

地震先行電離圏変動現象観測衛星 PRELUDE の熱数学モデルのキャリブレーション
超小型衛星の熱数学モデルにおけるカルマンフィルタを用いたパラメータ推定
Calibration of the Thermal Mathematical Model of the CubeSat "PRELUDE"

Estimation of Parameters in the Thermal Mathematical Model of CubeSats Using the Kalman Filter

○武井維吹¹, 大塚悠介², 山崎政彦³, 中村俊作²

*Ibuki Takei¹, Yusuke Otuka², Masahiko Yamazaki³, Shunsaku Nakamura²

This study investigates a calibration method for the thermal mathematical model of the earthquake precursor ionospheric variation observation satellite "PRELUDE" using a Kalman filter. In satellite thermal design, uncertain parameters such as contact thermal conductance remain a major challenge, traditionally addressed by labor-intensive manual adjustments based on thermal vacuum test data. To overcome these limitations, we applied a Kalman filter to estimate the contact thermal conductance from thermal vacuum test data of the PRELUDE Engineering Model, enabling automated and efficient calibration of the model. The results indicate that the conductance can be estimated with some consistency; however, discrepancies between simulated and observed temperatures reveal limitations caused by model simplification.

1. はじめに

人工衛星の設計において、熱設計は搭載機器の温度を適切に保ち、正常に動作するための安全性や信頼性を担保する。そこで、熱設計の検証・妥当性確認は、実機を用いて宇宙環境を模擬した熱真空試験の実施及び衛星をモデル化して熱解析を行う。従来の熱解析は、不確定な要素を含んだ解析入力パラメータ（以下、入力変数）を用いている。特に接触熱伝達率は部品同士の接触面の表面粗さや圧力などで値が変化するため不確定性が強い。そのため、設計時に解析で求めた温度範囲に予測誤差を加えている。したがって、入力変数を定量的に導出することで予測誤差をより適切に設定できると考えられる。

また、熱真空試験の観測温度に解析結果を合わせるため、入力変数を手動で調整して熱数学モデルをキャリブレーションしている。しかし、その作業は多くの時間と労力を要すると共に作業者の経験に依存する。先行研究においては、小型衛星モデルに対して、アンサンブルカルマンフィルタ^[1]や粒子フィルタ^[2]などを適用して推定している。しかし、これらはモデルに対しての双子実験であるため、推定パラメータの個数に対して方程式の本数が不足する不良設定問題など、実機への適用に関しては考察する余地がある

本研究では、山崎研究室で開発中である地震先行電離圏変動現象観測衛星「PRELUDE」の熱真空試験の観測値とカルマンフィルタ（以下、KF）を用いて、解析モデルの入力変数である接触熱伝達係数を推定して、熱数学モデルをキャリブレーションする。そして、実

機による試験データを用いた場合のキャリブレーションの結果と課題を明らかにする。

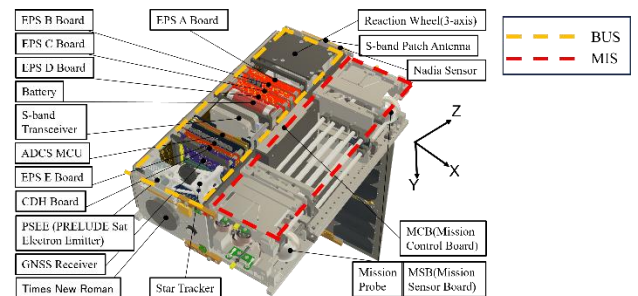


Figure 1. Overview of PRELUDE

2. カルマンフィルタについて

KF は動的システムにおける未知状態を逐次的に推定する最適推定手法の一つである。ノイズを含む観測値に対して、状態推定値とその不確実性を同時に更新できる。KF の状態空間モデルは状態方程式と観測方程式により記述される。状態方程式は前の状態から次の状態を予測し、観測方程式は状態と観測値の関係を

状態方程式はパラメータ推定において、未知パラメータを状態変数として拡張し、その時間発展を「定数」と仮定する。ここで推定対象のパラメータを θ 、プロセス雑音を $w(k)$ とすると状態方程式は次式で表される。

$$\theta(k+1) = \theta(k) + w(k) \quad (1)$$

観測方程式は、観測値とパラメータの関係を線形化または近似して定式化される。ここで観測量を $z(k)$ 、観測行列 $H(k)$ 、観測雑音 $v(k)$ とすると次式で表される。

$$z(k) = H(k)\theta(k) + v(k) \quad (2)$$

KF は予測ステップと更新ステップを交互に繰り返す。予測ステップは以下の式(3), (4)である。

$$\theta(k|k-1) = \theta(k-1) \quad (3)$$

1 : 日大理工・学部・航宇, 2 : 日大理工・博士(前)・航宇, 3 : 日大理工・教員・航宇

$$P(k|k-1) = P(k-1) + Q \quad (4)$$

また、更新ステップは以下の式(5), (6), (7)である。

$$K(k) = P(k|k-1) H(k)^T [H(k) P(k|k-1) H(k)^T + R]^{-1} \quad (5)$$

$$\theta(k) = \theta(k|k-1) + K(k)[z(k) - H(k)\theta(k|k-1)] \quad (6)$$

$$P(k) = (I - K(k)H(k))(P(k|k-1)) \quad (7)$$

3. 解析モデル

熱解析は節点解析で行う。等温と見なせる部品ごとを節点に分割し、各節点について立てた熱平衡方程式を連立させて、時間変化に伴う温度変化を計算する。以下に節点*i*に関する熱平衡方程式を次式に示す。

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = Q_i + \sum_{j=1}^n K_{ij}(T_j - T_i) + \sum_{j=1}^n R_{ij}\sigma(T_j^4 - T_i^4) \quad (8)$$

ここで C_i は節点 i の熱容量, T_i, T_j は節点 i, j の温度 (K), Q_i は節点 i の熱の入出力(W), K_{ij} は節点 i, j 間の接触熱伝導率(W/K), σ はステファンボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$), R_{ij} は節点 i, j 間の放射係数(m^2)である。異なる物体間の接触熱伝導率は次式で表せる。

$$K_{ij} = hA \quad (9)$$

ここで A は物体間の接触面積(m^2), h は今回推定したい接触熱伝達係数(W/ m^2K)である。

今回は PLELUDE の Engineering Model(EM)で行った熱真空試験のデータを用いる。実機は多数の部品から構成され、試験では約 30 点で温度を観測している。しかし、節点数が多いほどパラメータ数が増加するために問題が複雑化する。そこで、節点数を削減し主要な熱変化に着目した簡素化モデルでキャリブレーションを行うことで、本手法の有用性を検証する。

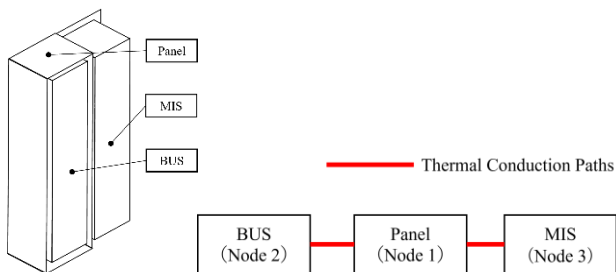


Figure 2. Three-Node Analytical Model and Thermal Contact Paths

衛星全体を外面パネルと BUS 部と MIS 部の 3 点に近似したモデルを用いる。また、熱伝達と熱放射を比較すると、熱放射はステファンボルツマン定数が 10^{-8} オーダーであり、支配性が小さいため無視した。さらに、+Y 面の外面パネルは他のパネルと等温と見なせないため除外した。各節点の温度は各観測点の観測値の平均値を用い、BUS 部と MIS 部は接触していない

め、接触熱伝導率は 0 とする。また、解析に用いたプログラムは、自作簡易モデルでの双子実験において、接触熱伝達係数の誤差が $2(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$ 以下、真値と解析値の温度差が $1[^\circ\text{C}]$ 以下であった。

4. 解析結果

以下に観測値とキャリブレーションした入力変数を用いて解析した結果との差、推定した接触熱伝達係数の変化の過程をそれぞれ図で示す。

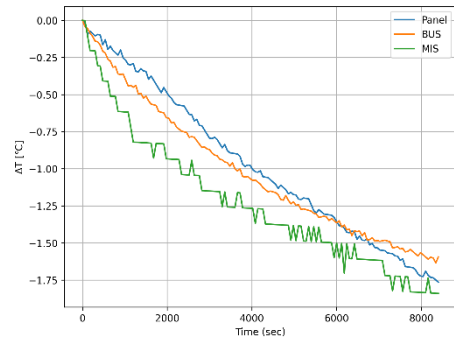


Figure 3. Difference between Observed and Calculated Values

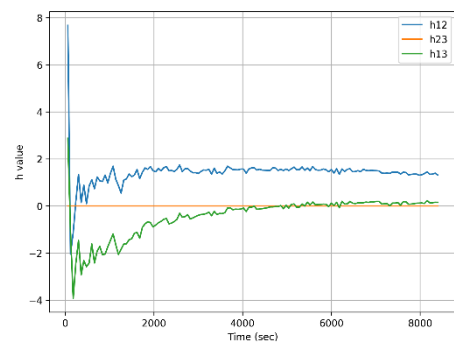


Figure 4. Parameter Variation During Calibration

5. 結論

カルマンフィルタにより接触熱伝達係数の推定は可能であった。しかし、最終的な熱解析では観測値との温度差が大きくなり、本手法の有効性を十分に証明できていない。これは 3 節点のモデル化による表現精度の不足が要因と考えられる。観測点は約 30 点存在するため、3 節点以上を考慮したモデル化の検討も今後の課題である。

参考文献

- [1] 秋田 剛, 高木 亮治, 嶋 英志: アンサンブルカルマンフィルタを用いた衛星熱数学モデルの接触熱伝導率推定法, 航空宇宙技術, Vol. 9, pp. 1-8, 2010.
- [2] 高木 亮治, 秋田 剛, 嶋 英志: 宇宙機熱モデルにおけるパラメータ推定への粒子フィルターの適用, 第 42 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2010 論文集, pp. 305-310, 2010.