
第1小委員会における 熱・流体解析の取り組み例

はんだ付け工程の 熱流体シミュレーション

2023年11月15日 富山県立大学 中川 慎二

背景と方法

鉛フリーはんだ使用に伴う温度条件の悪化など

→ 効果的・効率的な不具合対策が必要

→ シミュレーション技術の活用(予測・原因調査)

- 汎用熱流体解析ソフトウェア

- オープンソースソフトウェア OpenFOAM(VOF法, CSFモデル)

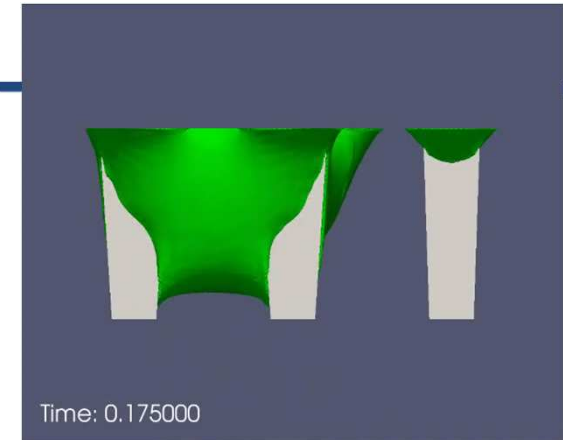
- 対象となる物理現象

- 溶融はんだと空気の 流動 と 熱移動
- 温度変化による物性値変化(バルク)
- はんだペーストの変化(模擬・モデル化, 溶融・固化)

経緯

ー2017 RC271など

- ・ フローはんだ付け・ディップはんだ付け
 - ・ 定性的に実験を再現
 - ・ 不具合検討(要因推定)の可視化ツール

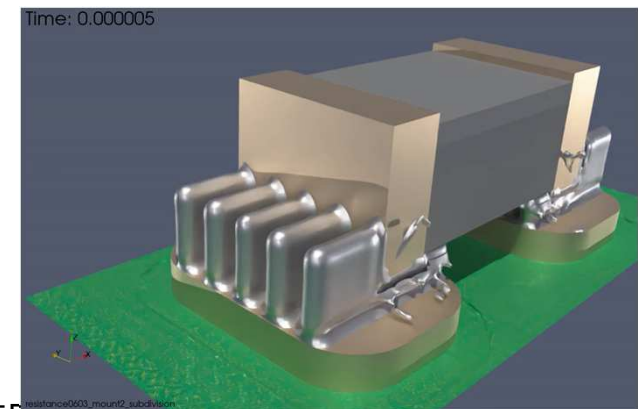


2018ー2019 RC278

- ・ リフローはんだ付け(1608チップ抵抗, 等温場)
 - ・ 重合格子法により, はんだ表面張力による部品移動を再現
 - ・ セルフアライメント過程の再現 (部品可動範囲の制限大)

2020ー2021 RC287

- ・ リフローはんだ付け(0603チップ抵抗, 等温場)
 - ・ マウント直後からリフロー完了までのはんだのモデル化
 - ・ はんだペーストから溶融はんだまでの簡易モデル化により適用範囲拡大...



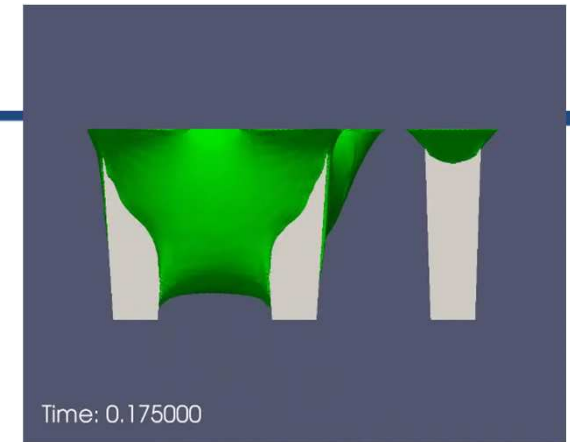
2022ー2023 RC294

- ・ リフローはんだ付け(0603チップ抵抗, 非等温場)
 - ・ 温度場の計算を含める
 - ・ 粘度の温度依存性としてはんだ溶融のモデル化
 - ・ 固液相変化(溶融)の試行

経緯

これまでのRC分科会

- フローはんだ付け・ディップはんだ付け
 - 定性的に実験を再現
 - 不具合検討(要因推定)の可視化ツール
- リフローはんだ付け(1608チップ抵抗, 等温場)
 - 重合格子法により, はんだ表面張力による部品移動を再現
 - セルフアライメント過程の再現 (部品可動範囲の制限大)
- リフローはんだ付け(0603チップ抵抗, 等温場)
 - マウント直後からリフロー完了までのはんだのモデル化
 - はんだペーストから溶融はんだまでの簡易モデル化により適用範囲拡大…

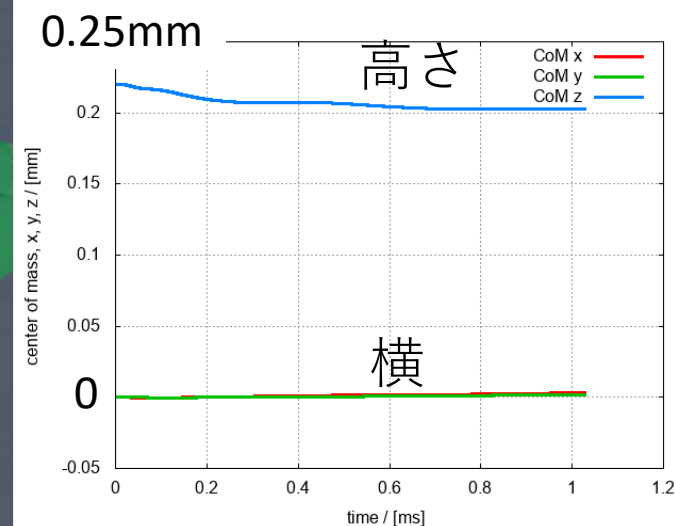
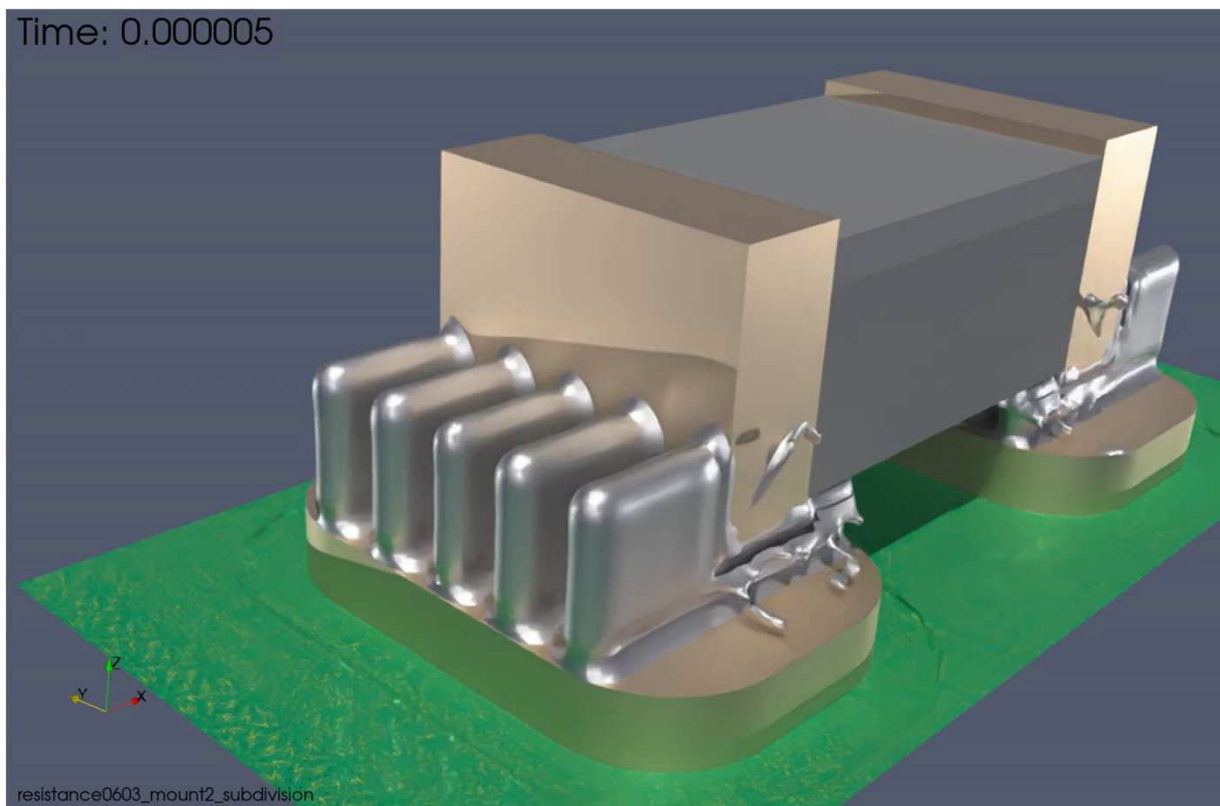


2022-2023 RC294

- リフローはんだ付け(0603チップ抵抗, 非等温場)
 - 温度場の計算を含める
 - 粘度の温度依存性としてはんだ溶融のモデル化
 - 固液相変化(溶融)の試行

参考 等温計算(0603チップ抵抗)

OpenFOAMによる計算結果をParaViewのレイトレーシング機能により可視化



部品重心位置履歴

はんだ量や配置の影響は調査可能。
加熱ムラや配線パターンによる温度分布は考慮できない。

温度場の必要性

等温計算で可(ハンダの溶融が同時に生じる)

- マスク開口部への付着によるハンダ体積の不均一
- ハンダ配置場所のずれ
- 部品マウント位置のずれ

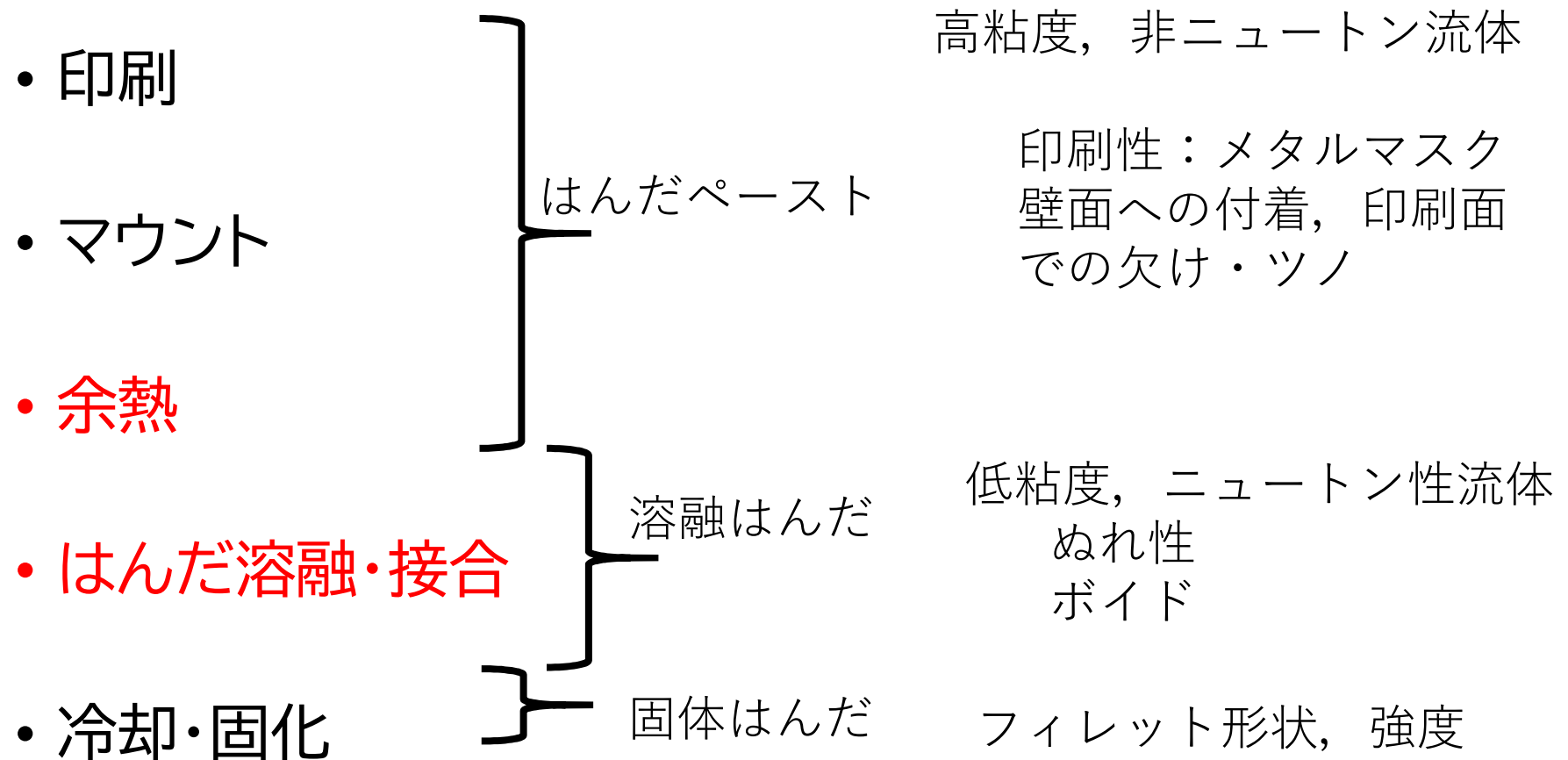
非等温計算が必要(溶融開始が場所に依存)

- 加熱ムラによる溶融タイミングのずれ
- 配線パターンや部品配置に依存する温度の非一様性
- 温度差に起因する表面張力差の影響(マランゴニ流れ)
- 相変化

難度の高いシミュレーション

- 物体の移動
 - 気液界面の大変形
 - 物性値の大きな変化(相変化)
 - 非定常計算
 - 微小領域
-
- 安定した計算のために クーラン数 Co を小さく保つ
 - $Co = U \, dt / \Delta x$ (U 局所速度, dt 時間刻み, Δx セルサイズ)
 - 時間刻みを小さくするため, 計算時間が長くなる

リフロー工程全体での はんだ



さまざまな流体の粘度

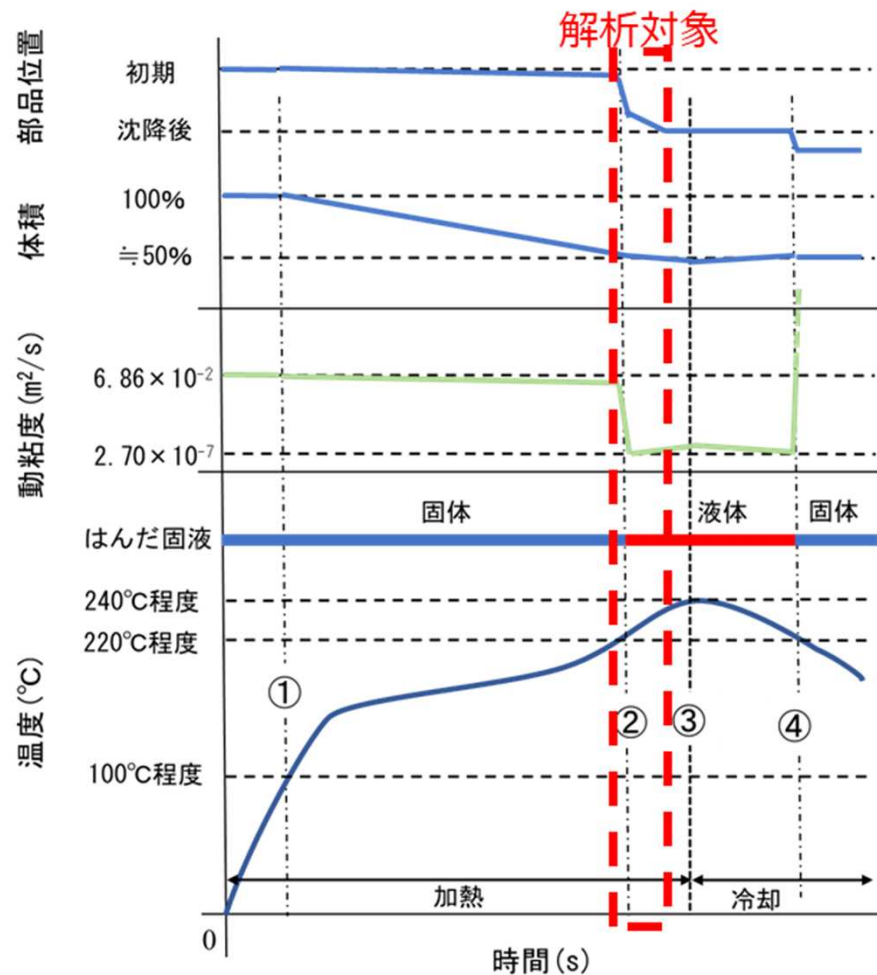


佐竹マルチミクス株式会社 https://www.satake.co.jp/small_mixers/sentei/img/nendo.pdf

流量知識.com キーエンス <https://www.keyence.co.jp/ss/products/process/flowmeter/selection/viscosity.jsp>

フードサイエンス 平成 26 年 11 月号, 粘度による食品材料の評価技術, 株式会社エーアンドディ
https://www.aandd.co.jp/pdf_storage/tech_doc/analytical/t_rv10000_jfsc_201411.pdf

リフロー工程(加熱・冷却) と はんだ



部品位置: Koyamaら(2010) Trans.JWRI 39[1608コンデンサでの測定]

※検討中: はんだペーストの成分等の影響
 活性剤・溶剤成分はほとんどが揮発
 ベース樹脂とワックスが残る

① 100°C程度. フラックスの揮発温度.

①~② フラックス揮発: 体積減少・動粘度変化(液減少による上昇)

② はんだ融点. はんだの相変化(固から液)
 動粘度の急減少, 気液界面での表面張力の発生

③ 最高温度

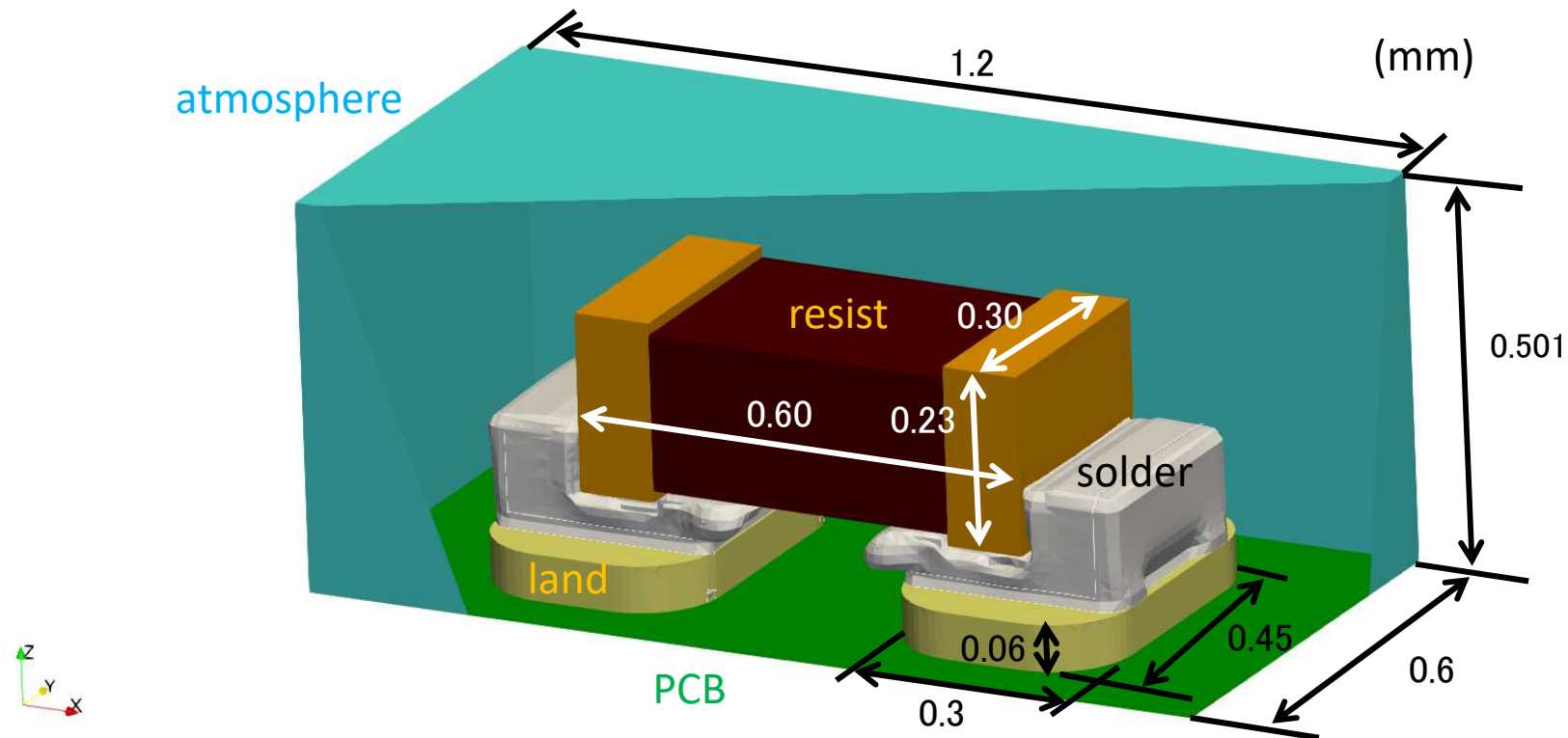
④ はんだ凝固点. はんだの相変化(液から固)
 動粘度の急上昇

[ペースト→溶融はんだ] → 粘度低下 → めれ → 部品変位(沈降)

シミュレーション方法

- 汎用オープンソースCFDソフトウェア OpenFOAM
v2112, v2212, v2306
- 非定常 圧縮性 非混和2流体 解析ソルバ
- ナビエストークス方程式, VOF法, エネルギー式
 - PISO法, 安定性重視のスキーム選定(風上1次)
- 重合格子(オーバーセット)
- 空気:状態方程式
- はんだ:物性値の温度依存性を表形式で与える
 - 温度依存性の与え方と, 温度境界条件によって現象をモデル化

対象:0603チップ抵抗



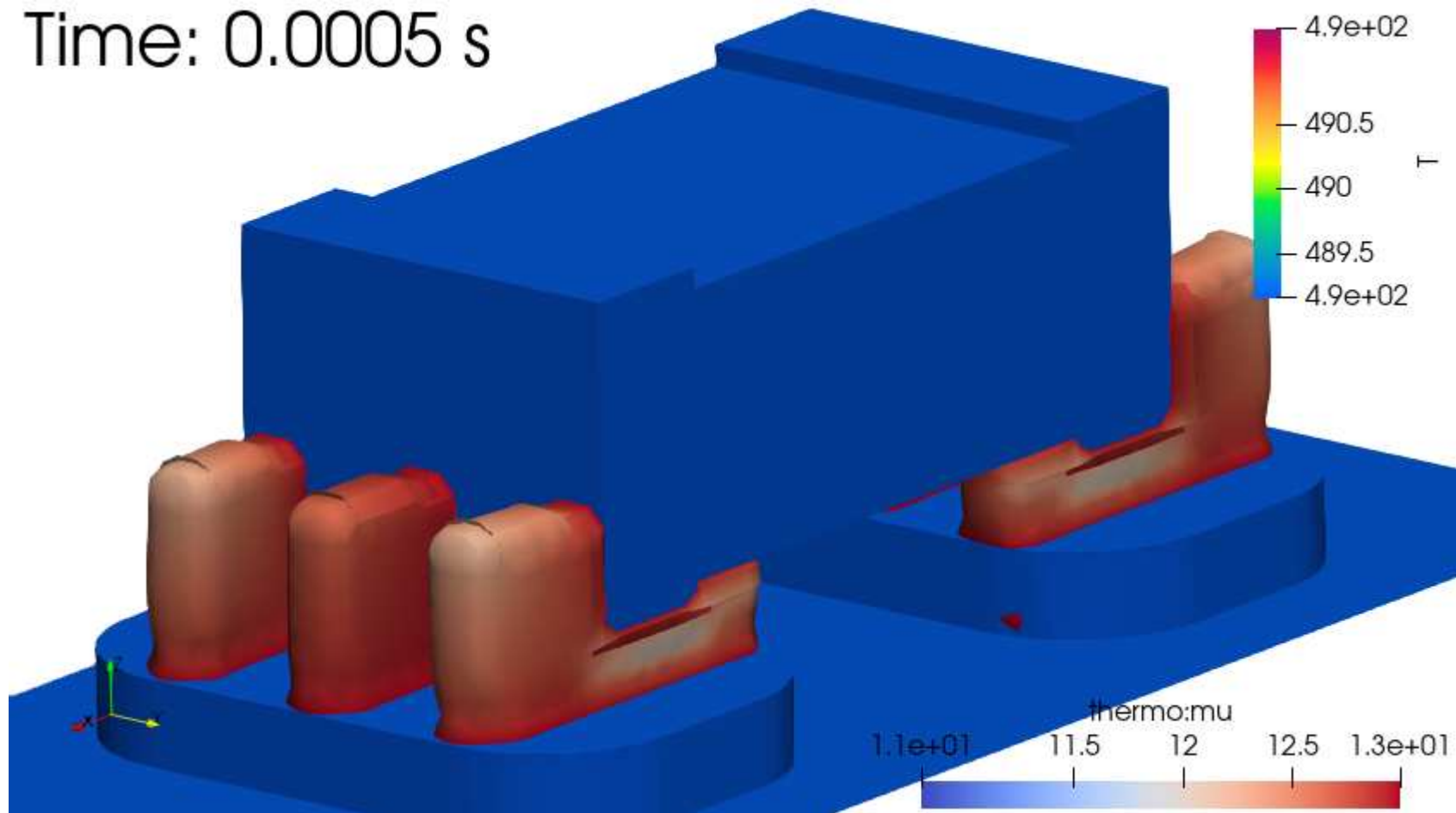
0603チップ抵抗(0.6mm×0.3mm), 0.15mg

固体面以外は大気開放 [温度 300°C (533.15K), 流速与えず]

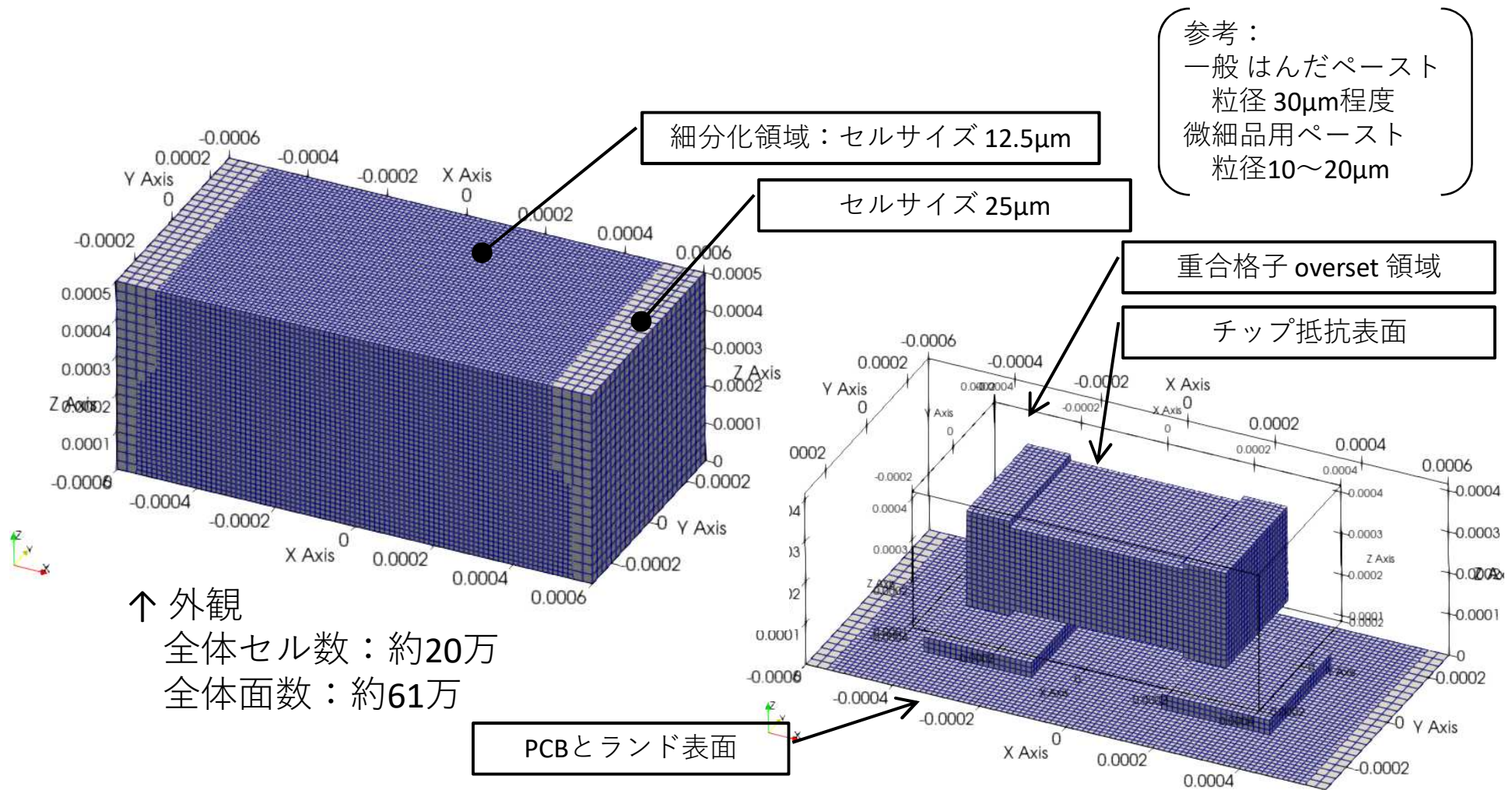
固体面の温度上昇を境界条件として規定

初期はんだ配置

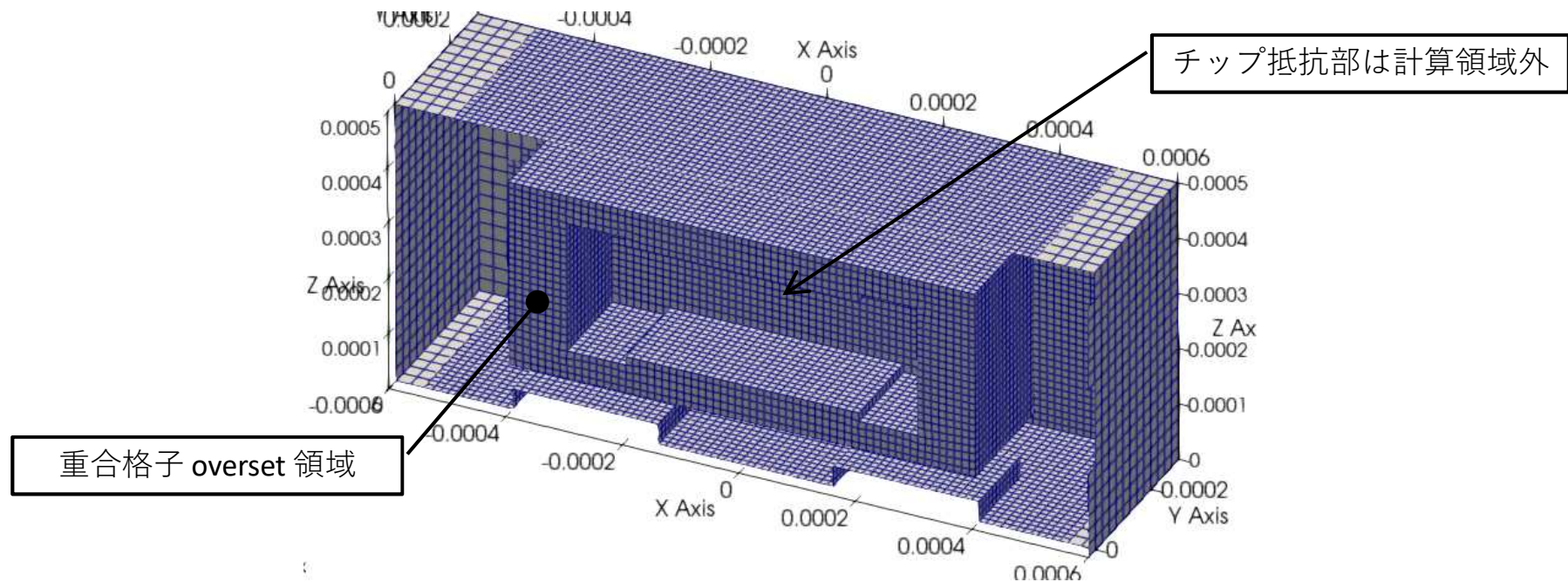
Time: 0.0005 s



メッシュ(概要)



メッシュ(概要)

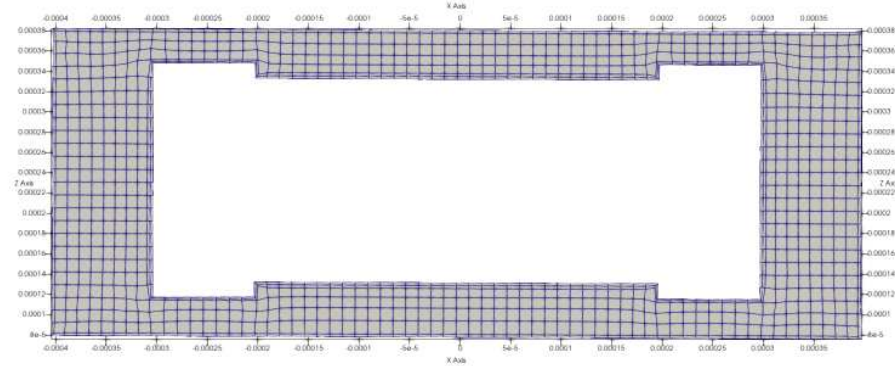


↑ 短手方向中心断面切断した図
重合格子領域を可視化
背景格子領域は境界面のみ表示

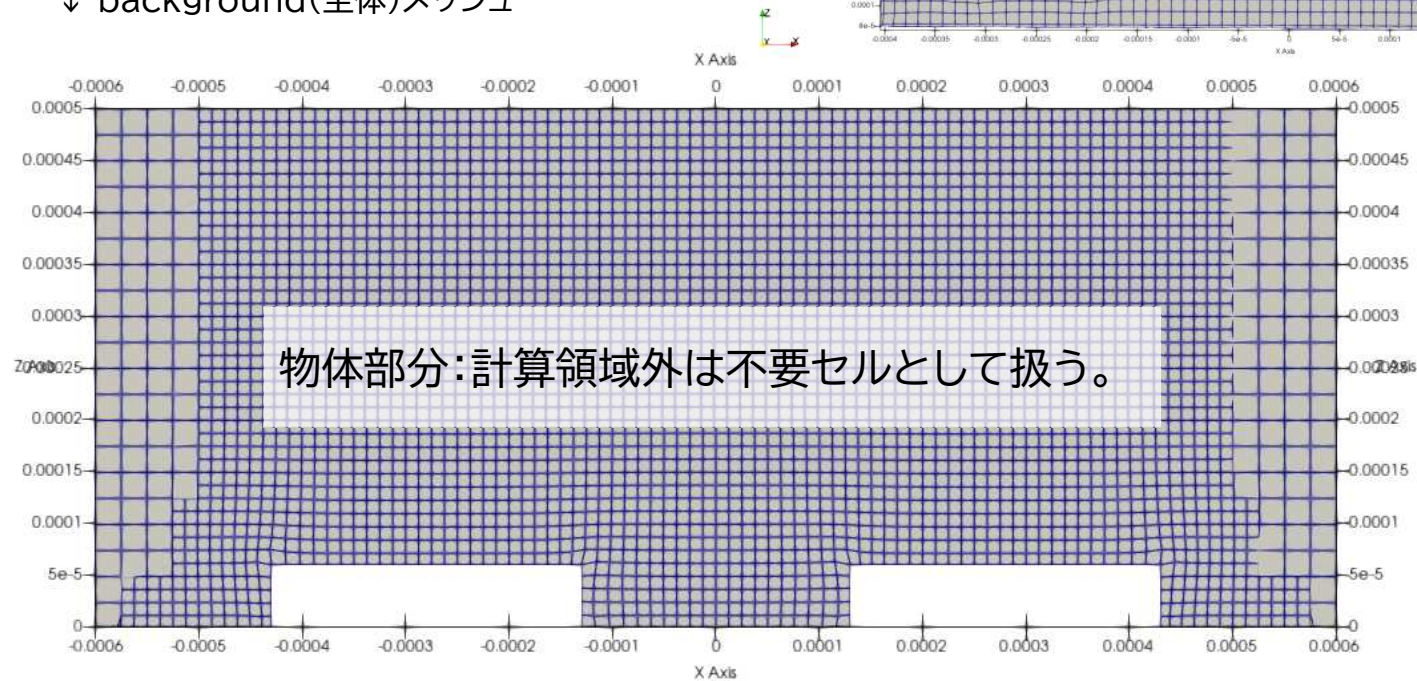
メッシュ

2つのメッシュ領域で計算を実行する。両メッシュ領域を部分的な補間セルでつなぐ。

overset(部品周り)メッシュ →
境界層レイヤー有り



↓ background(全体)メッシュ



重合格子：物体の動きとセルタイプ

奥行き方向中央での切断面

セルタイプ 0: 計算セル

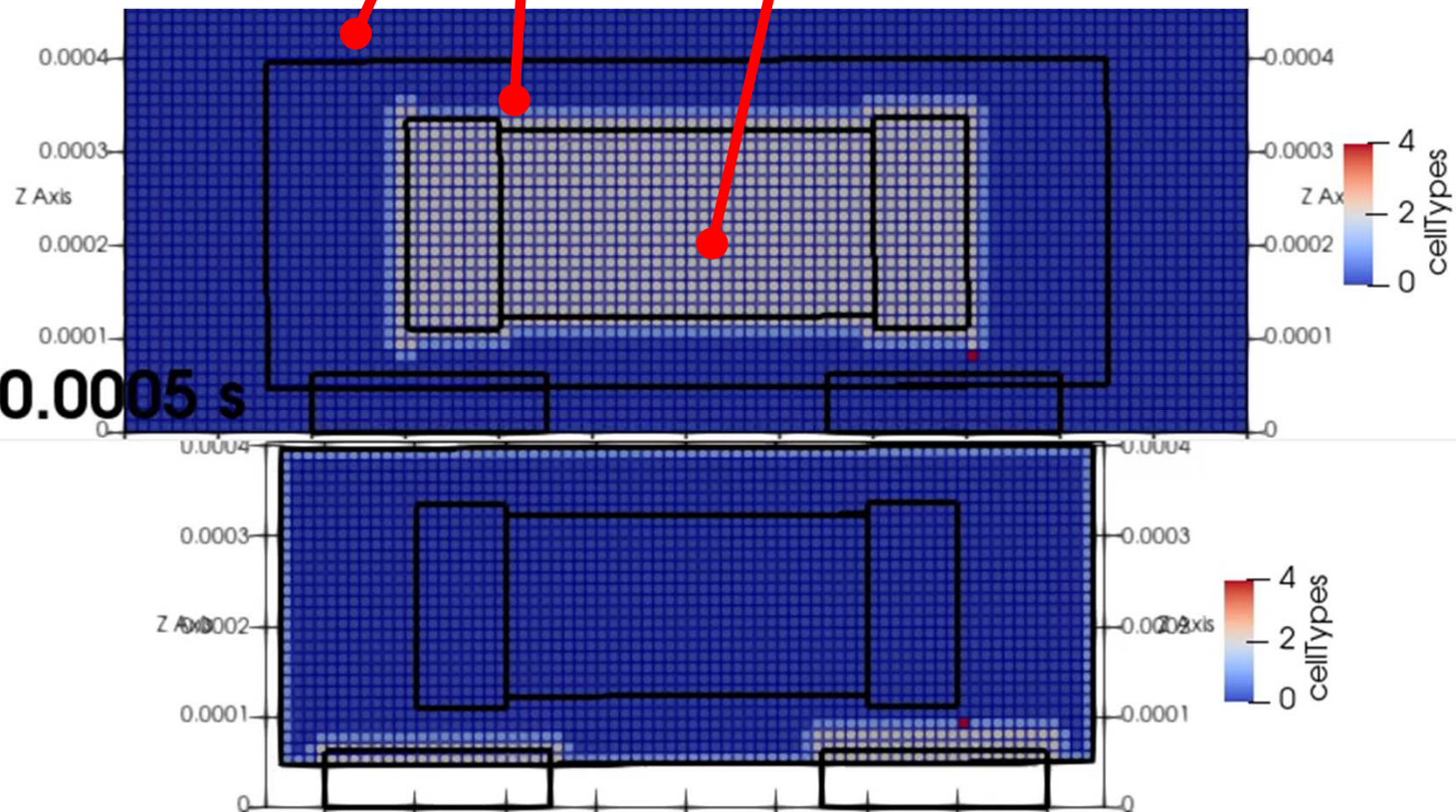
セルタイプ 1: 境界相当・補間セル

セルタイプ 2: 空洞・非計算領域

背景格子部

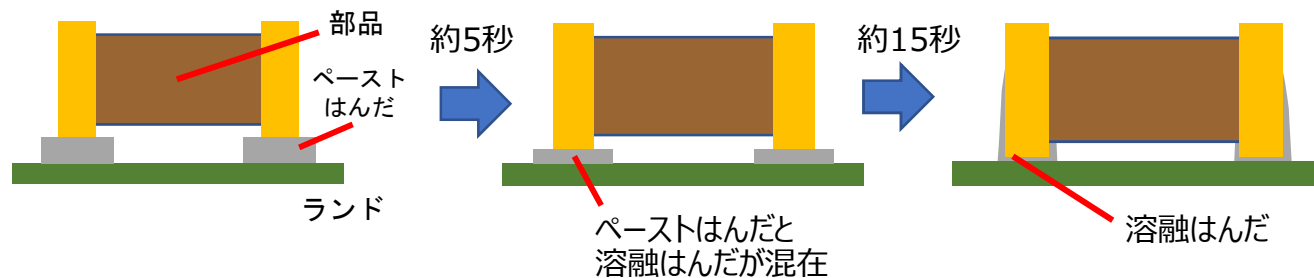
$T=0.0005$ s

重合格子部

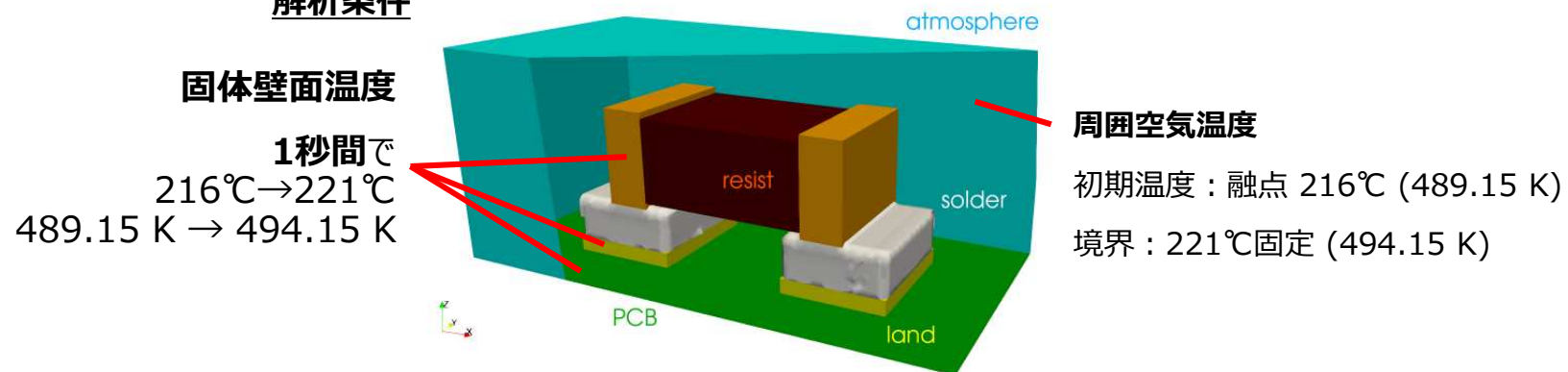


加熱・境界条件

リフロー炉内では、上下より吹き付ける熱風で加熱される⁽¹⁾。



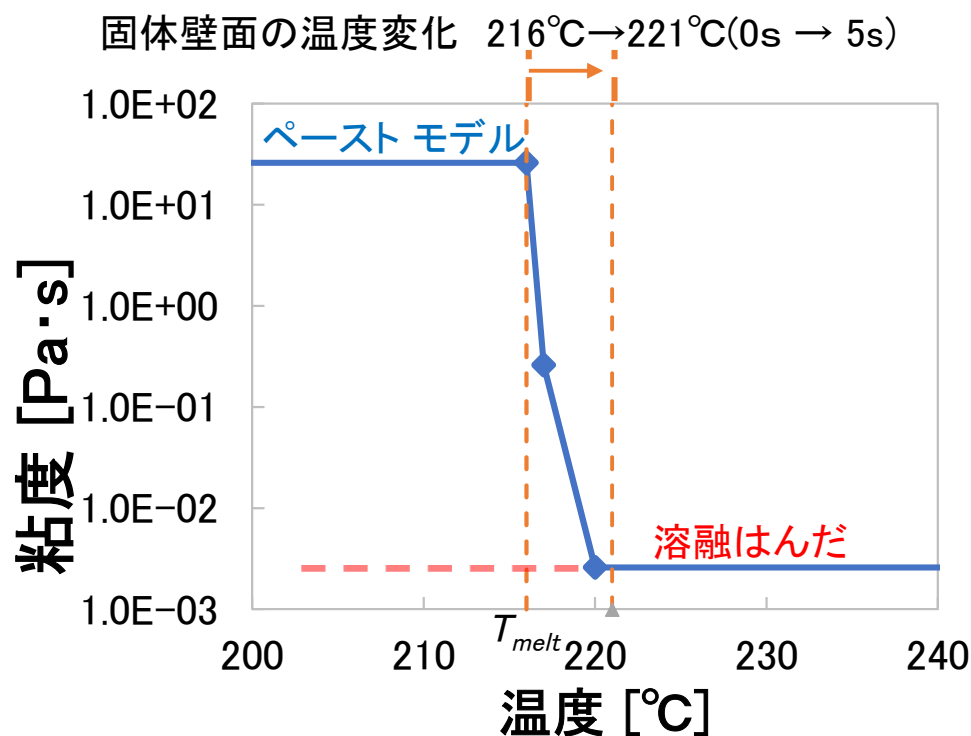
解析条件



(1) Koyama Shinji, Oya Issei, Isaka Toshihiro, Shoji Ikuo, Nishimuro Masashi, Hiramoto Kiyoshi, Miyamoto Hironaga, "Development of wettability evaluation equipment for solder paste using laser displacement method", Transactions of JWRI. 39(2) (2010), P.169-P.171

物性値

ペーストから溶融の変化を，粘度の温度変化としてモデル化する。



粘度の温度依存性（従来）

はんだの物性値

（物性計算ソフトウェアJMatPro, 220°C）

密度 $7.05397 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

比熱 $250.4 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

熱伝導率 $34.391 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

界面

表面張力 0.07 N/m

空気の物性値

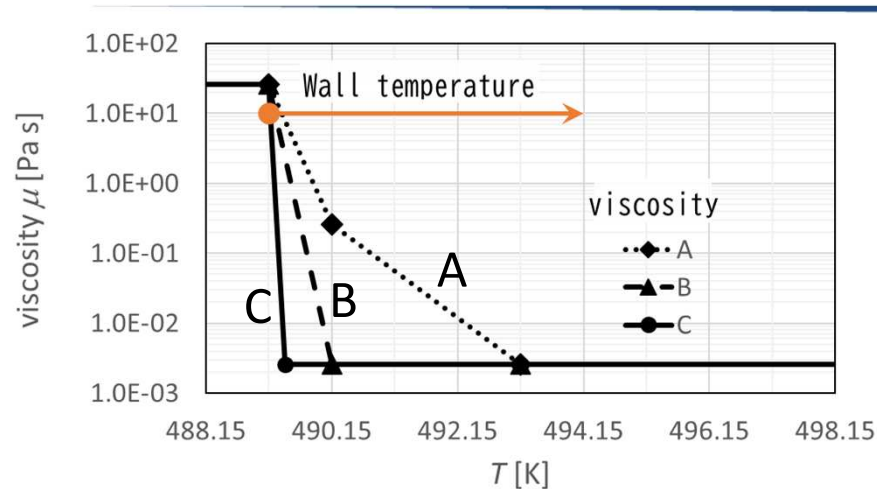
モル質量 28.9

粘度 $1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

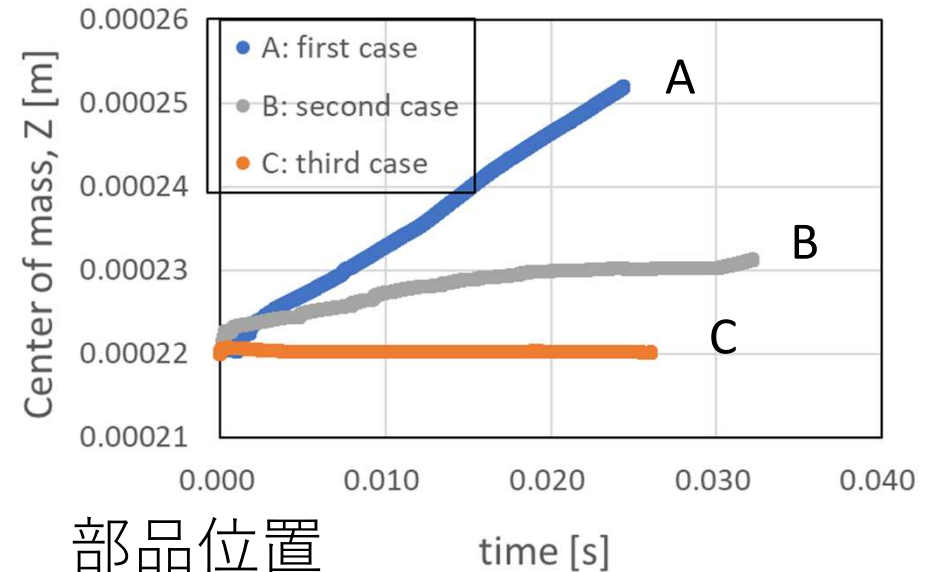
比熱 $1007 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

プラントル数 0.7

粘度変化率の影響

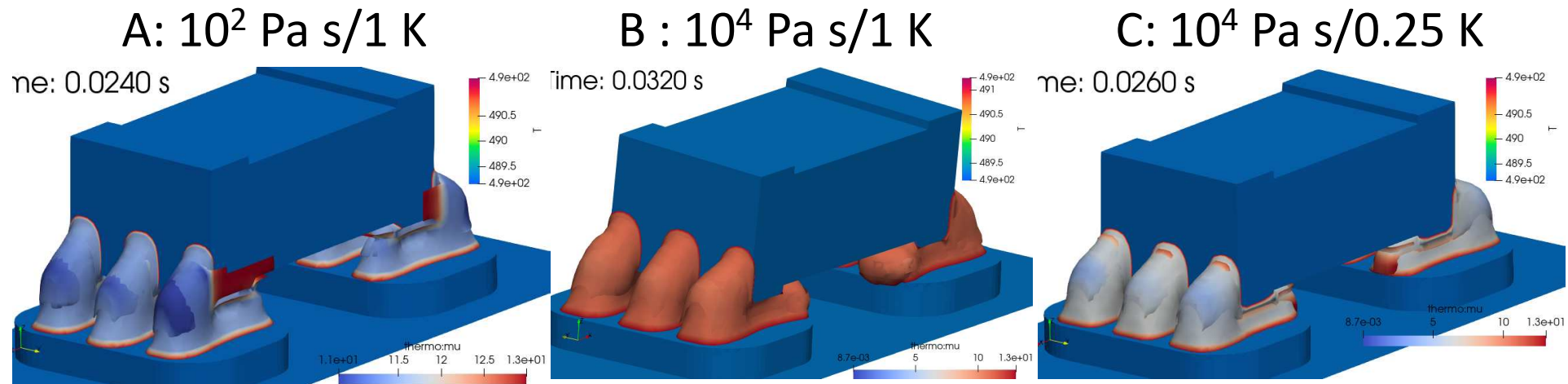


粘度の温度依存性



部品位置

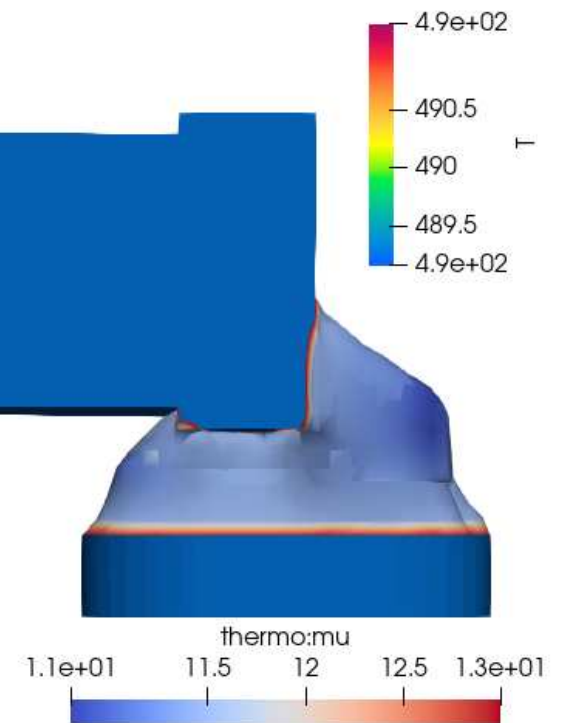
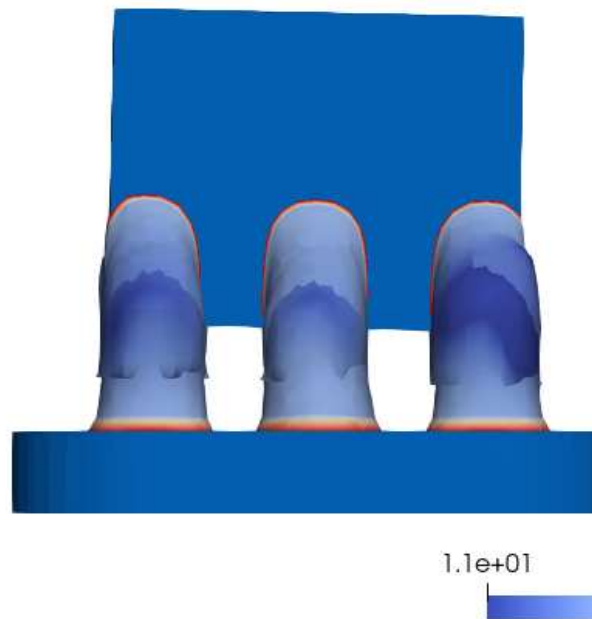
time [s]



粘度を急減させることで、部品上昇が低減される。

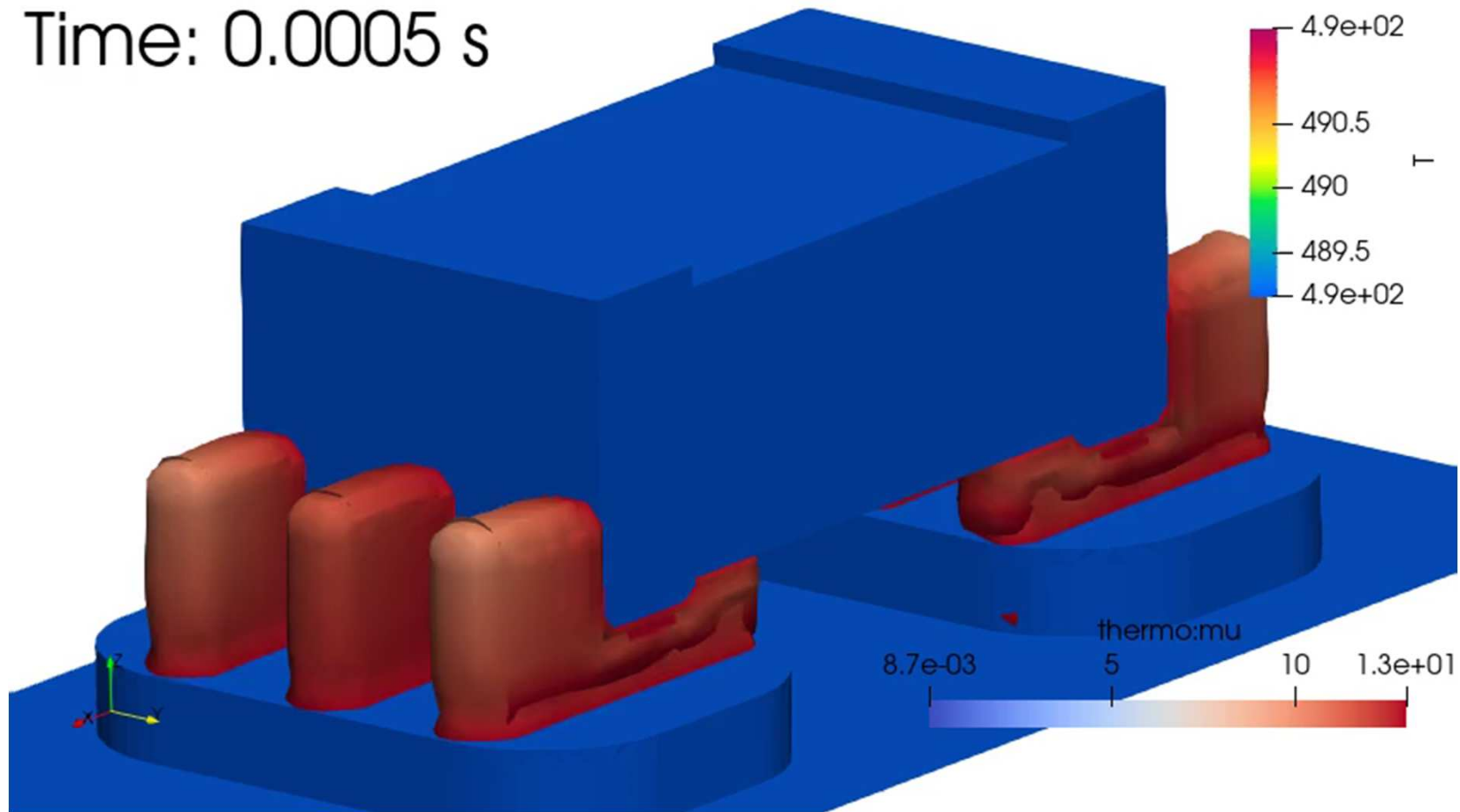
40 s

Time: 0.0240 s



動画 C: 10^4 Pa s/0.25 K

Time: 0.0005 s



0.026 秒で計算が発散. 安定性向上が必要.

計算時間 65時間 32コア graviton 3 (Aの2倍)

改善策：界面曲率計算時の平滑化

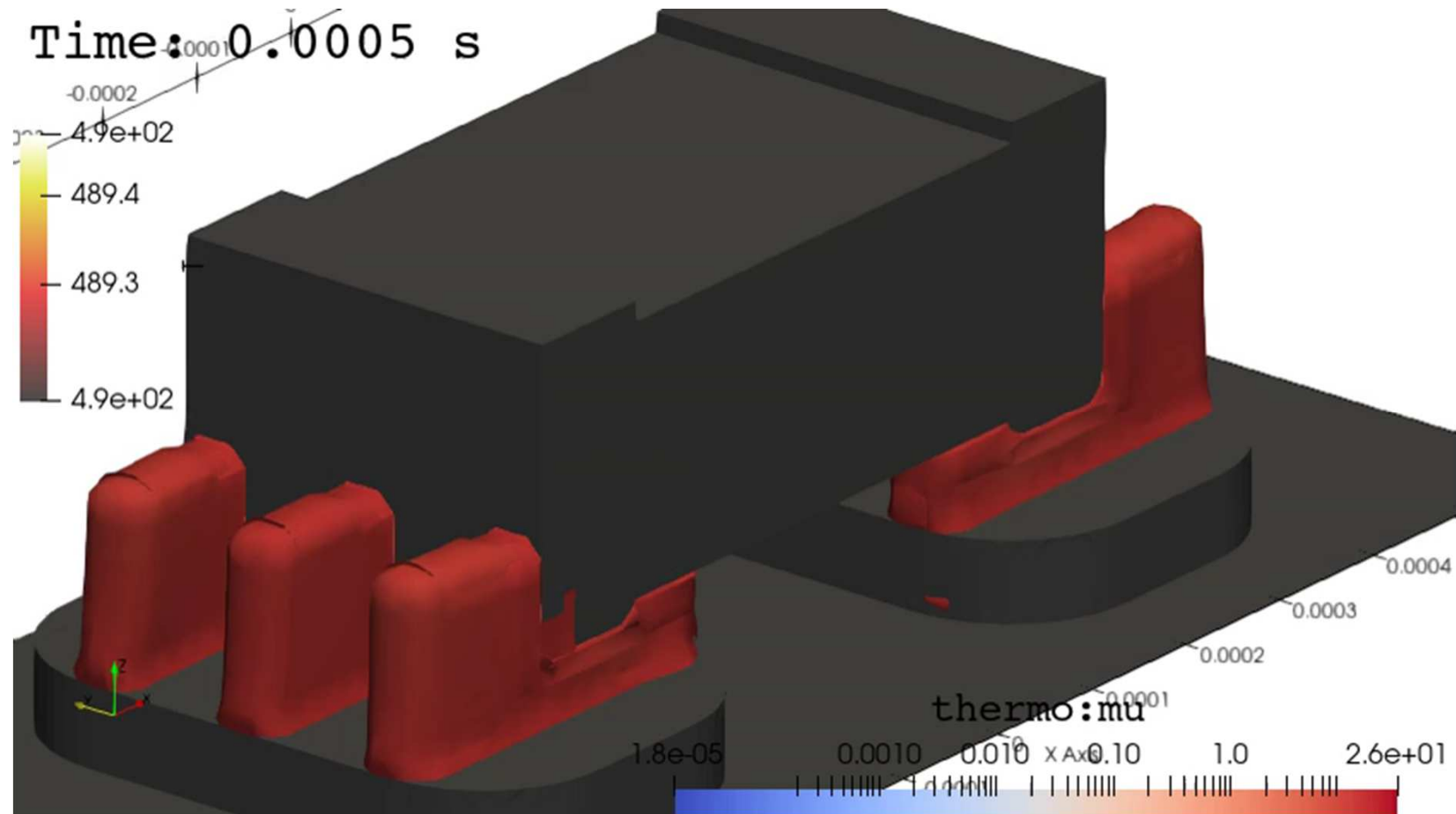
- 界面曲率計算の精度向上
 - 気液界面での液相率分布に空間的平滑化处理
 - 液面の偽速度を低減
 - 安定性向上

Bruno Lafaurie et al., Modelling Merging and Fragmentation in Multiphase Flows with SURFER, Journal of Computational Physics, 113(1994), 134-147.

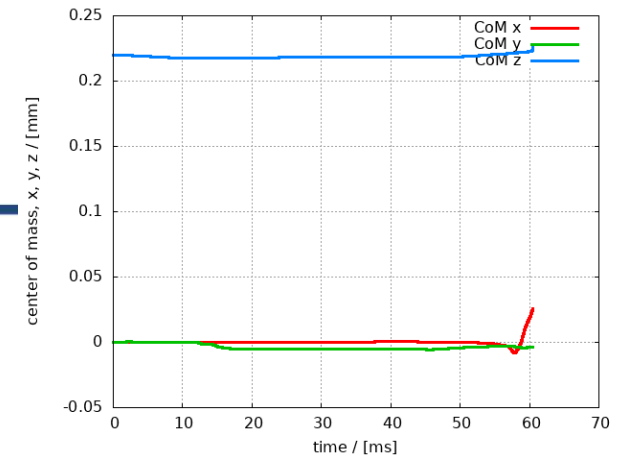
<https://doi.org/10.1006/jcph.1994.1123>.

<https://develop.openfoam.com/Development/openfoam/-/issues/2531>

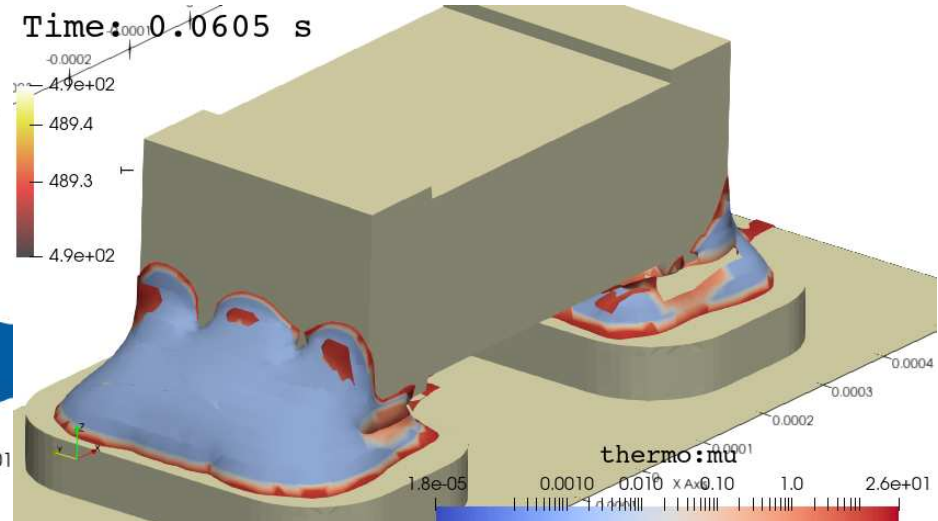
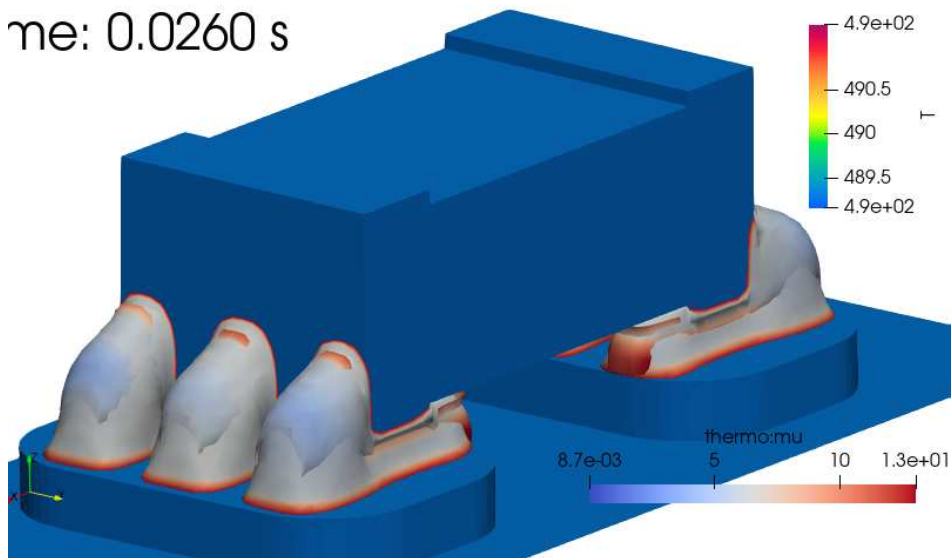
動画:はんだ粘度と壁面温度



改善前後の比較



Time: 0.0260 s



安定して計算可能な時間が伸びた。
はんだ列が融合するところまで計算できた。
発散する。→ さらなる改善が必要である。

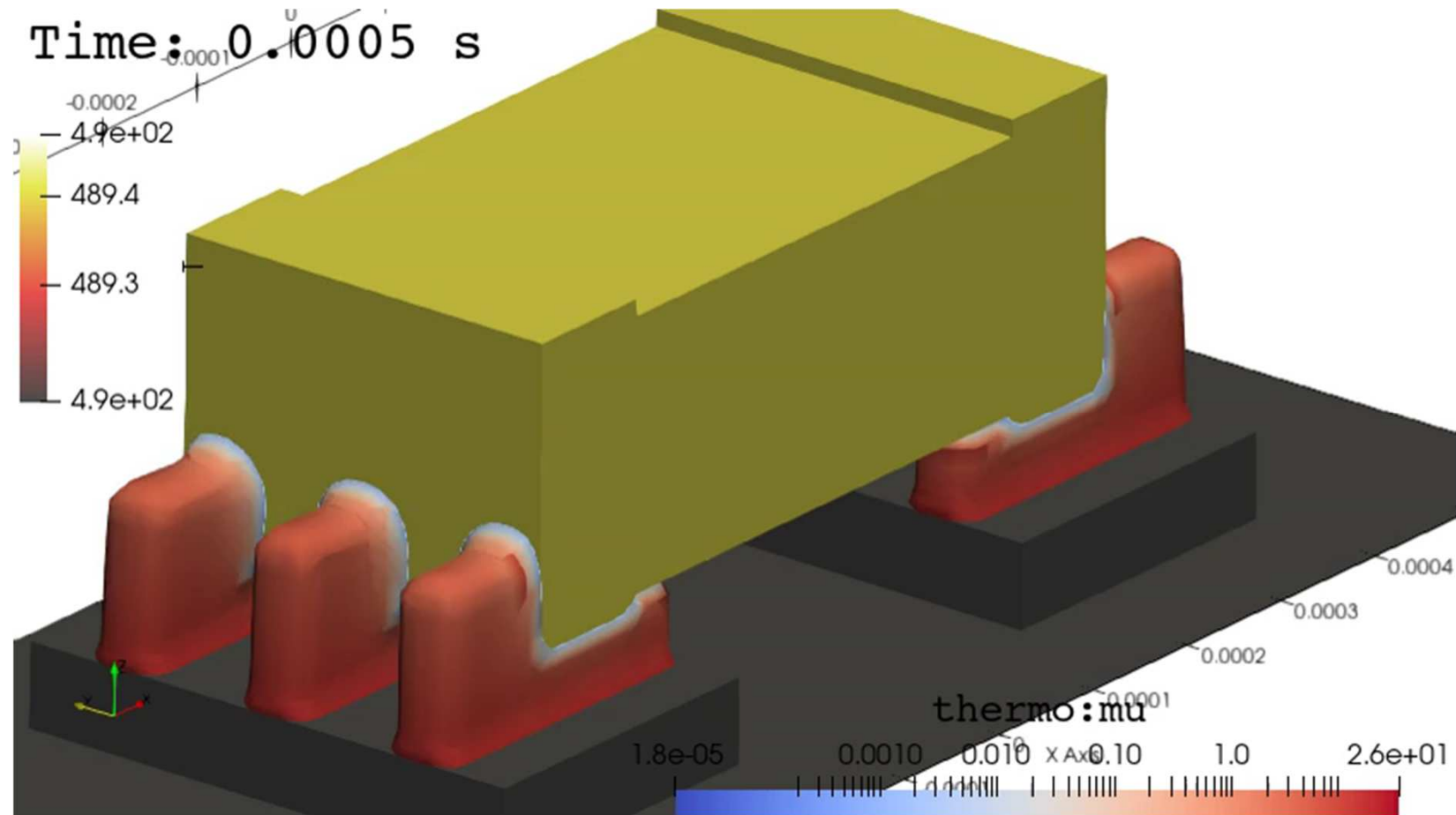
計算時間 65時間 32コアgraviton 3

計算時間 120時間 32コアEPYC4thGen.

テスト：非均一加熱

- 温度場を計算できることから、空間的または時間的に一様でない温度場の影響を調査できる可能性がある
- 部品温度のみ高いと仮定して試行
 - チップ壁面温度を $+0.25^{\circ}\text{C}$
- 違いは確認できる。
- 信頼性は不十分

動画:はんだ粘度と壁面温度



はじめは濡れ広がるが、ランドに引き寄せられる。
部品上昇 — 固体間の衝突？

その他: AWS

新たなCPU

- オープンソースソフトウェアを利用しているためライセンスの縛りはない。
- クラウドコンピュータを利用して, 様々な並列数, マシン数で計算を実行している。
- 最新のCPUを利用可能
 - 第 4 世代 AMD EPYC プロセッサ
 - 今年発売された新たなCPU
 - HPC性能が高いといわれる
 - AWS Graviton3E プロセッサ
 - Graviton3のネットワーク機能強化版
 - HPCに最適といわれる

AWS ベンチマーク(motorBike例題, 4並列)

1年前

instance	cpu	clock time (s)	price (USD)
m5a.2xlarge	AMD EPYC 7571	333	0.448
m5.2xlarge	Intel(R) Xeon(R) Platinum 8259CL CPU @ 2.50GHz	196	0.496
m6i.2xlarge	Intel(R) Xeon(R) Platinum 8375C CPU @ 2.90GHz	157	0.496
c6i.2xlarge	Intel(R) Xeon(R) Platinum 8375C CPU @ 2.90GHz	151	0.428
c6g.2xlarge	ARMv8 (AWS Graviton2)	211	0.3424 *
c7g.2xlarge Virginia	ARMv8 (AWS Graviton3)	127	0.29 *
local myWS	AMD® Ryzen threadripper 2990wx	148	搭載CPUの半 分のみ使用
local WS11	Intel(R) Xeon(R) Gold 6230R CPU @ 2.10GHz	143	

AWS ベンチマーク(motorBike例題, 4並列)

instance	cpu	clock time (s)	price (USD)
c6i.2xlarge	Intel Xeon Platinum 8375C @2.90GHz	151	0.428
c7i.2xlarge	Intel Xeon Platinum 8488C@2.40GHz?	139	0.357
c7g.2xlarge Virginia	ARMv8 (AWS Graviton3)	127	<u>0.29</u> *
c7gd.2xlarge Virginia	ARMv8 (AWS Graviton3E)	125	0.3629 *
hpc7a.12xlarge	AMD EPYC 9R14 (4th generation)	97	7.20
c7a.2xlarge	AMD EPYC 9R14 (4th generation)	↑(予想)	0.41056 *
local pyWS	AMD® Ryzen threadripper 2990wx	148	
local W 1	Intel Xeon Gold 6230R @ 2.10GHz	143	

従来の主力

今後の
主力?

オーバー
スペック

同じCPU

* 搭載CPUの半
分のみ使用

現状と今後

- フローハンダ付け／リフローハンダ付け
 - 済:等温場でののはんだ流動解析
 - 済:非等温場でののはんだ流動解析(密度以外の物性値は固定)
 - 済:はんだ表面張力による部品の移動を再現
 - 済:粘性, 表面張力等の物性値を温度の関数として考慮
 - 進行中:固体(ペースト)から液体への変化を, 流動性の低下として含める
 - 計算安定性の向上が必要
 - 計算速度の向上が必要
 - 計算パラメーターの調整中
 - テスト中:固液相変化(溶融・凝固)を考慮する
 - 計算速度の向上(GPU利用, 粒子法利用など)
- 計画:構造解析との連携(ごく基本的なテスト済)
- 将来的には, 材料物性へと繋げることを目指す

成果物(予定)

- 汎用的なモデルに対する計算ケースの公開
- 各種ノウハウの詳細
- 計算環境の構築方法

募集

- 公開可能な, 計算対象モデル
 - 参加メンバーに共通な性質が望ましい
 - 形状, 寸法, 物性など, 可能な範囲で実物に近い情報
- 実物での計測・実験事例など
- その他, ご要望・ご意見がございましたら, お気軽にお知らせください。
 - snakagaw@pu-toyama.ac.jp