

アンサンブルカルマンフィルタの適応型熱解析への適用

秋田 剛, 高木亮治, 嶋 英志, 石村康生
宇宙航空研究開発機構

Application of the Ensemble Kalman Filter to an Adaptive Thermal Analysis

by
Takeshi Akita, Ryoji Takaki, Eiji Shima and Kosei Ishimura

ABSTRACT

An effective adaptive estimation method of spacecraft thermal mathematical models that can constantly identify uncertain thermal characteristic parameters by using observation data on orbit is presented. In our method, we utilize an ensemble Kalman filtering technique to update the thermal mathematical model continuously at each observation time step. In this procedure, the thermal characteristic parameters are automatically estimated as the outputs of the filtered state variables, whereas, in the usual thermal model correlation, they are manually identified by experienced engineers using try-and-error approach which could be time consuming. A simple experiment is provided to verify the effectiveness of the presented method.

1. はじめに

宇宙機の熱設計において、軌道上での宇宙機各部の温度分布を予測する熱数学モデルを精度よく構築することが重要である。精度の高い熱数学モデルを構築するためには、宇宙機内外の熱入力や宇宙機各部で交換される熱量を正しく把握する必要がある。前者は機器のスペックや軌道条件から求めることができる。一方、後者を定めるためには、コンポーネント間の接触熱伝導抵抗や放射係数といった未知の熱特性パラメータを打ち上げ前に同定する必要がある¹⁾。一般にこれらのパラメータは、宇宙機の熱真空試験結果と熱数学モデルのコリレーションにより求められるが、その精度は地上の熱真空試験環境と軌道上の熱環境との差違によって制限される。近年、宇宙科学分野を中心に極めて厳しい熱設計を要求する宇宙機が考案されている。これらの宇宙機では地上での熱数学モデルのコリレーションのみでは温度予測精度が不十分になる可能性があり、軌道上での実際の温度測定データに適応して高精度な温度予測が可能で熱解析技術が望まれている。

測定データに適応して効率的に未知量の予測を行う方法として、カルマンフィルタを用いた方法が考えられる²⁾。この方法は、測定データを使ってシステムの状態変数とモデルパラメータを同時に推定することができ、宇宙機の熱数学モデル推定や温度予測にも有効であると考えられる。ただし、カルマンフィルタは線形もしくは線形に近いシステムを対象としており、非線形性をもったシステムに対しては安定性の面で問題となることが多い³⁾。宇宙機の熱数学モデルは非線形システムであり、この問題への対応が必要である。

本研究では、宇宙機の軌道上での熱解析にアンサンブルカルマンフィルタ⁴⁾を適用することを考える。アンサンブルカルマンフィルタは、非線形問題を対象とした状態推定方法であり、近年データ同化と呼ばれる手法に盛んに適用され、その有効性が実証されている⁵⁾。特に気象学や海洋学の分野で、測定データにモデルが自動で適応しながら数値解析が進行する適応型シミュレーションのための有力な手法として、大きな注目を集めている^{6, 7, 8)}。本研究では、著者等が構築したアンサンブルカルマンフィルタを用いた接触熱伝導率推定法⁹⁾をもとに軌道上での観測データを使って逐次熱数学モデルを更新することが可能な適応型の熱解析法を構築し、検証実験によりその有効性を示す。

2. 衛星の熱数学モデル

2. 1 節点の熱平衡方程式

衛星の熱数学モデルは、衛星を構成する構体パネルや内部機器などをいくつかの要素に分割し、各要素内で熱特性（温度、比熱、熱伝導係数、放射特性など）を代表する節点を設定することで構築される¹⁰⁾。各節点は熱伝導や放射によってお互いに熱交換を行う。また太陽放射、アルベド、地球赤外放射などによる外部熱入力、および機器の発熱などによる内部熱入力を受ける。これらの熱交換と内外の熱入力から各節点の熱平衡方程式が求められ、衛星各部の熱分布が計算される。以下に節点 i に関する熱平衡方程式を示す⁽¹¹⁾。

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

ここに C_i は節点 i の熱容量 ($W \cdot s/K$)、 T_i , T_j はそれぞれ節点 i , j の温度 (K)、 Q_i は節点 i の内外の熱入力 (W)、 C_{ij} は節点 i , j 間の熱コンダクタンス (W/K)、 σ はステファンボルツマン定数 ($5.669 \cdot 10^{-8} W/m^2/K^4$)、 R_{ij} は節点 i , j 間の放射係数 (m^2) である。また N は熱数学モデルの総節点数であり、 N 個の熱平衡方程式を連立させて解くことで各節点の温度を求めることができる。

2. 2 熱コンダクタンスと放射係数

節点 i, j が同一物体内の節点の場合、熱コンダクタンス C_{ij} は物体の熱伝導率 k (W/mK) を使って次式により算出される。

$$C_{ij} = kA/L \quad (2)$$

ここに A は節点 i, j の属する領域の接触面積 (m^2)、 L は節点間の距離 (m) である。一方、節点 i, j が異種物体間の接触熱伝導を表す場合には、

$$C_{ij} = hA \quad (3)$$

となる．ここに h は接触熱伝導率 (W/m^2K) である．式(2)からわかるように，同一物体内の熱コンダクタンスは節点の配置や物性値から容易に算出することができる．一方，式(3)は接触圧力など種々の外的要因によって A や h が変化するので，熱真空試験結果を使って値を推定して定める必要がある．対流による熱伝達も式(2)と同じ形式で表される．このとき h は熱伝達係数となる．

放射係数 R_{ij} は “Thermal Desktop” などの解析ソフトを利用して幾何学的な関係から算出することができる¹²⁾．

2. 3 節点の種類

衛星の熱解析では，ボルトや薄膜など衛星構体に比べて熱容量が微小な要素や，宇宙空間のように熱容量が無限と考えられる要素を含んだ解析を行う必要がある．これらの要素にはそれぞれ熱容量が 0 の Arithmetic 節点，熱容量が ∞ (温度が不変) の Boundary 節点，を設定して解析を行うことが多い^{13,14)}．なお式(1)に従う通常の節点は Diffusion 節点とよぶ．

3. アンサンブルカルマンフィルタ

3. 1 確率システム

まず次式のような非線形の時間更新式と線形の観測方程式からなる確率システムを考える．

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{F}_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t) \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (5)$$

ここに t は離散化されたタイムステップを表し， \mathbf{x}_t は n 次元状態ベクトル， \mathbf{F}_t は t から $t+1$ への時間更新を表す非線形関数， \mathbf{y}_t は p 次元観測ベクトル， \mathbf{H}_t は $p \times n$ 次元の観測行列， $\mathbf{w}_t, \mathbf{v}_t$ はそれぞれ n 次元のシステムノイズ， p 次元の観測ノイズ¹⁾であり，ガウス白色雑音ベクトルとする． $\mathbf{w}_t, \mathbf{v}_t$ の平均値は 0，共分散行列は

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{w}_t \\ \mathbf{v}_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_s^T & \mathbf{v}_s^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

であり

$$E \{ \mathbf{w}_t \mathbf{x}_s^T \} = \mathbf{0}, E \{ \mathbf{v}_t \mathbf{x}_s^T \} = \mathbf{0}, t \geq s \quad (7)$$

と仮定する．ここに $E\{a\}$ は a の期待値を表す．

3. 2 予測

アンサンブルカルマンフィルタでは，多数の粒子の実現値集合からシステムの統計的な性質を算出する．粒子数が多くなるほど，実現値集合から算出した状態ベクトルの確率分布が真の分布に近くなる．いま， M 個の粒子を作成したとして， m 番目粒子の t における状態量推定値を $\mathbf{x}_{t|t}^{(m)}$ とすると， $t+1$ の状態量予測値 $\mathbf{x}_{t+1|t}^{(m)}$ は，式(4)から

$$\mathbf{x}_{t+1|t}^{(m)} = \mathbf{F}_t(\mathbf{x}_{t|t}^{(m)}, \mathbf{w}_t^{(m)}) \quad (8)$$

のように算出される．ここに $\mathbf{w}_t^{(m)}$ はシステムノイズ実現値であり，各粒子ごとに共分散行列 \mathbf{Q}_t に従う正規乱数として作成される．式(8)により全粒子の状態予測値を求め，その共分散行列 $\mathbf{P}_{t+1|t}$ を以下の式より算出する．

$$\bar{\mathbf{x}}_{t+1|t}^{(m)} = \mathbf{x}_{t+1|t}^{(m)} - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{x}_{t+1|t}^{(m)} \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{t+1|t} = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M \bar{\mathbf{x}}_{t+1|t}^{(m)} \bar{\mathbf{x}}_{t+1|t}^{(m)T} \quad (10)$$

式(8)，(10)がアンサンブルカルマンフィルタにおける t から $t+1$ への状態予測式となる．

アンサンブルカルマンフィルタでは，式(8)を計算する手続きが存在すれば状態予測を行うことができ，アルゴリズムの実装が容易である．

3. 3 推定

m 番目粒子のタイムステップ $t+1$ における状態推定値は，以下の観測更新式により算出される．

$$\mathbf{r}_{t+1}^{(m)} = \mathbf{y}_{t+1} - \mathbf{H}_{t+1} \mathbf{x}_{t+1|t}^{(m)} + \mathbf{v}_{t+1}^{(m)} \quad (11)$$

$$\mathbf{x}_{t+1|t+1}^{(m)} = \mathbf{x}_{t+1|t}^{(m)} + \mathbf{K}_{t+1} \mathbf{r}_{t+1}^{(m)} \quad (12)$$

ここに $\mathbf{r}_{t+1}^{(m)}$ は m 番目粒子の観測残差， $\mathbf{v}_{t+1}^{(m)}$ は m 番目粒子の観測ノイズ実現値であり各粒子ごとに共分散行列 \mathbf{R}_t に従う正規乱数として作成される．また \mathbf{K}_{t+1} は $t+1$ のカルマンゲインで

$$\mathbf{K}_{t+1} = \mathbf{P}_{t+1|t} \mathbf{H}_{t+1}^T (\mathbf{H}_{t+1} \mathbf{P}_{t+1|t} \mathbf{H}_{t+1}^T + \mathbf{R}_{t+1})^{-1} \quad (13)$$

で定義される．

タイムステップ $t+1$ における状態量推定値は，粒子の集合平均値から

$$\mathbf{x}_{t+1} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{x}_{t+1|t+1}^{(m)} \quad (14)$$

として求められる．

4. 適応型熱解析の定式化

4. 1 状態ベクトルとシステムノイズ

タイムステップ t の状態ベクトルを以下のように定義する．

$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_t \\ \mathbf{h}_t \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここに \mathbf{T}_t は $N \times 1$ の節点温度ベクトル, \mathbf{h}_t は $K \times 1$ の推定対象の接触熱伝導率を成分とするベクトル, N, K はそれぞれ節点総数, 推定パラメータ総数である. 同様にシステムノイズを次式のように節点温度に対応する $\mathbf{w}_{t,T}$ と推定パラメータに対応する $\mathbf{w}_{t,h}$ に分割して定義する.

$$\mathbf{w}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{t,T} \\ \mathbf{w}_{t,h} \end{bmatrix} \quad (16)$$

4. 2 熱数学モデルの時間更新

式(1)の熱平衡方程式に前進差分を適用し, 節点 i に関するタイムステップ t から $t+1$ への節点温度の差分式を次式のように定義する.

$$T_{t+1,i} = \frac{\Delta t}{C_i} \left[Q_{t,i} - \sum_{j=1}^n C_{ij} (T_{t,i} - T_{t,j}) - \sum_{j=1}^n R_{ij} \sigma (T_{t,i}^4 - T_{t,j}^4) \right] + T_{t,i} + w_{t,i} \quad (17)$$

ここに Δt は時間刻み幅, $w_{t,i}$ は節点 i の熱平衡方程式に対するシステムノイズである. さらに接触熱伝導率もしくは熱伝達係数に関して, 以下の自明な差分式を定義する

$$h_{t+1,k} = h_{t,k} + w_{t,hk} \quad (18)$$

ここに添え字 k は推定対象とする接触熱伝導率のインデックスであり, $w_{t,hk}$ は接触熱伝導率に対するシステムノイズである. 式(15), (16)が接触熱伝導率を状態量に加えた場合の時間更新を表す関数となる. 式(15)の熱コンダクタンス C_{ij} で推定対象とする接触熱伝導率に関連するものは, 状態量 $h_{t,k}$ の関数となる. 推定対象とする熱特性パラメータは放射係数や太陽光吸収率など種々のものが考えられるが, 接触熱伝導率と同様に熱数学モデルの時間更新式に組み込むことができる. 本章では簡略化のため, 接触熱伝導率のみを推定パラメータとした定式化を示す.

4. 3 観測方程式

本研究では, 節点温度を直接観測する観測モデルを考える. いま, p を観測する節点温度の総数として状態ベクトルおよび観測ベクトルを

$$\mathbf{y}(t) = [T_{id(1)} \ \cdots \ T_{id(p)}]^T \quad (19)$$

と定義する. ここに $id(i)$ は観測ベクトルの i 成分に対応する観測温度の節点番号を示すインデックスである. 以上のベクトルに対して, 節点温度を直接観測する場合の観測行列は

$$\mathbf{H}_t = [\mathbf{L} \ \mathbf{p}\mathbf{0}_K] \quad (20)$$

と表される. ここに \mathbf{L} は $p \times N$ のブーリアン行列で, 観測ベクトルの i 成分が j 番目の節点温度を表す場合, \mathbf{L} の ij 成

分が 1 となり, それ以外の成分は 0 となる. また $\mathbf{p}\mathbf{0}_K$ は $p \times K$ の零行列で, 接触熱伝導率を直接観測するデータが存在しないことを意味する.

4. 4 適応型熱解析の実行手順

以下に本研究で提案するアンサンブルカルマンフィルタによる適応型熱解析の具体的な実行手順を示す.

(手順 1) 共分散行列の初期設定

システムノイズの共分散行列を,

$$\mathbf{Q}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_T & \mathbf{0}_N \\ \mathbf{0}_{N^T} & \mathbf{D}_h \end{bmatrix} \quad (21)$$

のように設定する. ここに $\mathbf{D}_T, \mathbf{D}_h$ はそれぞれ N, K 次元の対角行列で

$$\mathbf{D}_T = \begin{bmatrix} \sigma_{T_i}^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_{T_N}^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{D}_h = \begin{bmatrix} \sigma_{h_i}^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_{h_K}^2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

で定義される. ここに $\sigma_{T_i}^2$ は節点 i に関する熱平衡方程式に対するシステムノイズ分散値, $\sigma_{h_i}^2$ は推定対象とする i 番目の接触熱伝導率に対するシステムノイズ分散値である. $\mathbf{0}_N$ は $N \times K$ の零行列である. また, 観測ノイズの共分散行列を,

$$\mathbf{R}_t = \begin{bmatrix} \sigma_{b_1}^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_{b_p}^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

のように設定する. ここに $\sigma_{b_i}^2$ は i 番目観測値の観測ノイズ分散値である.

(手順 2) 状態ベクトルの初期値の設定

節点温度および接触熱伝導率の初期値 $\mathbf{T}_0, \mathbf{h}_0$ を設定する

(手順 3) 状態ベクトルの更新

式(17), (18) から粒子ごとに状態量予測値を求める. このときシステムノイズは, 式(21) に従う正規乱数として粒子ごとに作成される.

(手順 4) 状態量予測値の共分散行列の計算

手順 3 で求めた粒子の状態量予測値から式(9),(10)により $\mathbf{P}_{t+1|t}$ を計算する.

(手順 5) カルマンゲインの計算

式(20), (24) で定義される $\mathbf{H}_{t+1}, \mathbf{R}_{t+1}$ と手順 4 で求めた $\mathbf{P}_{t+1|t}$ を使ってカルマンゲイン \mathbf{K}_{t+1} を計算する.

(手順 6) 観測による更新

観測データを使って, 粒子ごとに式(11)から $\mathbf{r}_{t+1}^{(m)}$ を計算する. このとき観測ノイズは, 式(24)に従う正規乱数として粒子ごとに作成される. さらにカルマンゲイン \mathbf{K}_{t+1} と $\mathbf{r}_{t+1}^{(m)}$ から式(12) により各粒子の状態推定量 $\mathbf{x}_{t+1|t+1}^{(m)}$ を計算する.

(手順 7) 接触熱伝導率推定量の算出

タイムステップ $t+1$ の接触熱伝導率推定量を粒子の集合平均値から

$$\mathbf{h}_{t+1} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{h}_{t+1}^{(m)} \quad (25)$$

のように求める.

(手順 8) タイムステップの更新

タイムステップを1つ更新し, 手順3に戻る.

以上の手順より観測データを得るごとに逐次熱数学モデルが更新され, 観測データに適合した節点温度推定値を求めることができる.

5. 検証実験

本論文で提案するアンサンブルカルマンフィルタを用いた適応型熱解析の有効性を示すために検証実験を行った. 今回の検証実験は, 解析手法そのものの検証を目的としているので, 熱真空試験ではなく実験の容易な大気中での試験とした. また推定するパラメータに関しても, 接触熱伝導率ではなく熱伝達係数とした. 先に述べたように熱伝達係数の推定は接触熱伝導率の推定と完全に同じ定式化で行うことができる. 以降にその概要と結果を示す.

5. 1 実験概要

第1図に検証実験に用いる実験装置の概略図を示す. 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. また部材近傍に冷却用のファンを設置する. 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,

(ステップ 1) ヒータにより部材が定常状態になるまで加熱

(ステップ 2) 定常状態の部材をファンで冷却

(ステップ 3) ファンを停止し, 一定時間放置

の3つのステップで行う. いずれのステップでもヒータの出力は47.5Wで一定とする. 各ステップで部材・大気間の熱伝達係数が大きく変化する. 検証実験では, 熱伝達係数を推定パラメータとした適応型熱解析を行い, その有効性を検証する. なお4.2節では接触熱伝導率を推定パラメータとした時間更新式を示したが, 熱伝達係数を推定パラメータとした場合, 時間更新式はまったく同一のものとなる.

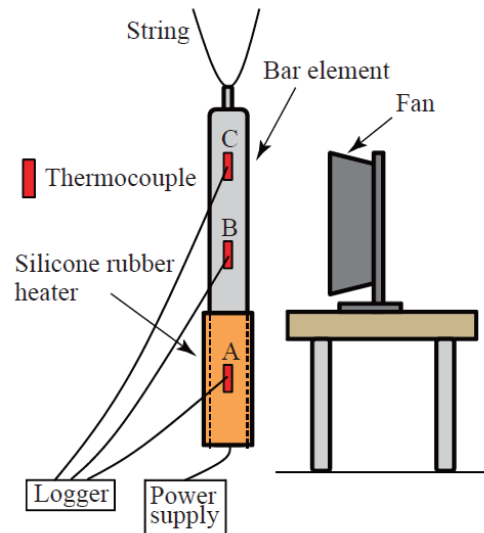


Fig. 1: Schematic diagram of experimental setup

5. 2 熱数学モデル

第2図に検証実験に用いるトラス部材の熱数学モデルを示す. 部材の分割数は3とし, 下部のシリコンラバーヒータで覆われた部分を1要素, そのほかの部分をも2要素に分割する. それぞれの要素に節点1~3を設定し, 大気を境界節点4として設定する. 第1表に各節点の諸元を示す. なお節点の初期温度は全て実験時の室温である22.0°Cとする.

部材内の熱伝導は, 鉄の熱伝導率を80.3W/(m・K)として節点間に熱伝導パスを設定しモデル化する. ヒータによる加熱は, 節点1に外部熱量を与えることでモデル化する. 部材の熱放射に関しては, 鉄の放射率を0.38として解析ソフト“Thermal Desktop”⁽¹²⁾により放射係数を計算し, 適切な放射パスを設定することでモデル化する.

部材・大気間の対流熱伝達は, 節点1~3と節点4との熱伝達パス1~3を設定してモデル化する. ここでそれぞれの*i*番目の熱伝達パスの設定に必要な熱伝達係数 h_i ($i = 1 \sim 3$) が推定パラメータとなり, 4.4節で示した方法により逐次推定しながら熱解析を行う.

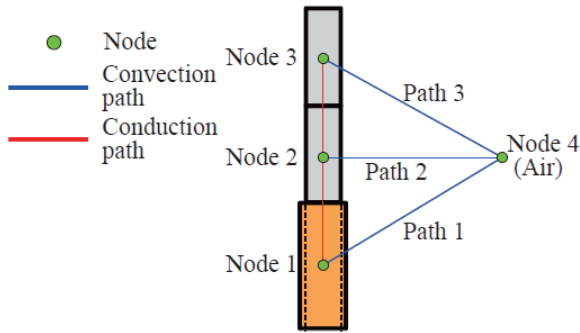


Fig. 2: Thermal mathematical model

Table 1: Definition of nodes

Element	Node ID	C_i [W · s/K]	Init. [°C]
bar (lower part)	1	213.58	22.0
bar (middle part)	2	163.75	22.0
bar (upper part)	3	192.22	22.0
air	4	∞	22.0

5. 3 検証結果

a モデルパラメータの設定

今回の実験では、シリコンラバーで覆われた部分の熱伝達係数 h_1 とそれ以外の部分の熱伝達係数 $h_2 (= h_3)$ の二つの係数を独立な推定パラメータとして採用する。パラメータの初期値は $h_1 = 1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ とする。

b 検証方法

検証実験では、第 1 図の A,B の熱電対計測値をアンサンブルカルマンフィルタに利用する観測値に、C の熱電対計測値を適応型熱解析の推定精度検証に用いる。

c 解析結果

アンサンブルカルマンフィルタの設定値を粒子数 5000, システムノイズ $\sigma_{\eta}^2 = 0.01, \sigma_{\eta}^2 = 0.01$, 観測ノイズ $\sigma_{obs}^2 = 1.0$ として適応型熱解析を実行した。比較のためにモデルパラメータを状態変数に含めない解析, つまり熱数学モデルは不変で適応型でない解析を同時に行った。便宜上, 本節では前者の解析を CaseA, 後者の解析を CaseB とよぶことにする。

第 3 図に検証用の節点 3 の測定データおよび CaseA,B における推定温度を示す。第 3 図の測定データより, トラス部材はまずヒータで加熱され定常状態に達する様子がわかる(Step1). 次にファンによる冷却で部材の温度は急激に減少し, 定常状態に達する(Step2). 最後にファンを停止した後, 部材の温度は再び上昇をはじめる(Step3). CaseA に注目すると, 推定値が測定データの温度に精度よく追従することがわかる。一方で CaseB の解析では, 推定温度と測定データの差が大きくなっている。第 2 表に測定データを真値とした場合の各ステップごとの RMS 誤差を示す。表より全てのステップで CaseA の RMS 誤差が小さくなり, 適応型熱解析が有効であることがわかる。

第 4 図に CaseA における熱伝達係数の推定履歴を示す。図より, 各ステップ間の熱環境の急激な変化に対応して, パラメータ推定値も変化することがわかる。

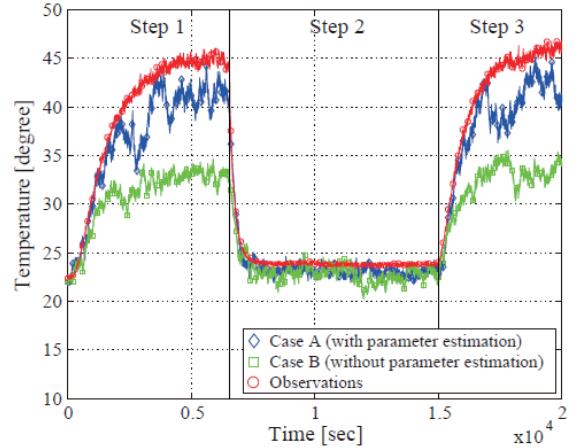


Fig. 3: Temperature estimations and observations of node 3

Table 2: RMS error [°C]

	Step1	Step2	Step3
Case A	3.39	0.86	2.81
Case B	9.53	1.50	7.73

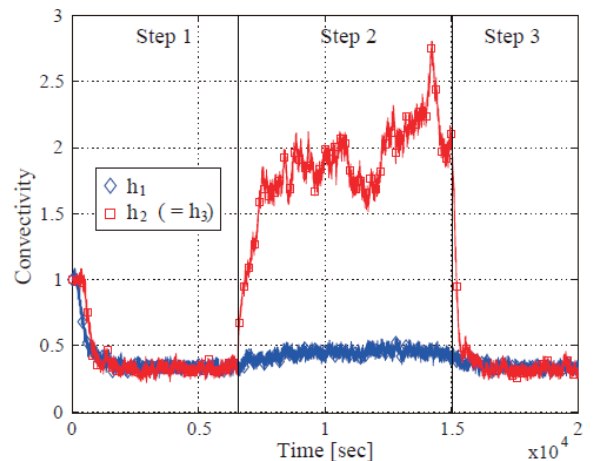


Fig. 4: Convectivity estimations

4. 結論

本論文において, アンサンブルカルマンフィルタを用いた適応型熱解析法を示した。また検証実験によりその有効性を検証した。実験結果から, 本手法により周辺環境の変化に対応して節点温度の予測を精度よく行えることがわかった。今後はさらに精度を向上させるようなアンサンブルカルマンフィルタの各種設定値のチューニング法の開発や熱真空試験環境での検証を行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所戦略的開発研究費の助成のもと, 先進軽量構造システム研究の一環として行われました。

参考文献

- 1) 大島耕一, 松下 正, 小林康徳, 根岸完二, 小木曾建: 熱設計ハンドブック, 朝倉書店, 東京, 1997, II 応用編第 2 章.
- 2) 片山 徹: 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 東京, 1996, 第 9 章.
- 3) Evensen G. : Using the Extended Kalman Filter with a Multilayer Quasi-Geostrophic Ocean Model, *Journal of Geophysical Research*, 97 (1992), pp.17905–17924.
- 4) Evensen G. : Sequential Data Assimilation with a Nonlinear Quasi-Geostrophic Model Using Monte Carlo Methods to Forecast Error Statistics, *Journal of Geophysical Research*, 99 (1994), pp.10143–10162.
- 5) Evensen G. : The Ensemble Kalman Filter for Combined State and Parameter Estimation, *IEEE Control Systems Magazine*, 29 (2009), pp.83–104.
- 6) 中村和幸, 上野玄太, 樋口知之: データ同化 : その概念と計算アルゴリズム, *統計数理*, 53 (2005), pp.211–229.
- 7) Annan, J. D., Hargreaves, J. C., Edwards, N. R. and Marsh, R. : Parameter Estimation in an Intermediate Complexity Earth System Model Using an Ensemble Kalman Filter, *Ocean Modelling*, 8 (2005), pp. 135–154.
- 8) Ueno, G., Higuchi, T., Kagimoto, T. and Hirose, N.: Application of the Ensemble Kalman Filter and Smoother to a Coupled Atmosphere-Ocean Model, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 3 (2007), pp. 5–8.
- 9) 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*, 9 (2010), pp. 1–8.
- 10) 茂原正道: 宇宙システム概論, 倍風館, 東京, 1995, 第 7 章.
- 11) 茂原正道, 鳥山芳夫: 衛星設計入門, 倍風館, 東京, 2002, 第 4 章.
- 12) C&R Technologies: Thermal Desktop User's Manual, Colorado, 2007.
- 13) Gilmore, D. G. : Satellite Thermal Control Handbook, The Aerospace Corporation Press, California, 1994, pp.5-23–29.
- 14) C&R Technologies: SINDA/FLUINT User's Manual, Colorado, 2008.