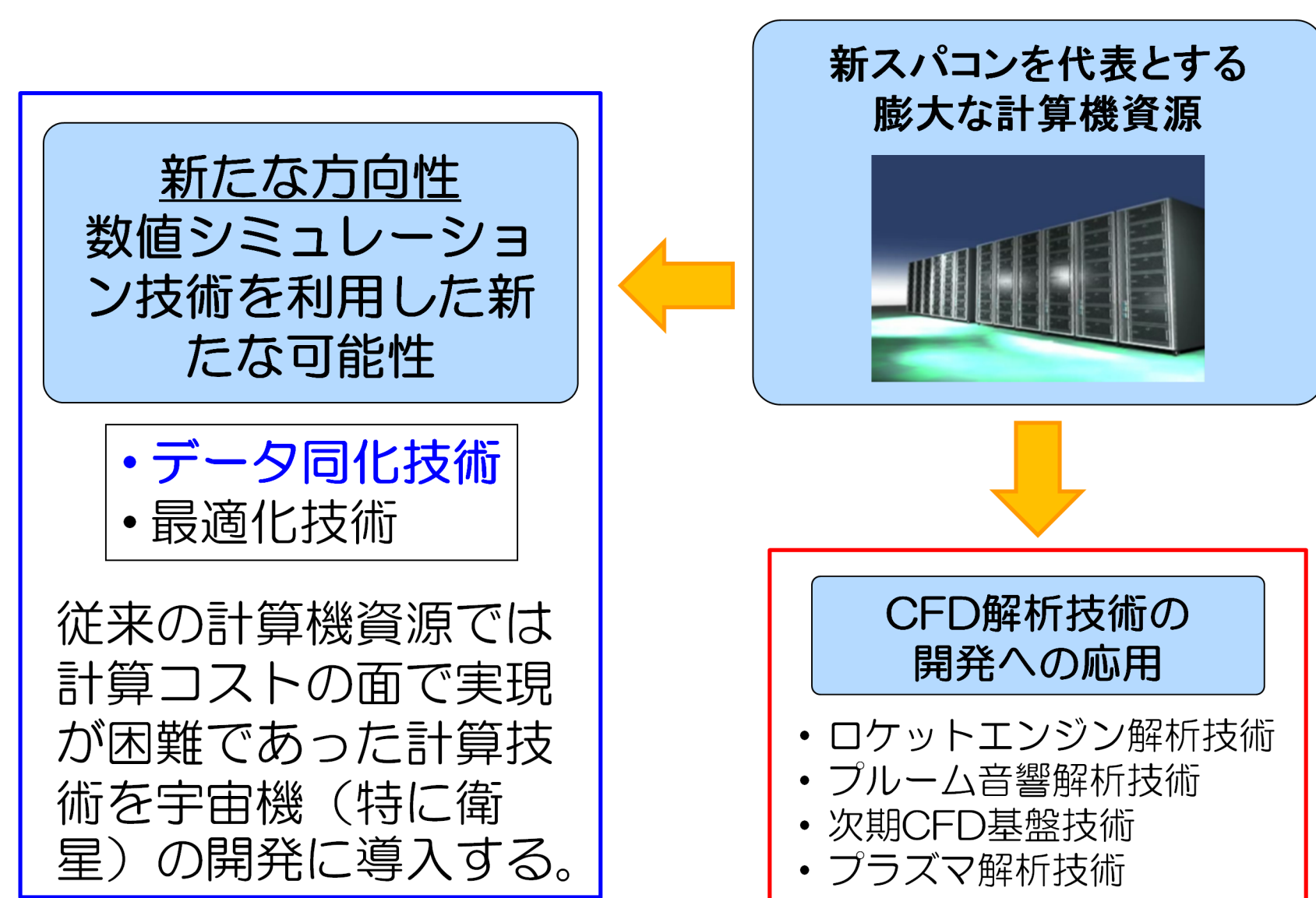


P7-095 データ同化による測定データと数値解析モデルの融合 : 宇宙機熱設計への適用に向けて

秋田 剛, 高木亮治, 嶋 英志 (JAXA/JEDI)

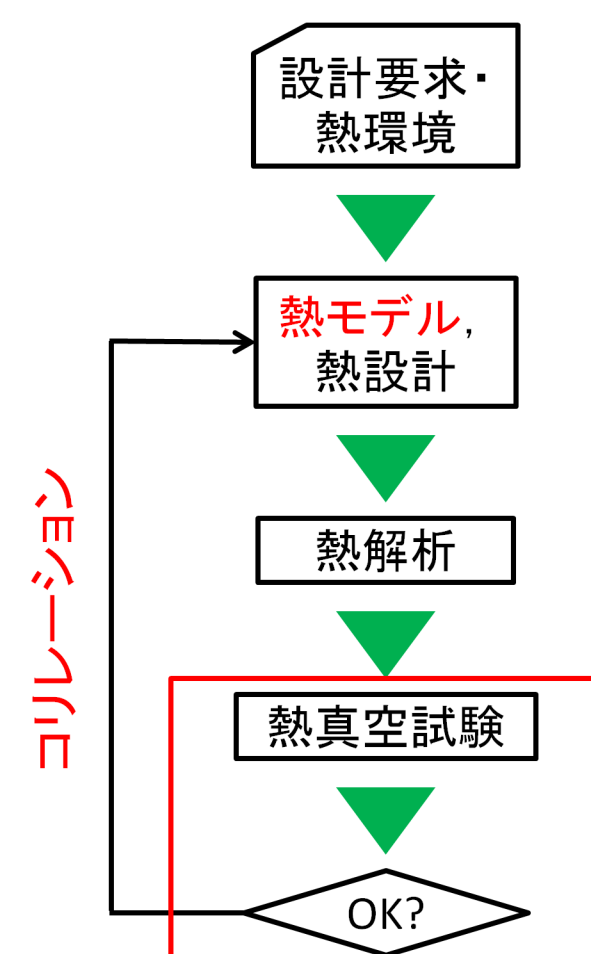
1. 背景

数値シミュレーション技術の展開



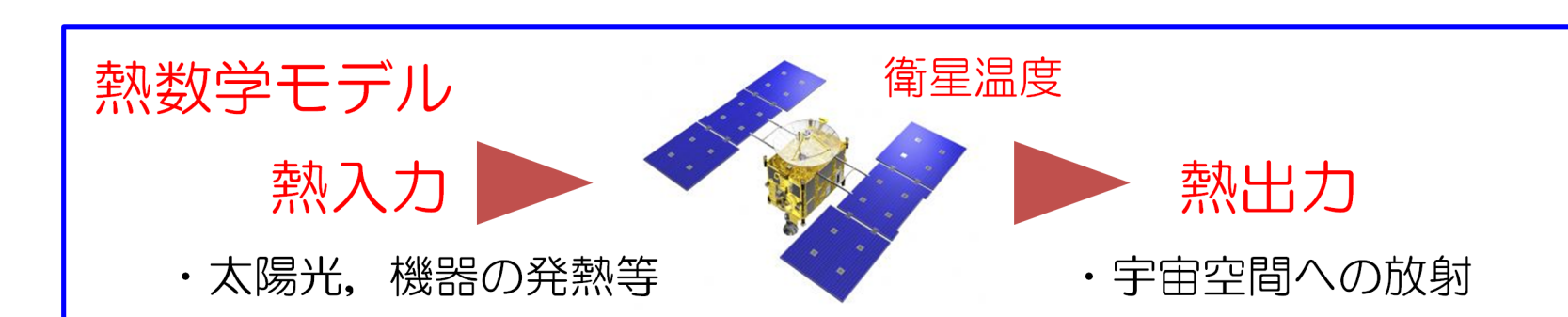
宇宙機の熱設計

- 宇宙空間における過酷な熱環境でも宇宙機が正常に動作するように保証する。
- 要求された運用期間内で、搭載機器や構体の温度分布が許容範囲に収まるように熱設計を行う。
- 軌道上での宇宙機の温度を精度良く予測する熱数学モデルを構築する。
- 温度予測値が熱試験の実測値と一致するように手動で熱数学モデルのパラメータ調整を行う。



宇宙機の熱数学モデル

宇宙空間では伝導と放射によって熱交換



熱数学モデルに必要な物性値

- 熱特性:
 - 熱容量, 放射率, 太陽光吸収率等
- 伝導:
 - 熱伝導係数, 接触熱伝導率
- 放射:
 - 放射係数

材料ごとに固有の値
接触圧や接触面積に依存
実験データから値を決定
幾何学的な配置から決定

現状の課題

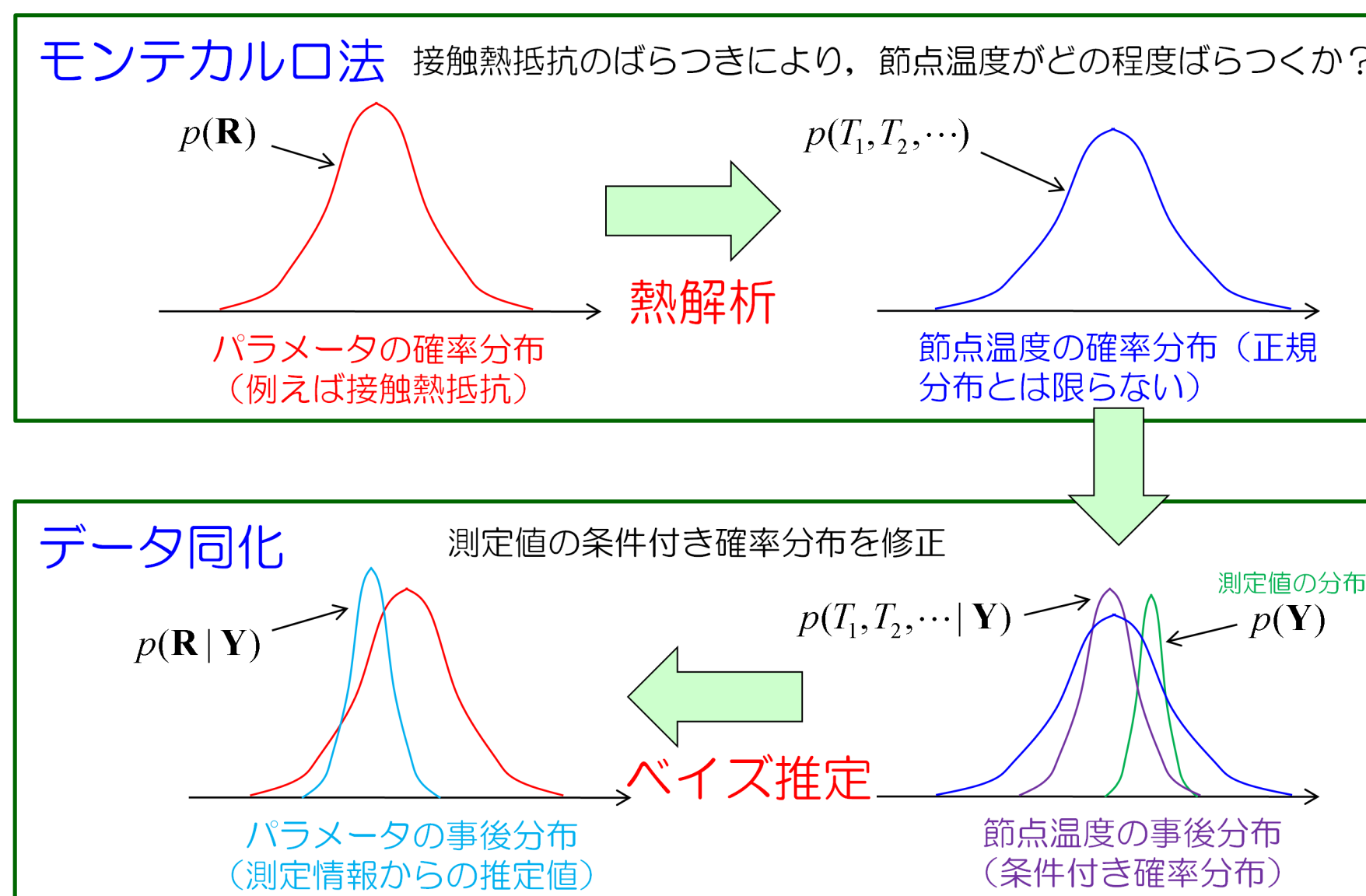
- 物理シミュレーションの限界
 - 衛星の熱数学モデルの様に、物理モデルだけでは限界がある。
 - 理論だけでは物理パラメータを決められない。
 - 製作工程、外的要因、経年変化、不確定性、...
 - 統計処理・確率論的な扱いが必要か？
- 物理モデルと現実世界を繋ぐ方法論が必要
 - モデルの導入とモデルパラメータの推定（特に、現物合わせ的なパラメータ推定）が必要
 - ある種の最適化問題とも考えられる

2. データ同化

データ同化とは

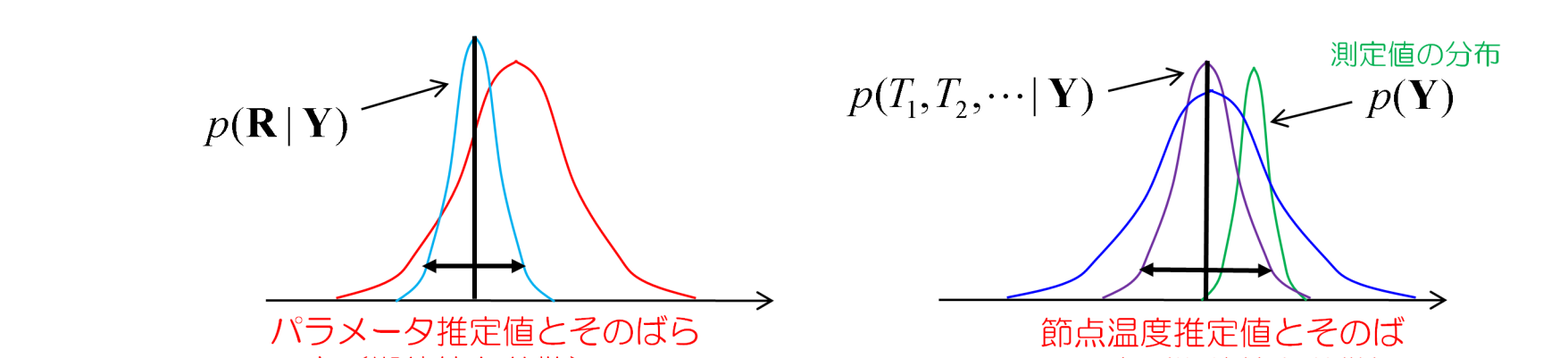
- 物理シミュレーションモデルと実際の観測・実験データを統合するための方法論
 - 気象・海洋分野で発達：例）天気予報
 - 観測・実験データは物理的・社会的制約による限界がある。
 - 物理シミュレーションのみでは実際の物理現象を再現できない
 - モンテカルロ法とベイズ推定を基礎にした計算統計学的手法
 - 既存の解析コードへの組み込みが容易
 - 大規模モデルに適用する場合、計算負荷が膨大（HPC技術の利用）
- データ同化のメリット
 - 統計的により良い解の予測（不確定性の定量化）
 - パラメータの自動推定、初期条件、境界条件の構築
 - 観測値の補間
 - 状態量間の依存関係の把握（共分散行列の相関解析）

データ同化手法の概要

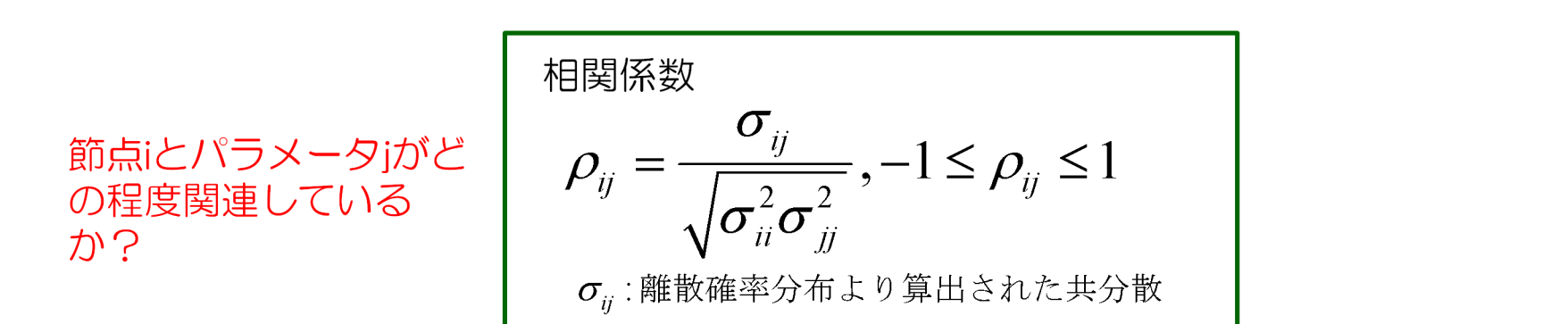


確率分布がわかると

パラメータ・節点温度の推定値とばらつきはどの程度？



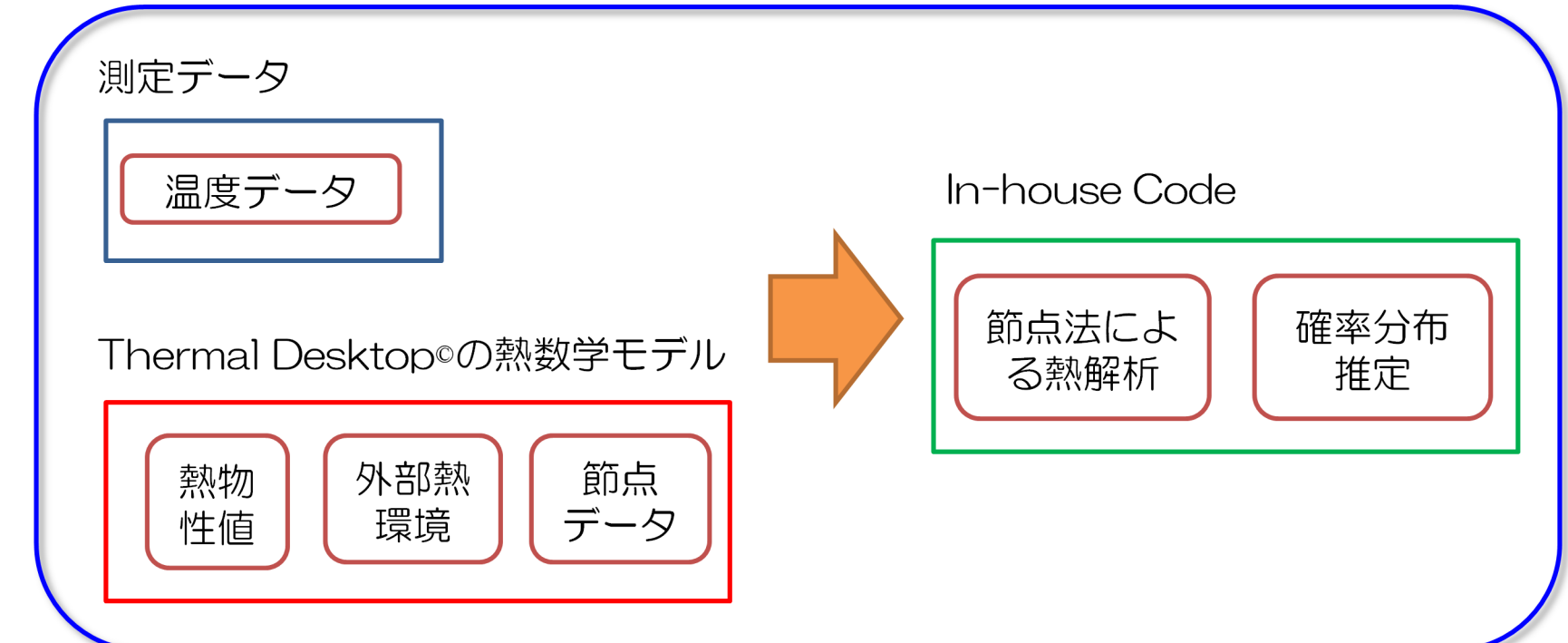
パラメータや節点温度のお互いの依存関係はどの程度か？



3. 衛星熱解析への適用

データ同化コード開発

熱解析におけるデータ同化



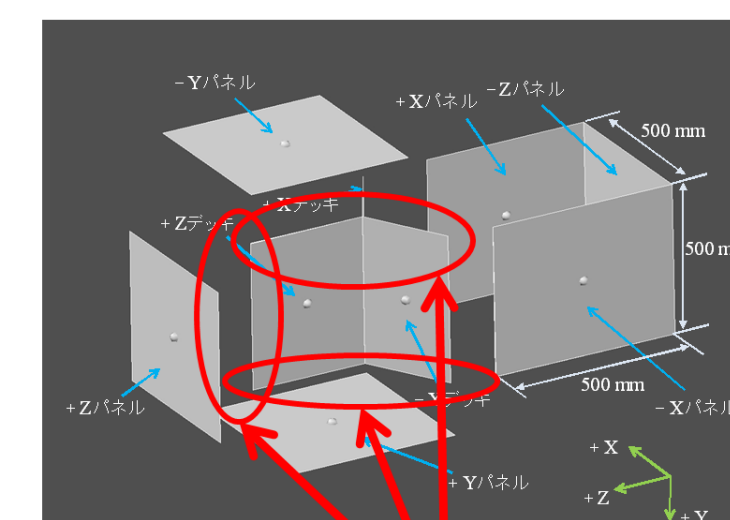
- データ同化の有効性を検証（アンサンブルカルマンフィルタ、粒子フィルタを使ったアプローチ）
 - データ同化用の熱解析コード開発（TDの出力ファイルを読み込み、接触熱抵抗、ヒータ出力、放射係数等の推定プログラム）
 - 数値実験による検証^[1]（小型衛星モデルを用いた接触熱伝導係数推定実験、節点数16、未知パラメータ4）
 - 簡易実験モデルによる検証^[2]（トラス部材の熱伝導率推定、節点数4、未知パラメータ2）
 - 実データを使った検証（小型衛星モデルのコリレーション問題への適用、節点数3000程度、未知パラメータ48）
1. 秋田剛, 高木亮治, 嶋英志, "アンサンブルカルマンフ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. 1-6, 2010.
2. 秋田剛, 高木亮治, 嶋英志, 石村康生, "アンサンブルカルマンフィルタの連型熱解析への適用," 第42回流体物理学講演会, 2010.

小型衛星での双子実験

- 双子実験:
 - 正しいパラメータの値を用いて数値シミュレーションを行う。
 - 上記の数値シミュレーション結果に観測誤差を加えることで観測データを表現
 - 偽のパラメータの値からパラメータ推定を行う。

数値実験モデル

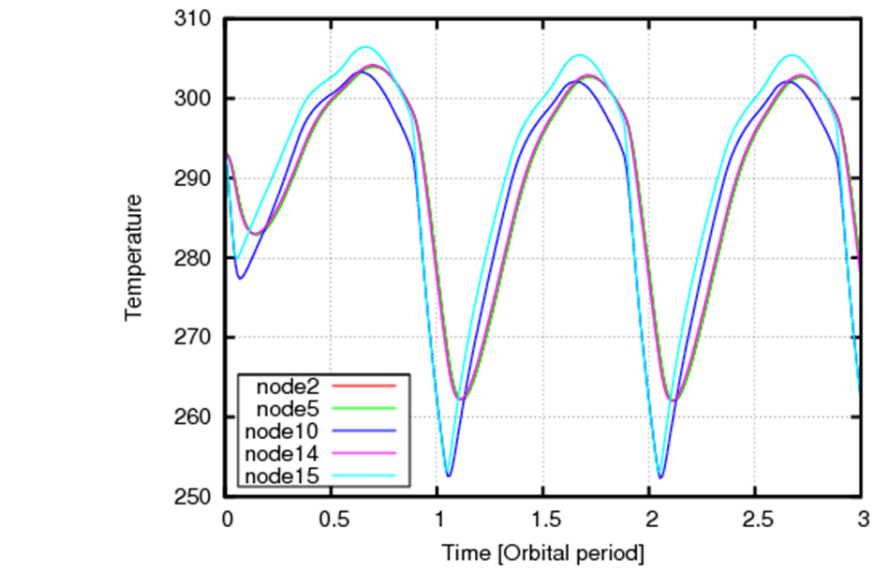
- 状態変数: 20 (=16+4)
- 節点数: 16
- 観測点: 5
 - node2,5,10,14,15
- 未知パラメータ数: 4
 - edge2,9,21,24



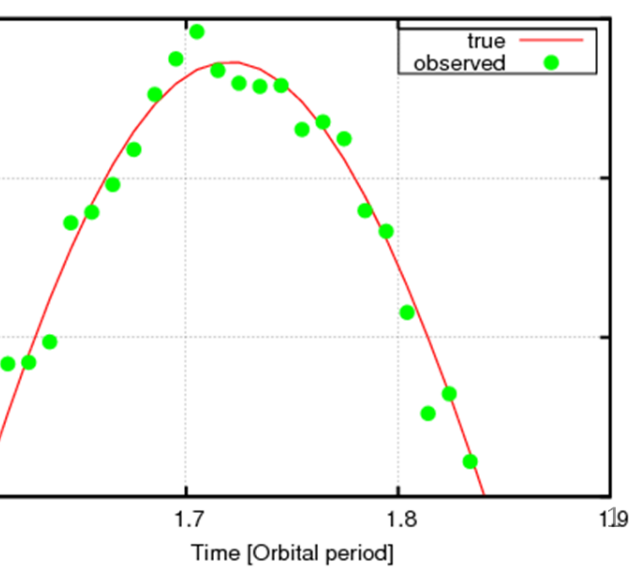
内部デッキと構体の接触部の接触熱伝導率を推定。

- 1周期: 6052.4秒
- 50,000秒 (8周期分)
- MPI+OpenMP
- 10⁴粒子/CPUで4.5時間

温度履歴 (シミュレーション結果)

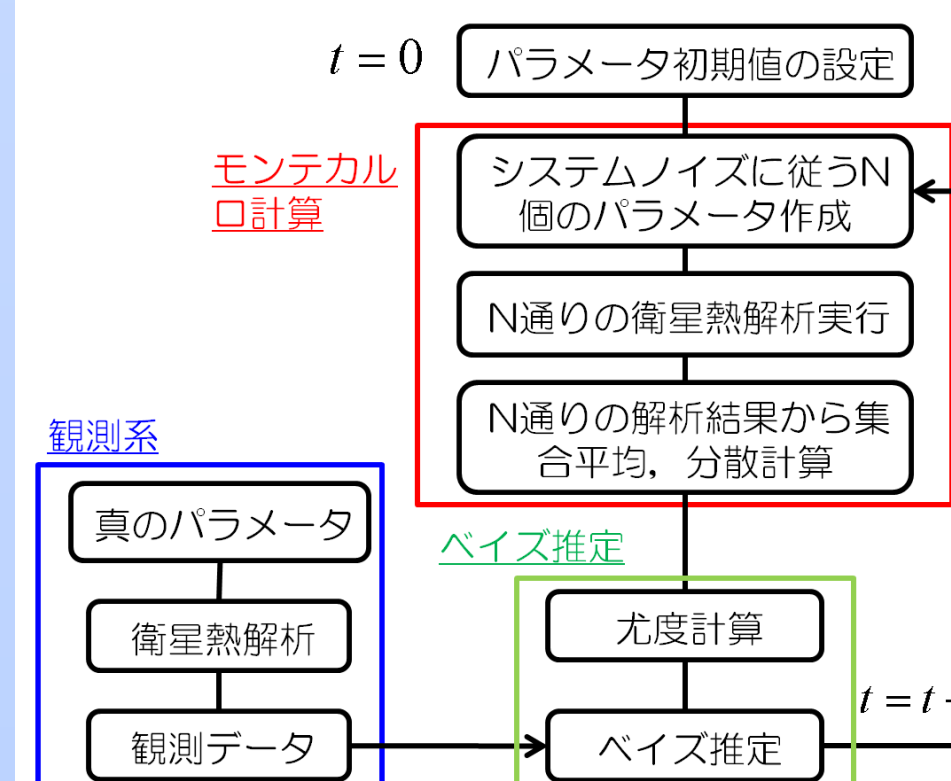


真値と観測値

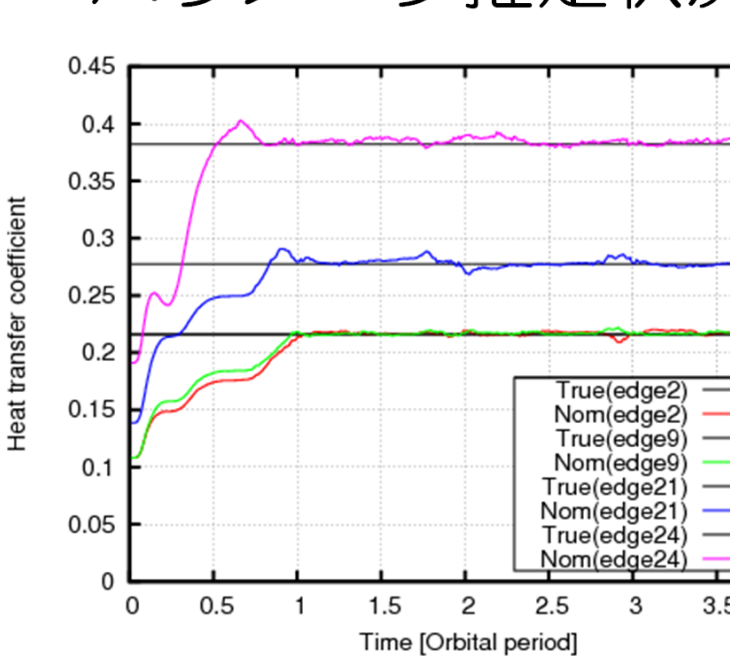


推定手順と結果

パラメータ推定手順

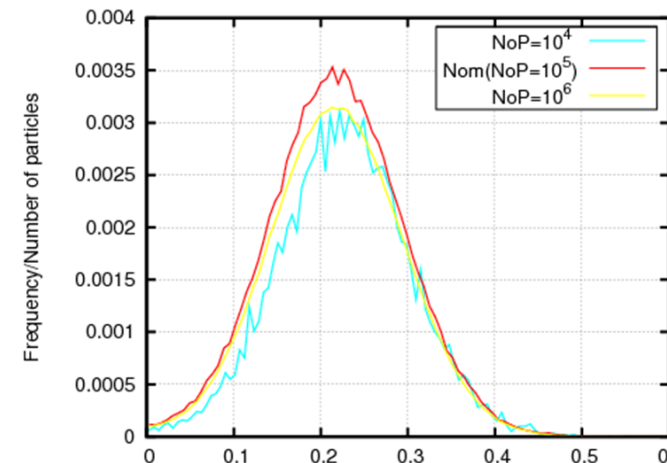


パラメータ推定状況

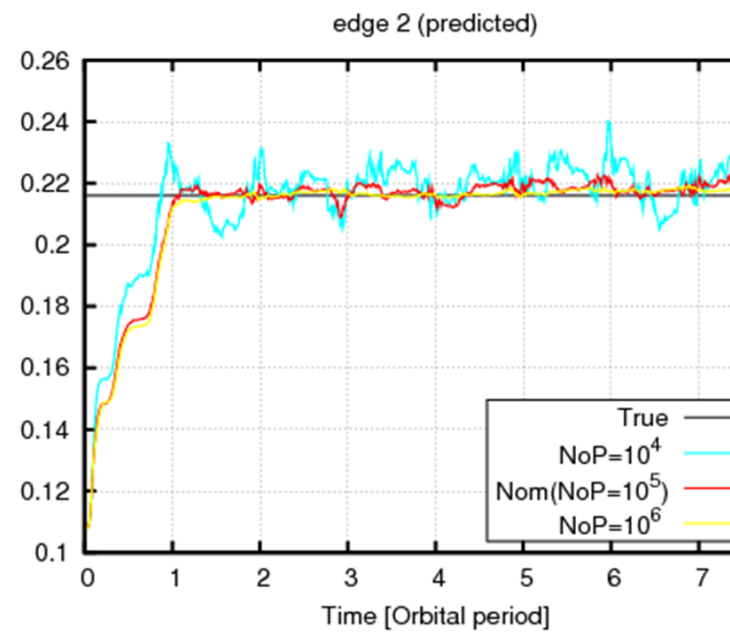
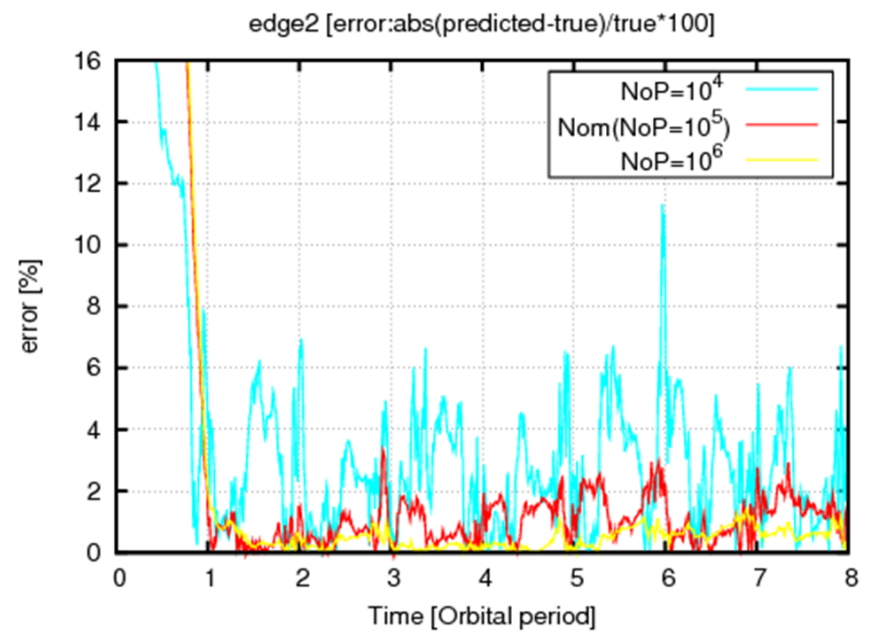


モンテカルロ法のサンプル数 (粒子数の影響)

- 粒子数が増えると
 - 安定性、推定精度が向上
 - 若干収束性が悪化？
 - 分布の表現性が向上



T = 7.93でEdge2の予測分布



4. 今後の展開

- 実データを使った中規模モデルの自動コリレーション
- 相関係数を用いた感度解析
- 観測点配置の最適設計

データ同化手法の適用