

超小型衛星搭載用紫外線望遠鏡 の統計的な熱数学モデル最適化

2024/3/8 [Om3]

東京工業大学

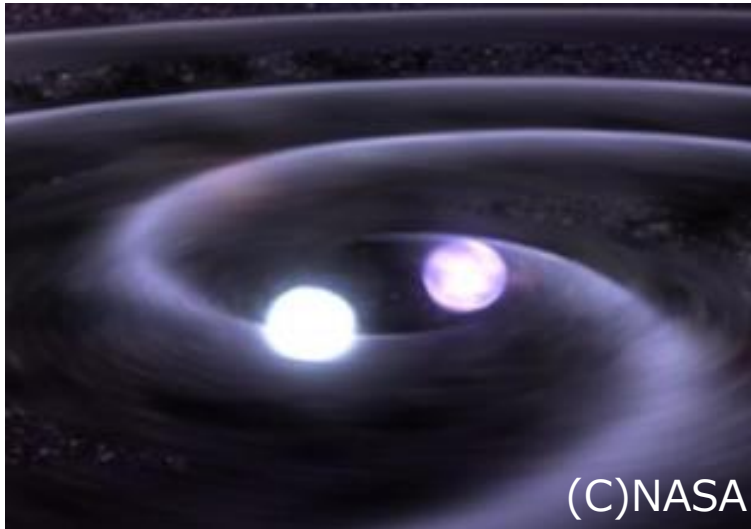
谷津研究室 早津 俊祐

目次

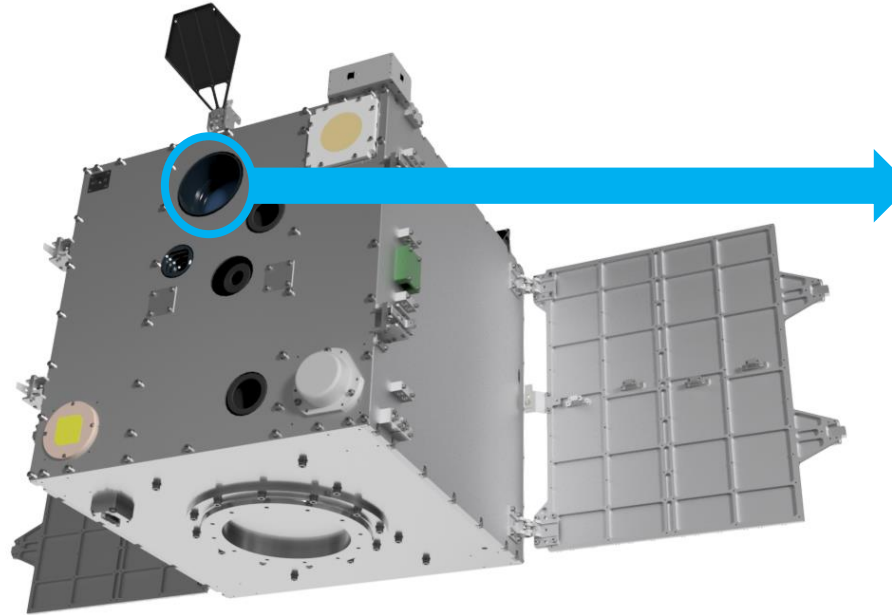
- 背景
- 研究目的
- 熱真空試験
- 試験結果解析手法
- 解析結果
- まとめ

背景～中性子星連星合体の観測

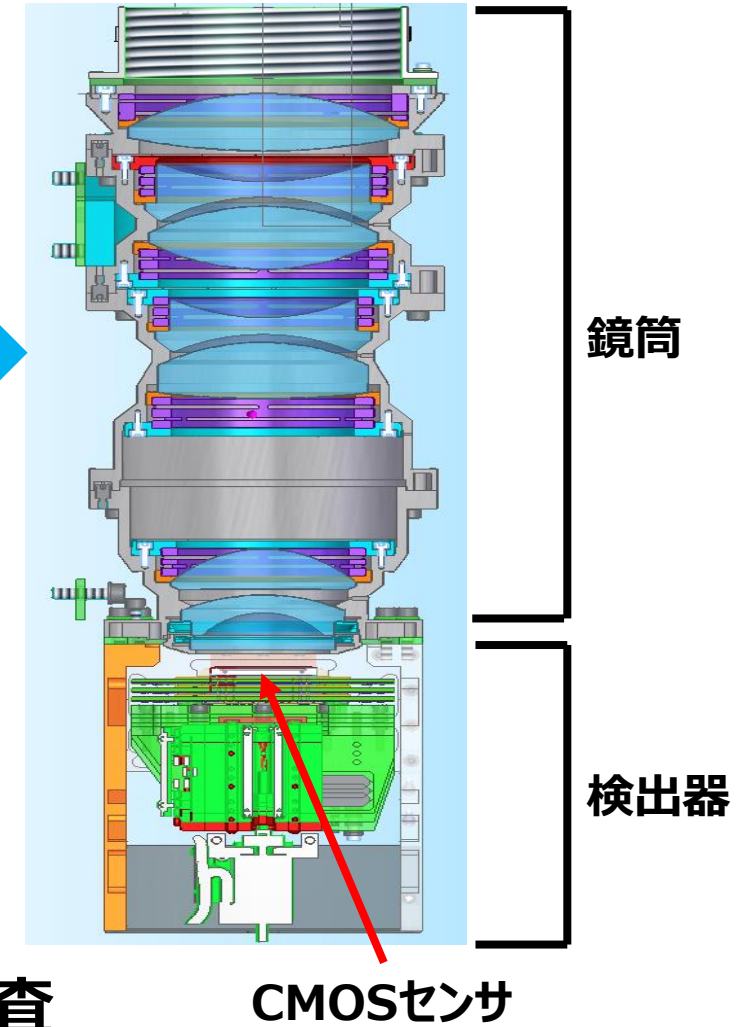
中性子星連星合体



うみつばめ衛星



紫外線望遠鏡



- ターゲットは重力波源である中性子星連星合体
- 合体直後の紫外線放射を観測することで重元素の起源を探查
- 目標の限界等級を達成するため、CMOSセンサを軌道上で -20°C 以下に冷却

軌道上でのCMOSセンサ温度を求めるには

1. 熱真空試験で熱平衡状態の各部の温度を実測
2. 平衡温度を再現する熱数学モデルを求める
3. 軌道上での温度をシミュレーション

■熱数学モデルとは

- 物体間の熱の流れやすさを表す熱コンダクタンス（単位：W/K）でパーツ間をつないだモデル

簡単な熱数学モデルの例



$$Q = C_1(T_{\text{CMOS}} - T_1) + C_2(T_{\text{CMOS}} - T_2)$$

研究目的

これまで一般的に用いられてきた手法

熱真空試験



熱コンダクタンスを手動で調整



熱数学モデル完成



軌道上温度シミュレーション

- ・非常に時間がかかる
- ・精度が悪い
- ・信頼性が評価できない

今回用いる手法

熱真空試験



今回開発

熱コンダクタンスを最適化を用いて自動で調整



熱数学モデル完成

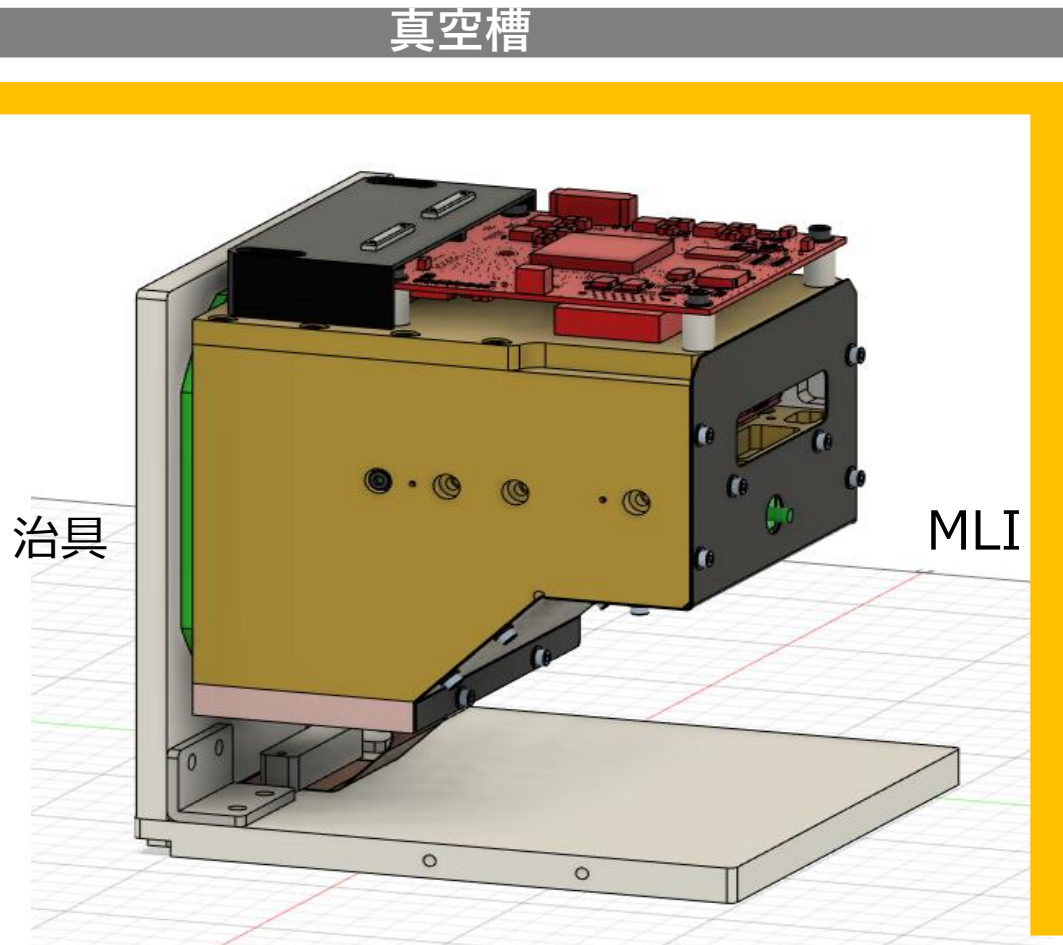


軌道上温度シミュレーション

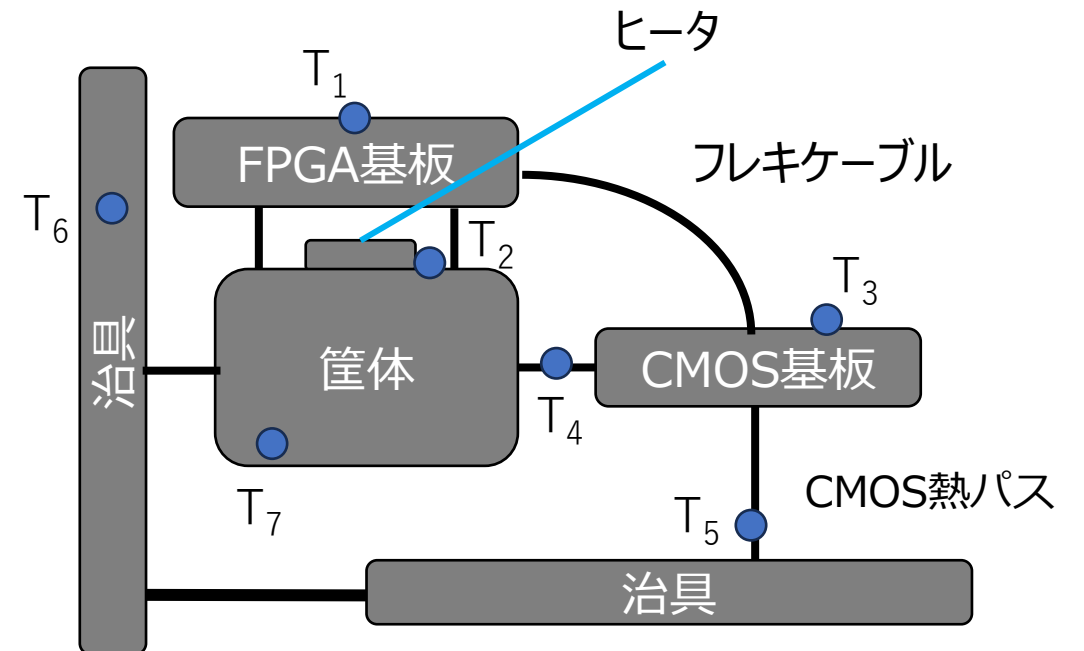
- 熱真空試験結果を用いて熱数学モデルを数学的に最適化して精度を向上させ、信頼性を評価できる手法を開発する
- 作業時間の短縮し、衛星開発の効率化を図る

熱真空試験方法

- 検出器を真空槽に入れて**平衡温度を測定**
- 内部機器を発熱させ、温度変化が $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/30\text{min}$ となるまで待機



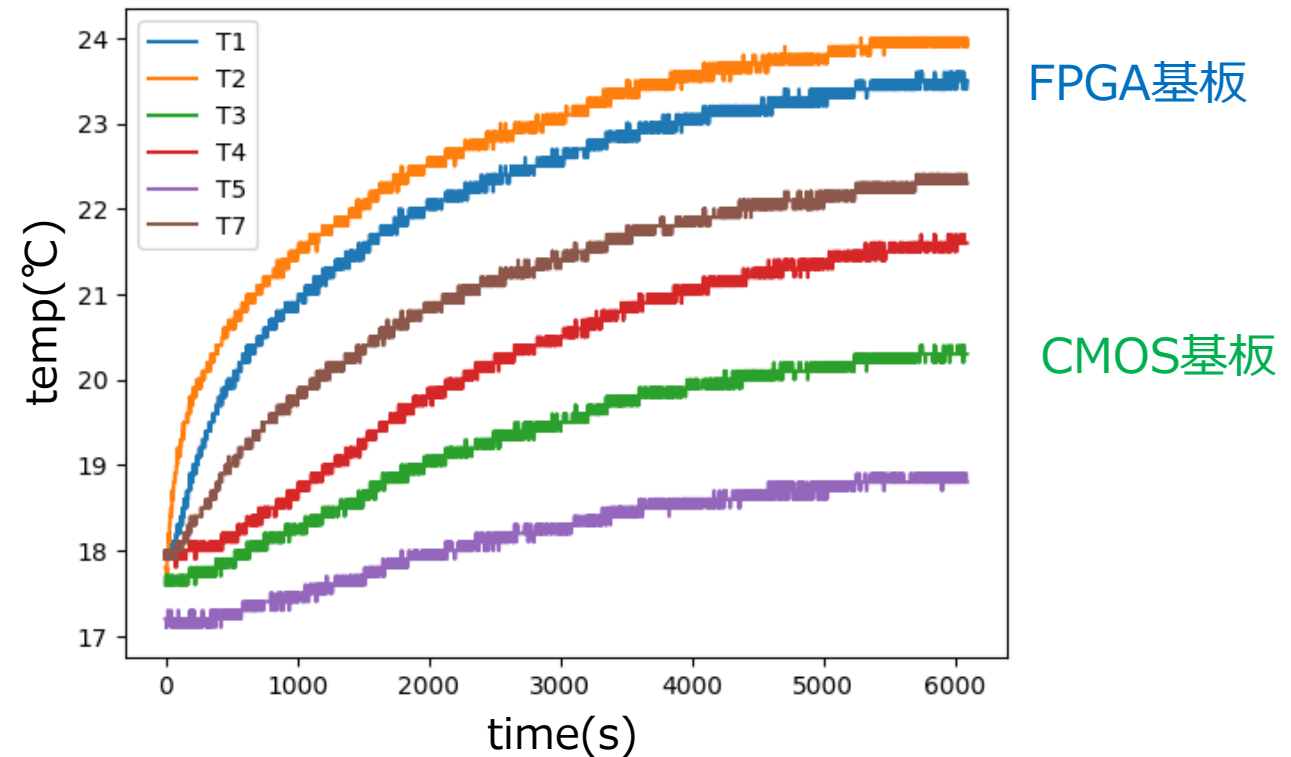
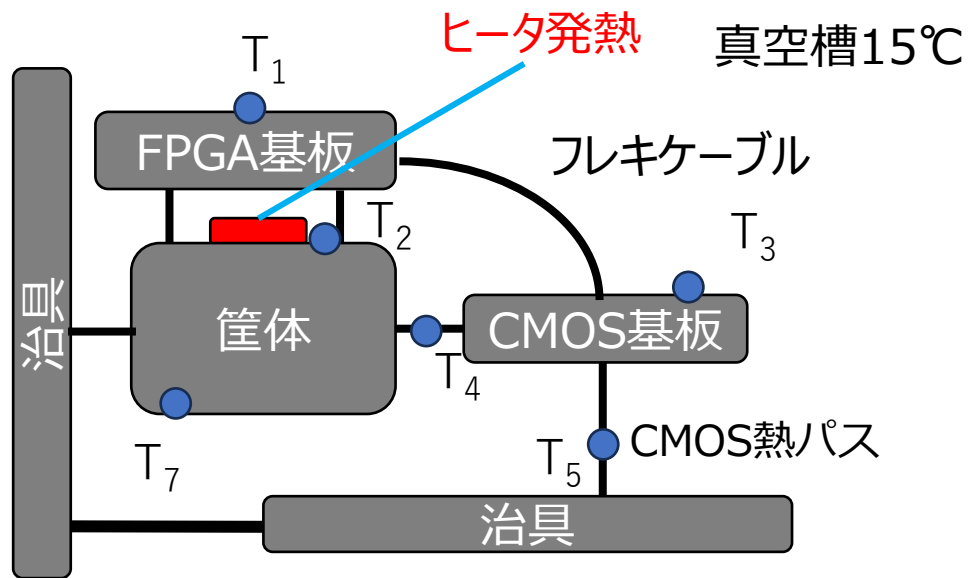
熱回路概要



試験条件・結果

■発熱源を変えた4つの条件で試験

- できるだけ多くの平衡温度を取得し、データ点数を増やす



熱数学モデル

■温度測定点をノードに持つ熱数学モデルを作成

➤熱量 Q , 温度 T は既知、熱コンダクタンスを C を調整

$$Q_1 + Q_{r1} = C_1(T_1 - T_3) + C_2(T_1 - T_2)$$

$$Q_2 + Q_{r2} = C_1(T_3 - T_1) + C_3(T_3 - T_4) + C_7(T_3 - T_5)$$

$$Q_3 + Q_{r3} = C_0(T_5 - T_6) + C_7(T_5 - T_3)$$

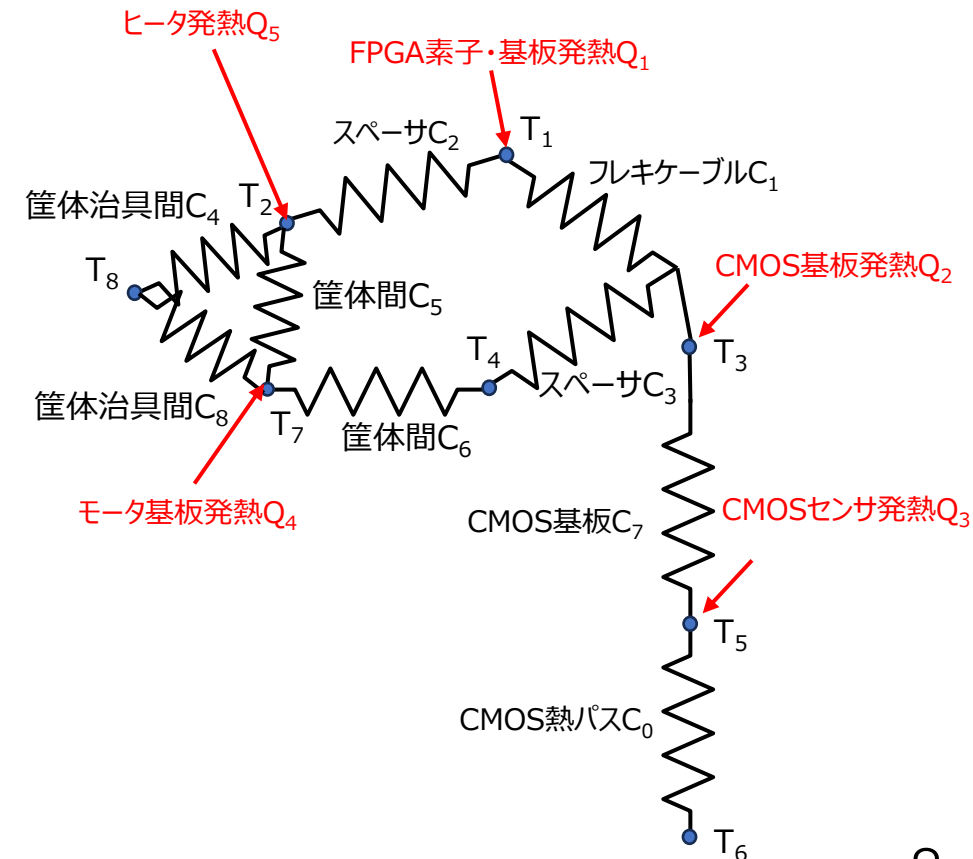
$$Q_4 + Q_{r4} = C_5(T_7 - T_2) + C_6(T_7 - T_4) + C_8(T_7 - T_8)$$

$$Q_5 + Q_{r5} = C_2(T_2 - T_1) + C_4(T_2 - T_8) + C_5(T_2 - T_7)$$

$$0 + Q_{r6} = C_3(T_4 - T_3) + C_6(T_4 - T_7)$$

Q_i : 内部機器発熱 (実測)

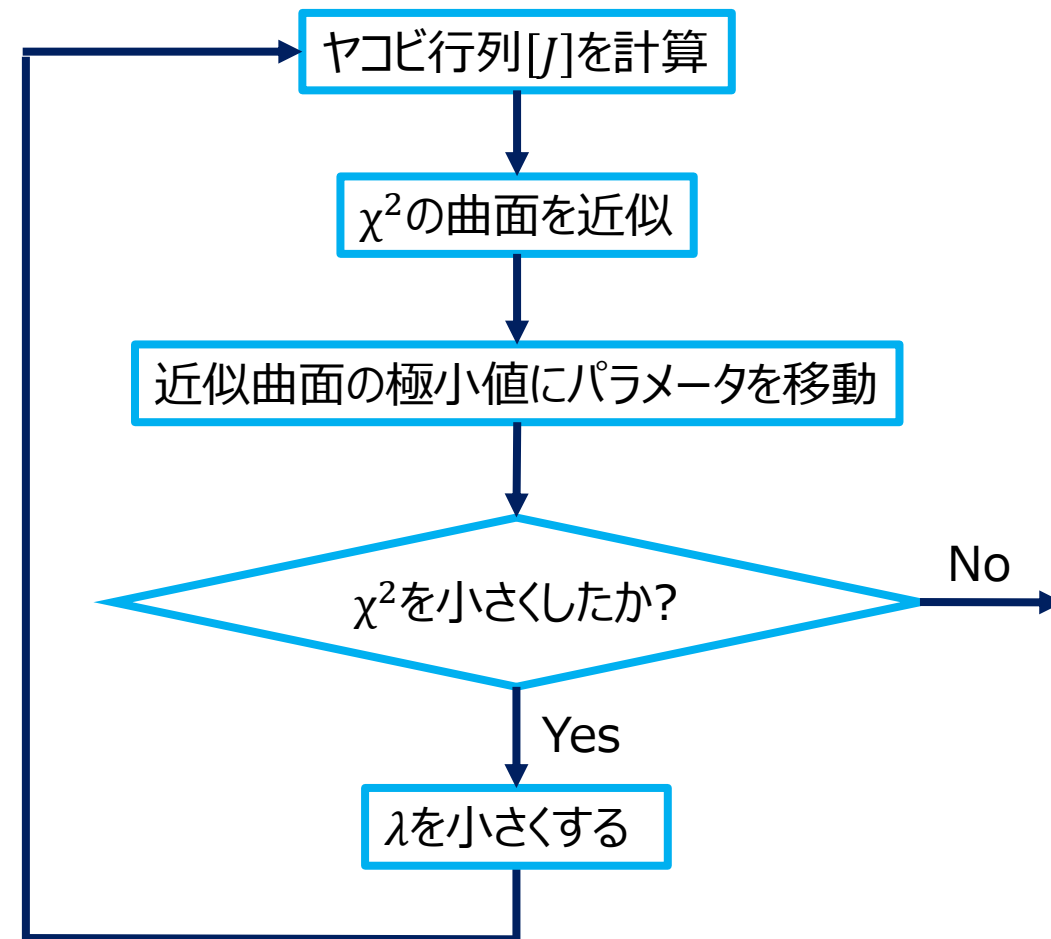
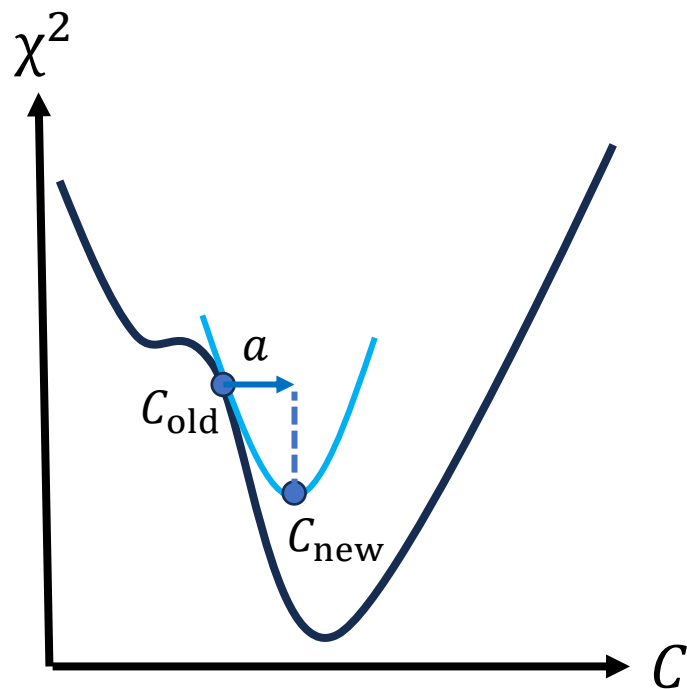
Q_{ri} : 輻射放熱 (シミュレーション)



解析手法

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(T_i - T_{i_measure})^2}{\sigma^2}$$

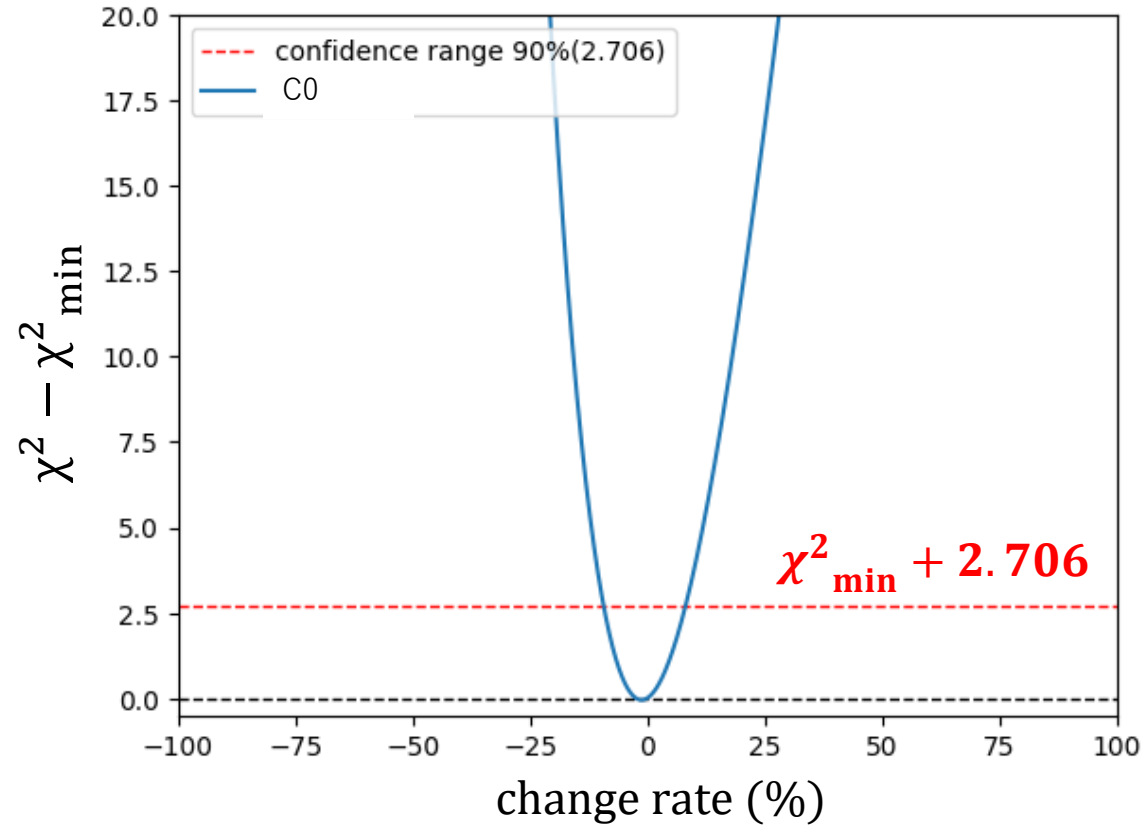
- 勾配降下法 (レーベンバーグ・マーカート法) を用いて χ^2 を最小化する



更新式

$$C_{new} \approx C_{old} - \frac{([J]^T [J] + \lambda [I])^{-1} [J]^T r}{a}$$

最適化実行結果

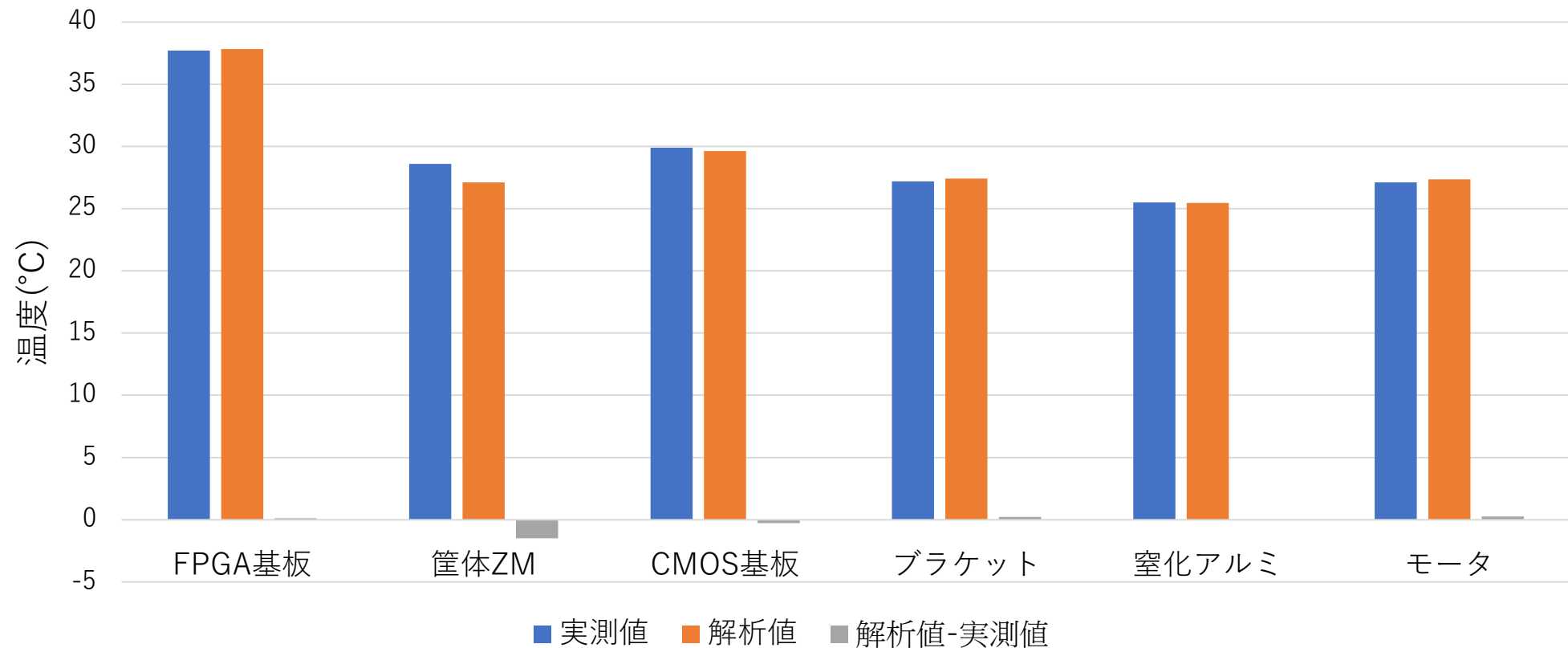


$$\chi^2_{\min}/\text{d. o. f} = 6.16$$

熱コンダクタンス	C_0	C_1	C_2	C_3
値(W/K)	$0.199^{+0.016}_{-0.018}$	$0.00289^{+0.00569}_{-0.00289}$	$0.173^{+0.009}_{-0.006}$	$0.130^{+0.047}_{-0.030}$
C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
$0.266^{+0.008}_{-0.009}$	$0.125^{+0.032}_{-0.025}$	$6.00^{+}_{-5.30}$	$0.0924^{+0.0149}_{-0.0131}$	$0.0162^{+0.0047}_{-0.0043}$

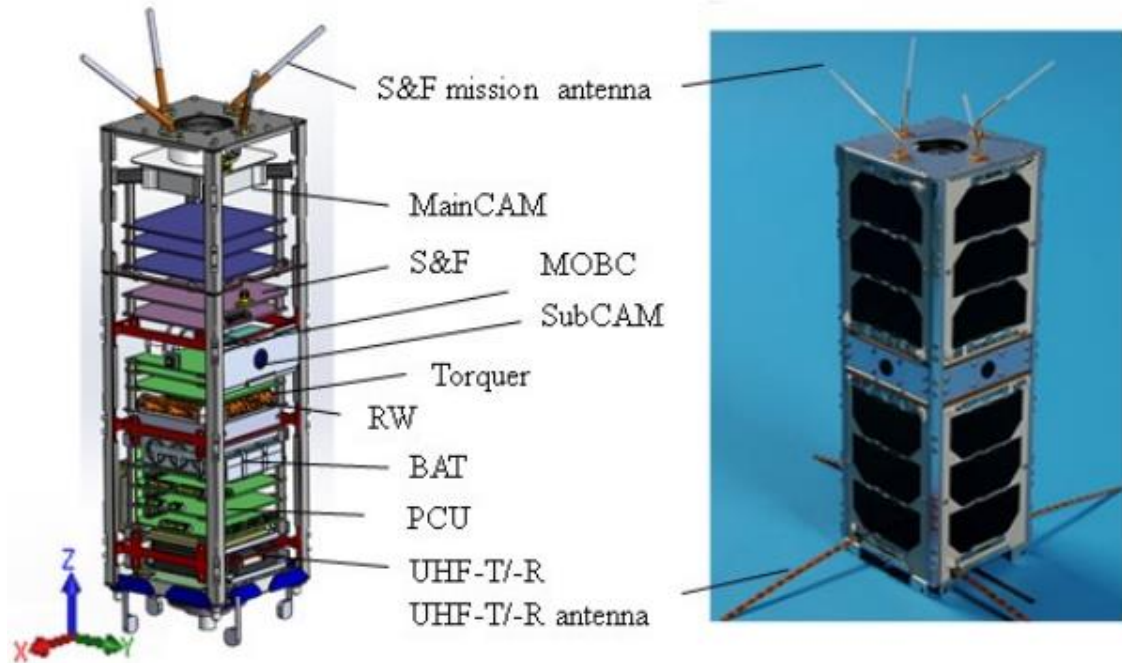
解析結果

■ 温度の実測値と、熱コンダクタンス修正後のモデルによる温度の解析値の比較



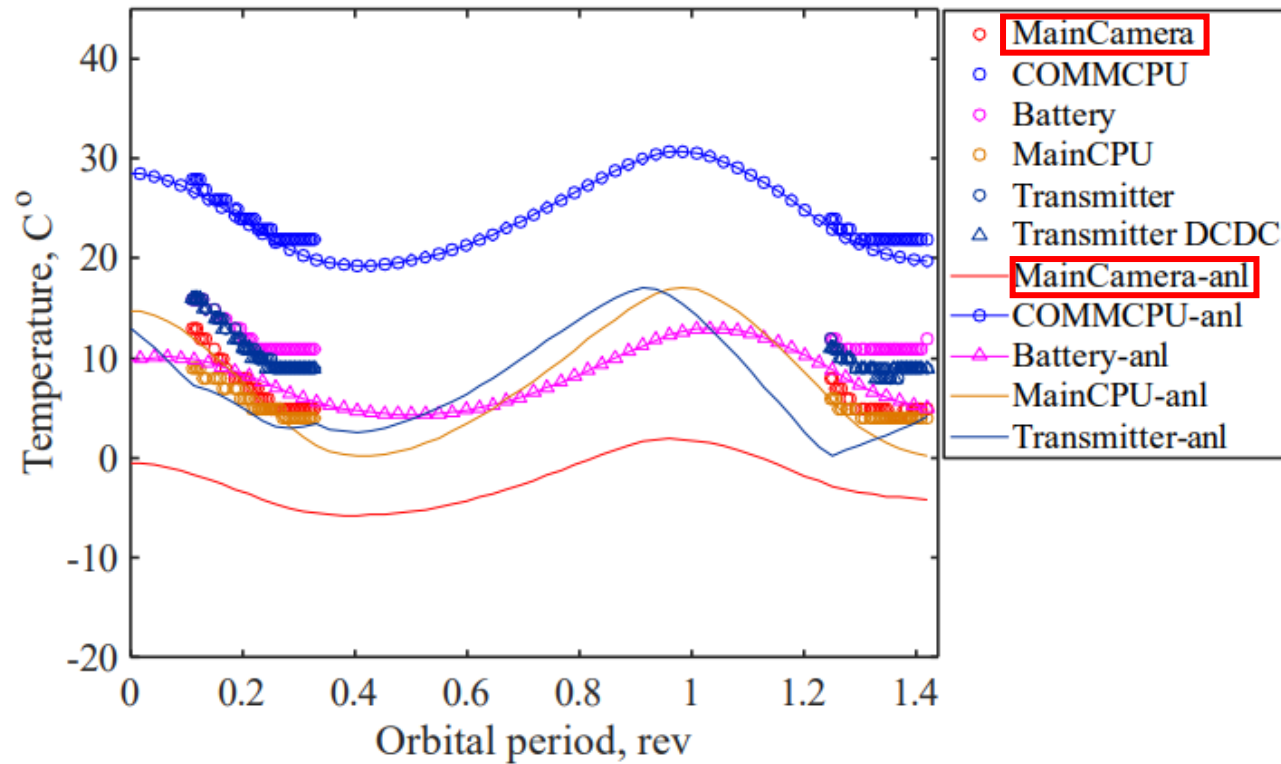
実測値と解析値の差は最大1.8°C

他衛星との比較



Summary of the Experimental and Analytical Results.

		HOT, °C			COLD, °C		
		Exp.	Anal.	Δ	Exp.	Anal.	Δ
CH1	MainCAM	30.1	37.9	7.8	-30.2	-30.0	0.2
CH2	MOBC1(center)	63.6	65.4	1.8	-21.4	-16.4	5.0
CH3	MOBC2(side)	52.5	61.4	8.9	-24.5	-21.2	3.3
CH4	COMM1(center)	57.7	64.2	6.5	-13.6	-10.5	3.1
CH5	COMM2(side)	56.8	62.2	5.4	-14.3	-10.9	3.4
CH6	BAT	47.9	52.3	4.4	-17.8	-16.0	1.8



まとめ

- 紫外線望遠鏡の熱コンダクタンスを新たに開発した最適化手法を用いて最適化することができた
- 熱コンダクタンスの90%信頼区間を求め、信頼性を評価することができた
- 平衡温度の解析値と実測値の差を 1.8°C 以内に収めることができた
- 修正作業時間を大幅に短縮できた
- 今後の課題は最適化手法の検証と軌道上での温度実証

Appendix

参考文献

- [1] Ignacio Torralbo et al., Acta Astronautica, Volume 144, March 2018, Pages 305-319, Correlation of spacecraft thermal mathematical models to reference data
- [2] Introduction to Thermal Desktop (NASA(.gov))
https://tfaws.nasa.gov/TFAWS03/software_training/thermal_desktop.pdf

他の最適化アルゴリズムとの比較

■メリット

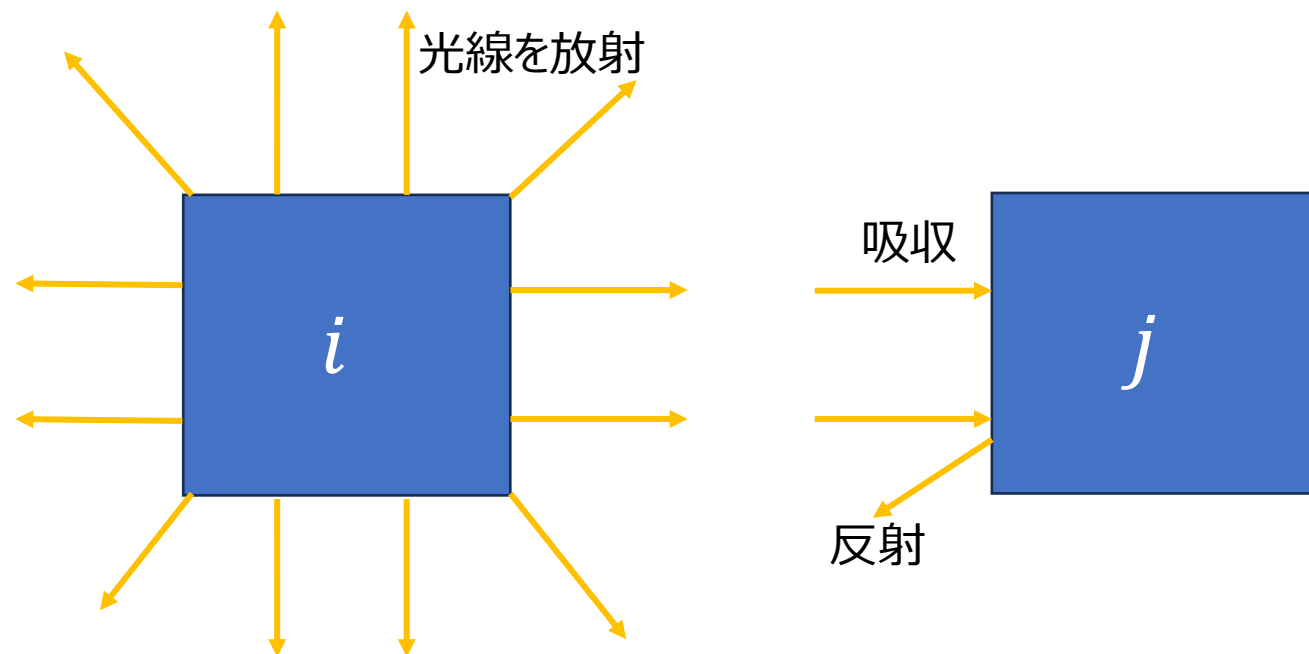
- 輻射熱をシミュレーションで求めることで、最低2つの熱真空試験条件で最適化可能
- レーベンバーグ・マーカート法を用いることでパラメータの初期値が最適値から遠くても収束しやすい
- $\chi^2/\text{d.o.f}$ の値からモデルの優位性を判定できる
- 90%信頼区間を出せる

■デメリット

- 温度測定点から遠い部分の温度は分からない

輻射放熱 Q_{ri} の計算方法

■RadCADの光線追跡を用いて計算



B_{ij} : i から出た光線の内 j に吸収される割合
左図の場合は1/12

$$\text{Radk}_{ij} = A_i e_i B_{ij}$$

$$Q_{ri} = \sigma \sum_j \text{Radk}_{ij} (T_i^4 - T_j^4)$$

A_i : i の表面積

e_i : i の赤外放射率

σ : シュテファン・ボルツマン定数

χ^2 とヤコビ行列

- χ^2 を勾配探索を行うことで最小化する

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(T_i - T_{i_measure})^2}{\sigma^2}$$

σ は熱電対の測定誤差 0.5°C

- 熱数学モデルの行列表記

$$[K]\{T\} = \{Q\} \rightarrow \{T\} = [K]^{-1}\{Q\}$$

コンダクタンス行列 温度ベクトル 発熱ベクトル

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial C_0} & \frac{\partial T_1}{\partial C_1} & \dots \\ \frac{\partial T_2}{\partial C_0} & \ddots & \dots \\ \dots & \dots & \frac{\partial T_N}{\partial C_n} \end{bmatrix}$$

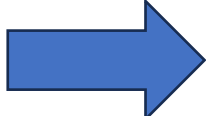
- ヤコビ行列 ← χ^2 の勾配とラプラシアンを求めるのに便利

$$\frac{\partial}{\partial C_j} \{T\} = -[K]^{-1} \left(\frac{\partial}{\partial C_j} [K] \right) [K]^{-1} + \frac{\partial}{\partial C_j} \{Q\}$$

ヤコビ行列による微分表記

■勾配

$$\nabla \chi^2 = \frac{\partial \chi^2}{\partial C_i} = 2 \sum_j (T_j - T_{j_measure}) \frac{\partial T_j}{\partial C_i}$$

 $\frac{\partial \chi^2}{\partial C_i} = 2[J]^T \{r\}$ $\{r\} = \begin{bmatrix} T_1 - T_{1_measure} \\ \vdots \\ T_N - T_{N_measure} \end{bmatrix}$

残差ベクトル

■ラプラシアン

$$\nabla^2 \chi^2 = \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial C^2} = 2 \sum_{i,j} \frac{\partial T_i}{\partial C_j} \frac{\partial T_i}{\partial C_j} + 2 \sum_{i,j,k} (T_j - T_{j_measure}) \frac{\partial^2 T_i}{\partial C_j \partial C_k} \approx 2[J]^T [J]$$

χ^2 の凹凸の変化大きくないとして無視

勾配探索手法

■レーベンバーグ・マーカート法

1. 更新前のコンダクタンス C_{old} の周りでテイラー展開して χ^2 を2次関数で近似

$$\chi^2(C_{new} + a) = \chi^2(C_{old}) + \nabla\chi^2(C_{old})a + \frac{1}{2}\nabla^2\chi^2(C_{old})a^2$$

2. 2次関数の極小値を求め、コンダクタンスを更新

$$\frac{\partial}{\partial a}(\chi^2(C_{new} + a)) = \nabla\chi^2(C_{old}) + \nabla^2\chi^2(C_{old})a = 0$$

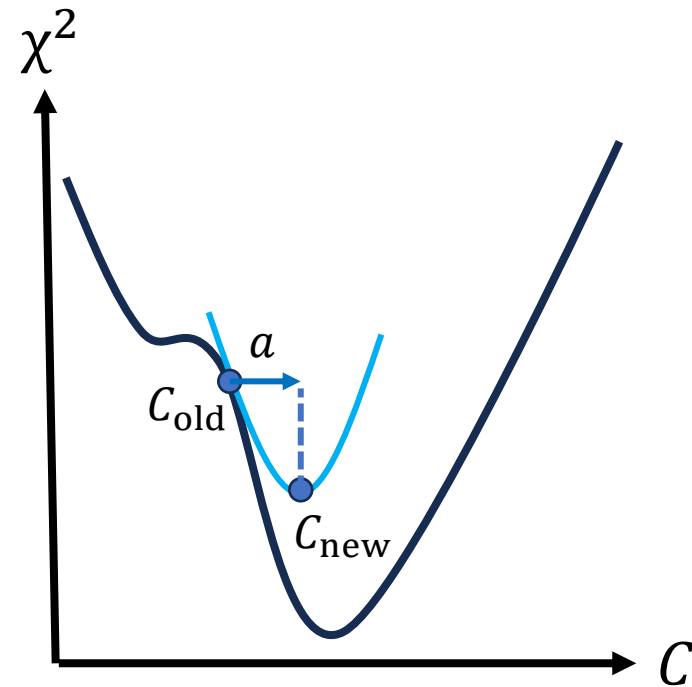
$$a = -(\nabla^2\chi^2(C_{old}))^{-1}\nabla\chi^2(C_{old}) \approx -([J]^T[J])^{-1}[J]^T\{r\}$$

$$C_{new} \approx C_{old} - ([J]^T[J])^{-1}[J]^T\{r\} \quad (\text{ガウス・ニュートン法})$$

3. ガウス・ニュートン法と最急降下法を組み合わせる

更新式

$$C_{new} \approx C_{old} - ([J]^T[J] + \lambda I)^{-1}[J]^T\{r\}$$



初期値付近では最急降下法、極小値付近ではガウス・ニュートン法を用いてすばやく収束