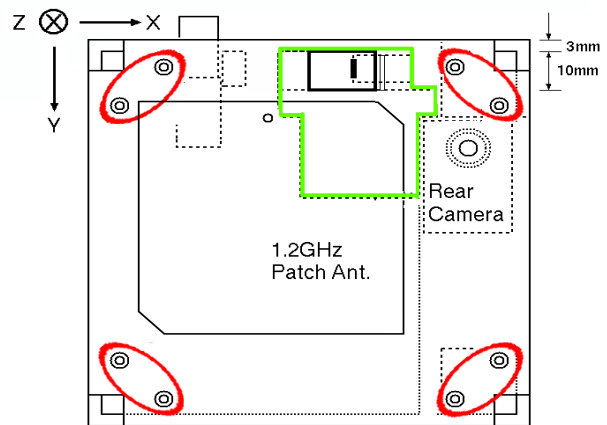


Figure 4: -Z plane

て赤丸で囲まれたビスである。

図 2.8. ビス取り付け位置

(1)取り付けビスと上板U間で発生する熱応力

ビス取り付け部の断面を図 2.1.8 に示す。

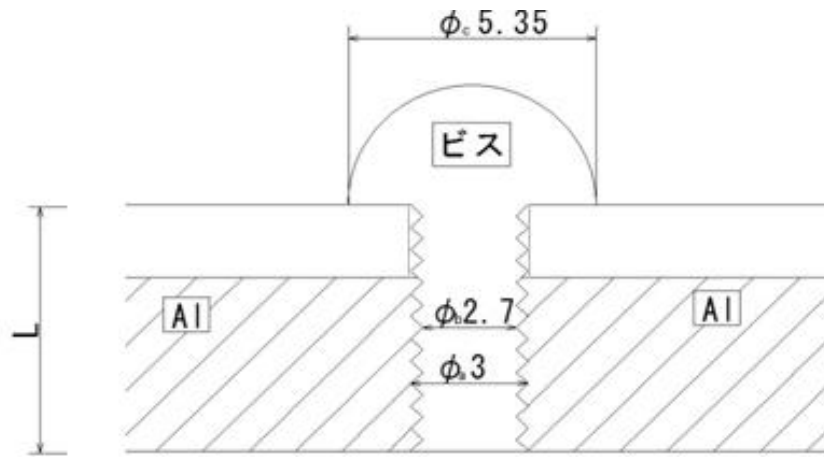


図 2.9. ビス取り付け断面

L : 通常時の長さ(mm)

L' : 温度上昇後の長さ(mm)

E:ヤング率(N/m²) α:熱膨張率(1/K)

ビスの物性質値(SWCH16A) E₁=2.1×10¹¹ α₁=1.05×10⁻⁵

上板の物性質値(A6061) E₂=6.9×10¹⁰ α₂=2.30×10⁻⁵

ビスのねじ山径: φ_a=3(mm)

ビスのねじ谷径: φ_b=2.7(mm)

ビス頭の径: φ_c=5.35(mm)

添え字 1 及び 2 はそれぞれビス及びアルミ板を示す.

以下に計算結果を示す.

温度変化の範囲は,

温度変化量 $T = (273 + 60) - (273 + 20) = 40$ (K)

材料の終極強度を $\sigma_{tu} = 490$ (N/mm²) (5 項表 1 参照)

とする.

ビスのひずみ ε_1 と上板のひずみ ε_2 は

$$\varepsilon_1 = \frac{L' - L(1 + \alpha_1 T)}{L} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{L(1 + \alpha_2 T) - L'}{L} \quad (2)$$

と表され,(1)式と(2)式により

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \frac{L' - L(1 + \alpha_1 T)}{L} + \frac{L(1 + \alpha_2 T) - L'}{L} = (\alpha_2 - \alpha_1)T = 6.25 \times 10^{-4} (= A) \quad (3)$$

と表すことが出来る.

ビスに作用する引っ張り力とアルミの上板に作用する圧縮力のつり合より,

$$\varepsilon_1 E_1 S_1 = \varepsilon_2 E_2 S_2 \quad (4)$$

となる.

(4)式より

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{E_2 S_2}{E_1 S_1} = \frac{6.9 \times 10^{10} \times \frac{(5.35^2 - 3^2)\pi}{4}}{2.1 \times 10^{11} \times \frac{2.7^2 \pi}{4}} = 0.88 (= B) \quad (5)$$

式(3)と式(5)よりビスのひずみ ε_1 は

$$\varepsilon_1 = \frac{AB}{B + 1} = 2.93 \times 10^{-4}$$

となり, ビスにかかる応力 σ_1 は

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 E_1 = 61.5 \quad (N/mm^2)$$

と, 算出される.

(2)ビスに作用する引っ張り応力の推定

ビスはメーカーの推奨値である 0.3Nm で締め付けられているとする. また実験を行ったところ 2.5Nm で締め付けても破断しなかった. この結果より, 締め付けトルク 0.3Nm の時のビスに作用する引っ張り応力 σ_2 は

$$\sigma_2 = \sigma_{tu} \times \frac{0.3}{2.5} = 58.8 \quad (N/mm^2)$$

と, 算出される.

(3)全てのビスが正常に取り付けられている場合

まず上板には, 終極安全係数 (2.0) を考慮し, 一様荷重で 218N かかっていると考える. 従って,

この上板はビスが4隅に2本ずつ計8本で支えられており、1隅につき54.5Nずつ荷重がかかっている。

部品	材料	制限荷重 (N/mm ²)	終極強度 (N/mm ²)	終極 安全余裕	NOTE
い こ に る の ス 有 断 積					る と な こ ビ の 効 面 は

5.7mm²であり、1本のビスにかかる荷重は27.25Nの荷重がかかっている。

ビスの引っ張り応力 σ_3 は

$$\sigma_3 = \frac{27.25}{5.7} = 4.8 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

よって全応力 σ_4 は

$$\sigma_4 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 125 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

また安全余裕(MSu)は

$$\text{MSu} = \frac{\sigma_{tu}}{\sigma_4} - 1 = 2.92$$

と、算出される。

(4) どれか1本のビスが破断し欠損している場合

この場合は、欠損したとビスとペアで組みつけられているビスに、前項(3)に対して2倍の荷重が上板から作用する一方、Fail-Safe 評価時に考慮すべき終極安全係数は1.0であるため(適用文書(1)による)、結果的に考慮すべき応力 σ_3 は変わらない。

したがって、MSuの値は前項(3)と同じく、MSu=2.92となる。

2.4.総合評価

以上の結果より、FITSAT-1の外郭構造体は打ち上げ時の加速度81.8m/s²に対して十分な強度を持ち、かつ-15度から+60度までの熱変動に対して発生する熱応力の増加に対して取り付けビスが破壊させることはない。

表2.1に、各部の安全余裕を示す。

主構造 (外部躯体(C))	A6063-S-T5	20.6	185	3.50	
主構造 (上板(U)),底板 (B))	A6061-P-T6	21.3	310	6.29	
ビス(主構造締 結)	SWCH16A	125	490	2.92	
		125	490	2.92	Fail-Safe 評価

(※1)終極安全係数は2.0とした。但しネジの Fail-Safe 評価は、終極安全係数を1.0とした。

(※2)表中のネジの制限荷重(応力)には、終極安全係数が考慮されている。

表 2.1 安全余裕一覽