コンポーネント熱真空試験におけるサイクル数の緩和条件とその技術根拠の紹介

1.概要

FY28に制定予定の宇宙機一般試験標準のA改訂にて、コンポーネント熱真空試験および熱サイクル試験の受入試験におけるサイクル数の緩和条件が新たに追加される[1][2]。本ポスターではその緩和条件の紹介を行う。またその緩和条件の技術根拠を得るに当たり実施した分析・評価について、他の環境試験や宇宙機以外にも適用可能な手法として紹介する。

2.コンポーネント熱真空試験要求

- 宇宙機一般試験標準（JERG-2-130）では、QT・PFT・ATのコンポーネント熱真空試験に対して、8サイクルを要求している。
- FY28に発行される宇宙機一般試験標準A改訂では、これまでのJAXAの宇宙機開発実績を踏まえ、開発実績を多く積んだ機器に対し、ATのサイクル数緩和条件を新たに規定する予定である。

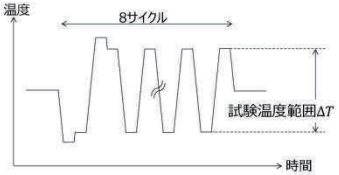

Fig.1 コンポーネント熱真空試験プロファイル

3.サイクル数の緩和条件

- コンポーネントAT熱真空試験または熱サイクル試験については、以下に示すフローに従い、サイクル数を4サイクルに削減することができる。
- サイクル数の削減に係る評価を行うためには、評価対象コンポーネントに関して、次の情報を要する。
  ① 品質および信頼性に係る管理プログラムの適用状況
  ② 評価対象コンポーネントの試験温度範囲
  ③ 評価対象コンポーネントと同一設計の機器の開発実績（試験温度範囲、不具合の発生状況）

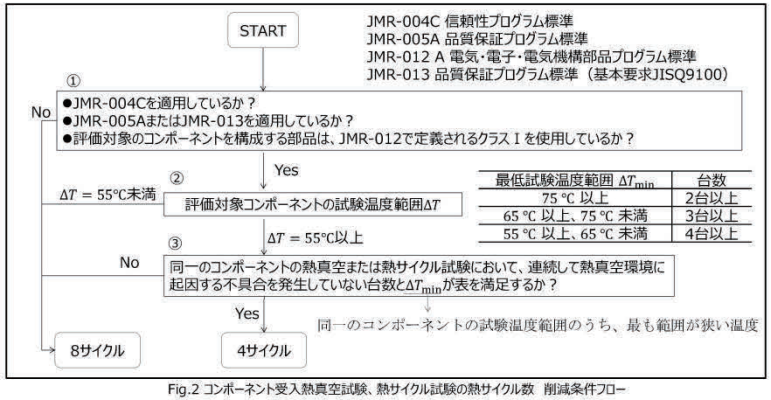

Fig.2 コンポーネント受入熱真空試験、熱サイクル試験の熱サイクル数 削減条件フロー

サイクル数の評価例

例1

台数	モデル	ΔT	不具合	
1	PM	85	無し	
2	FM	75	有り	
3	FM	75	無し	
4	FM	75	無し	
5	FM	75		←評価対象

最低試験温度範囲が75℃で、連続して不具合が発生していない台数が2台あるので、5台目のサイクル数は4サイクルに削減可能。

例2

台数	モデル	ΔT	不具合	
1	PM	75	無し	
2	FM	65	無し	
3	FM	65	無し	
4	FM	65		←評価対象

最低試験温度範囲が65℃で、連続して不具合が発生していない台数が3台あるので、4台目のサイクル数は4サイクルに削減可能。

4.緩和条件の根拠

同一設計のコンポーネントの熱真空試験結果が以下の通りであるとき、そのコンポーネントが熱真空試験で検出可能な初期不良を有していない確率（スクリーニング率）はFig.3の通りに推定される。

- N台のコンポーネントが、8サイクルの熱真空試験を不具合なしで連続して通過している。
- N+1台目が4サイクルの熱真空試験を、不具合なしで通過した。

8サイクルの熱真空試験を不具合なしで通過した台数Nが、Fig.2のフローに示す台数以上の場合、スクリーニング率は0.999以上になる。

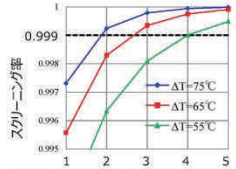

Fig.3 スクリーニング率と試験実績の関係

5.スクリーニング率の定量化

スクリーニング率を定量化するモデルの理論背景と、そのモデルのコンポーネント熱真空試験への適用例を示す。

5.1 モデルの理論背景

試験で初期不良が検出されなかった場合、その機器が初期不良を有している確率は、ベイズの定理を用いると次の通りに更新される[2]。

$$p_1 = \frac{p_0(1-PE(x))}{1-p_0PE(x)} \quad (1)$$

ここで、
p_0：ある機器が試験で検出可能な初期不良を有している確率
x：ある試験の試験時間（サイクル数、加振時間、etc）
$PE(x)$：試験時間がxの試験で、初期不良が検出できる確率

N 台の同一設計機器が、8サイクルの熱真空試験で不具合検出されなかった場合、式(1)は次の通りに更新される。

$$p_N = \frac{p_0(1-PE(8))^N}{p_0(1-PE(8))^N+1-p_0} \quad (2)$$

さらに、$N+1$ 台目が4サイクルの熱真空試験で不具合検出されなかった場合、式(2)は次の通りに更新される。

$$p_{N+1} = \frac{p_0(1-PE(8))^N(1-PE(4))}{p_0(1-PE(8))^N(1-PE(4))+1-p_0} \quad (3)$$

したがって N 台の同一設計機器の8サイクルの試験において不具合が発生しておらず、$N+1$ 台目の4サイクルの試験で不具合が発生しない場合、その機器が初期不良を有していない確率、すなわちスクリーニング率 R_{N+1} は次の通りに計算できる。

$$R_{N+1} = 1 - p_{N+1} = 1 - \frac{p_0(1-PE(8))^N(1-PE(4))}{p_0(1-PE(8))^N(1-PE(4))+1-p_0} \quad (4)$$

したがって、スクリーニング率を定量化するためには、ある機器が初期不良を有している確率p_0と、試験時間xに対する初期不良が検出できる確率$PE(x)$を推定する必要がある。これらはいずれも試験における不具合の検出実績数と、それらの不具合が検出されるまでに経過した試験時間から推定することができる。

5.2 モデルの適用例 ~コンポーネント熱真空試験~

Fig.3のスクリーニング率と試験実績の関係を定量化するために行った分析を例に、5.1で示したモデルの適用例を紹介する。

(1)分析データ

700個の衛星バス機器のフライト品の熱真空試験を行い、12件の不具合が検出された。またそれらの不具合が検出されるまでに経過した時間（サイクル数）と試験温度範囲の関係は下表の通りであった。

検出時期	1	1	1	1	1	1	1	3	7	8	8	9
試験温度範囲,℃	85	70	70	70	85	85	70	80	70	60	85	60

(2)事前確率の推定

700個の機器のうち、初期故障を有していた機器の数は12個であったため、ある機器が初期故障を有している確率は次の通りに推定できる。

$$\hat{p}_0 = \frac{12}{700} = 0.0171 \quad (5)$$

(3)初期故障の検出確率の推定

初期故障の検出確率は、初期故障が検出されるまでに経過する時間（熱サイクル数）がワイブル分布に従うと仮定し、最尤法によりワイブルパラメータの推定を行う[3]。

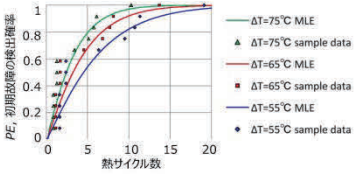

Fig.4熱サイクル数と初期故障の検出確率の最尤推定値（MLE）

4サイクルおよび8サイクル時点の初期故障の検出確率と、式(5)で算出した初期故障を有している確率$\hat{p}_0$を式(4)に代入することで、Fig.3に示したスクリーニング率と不具合なしで試験を通過した機器の台数の関係を定量化することができる。

6.参考文献

1. JERG-2-130A, 宇宙機一般試験標準A改訂（FY28制定予定）
2. JERG-2-130-HB006, 環境試験信頼性要求ハンドブック（FY28制定予定）
3. 高橋大祐, 施勤忠, 宇宙機搭載機器の熱真空試験データを用いた熱サイクル数に対するスクリーニング効果のモデル化, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 835 (2016).

This document is provided by JAXA.