

# 周期的熱荷重による試験環境変動にロバストな 熱変形試験法の成立性評価

○宮崎哲大（早大・院），石村康生（ISAS/JAXA），佐藤泰貴（ISAS/JAXA），宮下朋之（早大）

Feasibility of the Thermal Deformation Test Technique Utilizing Periodic Heating  
Tetsuhiro Miyazaki (Waseda University), Kosei Ishimura (ISAS/JAXA), Yasutaka Satou (ISAS/JAXA),  
Tomoyuki Miyashita (Waseda University)

## Abstract

This paper describes a novel technique for spacecraft's thermal deformation test and shows the feasibility of the technique through experimental results. Recent space development demands a high-precision observation. As a result, large and more precise space structures are needed. To satisfy those requirements, structures with high shape stability are important. One of the negative factors against the shape stability is the thermal deformation on orbit. Since the thermal deformation on orbit is estimated by numerical analysis before launch, the mathematical model is validated by thermal deformation tests on the ground. The proposed method utilizes periodic heating instead of constant one. In the conventional thermal deformation test using constant heating, it is difficult to isolate the environmental noise. However, we can evaluate the characteristics of the structure not in time domain but in frequency domain, with periodic heating. Extracting the same frequency component as the applied heat from the measured data, we can accurately evaluate the essential thermal deformation against noise. Consequently, the proposed technique realizes a highly accurate thermal deformation test with short test time. In this paper, we conducted several experiments and proved the effectiveness of the proposed test technique.

## 1. はじめに

近年の宇宙開発では、より高精度な観測の実現が求められている。これに伴い宇宙構造物には大型化・高精度化が求められ<sup>1,2)</sup>、その要求を満たすためには高い形状安定性が必要となる。表1に示すように、形状精度を低下させる要因には様々なものがあるがその中の一つに軌道上での熱変形がある。軌道上の熱変形は開発の段階で熱変形数学モデルを用いた数値シミュレーションによって見積もられる。この時用いられる熱変形数学モデルは対象を高精度に表している必要がある。実際に構造物を熱変形させ、この妥当性を確認する試験が熱変形試験である。構造物の高精度化が求められると共に、熱変形試験にも高精度化が必要となっている。

表1 形状安定性の低下要因

|             |
|-------------|
| 設計・製造誤差     |
| 打ち上げ時の振動・衝撃 |
| 材料劣化        |
| 熱変形         |
| 脱湿変形（高分子材）  |
| 展開機構の非再現性   |
| 摺動部のガタ      |

熱変形試験では供試体を加熱し、それにより生じる温度変化と熱変形を計測する。そして計測された温度変化と熱数学モデルから供試体の熱変形量を予測し、これと計測器により測定された熱変形量との比較により評価を行う。従来の熱変形試験では、一定熱荷重を用いた供試体の加熱と、熱荷重を与える前の初期状態と熱荷重後の平衡状態の二点の比較による評価が一般的だった<sup>3)</sup>。しかし、この手法には環境外乱の影響を受け

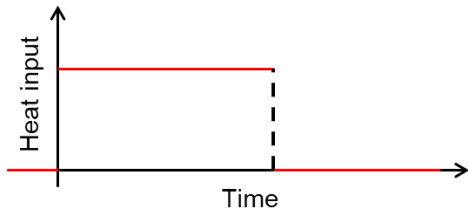
やすいという性質がある。熱伝導等により、加熱対象ではない部材や、試験対象や測定機器を固定する治具が熱変形した際に、測定値からその影響を区別することが難しい。実験室内の気温変化や湿度変化による影響についても同様である。

このような試験環境変動に対してロバストな熱変形試験法として、周期的熱荷重を用いる方法が概念的に著者らによって提案されている<sup>4)</sup>。しかしながら、この試験法はシミュレーションベースでは実証されているものの、実験ベースでは未実証である。本研究では実験手順の詳細化と、実験による提案手法の成立性評価を行う。

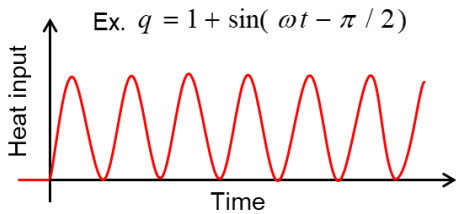
## 2. 周期的熱荷重を用いた熱変形試験法

本研究で実証を行う熱変形試験法の特徴は供試体の加熱に「周期的熱荷重」を用いることである。周期的熱荷重は測定データから試験環境変動の影響項と試験対象の熱変形項とを定量的に分離するために用いられる。

試験環境変動の一例として、試験対象部材から非対象部材への熱伝導によって熱変形が生じる場合を考える。従来手法により一定の熱荷重を与えた場合(図1(a))、試験対象部材と非対象部材はどちらも単調に温度上昇/熱変形し、それらの影響を分離することは難しい(図2(a))。これに対して周期的熱荷重を与えると(図1(b))、試験対象部材の温度変化/熱変形は周期的な特徴を持つ。一方で、一般的に熱伝導で熱が伝わっていく場合は、周波数成分は平滑化される傾向にある(図2(b))。よって、得られた時系列データを、FFTを用いて周波数領域で評価することにより、試験対象部材のみの熱変形量の評価が可能となる。

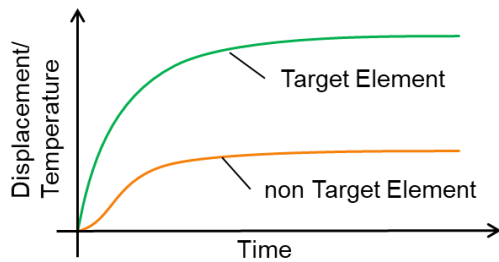


(a) 従来手法

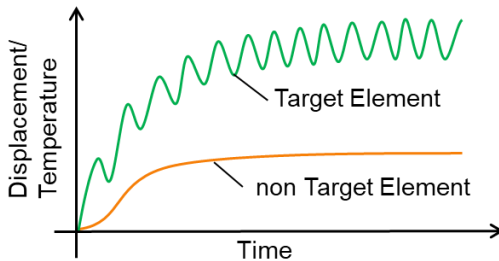


(b) 提案手法

図1 熱変形試験における熱荷重方法



(a) 従来手法



(b) 提案手法

図2 熱変形量と温度変化の時間推移

### 3. 提案手法の成立性評価実験

#### 3.1 実験系

提案手法によって試験環境変動の分離が可能であることを実証するためにトラスを用いた実験を行う。本実験では測定される変位と実際の試験対象の変形量(真値)とを比較する必要があるため、温度変化量から理論的に算出される「変位の推定値」≒「変位の真値」と見なせるような単純なモデルを使用する。実験に用いた実験系の概略図を図3に示す。直角三角形のトラスに対して、底辺を固定した状態で縦部材にテープヒータを用いて熱荷重を与える。そして、温度変化を熱電対によって、垂直方向の変位をレーザ変位計によって測定する。また、試験環境変動の模擬としてレーザ変位計固定用治具を加熱し熱変形を生じさせる。なお、本実験では提案手法の実証を目的とするため、断熱チューブ等を用いて、実験条件として試験対象部材と治具に与える熱荷重以外に試験結果に影響を及ぼすような要素は極力排除する。

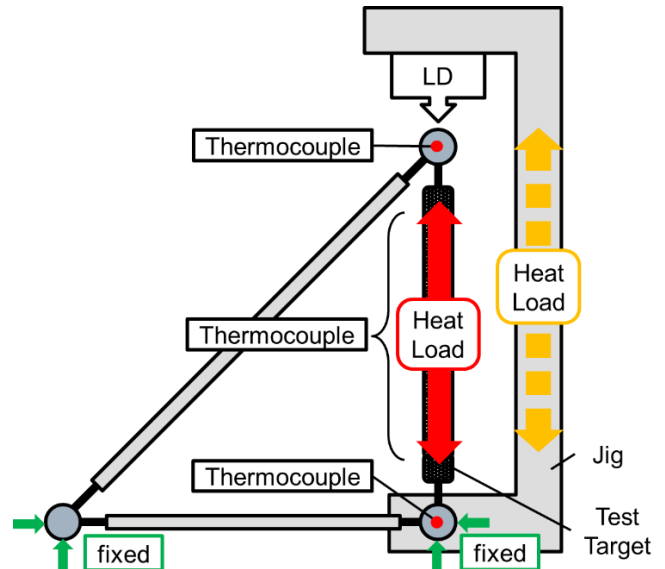


図3 実験系概略図

#### 3.2 実験条件

試験環境変動の模擬である治具の熱変形の有無と試験法の違いによる4条件で実験を行う(表2)。従来手法を用いた実験(①,③)では、供試体に対して一定の熱荷重を与え、平衡状態の評価を行う。一方提案手法を用いた実験(②,④)では、測定データから周波数成分の抽出することで評価を行う。

表2 実験条件

|   | 試験環境変動 | 試験法  | 供試体の加熱方法 | 評価方法   |
|---|--------|------|----------|--------|
| ① | 無し     | 従来手法 | 一定熱荷重    | 平衡状態計測 |
| ② |        | 提案手法 | 周期的熱荷重   | 特定周波抽出 |
| ③ | 有り     | 従来手法 | 一定熱荷重    | 平衡状態計測 |
| ④ |        | 提案手法 | 周期的熱荷重   | 特定周波抽出 |

次に熱荷重条件について述べる。熱荷重の大きさはテープヒータに与える電力により調整した。本実験では実際に起こりうる宇宙構造物の熱変形試験での熱荷重条件と試験環境変動として、次のようなケースを想定する。

想定ケース：

CFRP(線膨張係数 $1 \times 10^{-6} [K^{-1}]$ )製の供試体を40[K]温度変化させる熱変形試験において、アルミ製(線膨張係数 $23 \times 10^{-6} [K^{-1}]$ )の供試体と計測計を固定する治具が2[K]温度変化し、治具の熱変形が生じた。(表3)

表3 熱荷重条件(想定)

|       | 供試体                         | 固定用治具                        |
|-------|-----------------------------|------------------------------|
| 材料    | CFRP                        | Al合金                         |
| 線膨張係数 | $1 \times 10^{-6} [K^{-1}]$ | $23 \times 10^{-6} [K^{-1}]$ |
| 温度変化量 | 40 [K]                      | 2 [K]                        |

今回の実験では簡略化のため供試体、変位計固定用治具共にアルミ材(線膨張係数 $23 \times 10^{-6} [K^{-1}]$ )を使用したため、温度変化量を20分の1することで線膨張係数の違いを読み替える。さらに、実験条件として与える熱荷重の影響を判別しやすくするため、温度変化量のスケールを15倍し、これを本実験の熱荷重条件とする(表4)。なお、一定熱荷重を与える際には、熱平衡状態で温度変化が30[K]となるように、周期的熱荷重を与える際には

その振動中心が30[K]となるように入力電力を決定した。

表4 熱荷重条件 (本実験)

|       | 供試体                          | 固定用治具                        |
|-------|------------------------------|------------------------------|
| 材料    | Al合金                         | Al合金                         |
| 線膨張係数 | $23 \times 10^{-6} [K^{-1}]$ | $23 \times 10^{-6} [K^{-1}]$ |
| 温度変化量 | 30 [K]                       | 30 [K]                       |

ヒータへの入力電力は以下の式を元に決定した。

$$C \frac{dT}{dt} = Q - hA_s(T - T_a) \quad (1)$$

$T$ : 供試体温度

$C$ : 熱容量 (22[J/K])

$Q$ : 入力電力

$h$ : 熱伝達効率 (10[W/m<sup>2</sup>K])

$A_s$ : 部材表面積 (0.01[m<sup>2</sup>])

$T_a$ : 雰囲気温度

なお、熱容量、部材表面積は実験に用いた供試体の形状から算出し、熱伝達効率は一般的な値を用いた。

また、周期的熱荷重に使用する周期は供試体の温度変化量の周波数成分の振幅に大きく影響する。この時式(1)の変形から、短時間における加熱時間と温度変化量の関係は近似的に式(2)のように表される。

$$\Delta t = \frac{c}{Q - hA_s(T - T_a)} \Delta T \quad (2)$$

$\Delta t$ : 時間

$\Delta T$ : 温度変化量

本実験では、実験系の測定精度1[μm]を考慮し、変位データから最終的に抽出される周波数成分の振幅が約20[μm]となるように周期を決定する。なお、本実験系において20[μm]の変位は約3[K]の温度変化量に相当する。これを満たすように式(2)により概算を行い、余裕をもって周期的熱荷重の1周期を125[s] (周波数:0.008[Hz])とする。

### 3.3 変位の推定値 (真値相当) の算出法

変位 $\delta$ の推定値 (真値相当) は次の式により算出する。

$$\delta = \alpha \times \Delta T \times L \quad (3)$$

$\alpha$ : 線膨張係数

$\Delta T$ : 温度変化量

$L$ : 部材長

この時部材の温度分布は長手方向で一様ではない。そこで、図5のように貼り付けた7点の熱電対を用い、それらの測定データを長手方向に台形近似を用いて積分し、これを部材長で除すことによって部材の平均温度を算出する。

トラスの各頂点を接続するためのジョイントやボルトにも熱が伝わるため、これについても考慮する必要がある。そこで両端のジョイントにも熱電対を取り付け、この熱電対の値をジョイントの温度変化とした。また、ボルトの温度変化は図4に示した主部材の両端の熱電対とジョイントに取り付けた熱電対の値の平均値とした。各部材の熱変形量の総和を変位の推定値とするが、この時使用した主部材、ジョイント、ボルトの線膨張係数、部材長を表5に示す。

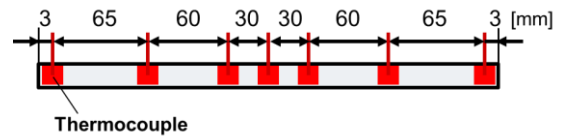


図4 熱電対取付位置

表5 トラス構成部材の諸元

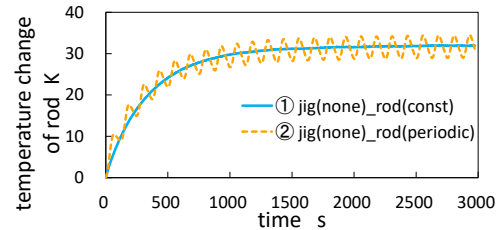
|       | 線膨張係数 $K^{-1}$      | 部材長 mm |
|-------|---------------------|--------|
| 主部材   | $23 \times 10^{-6}$ | 316    |
| ジョイント | $11 \times 10^{-6}$ | 12.5   |
| ボルト   | $17 \times 10^{-6}$ | 12     |

### 3.4 評価方法

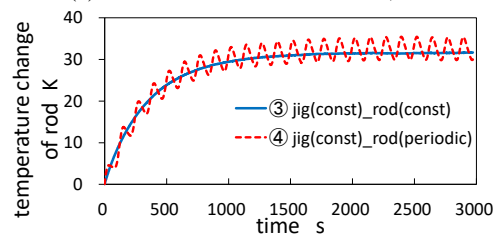
実験結果の評価方法は次の通りである。まず、従来手法による平衡状態の評価では、熱電対の相対精度を±0.1[K]と考え、平衡状態の基準を600[s]間の温度変化量が0.2[K]未満となる範囲とした。そしてこの区間について平均値を算出した。これに対して提案手法では、測定データから、供試体に与えた周期的熱荷重と同じ周波数成分の抽出を行った。具体的には、測定データについて、入力波形の1周期分である125[s]間で移動平均を取ったものを元データから差し引き、その後FFTを行った。この時、0.008[Hz]成分を評価するため、FFTの周波数分解能が0.002[Hz]となるように使用データ範囲を定め、101[s]~600[s]のデータを用いた。

## 4. 実験結果

供試体の温度変化の様子を、治具への熱荷重の有無で分けてそれぞれ図5a),(b)に示す。また、固定用治具の温度変化の様子を図6に示す。



(a) 治具への熱荷重無し (①,②)



(b) 治具への熱荷重有り (③,④)

図5 供試体の温度変化

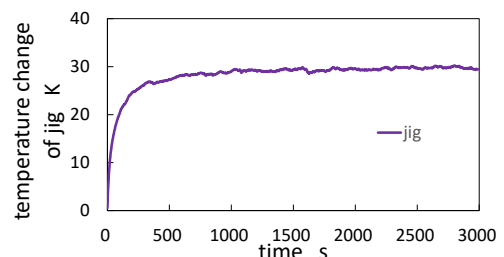
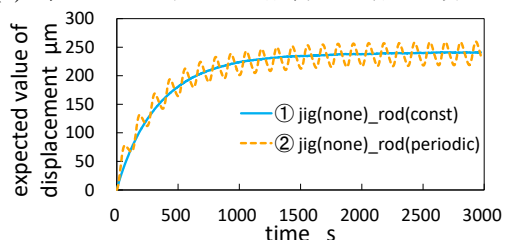
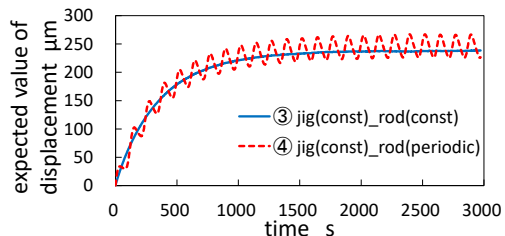


図6 治具の温度変化

図5に示した供試体の温度変化から算出した変位の推定値（真値相当）のグラフを図7(a)(b)に、レーザ変位計によって計測された変位の測定値のグラフを図8(a)(b)に、それぞれ治具への熱荷重の有無で分けて示す。

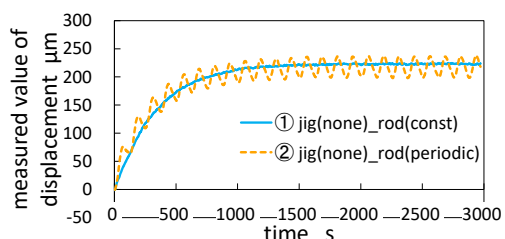


(a) 治具への熱荷重無し (①,②)

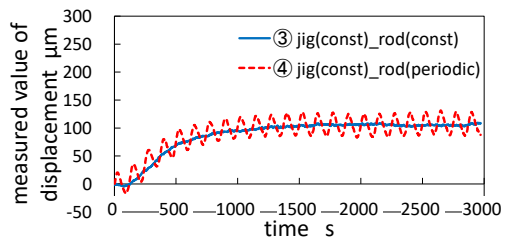


(b) 治具への熱荷重有り (③,④)

図7 変位の推定値（真値相当）



(a) 治具への熱荷重無し (①,②)



(b) 治具への熱荷重有り (③,④)

図8 変位の測定値

図7(b)と図8(b)を見ると、治具に熱荷重を与えた場合には、真値と測定値とが大きく異なってしまふことが分かる。これは当初の予想通り治具の熱変形が測定値に影響しているためである。これらの実験結果を定量的に評価するため、一定熱荷重を用いたものについては平衡状態の値を取り、周期的熱荷重を用いたものについては0.008[Hz]成分の抽出を行った結果を表6に示す。

表6 実験結果

|   | 熱荷重条件 |     | 結果        |           |        |
|---|-------|-----|-----------|-----------|--------|
|   | 治具    | 供試体 | 変位の推定値 μm | 変位の測定値 μm | 相対誤差 % |
| ① | 無し    | 一定  | 240       | 223       | 7      |
| ② |       | 周期的 | 20        | 20        | 0      |
| ③ | 有り    | 一定  | 237       | 106       | 55     |
| ④ |       | 周期的 | 20        | 21        | -5     |

表6の③の結果を見ると、治具の熱変形の影響によって理論値（真値）と測定値との間に非常に大きなずれが生

じていることが分かる。一方、同じ試験環境条件のもとで、提案手法を用いた④の結果を見ると、理論値（真値）と測定値との差は1[μm]である。この結果から、提案手法により試験環境変動にロバストな熱変形試験が成立することが示された。

またこの時、評価に使用した区間を表7に示す。

表7 評価区間

|   | 評価区間              |
|---|-------------------|
| ① | 2163[s] ~ 2762[s] |
| ② | 101[s] ~ 600[s]   |
| ③ | 1700[s] ~ 2299[s] |
| ④ | 101[s] ~ 600[s]   |

これを見ると、従来手法に比べ提案手法では格段に短い試験時間での評価が可能であることが分かる。従来の試験法では、平衡状態を待つ必要があるため長時間の試験が必要となるが、提案手法では平衡状態を待つ必要が無い。実際には周波数成分の抽出の際に移動平均処理を行うため提案手法による試験時間は700[s]程度となるが、それでも従来の試験法に比べ大幅な試験時間の短縮が可能であることが示された。

## 5. まとめ

本研究では周期的熱荷重を用いた試験環境変動にロバストな熱変形試験法について、トラスを用いた実証実験を通じて実験手順の詳細化と提案手法の成立性評価を行った。試験環境変動の模擬として治具の熱変形を例に取り、従来手法では分離不可能だった環境外乱の影響が、提案手法によって分離可能であることを実験によって示した。加えて、提案手法では平衡状態を待つ必要が無く、試験時間の大幅な短縮が可能であるということを実験結果から示した。今後、この試験法の応用によって飛躍的なS/N比の向上と、大幅な試験時間の短縮が期待される。

## 謝辞

本研究は、JAXA/ISAS戦略的開発研究費「高性能化学観測に向けた高精度構造・材料の研究開発」の活動の一環として実施されました。

## 参考文献

- 1) M. Greenhouse, “The JWST science instrument payload: Mission context and status,” Proc. SPIE 9602, 960202, 2015
- 2) T. Takahashi, et al., “The ASTRO-H X-ray Astronomy Satellite,” Proc. SPIE 9144, 914425, 2014
- 3) Y. Tanaka, et al., “Measurement method of multi scale thermal deformation inhomogeneity in CFRP using in situ FE-SEM observations,” Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017
- 4) K. Ishimura, et al., “Novel Technique for Spacecraft’s Thermal Deformation Test Based on Transient Phenomena,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2014