

宇宙ステーション搭載機器の構造解析

福山 俊一 ^{*1}

Fukuyama Shunichi

国際宇宙ステーション (ISS) に搭載される機器の開発 (設計、製造) をしているメーカーは、開発製品に対し、構造破壊に対する耐性を有していることを検証する必要がある。当社では、宇宙ステーション搭載機器の構造要求に対して、各種構造解析技術を用いて検証を実施している。

本稿は、宇宙ステーション搭載機器の構造解析手法について紹介する。

キーワード：宇宙ステーション、ISS、構造解析、FEM

1. はじめに

国際宇宙ステーション (以下、ISS という) に搭載される機器はさまざまな環境にさらされ、打上げ時、軌道上など (詳細は 2 章に示す) で、加重負荷を受ける。

これらのすべての構造的な負荷に対し、剛性・強度的に問題ないことを検証する必要がある。

宇宙ステーション搭載機器の場合は、基本的に修理ができないため、構造部品が曲がったり、破断したりすることは、すなわちミッションの実行が不可能となる可能性が高く、場合によっては ISS やクルーなどすべてを失うケースもあり得る。

検証には解析検証と試験検証があるが、本稿では解析検証について述べる。近年は、解析の精度が高まり、コスト、スケジュールの観点で試験検証から解析検証に置き換わる開発も多く、構造解析の重要性は増している。

構造解析フローを以下に示す。

① 荷重条件の確認・算出

対象となる機器に要求される荷重条件を確認

し、負荷荷重を算出する。

② モデル化

対象となる機器の構造数学モデルを構築する。

③ 剛性・強度の計算・評価

構造数学モデルを用いて、固有振動数、および応力を計算し、剛性・強度を評価する。

以下に上記フローに従った宇宙ステーション搭載機器の構造解析の流れを紹介する。

2. 荷重条件

荷重条件は、当該機器に負荷されると想定されるあらゆる荷重を設定する。

2.1 打上荷重

(1) 準静的加速度 QS

重力加速度やロケットが打ち上げられる際に初速ゼロから所定の速度に達するまでの加速度。

機器ごとに打ち上げられる宇宙機によって規定される。

*1：制御システム事業部 防衛・宇宙システム部 課長

(2) ランダム振動加速度 R

打上げ時のエンジンなどから発生する音響、および振動が、ロケット構造やフェアリング壁を伝わって、機器の取付面まで伝達される振動加速度。

機器により取付位置や取付方法が異なるため、それぞれの条件が規定される。ランダム振動加速度の要求例を図1に示す。

構造解析ではランダム振動加速度を、等価静加速度に置き換えて評価する。

置き換えには、機器の固有振動モードにより、以下の2種類の方法⁽¹⁾を用いる。

参考に固有振動モードの例を図2に示す。

方法1：Miles の式

固有振動モードの有効質量比が集中して、

1自由度系と仮定できる場合。

$$RVLF = 3 \times \sqrt{\frac{\pi}{2} \times Q \times f \times PSD}$$

$RVLF$: 等価静加速度

Q : 応答倍率

f : 固有振動数

PSD : パワースペクトル密度

方法2：Mass Participation 法

固有振動モードの有効質量比が分散して、多自由度系と考えられる場合。

$$RVLF_i = 3 \times \sqrt{\frac{\pi}{2} \times Q \times f_i \times PSD_i}$$

($f_i < 2000$ の場合)

$RVLF_i = 3 \times Grms$ ($f_i > 2000$ の場合)

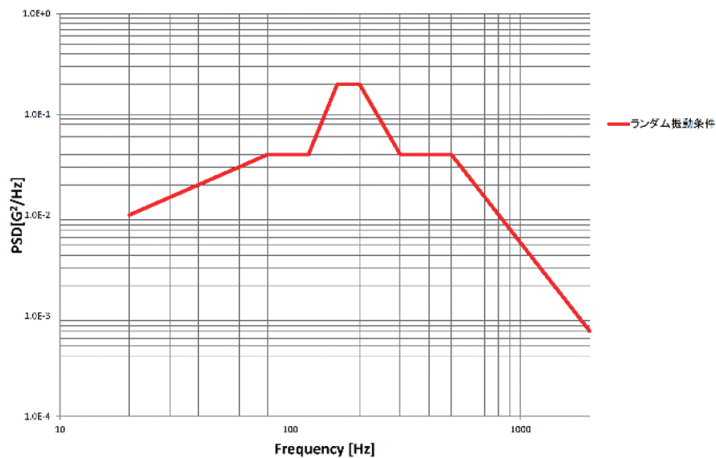


図1 ランダム振動条件

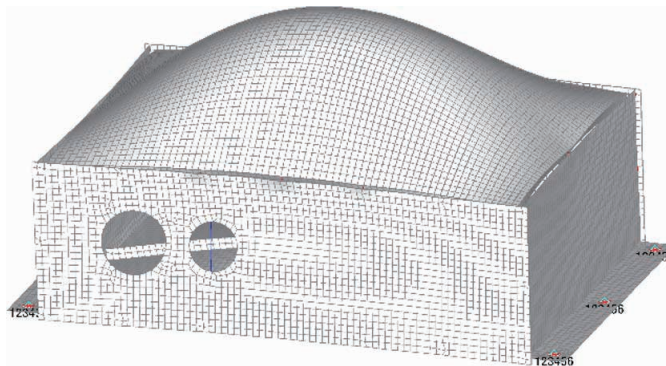


図2 固有振動モード図 (1次)

$$RVLF_{i-MW} = RVLF_i \times EMR_i$$

$$RVLF = \sqrt{\sum_{i=1}^n (RVLF_{i-MW})^2}$$

$RVLF$: 等価静加速度

Q : 応答倍率

f : 固有振動数

PSD : パワースペクトル密度

$Grms$: オーバーオール実効値

EMR : 有効質量比

i : 固有振動モード

(3) 正弦波振動加速度 S

ロケットの推力変動などによる低周波振動加速度。

機器の1次固有振動数が100 [Hz] を超える場合などは、影響が小さいため無視できる。

(4) 複合荷重

(1)～(3)で算出された各荷重を表1に示す式⁽²⁾を用い複合荷重として求め、同時負荷して強度評価を実施する。

2.2 軌道上荷重

軌道上荷重とは、ISS 到着後に機器に負荷される荷重である。

機器ごとにさまざまな荷重が想定され、各機器の使用状況により規定される。

代表的な軌道上荷重を紹介する。

(1) 船内クルー荷重

ISS の与圧された船内空間で使用する機器などにおいて、船内で活動するクルーにより操作される荷重や誤ってクルーが衝突した際などに負荷される荷重。

(2) 船外クルー荷重

ISS の曝露環境(船外)で使用される機器などにおいて、船外活動するクルーにより操作される荷重や、誤ってクルーが衝突した際などに負荷される荷重。

(3) 軌道上加速度

ISS の軌道変更する際に、リブースト(軌道高度上昇)などにより ISS 全体に負荷される加速度。

(4) ロボットアーム操作荷重

曝露環境で ISS のロボットアームで運搬される機器などにおいて、ロボットアームから負荷される荷重。

(5) ロボットアーム衝突荷重

曝露環境で ISS のロボットアームで運搬される機器などにおいて、ロボットアームが故障して暴走などが発生した際に、ロボットアームがぶつかったり、運搬されている最中に別の場所にぶつかったりした時に受ける荷重。

2.3 その他の荷重

地上試験で負荷される荷重や、トラック/飛行機などで輸送される際に負荷される荷重、クレーンなどで吊り上げられる際に負荷される荷重なども考慮し、荷重条件を設定する。

3. 構造解析

構造解析は、FEM (Finite Element Method : 有限要素法)を用いる。

FEM とは、連続体を要素で分割し、節点同士の関係を行列(マトリクス)化して解く手法である。

表1 複合荷重

Load Set	X Axis	Y Axis	Z Axis
1	$\pm QS_x \pm \sqrt{S_x^2 + R_x^2}$	$\pm QS_y$	$\pm QS_z$
2	$\pm QS_x$	$\pm QS_y \pm \sqrt{S_y^2 + R_y^2}$	$\pm QS_z$
3	$\pm QS_x$	$\pm QS_y$	$\pm QS_z \pm \sqrt{S_z^2 + R_z^2}$

3.1 構造数学モデル

一般的には3D CADモデルなどから、プリポストソフトを使用してメッシュ作成する。

要素は梁要素、板要素、ソリッド要素などさまざまな種類があり、使用するソルバー（解析ソフト）や解析する機器の形状などにより使い分けしている。

構造数学モデルの例を図3に示す。

3.2 剛性・強度評価

構造数学モデルに、2章で設定した荷重条件を負荷し、計算を行う。

宇宙ステーション搭載機器の静解析においては、ソルバーはNASTRANが一般的である。

剛性については、固有値解析により算出された固有振動数が要求より高いことに基づき評価する。

強度については、静解析により算出された応力を評価する。ほとんどの場合、von-Mises 応力で評価する。

応力コンタ図の例を図4に示す。

FEMで算出された応力×安全係数と、材料の許容応力を比較して、MSを算出する。

MSとは、Margin of Safetyの略で安全余裕である。以下の式⁽³⁾により、MSが0以上となれば、強度的に問題ない評価となる。

すべての構造部品について、MSが0以上となることを確認する。

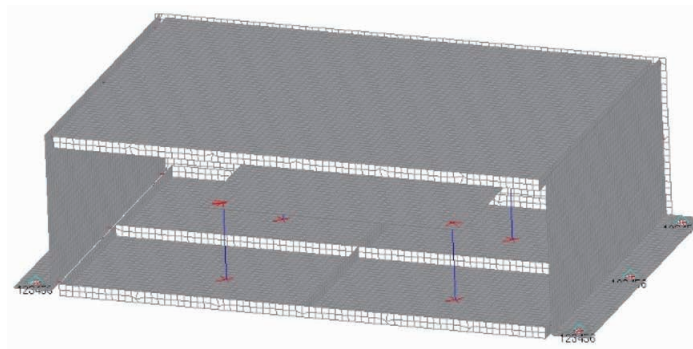


図3 構造数学モデル

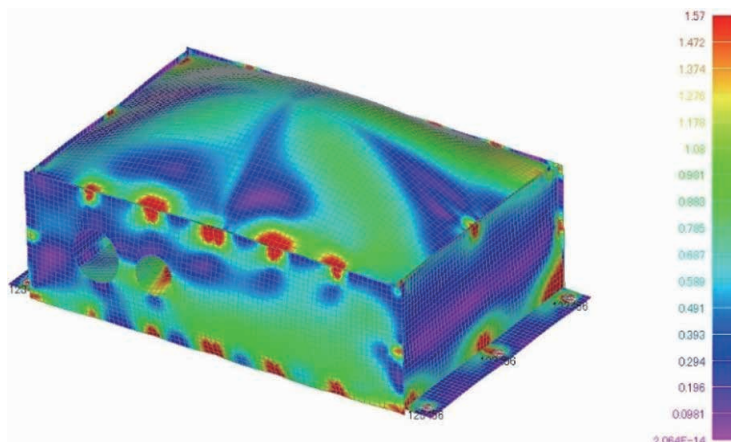


図4 応力コンタ図

$$MS_y = \frac{Fty}{\sigma \times SFy} - 1$$

MS_y : 降伏安全余裕

Fty : 材料の降伏応力

σ : 応力 (計算結果)

SFy : 降伏安全係数

$$MS_u = \frac{Ftu}{\sigma \times SFu} - 1$$

MS_u : 終極安全余裕

Ftu : 材料の破壊応力

σ : 応力 (計算結果)

SFu : 終極安全係数

ファスナ (ボルトなど) については、プリロード (予張力)、外力、熱変形荷重などを考慮し、強度が問題ないことを確認する。

4. まとめ

宇宙ステーション搭載機器における構造解析についての紹介を行った。

宇宙ステーション搭載機器においては、強度・

剛性を満足するだけでなく、それらを維持しつつ、より軽量の機器とすることも構造設計としては重要である。

今後も構造設計・解析に関する最新技術を幅広く利用して、日本の宇宙開発に貢献してゆく。

参考文献

- (1) SSP52005 : Payload Flight Equipment Requirements and Guidelines for Safety-Critical Structures, http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/SSP_52005C_3094/
- (2) SSP30559 : Structural Design and Verification Requirements -International Space Station, http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/SSP_30559C_28730/
- (3) SSP52005 : Payload Flight Equipment Requirements and Guidelines for Safety-Critical Structures, http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/SSP_52005C_3094/



制御システム事業部
防衛・宇宙システム部
課長

福山 俊一

TEL. 042-523-8319

FAX. 042-523-8320