

機関番号：32503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760667

研究課題名(和文) データ同化を援用した宇宙機熱変形の効率的な定常状態予測に関する研究

研究課題名(英文) A Study on an Efficient Scheme for Steady-State Temperature and Thermal Deformation Predictions

研究代表者

秋田 剛 (Akita, Takeshi)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20405343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、熱変形が問題となる宇宙機構造の設計・開発への適用を目標として、定常熱試験における定常温度・熱変形の効率的な予測方法の検討を行った。温度予測を行うための複雑な熱数学モデルに対して、簡便に利用できる温度予測モデル式を考案し、数値シミュレーションや簡易実験によりその有効性を検証した。また、ベンチ型の実験モデルを製作し定常熱試験を行い、各測定箇所の温度とベンチの熱変形の相関関係を求め、過渡状態での温度と熱変形の関連について検証した。

研究成果の概要(英文)：This study investigates an efficient method for steady-state temperature and thermal deformation predictions in thermal tests. Simple temperature prediction models, which are based on the analytical solution of linearized thermal mathematical model, are presented. Numerical and experimental results present the effectiveness of the predictions models. In addition, we investigate the correlations between temperature and thermal deformation in transient-state by a simple thermal deformation experiment.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：定常熱試験 過渡応答 パラメータ同定 熱解析

1. 研究開始当初の背景

近年、科学衛星を中心に宇宙機構造に対し極めてシビアな精度要求が課せられている。高精度宇宙機構造の設計では、様々な誤差要因を予測する必要がある。特に軌道上運用時の日陰日照サイクルに伴う熱変形は、構造精度に与える影響が大きいいため、高精度な予測が求められる。

宇宙機の熱変形に対する設計検証は、真空チャンバーを利用した熱真空試験により行われる。熱真空試験では、熱的な定常状態における宇宙機の温度と熱変形を計測する必要がある。通常、大熱容量を持つ宇宙機は、定常状態に至るまで長時間を要し、大型の設備を数週間占有して 24 時間体制で試験を行うため、大きな試験コストを要する。近年の宇宙機開発の迅速化・低コスト化の要求から、このような熱変形試験の効率化が課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、わずかな熱変形が問題となる高精度宇宙機構造の設計・開発を効率化することを目的として、定常熱試験における定常温度・熱変形の効率的な予測方法の構築を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、(1) 定常熱試験時の定常温度予測法の構築と検証、(2) 簡易実験による定常温度と熱変形の相関関係の検証、を行い、定常熱試験における定常温度・熱変形の効率的な予測方法の構築を目指す。

(1) 定常温度予測法の構築と検証

熱問題の定常状態予測法として、熱数学モデルを使った数値計算による方法が考えられるが、一般にモデル誤差のため、数値計算のみで精度の高い予測を行う事は困難である。熱真空試験のデータを使ってモデル修正を行うことではじめて精度の高い数学モデルが求められる。熱真空試験では、冷却 (or 加熱) 開始時に構造が急激に温度変化する過渡状態から長時間を経て温度が一定となる定常状態に至る。数学モデルの修正は、定常状態に注目して行われることが多い。一方、過渡状態には定常状態よりも多くの情報が含まれていると考えられるが現状では有効活用されていない。そこで本研究では、熱真空試験の過渡データを利用して、パラメータ推定により定常状態温度を予測する方法を考案し、その有効性を検証する。

①推定モデル式

宇宙機の熱平衡方程式は、以下のように与えられる。

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = Q_i - \sum_{j=1}^N C_{ij}(T_i - T_j) - \sum_{j=1}^N R_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4)$$

$$i = 1 \sim N$$

上式の C_i は節点 i の熱容量、 T_i , T_j はそれぞ

れ節点 i, j の温度、 Q_i は節点 i の内外の熱入力、 C_{ij} は節点 i, j 間の熱コンダクタンス、 σ はステファンボルツマン定数、 R_{ij} は節点 i, j 間の放射係数である。また N は熱数学モデルの総節点数である。本式の輻射項を無視した線形の熱平衡方程式の解を明示的に求めると

$$T_i(t) = \sum_{i=1}^N k_i (1 - e^{-\lambda_i t}), i = 1 \sim N$$

と表わされる。ここに λ_i, k_i は熱システムの i 番目の固有値・固有モードに対応した定数である。上式は、節点温度はいくつかの指数関数を基底関数とした線形結合と定数項の重ね合わせで表わされることを示している。熱パラメータや熱入力の値から基底関数の係数を決定することができるが、実モデルと数学モデルの相違から、これらの係数を事前に正確に決定することは困難である。本研究では、定常熱試験の過渡データを利用して、基底関数の係数を推定し、温度の定常状態を予測することを考える。また、熱試験において温度を測定できる節点数は限られており、固有モードを考慮した温度データを取得することは困難である。本研究では、推定のための観測方程式として、単一節点を対象とした以下の式を推定モデル式として考える。

$$T(t) - T(0) = T_C (1 - e^{-\beta t})$$

ここに T_C は節点の定常温度であり、上式の定数 T_C, β を定常熱試験の過渡データより推定する。本研究では、時刻 t_1, t_2, \dots, t_n の n 個の過渡データが得られたとする。このとき、推定モデル式を観測方程式として T_C, β を最小二乗法により推定する。

②非線形項を考慮した推定式

温度の 4 乗の輻射項が存在する場合に非線形項の摂動解を求めると、線形解の 4 乗から生成される関数が基底関数に加えられる。これに対応して次式のような非線形推定モデル式を考える。

$$T(t) - T(0) = K_1 (1 - e^{-\beta t}) + K_2 (1 - e^{-4\beta t})$$

ここに $T_C = K_1 + K_2$ であり、上式の定数 K_1, K_2, β を定常熱試験の過渡データより最小二乗法により推定する。

(2) 定常温度と熱変形の相関関係の検証

光学ベンチを模したベンチ型構造を対象に、定常熱試験の過渡状態の特性、特に温度と熱変形の時定数に着目しその評価を行う。各測定点の温度と熱変形の応答の関係を調べることで、熱変形を予測する際に重要度の高い温度測定点について考察する。

4. 研究成果

(1) 定常温度予測法の構築と検証

①簡易実験データを使った検証試験

簡易実験データを使った定常温度予測の検証を行った。Fig. 1 に簡易実験の概略図を

示す。実験対象は、ひもで吊された鉄製のトラス部材である。部材は中空円筒状のものをを用い、下部に加熱用のシリコンラバーヒータを巻き付ける。部材の温度は下部、中央部、上部の3点に設置された熱電対A, B, Cで計測しロガーに記録する。本実験においてロガーのサンプリング周期は10Hzとする。実験は、ヒータにより部材が定常状態になるまで加熱する。ヒータの出力は47.5Wで一定とする。

熱電対A, B, Cの過渡データを使って検証実験を行った。推定実験では、種々の条件下で検証を行ったが、一例として過渡データとして $t=100[s] \sim 1000[s]$ のデータを利用して推定を行った結果をFig. 2, 3, 4に示す。図中には、実験データ(黒)、線形モデルでの推定結果から求めた温度履歴(赤)、非線形モデルでの推定結果から求めた温度履歴(シアン)を示す。実験では4000[s]前後で定常状態に至っている。図から非線形モデルを用いた場合のほうが線形モデルよりも推定結果が良好になる傾向を確認できる。また、熱電対の位置によって推定精度が異なることがわかる。図で示した結果からは、ヒータを貼り付けた箇所である熱電対Aの点での温度推定では、線形モデル、非線形モデル共に良好であったが、電対Cの点での両モデルの温度推定は誤差が非常に大きくなった。

今回の実験から、単一節点を対象とした指数関数を基底関数とした推定モデル式について、予測が容易な節点箇所と困難な節点箇所が存在することがわかった。理論的には、多自由度の熱数学モデルでは、モード座標系で温度を考えた場合に、単一節点を対象とした推定モデル式が有効となる。本件に関しては引き続き研究を行い、予測が困難となる測定箇所に対する対応策を研究していく予定である。

②数値シミュレーションを使った検証

衛星開発用の熱解析ソフトウェア Thermal Desktop を用いて、熱解析モデルの構築を行い、数値実験によって定常熱試験の過渡状態時の特性、特に定常状態の63.2%の温度になるまでの時間を時定数と考え、時定数について検証を行い過渡データの特性について検討した。

Fig. 5のように大気中に設置された中空円筒部材を考える。部材は1つの節点でモデル化され、図の中央の丸で囲まれた部分が加熱部で、上方の丸で囲まれたものが輻射設定用の大気節点、下方の丸が熱伝達設定用大気節点である。本モデルに対して、ヒータ出力3W, 6Wにおいて大気との熱伝達係数(h)・輻射係数(Bi, j)の2つの値を変え線形モデルを使った推定実験を行い、推定された β の逆数と実験データから求められる時定数を比較した。Tab. 1に示されるように、1節点モデルでは、推定から求められる時定数と実験データから求められる時定数が良く一致することを確認した。

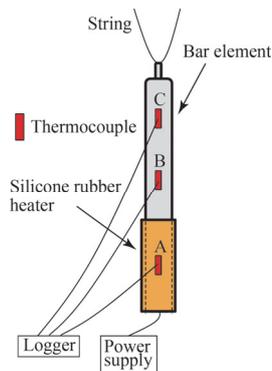


Fig. 1 簡易モデルによる定常熱試験

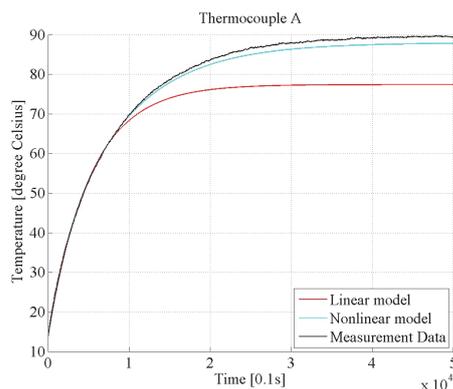


Fig. 2 推定結果(熱電対A)

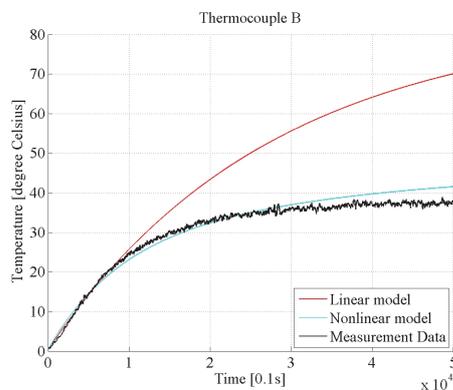


Fig. 3 推定結果(熱電対B)

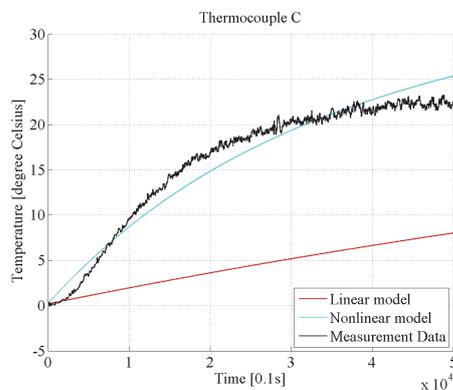


Fig. 4 推定結果(熱電対C)

次に Fig. 6 のような板を 2 本の丸棒で固定する Bench 型の構造を作成した。ヒータ出力 5W, 12W において大気との熱伝達係数(h)・輻射係数(B_{ij})の 2 つの値を変え時定数を数値実験により求めた。Tab. 2 に Bench 型モデルにおける各条件での時定数を示す。Tab. 2 の 1 行目の記号 (B, C, D, E, F) は Fig. 6 中の記号に示される温度測定箇所に対応する結果を表している。表より輻射が 0 で熱伝達のみを考えた場合 (表中の色づけ部分), 温度測定箇所が異なると時定数の値に差異が生じるが, 同一箇所ではヒータ出力を変化させてもほぼ同一に時定数が得られることがわかった。それに対して輻射を考えた場合, 時定数のばらつきが大きくなった。今回の実験では, 種々の条件における測定箇所ごとの温度データの特性を把握することができた。本件に関しては, 引き続き研究を行い, 推定箇所と推定精度の関係について, より詳細な検討を行っていく予定である。

(2) 温度と熱変形の相関関係の検証

光学ベンチを模したベンチ型構造を対象に, 定常熱試験時の過渡状態特性, 特に温度と熱変形の時定数に着目しその評価を行った。数値実験と同じく, 温度や変形が定常状態の 63.2%になるまでの時間を時定数と考えた。試験対象としてアルミロッド 2 本の片端を固定板に設置し, さらに土台に固定板をボルトで固定した。アルミロッドのもう一方にアルミ合金の板をボルトで接合しベンチ型構造モデルを製作した。試験方法はアルミロッドの中間部と上部をヒーター12W で加熱し, 温度・熱変形を測定した。温度は, Fig. 7 に示すように固定板 (TC_A) とヒーター貼付側のアルミロッドの上部 (TC_D) ・中央部 (TC_C) ・下部 (TC_B), アルミ板の各々のアルミロッド接合部分付近 (TC_E, TC_F), 他方のアルミロッドの中央部 (TC_G) に熱電対を合計 7 か所貼付し測定した。変位は, レーザ変位計をベンチ型構造モデルの周辺に直方体の外枠フレームに設置し, アルミ板の変位を測定した。

Tab. 3 に中間部加熱時と上部加熱時の熱変形の時定数と定常値を示す。また, 温度と熱変形の相関関係を相関係数を用いて Tab. 4 に示す。Tab. 3 より, 熱変形および時定数に関して, 若干の差異はあるものの, ヒーターの取り付け位置にかかわらずほぼ同一の値となった。Tab. 4 より, 熱変形は B, C, D 点の温度と高い相関を持っていることがわかった。これらの点の温度予測が, 熱変形推定にとって重要になると考えられる。

本件に関しては, 引き続き研究を行い, 線形モデル, 非線形モデルを使った熱変形予測の詳細な検討を行っていく予定である。

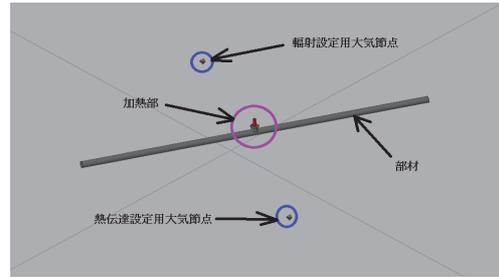


Fig. 5 1 節点アルミ棒モデル

Tab. 1 推定値の逆数と観測データから求められる時定数 (大気温度 20 度)

| h = 1.0, Bij = 0 | | |
|---------------------|-----|-----|
| | 3W | 6W |
| 1/β | 260 | 260 |
| 時定数[s] | 266 | 266 |
| h = 1.0, Bij = 0.35 | | |
| | 3W | 6W |
| 1/β | 155 | 148 |
| 時定数[s] | 154 | 143 |

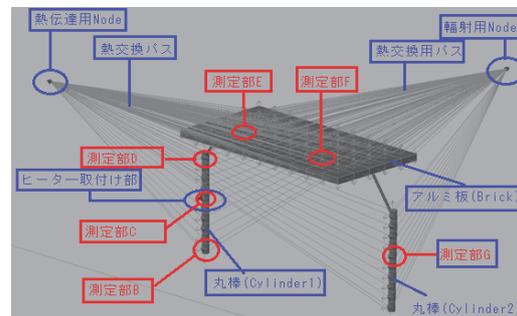


Fig. 6 Bench 型モデル

Tab. 2 Bench 型モデルにおける各条件での時定数 [s]

| | | B | C | D | E | F |
|-----|-----------------|------|-----|-----|------|------|
| 5W | h:10 Bij:7 | 571 | 159 | 479 | 495 | 526 |
| | h:10 Bij:0 | 1150 | 564 | 997 | 1105 | 1122 |
| 12W | h:10 Bij:7 | 510 | 123 | 416 | 458 | 457 |
| | h:10 Bij:0.0 | 1151 | 556 | 996 | 1123 | 1141 |

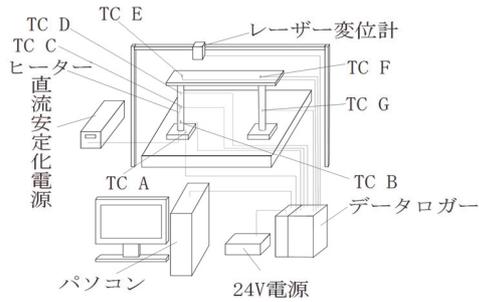


Fig. 7 実験装置の概略図

Tab. 3 熱変形の時定数と定常値

| 試験条件 | 時定数[s] | 定常変形 [mm] |
|------|--------|--------------|
| 中間部 | 325.1 | 0.197 |
| 上部 | 344.7 | 0.174 |

Tab. 4 定常温度と熱変形の相関関係

| | 中間部 | 上部 |
|------|------|------|
| TC A | 0.85 | 0.64 |
| TC B | 0.97 | 0.91 |
| TC C | 0.98 | 0.94 |
| TC D | 0.98 | 0.94 |
| TC E | 0.88 | 0.86 |
| TC F | 0.80 | 0.80 |
| TC G | 0.70 | 0.75 |

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

- ① 秋田剛, 石村康生, 高木亮治, “過渡データを利用した効率的な熱特性推定法に関する研究,” 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 8 日, 東京.
- ② 秋田剛, 石村康生, 高木亮治, “定常状態の効率的な温度予測法に関する研究,” 第 22 回スペースエンジニアリング・コンファレンス, 2013 年 12 月 21 日, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋田 剛 (AKITA, Takeshi)
 千葉工業大学・工学部・准教授
 研究者番号: 20405343

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし