

 JKA共同研究

磁束密度制御治具を活用した 選択的高周波焼入れ法の開発

(地独) 鳥取県産業技術センター

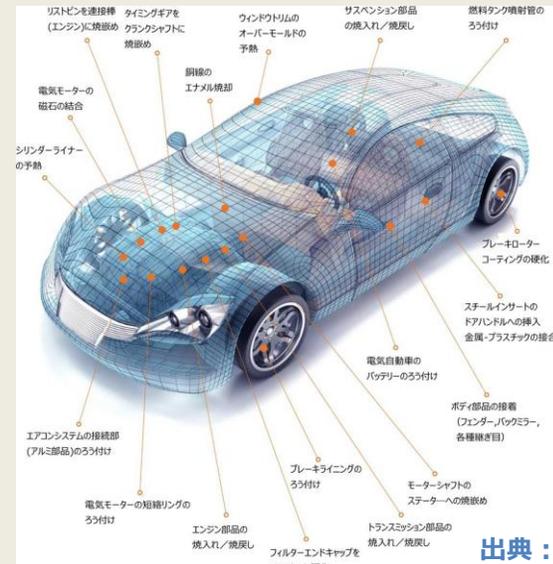
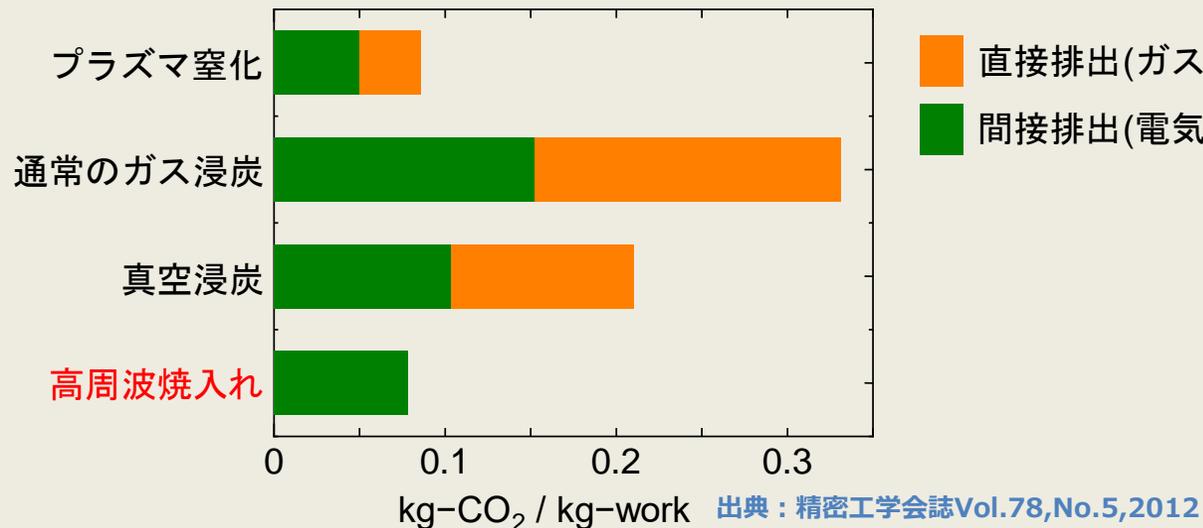
機械素材研究所 佐藤崇弘
企画・連携推進部 野嶋賢吾

鳥取県金属熱処理協業組合

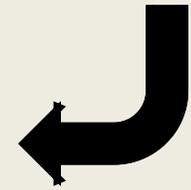
専務理事 馬田秀文
工場長 生田智章

背景

- 脱炭素社会，SDGsの達成を求められる中で，自動車業界は，製造工程での**環境負荷・エネルギー消費量の低減**が課題
- 現在の主流である「**浸炭焼入れ**」から，環境負荷の小さい「**高周波焼入れ**」へ転換する事例が増加
- 今後は，熱処理業者のみならず，**県内の製造業者（切削，鍛造・プレス業）**においても「**高周波焼入れ**」への**技術対応が必須**になると予想

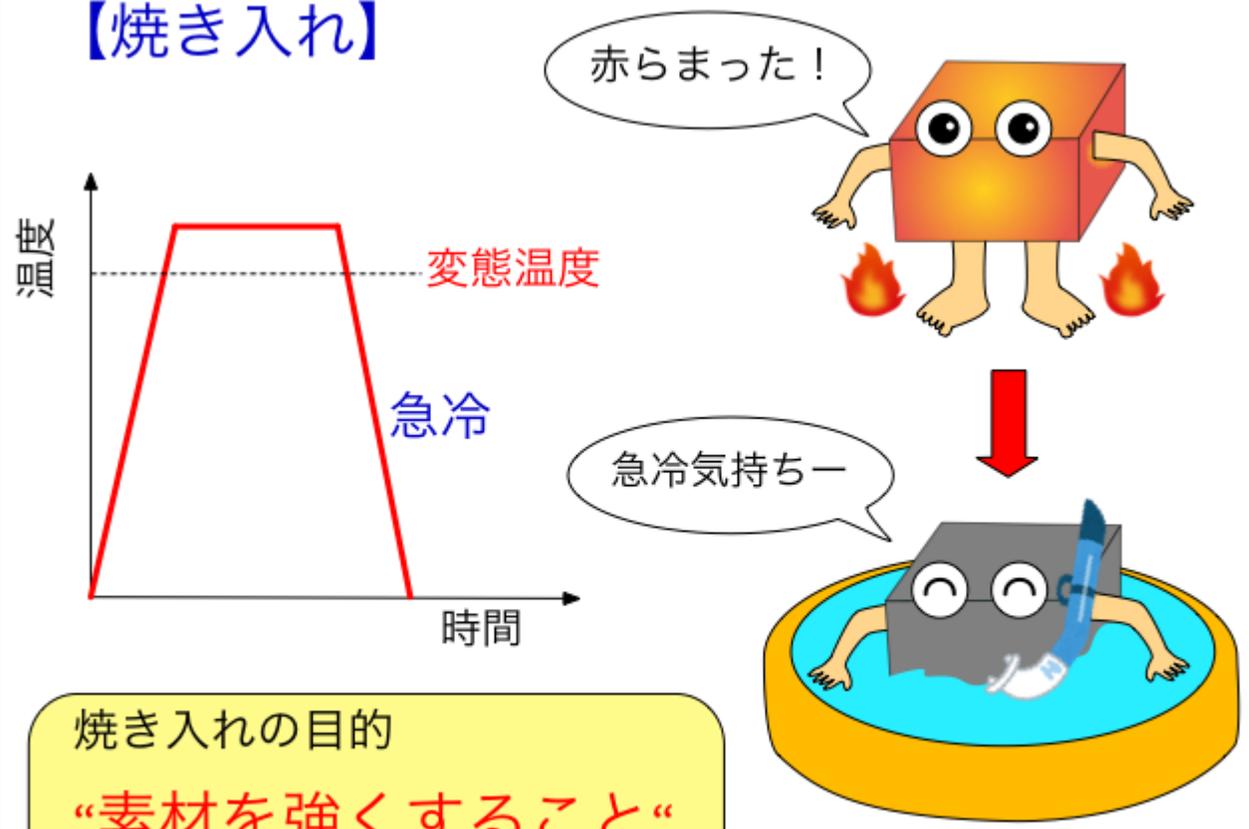


自動車製造工程での誘導加熱の適用例



熱処理

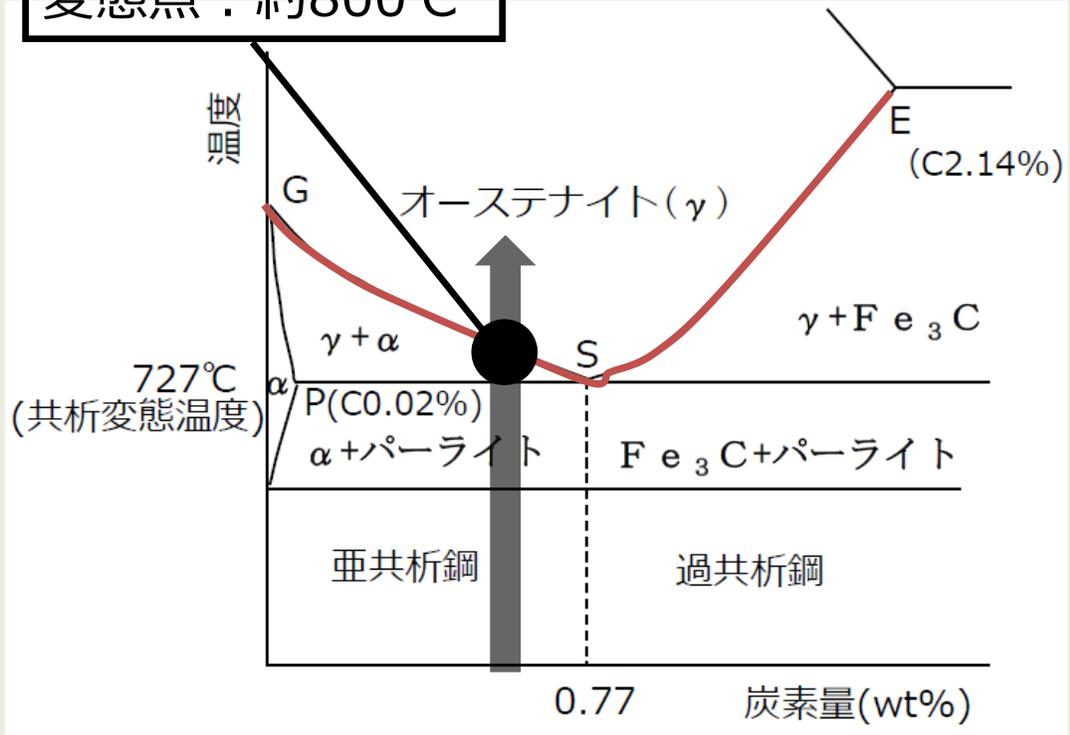
【焼き入れ】



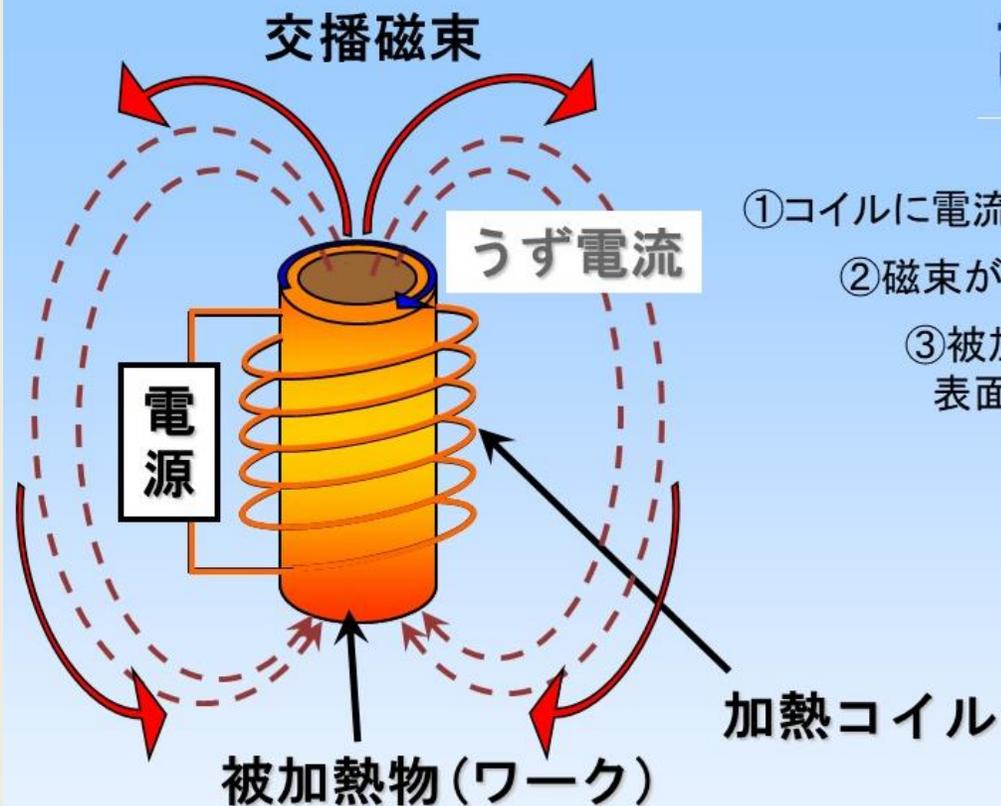
焼き入れの目的
“素材を強くすること”

出典 : <https://sibucho-laboratory.com/>

平衡状態
 変態点：約800°C



高周波誘導加熱の原理



誘導加熱の原理図

誘導電流の仕組み

- ①コイルに電流を流す。
- ②磁束が発生。
- ③被加熱物(ワーク)の電気抵抗により、表面に渦電流が発生。
- ④ワーク自体が発熱する。

加熱の図



とりねっ様との共同研究のきっかけ



【課題①】

- ・小型歯車の**短時間焼入れ時（1秒未満）に従来と条件が異なる**
⇒短時間焼入れ時は、従来の焼入れ（数秒）と現象が異なる
メカニズムを解明する研究を提案

【課題②】

- ・複雑形状の部品で**目的の場所に焼きが入りにくい**
- ・高周波焼入れの**材質により温度分布が異なる**
⇒材質の特性を活用した**選択的高周波誘導加熱法の開発を提案**

治具の材質で
温度分布が異なる

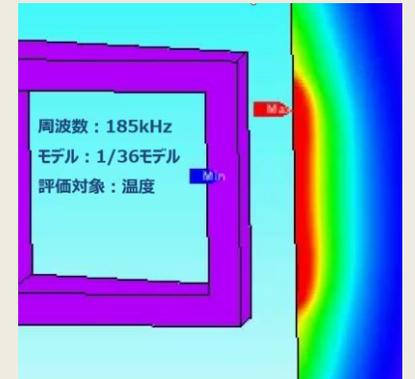


共同研究までの取り組み内容



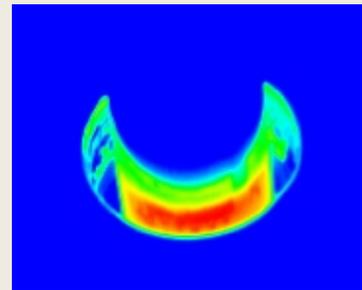
◎ 高周波誘導加熱解析（CAE）を活用した仮想実験

- ① CAEの信頼性向上に向けた材料定数の同定
- ② 目に見えない高周波誘導加熱現象の可視化⇒メカニズム解明



◎ 製造ラインを活用した現象評価

- ① 高周波誘導加熱中の電流値・温度実測
- ② 高周波誘導加熱後の素材評価



産技センター

独自研究

とりねつ様

共同研究

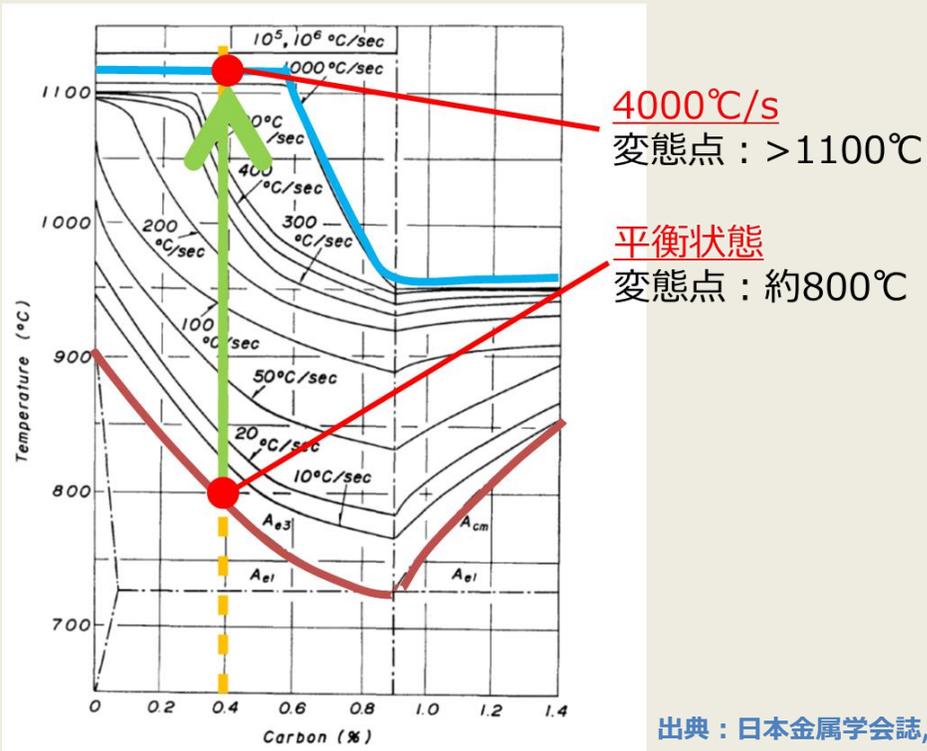
外部資金

研究(共同)

共同研究で取り組んだ課題

【研究課題】短時間焼入れのメカニズム解明

対象ワークサイズが小さいと**相変態速度より温度変化の速度が速くなり、焼きが十分に入らない**（相変態しない）現象がある。φ20mmの丸棒を対象に実験と解析で検証



出典：日本金属学会誌,鋼の非平衡加熱状態図,vol39,1979

【課題】

短時間焼入れになると
昇温速度が変態速度より早くなる
⇒焼きが入りにくい??



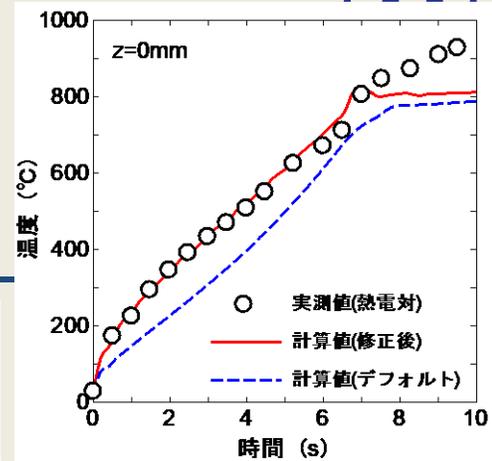
【目的】

超短時間加熱のメカニズムを解明

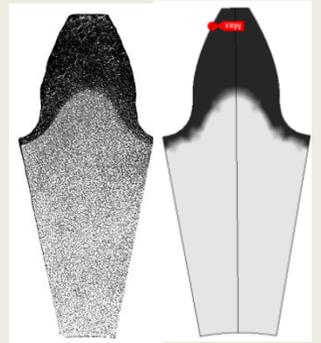
【短時間焼入れのメリット】

- ・極表層のみ焼入れ可能
- ・熱処理後の変形が少ない
- ・より大きな圧縮残留応力が付与可能

材料定数の同定

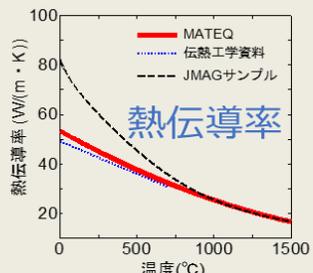
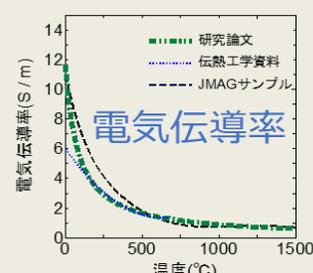
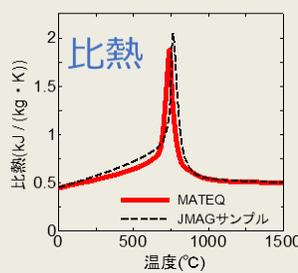
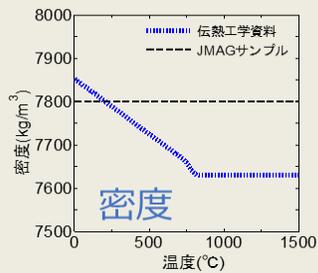
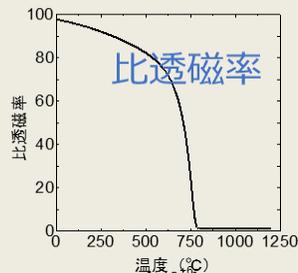


実施内容・検討項目	解析対象ワーク	比較検証データ (参照値)
① 誘導解析法の構築 (解析モデル, 材料物性値の妥当性の確認)	丸棒 (単純形状の部品) 加熱時間: 10S	論文とのデータ比較
② 各種処理条件下における 誘導加熱解析の再現性の確認	平歯車 (通常サイズの複雑部品) 加熱時間: 約3s	論文とのデータ比較



温度依存性材料定数 (電気伝導率、比熱、密度、熱伝導率、透磁率) の確立
解析手法 (メッシュサイズ、電力設定方法) の確立

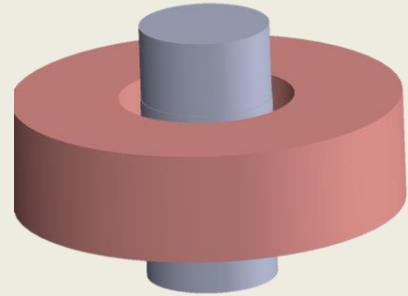
いずれの結果もよく一致



研究概要

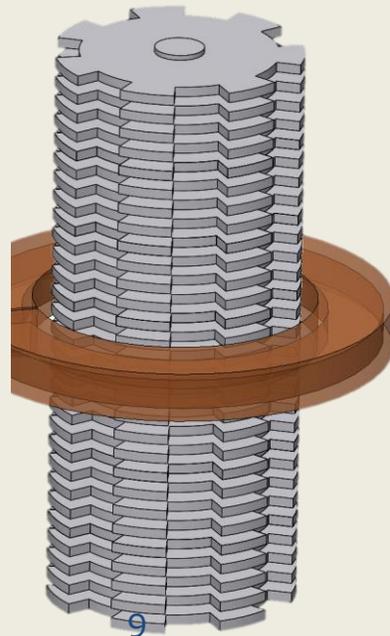
【研究課題①】短時間焼入れのメカニズム解明

対象ワークサイズが小さいと**相変態速度より温度変化の速度が速くなり、焼きが十分に入らない**（相変態しない）現象がある。 $\phi 20\text{mm}$ の丸棒を対象に実験と解析で検証



【研究課題②】磁束密度とジグ材質および形状の影響

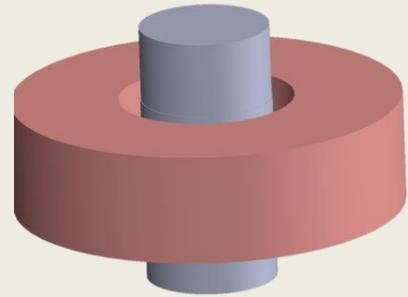
複雑薄肉形状部品で**凸部に焼きが入らず凹部に焼きが入る**。特殊治具を開発し、実験と解析で検証



研究結果概要

【研究課題①】短時間焼入れのメカニズム解明

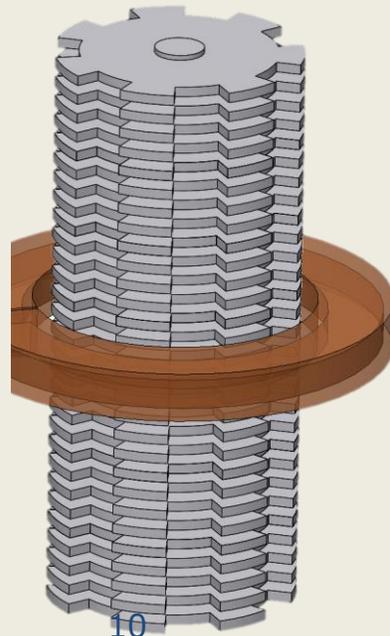
短時間焼入れは、**A1変態点後の温度上昇カーブが異なる**
短時間になるほど装置電力損失により**電流値が上昇しにくい**



【研究課題②】磁束密度とジグ材質および形状の影響

凹凸の形状の影響で温度分布が異なる

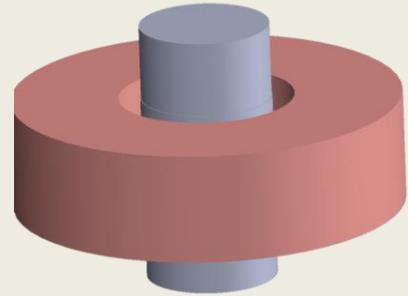
磁束密度制御治具は**透磁率が影響**し、温度分布を制御可能



研究概要

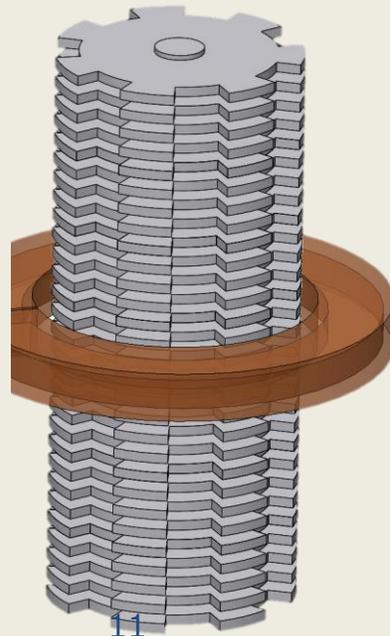
【研究課題①】短時間焼入れのメカニズム解明

対象ワークサイズが小さいと**相変態速度より温度変化の速度が速くなり、焼きが十分に入らない**（相変態しない）現象がある。 $\phi 20\text{mm}$ の丸棒を対象に実験と解析で検証



【研究課題②】磁束密度とジグ材質および形状の影響

複雑薄肉形状部品で**刃先に焼きが入らず刃元に焼きが入る**。特殊治具を開発し、実験と解析で検証



実施内容

【研究課題①】相変態速度が硬化層深さに及ぼす影響

◎ 実験（硬化層深さ）と解析（理論値）を比較

- ・焼入れ時間 0.2s～5sまで変化させた場合の硬化層深さ評価

【検証目的】

- ・短時間焼入れ時における硬化層への影響調査

【実験条件】

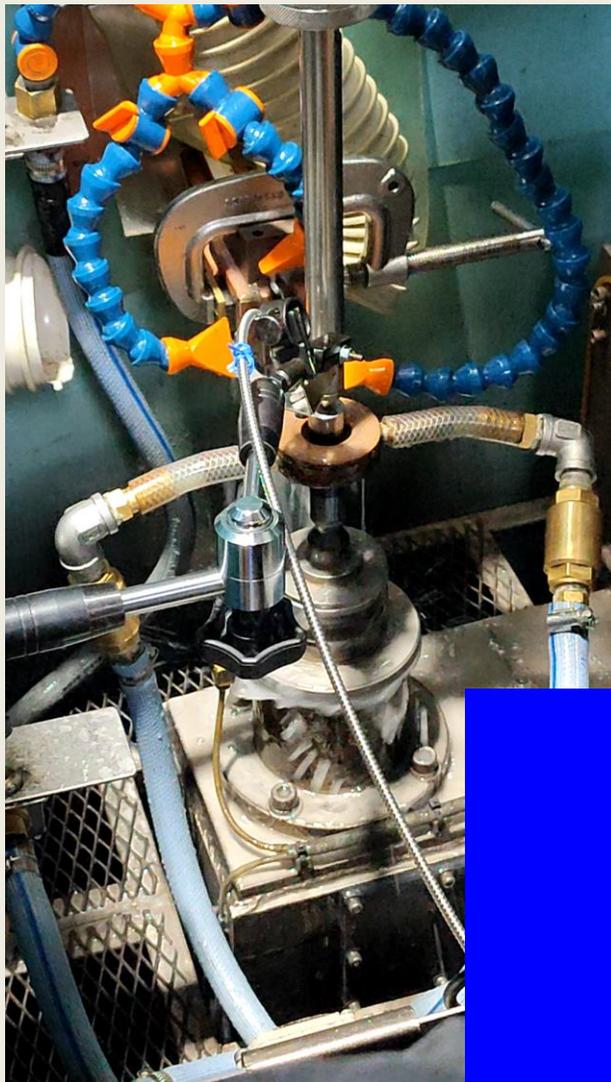
- ・テストピース：φ20mm長さ80mmの丸棒
- ・焼入れ方法：停止焼入れ
- ・焼入れ時間：0.1s, 0.2s, 0.3s, 0.4s, 0.5s, 1s, 2s, 3s, 5s

【検証項目】

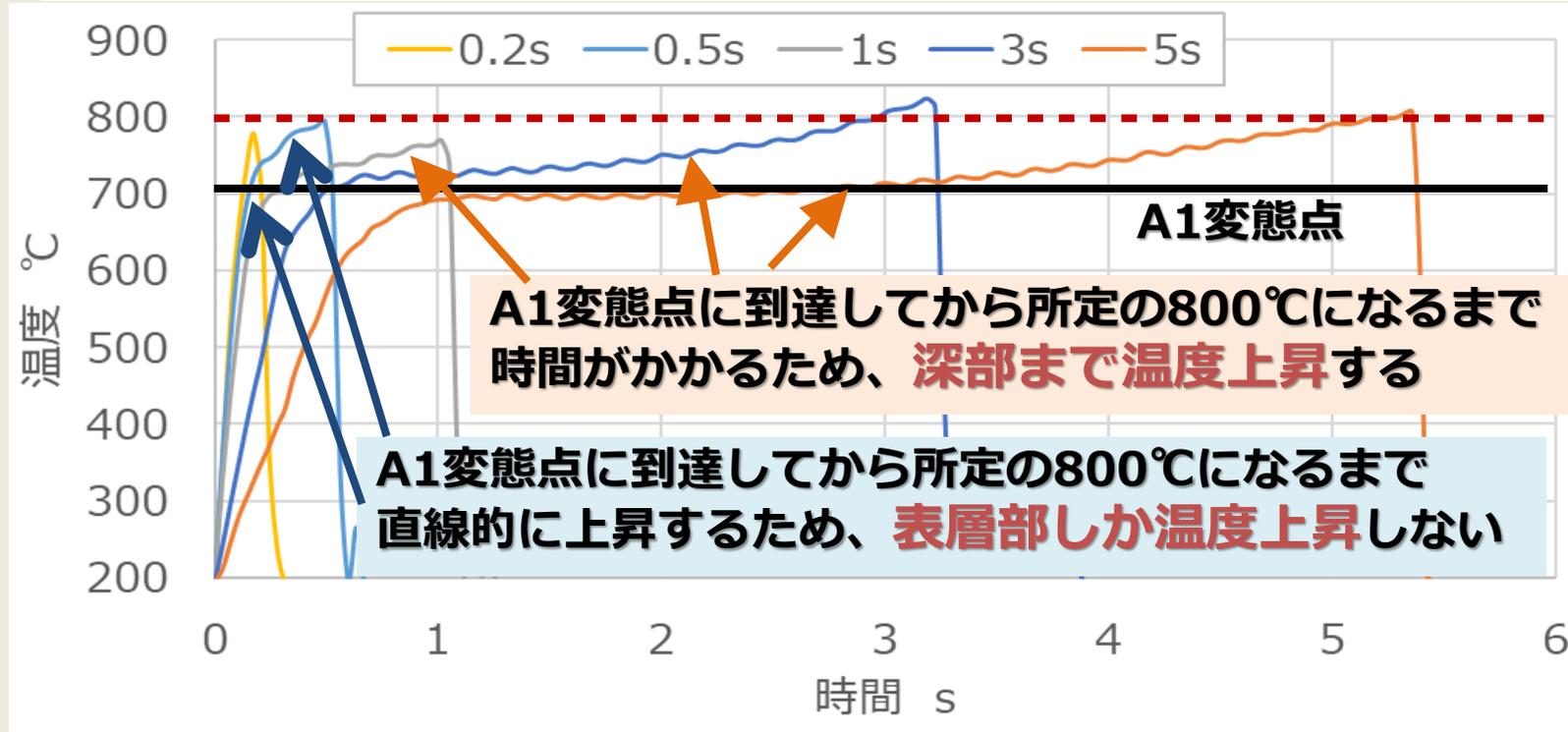
- ・硬化層分布をマクロ試験と硬さ分布で取得
- ・シミュレーションと比較



短時間焼入れ実験の様子



温度センサによる測定結果

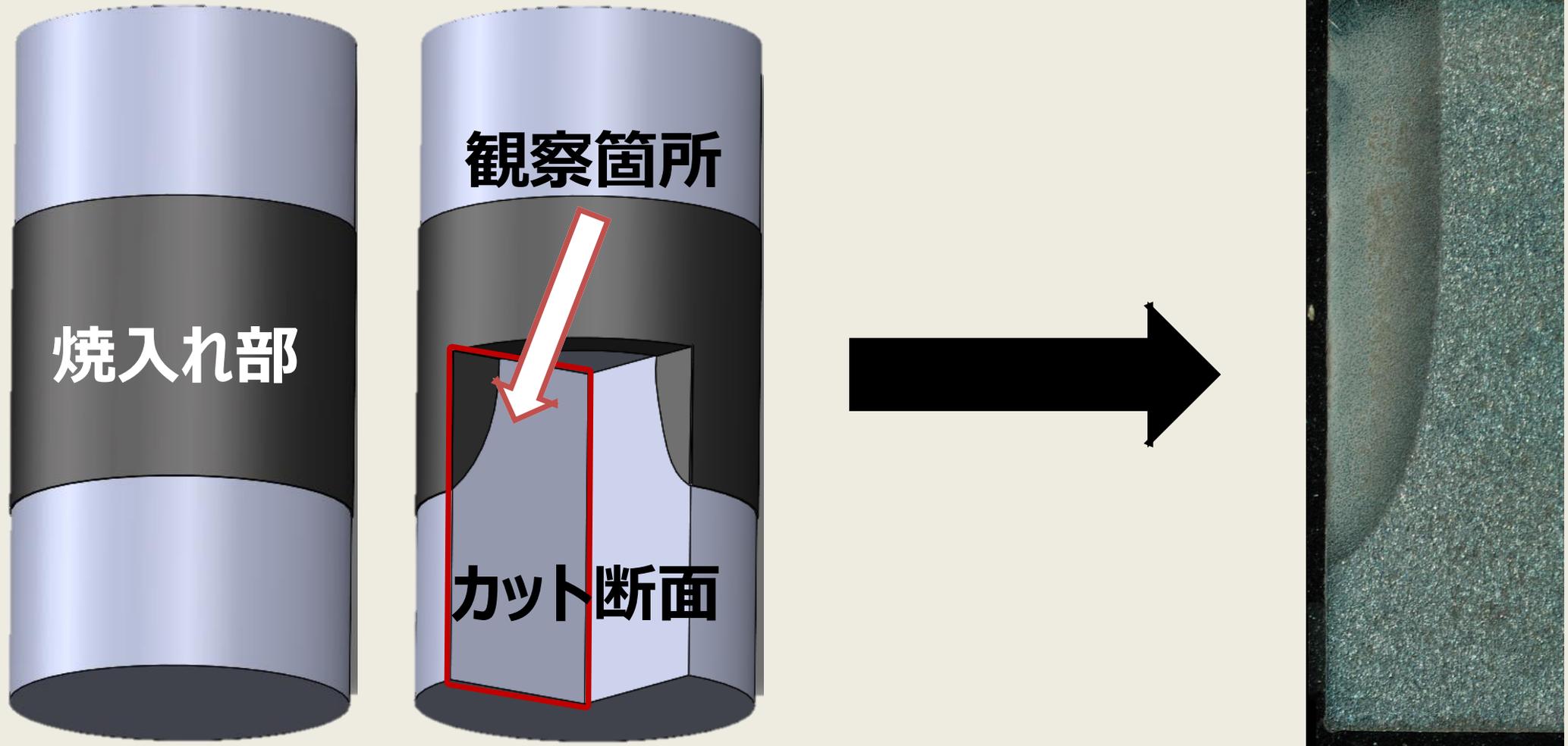


20mm
↔



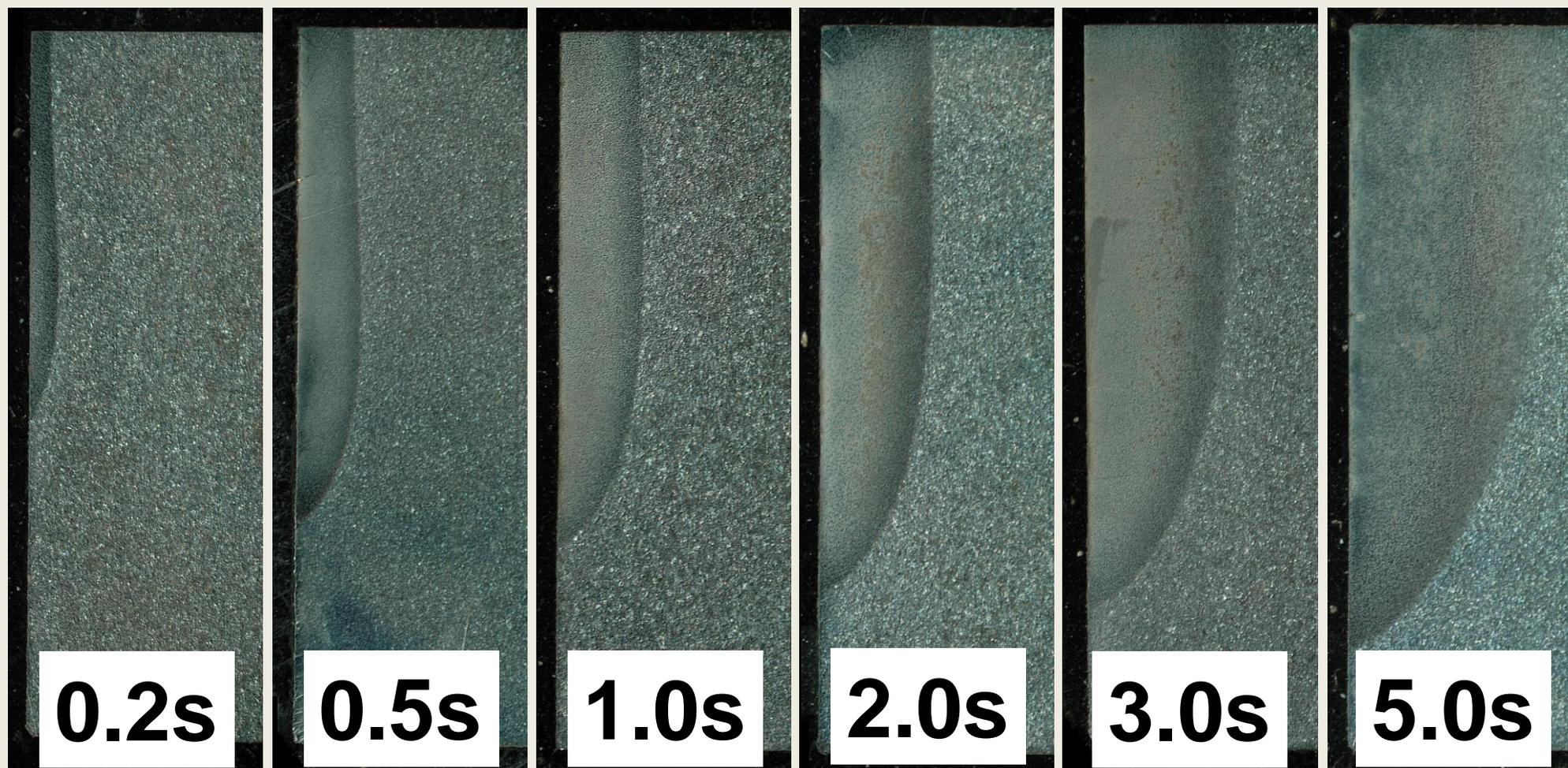
0.2s 0.3s 0.4s 0.5s 0.6s 0.8s 1s 2s 3s 5s

高周波焼入れ後のマクロ観察方法

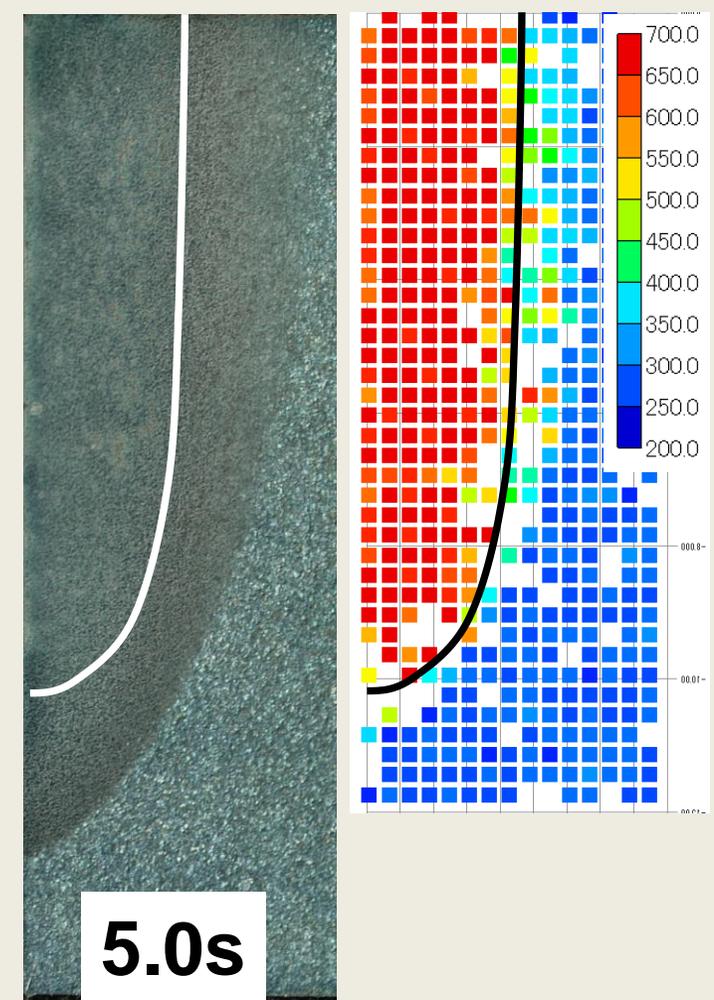
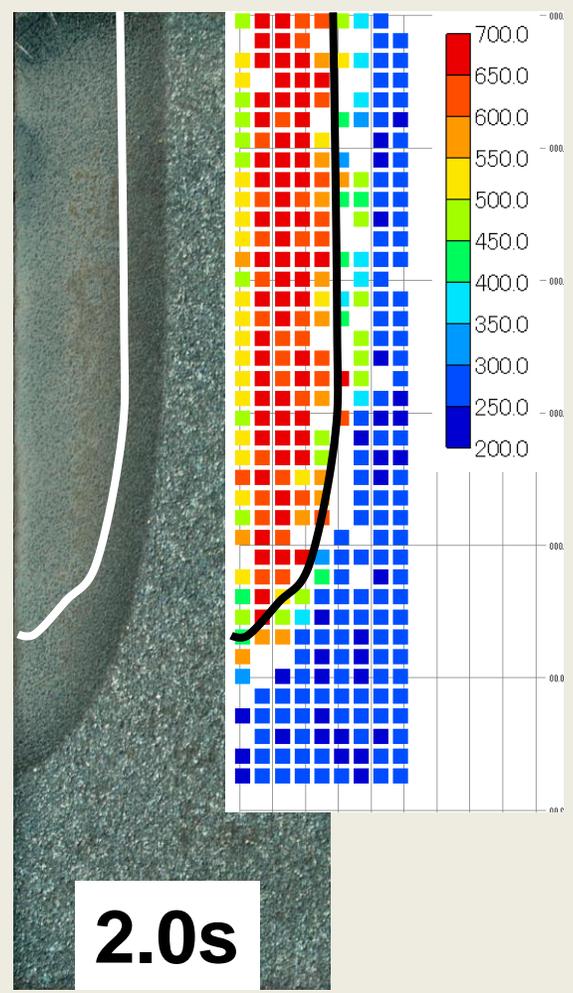
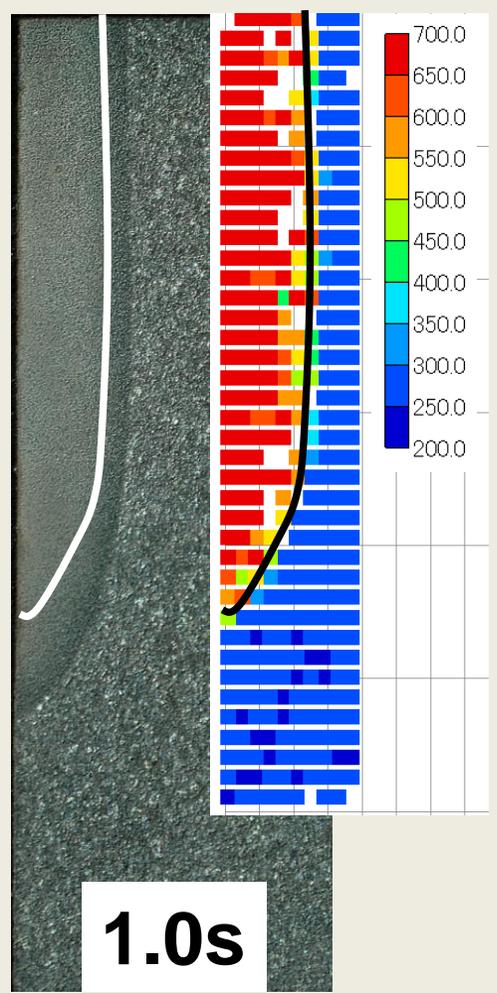
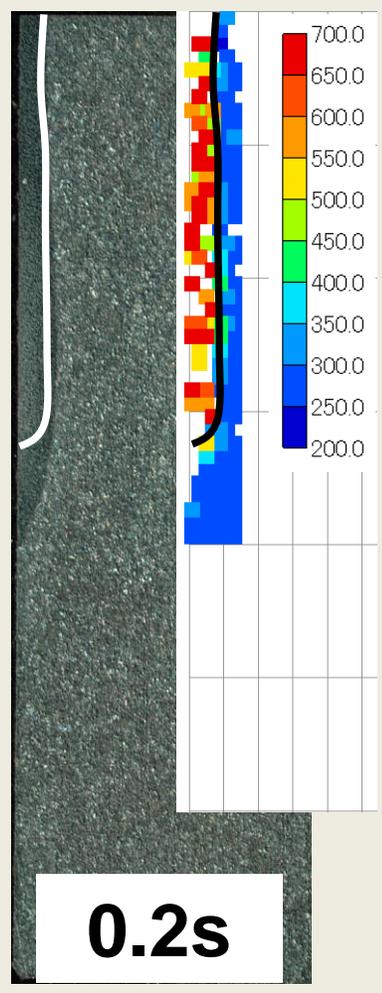


高周波焼入れ後のマクロ観察結果

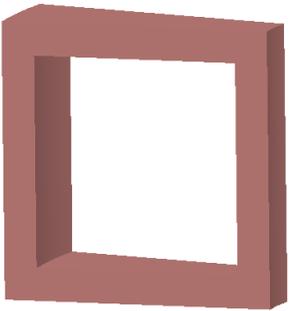
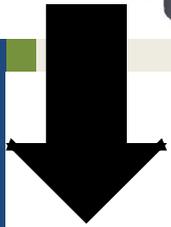
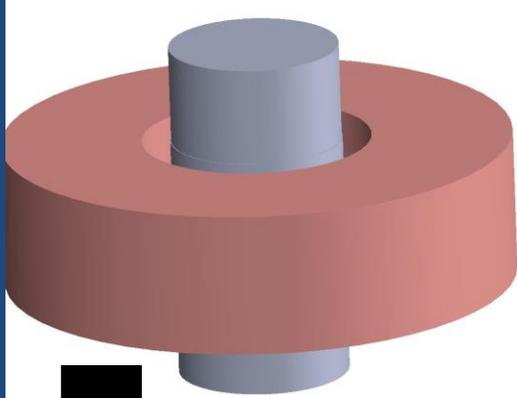
コイル



硬さマッピングとマクロ観察の比較

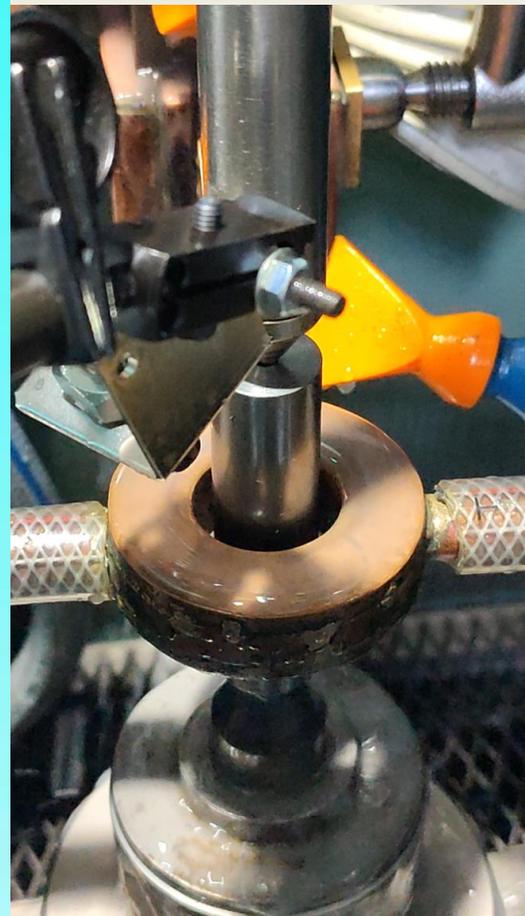


解析条件

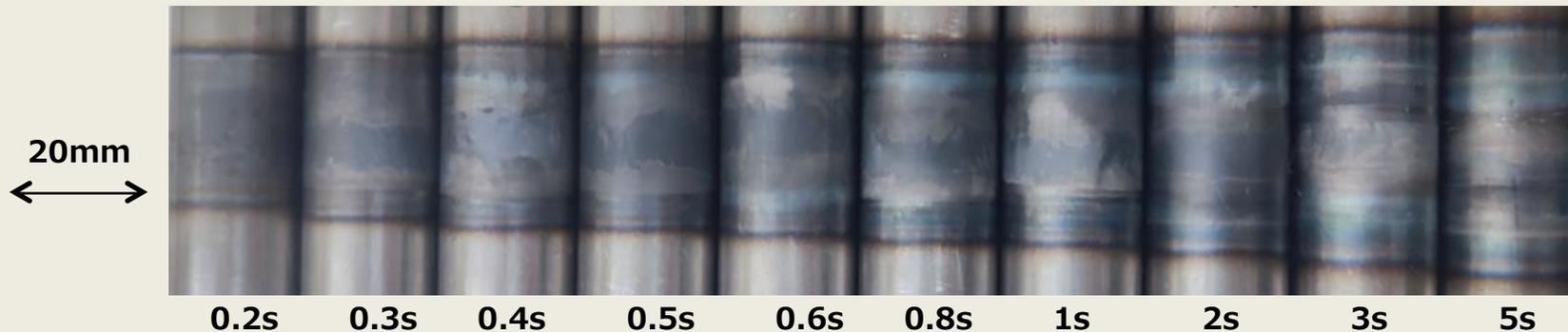
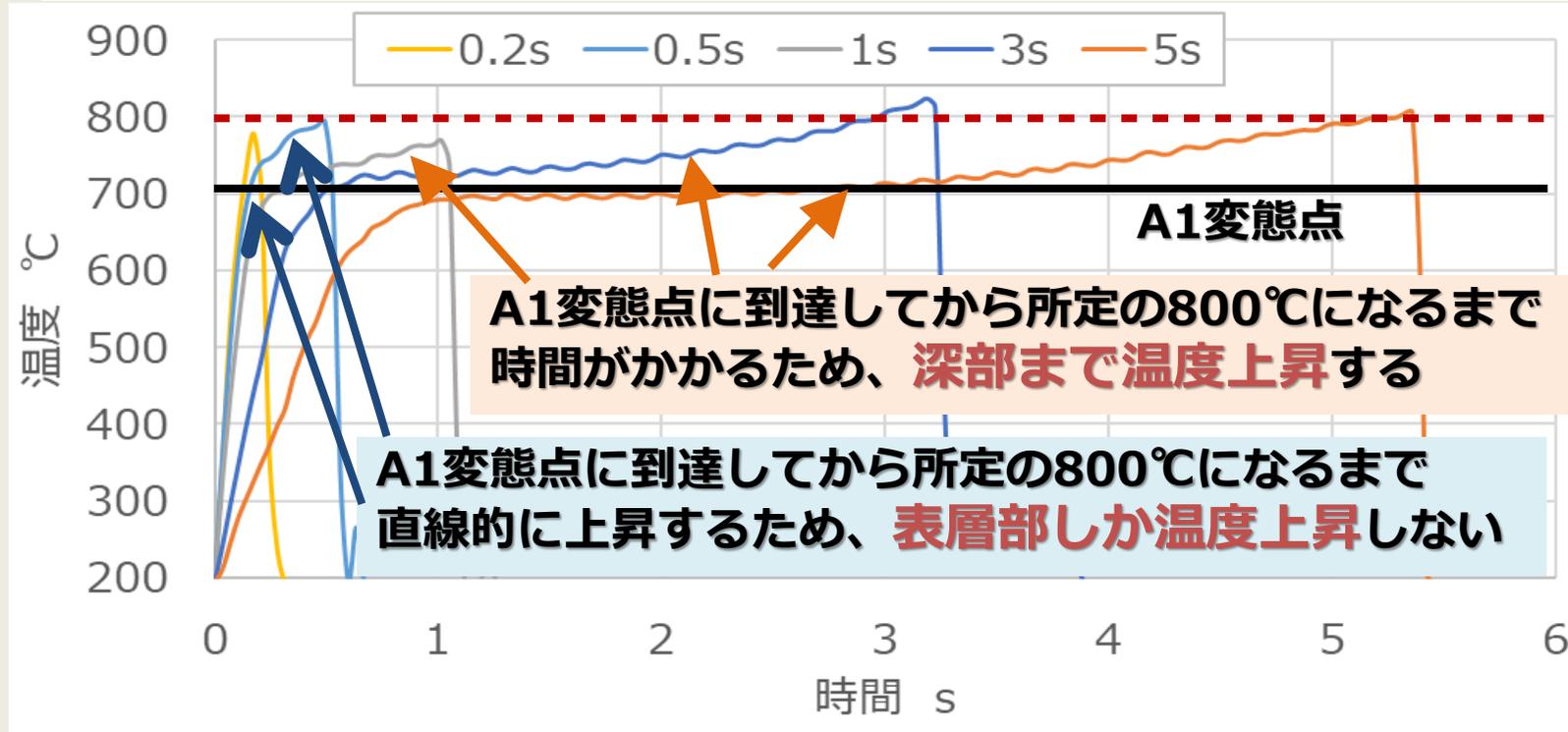


周波数 : 185kHz
モデル : 1/36モデル
評価対象 : 温度

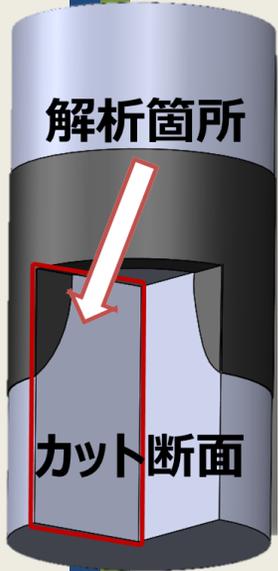
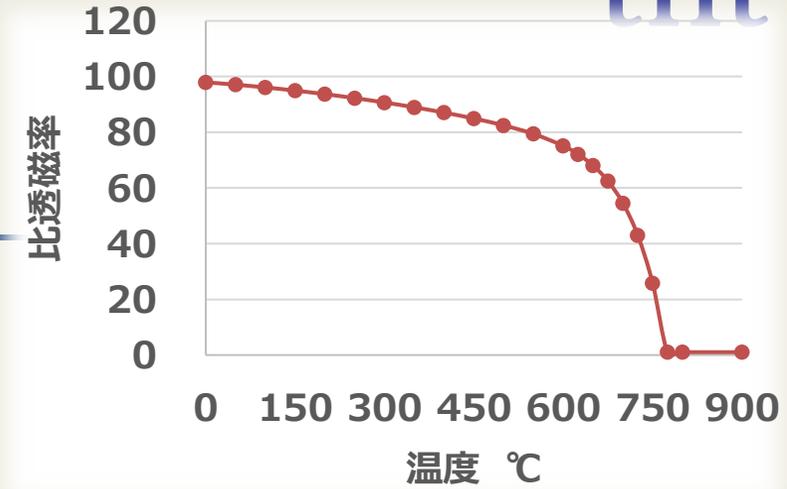
Min



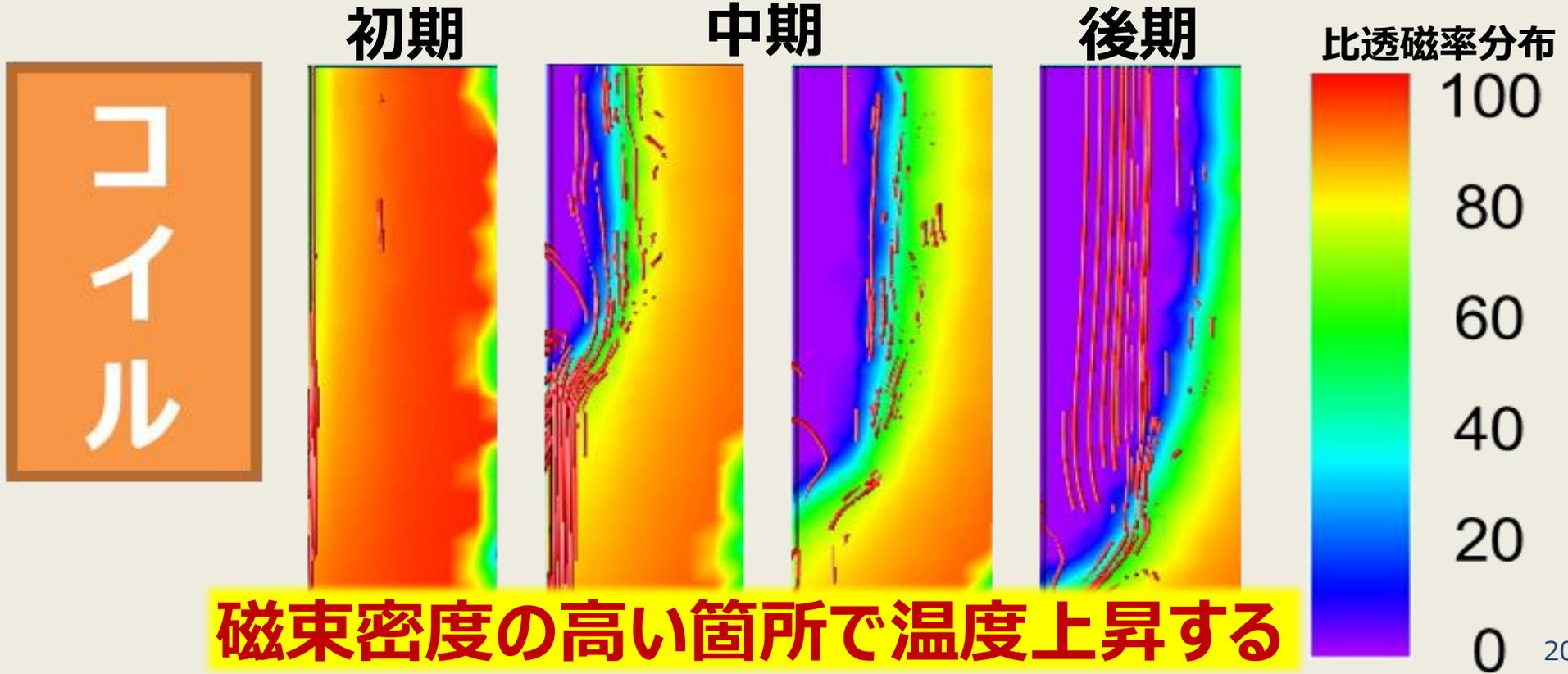
温度センサによる測定結果



比透磁率分布と磁束密度

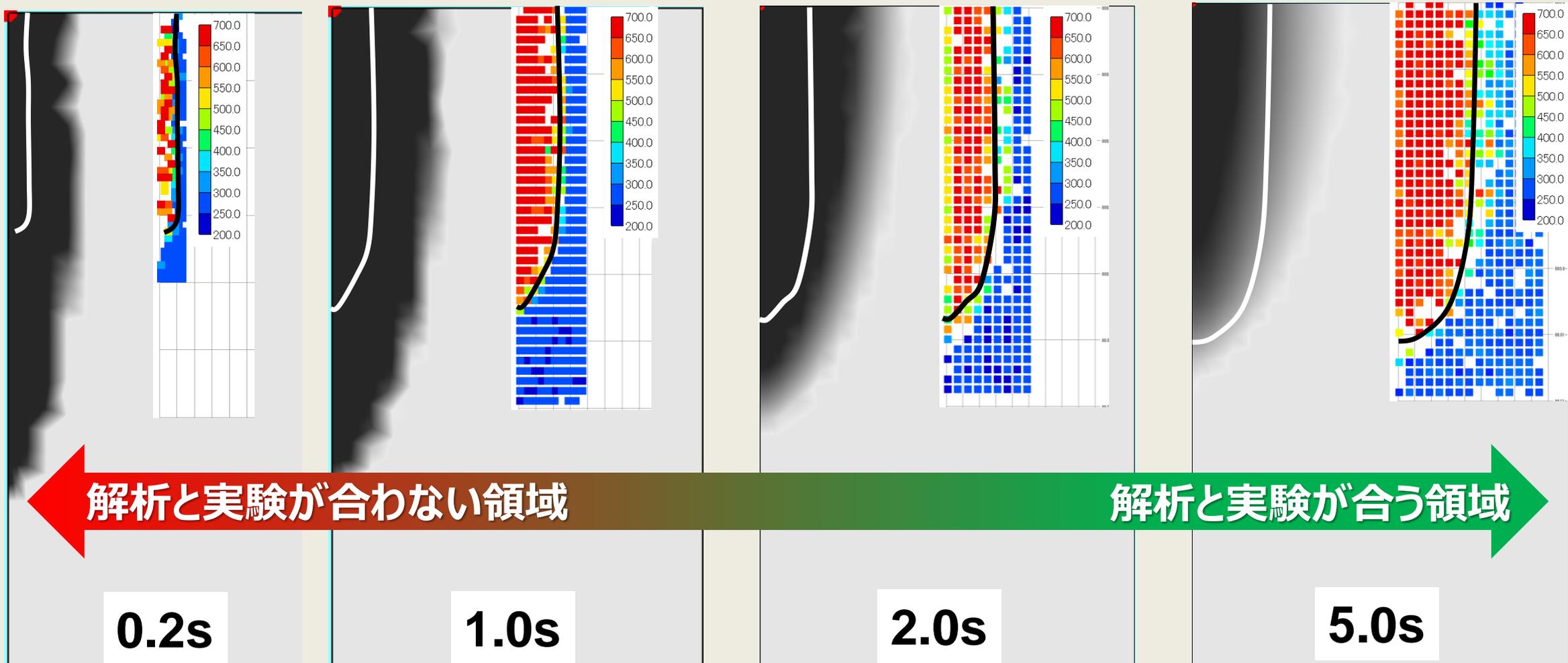


赤線：磁束密度



解析結果と実験結果の比較

※解析結果の750℃以上を黒色表示



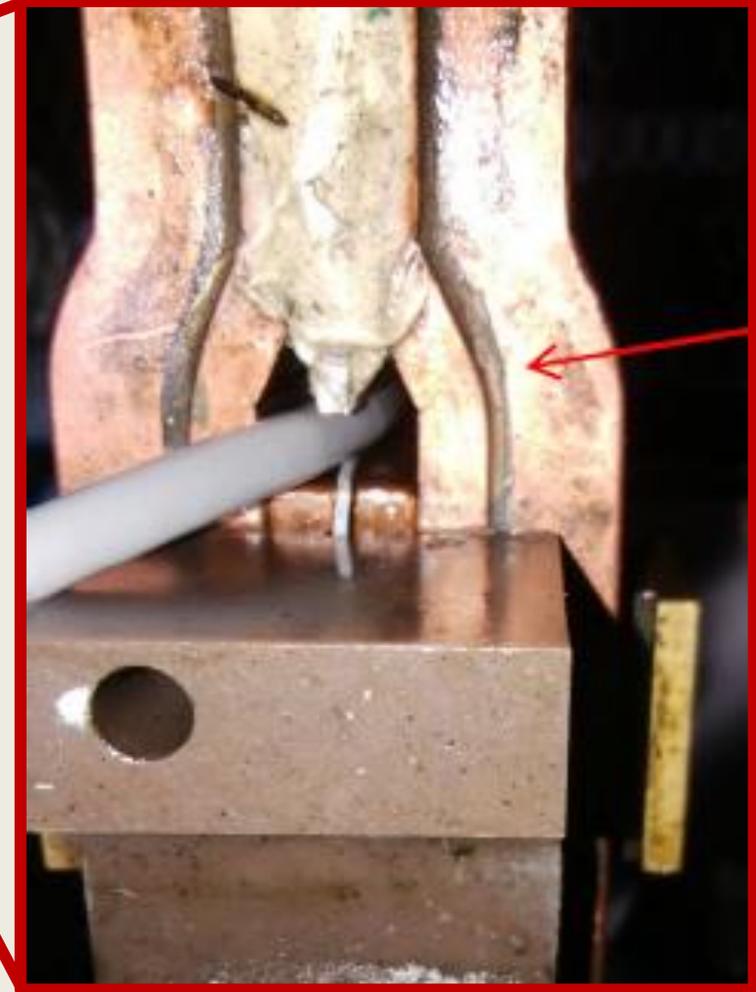
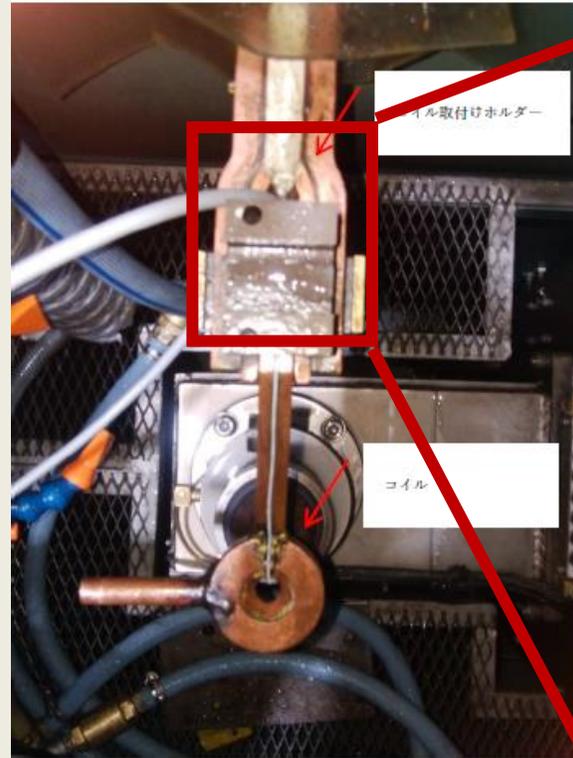
焼入れ条件（電源側の出力値）

焼入れ時間	電流値	電圧値	電力
0.2	282A	387V	109,134W
0.5	266A	320V	85,120W
1	235A	265V	62,275W
3	174A	187V	32,538W
5	143A	153V	21,879W

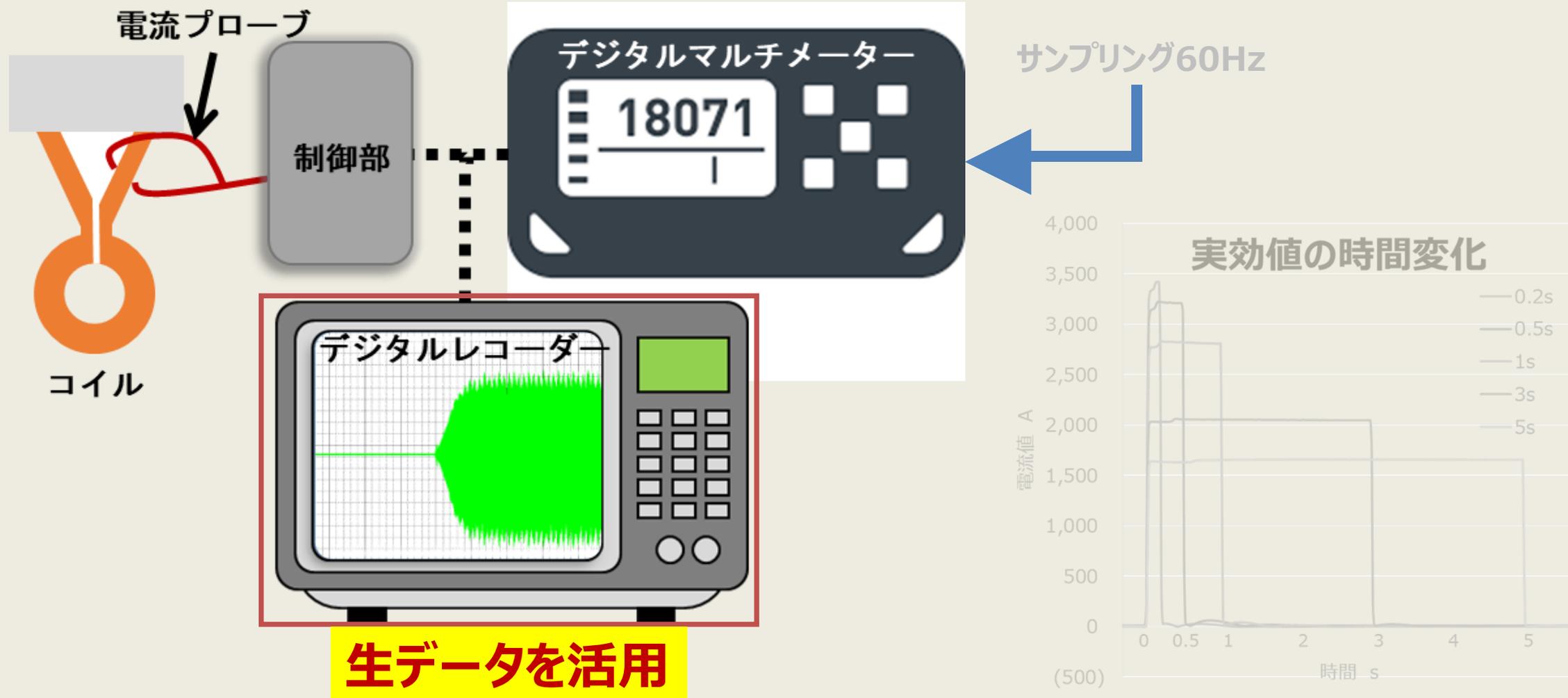
損失大

損失小

電流プローブ設置方法

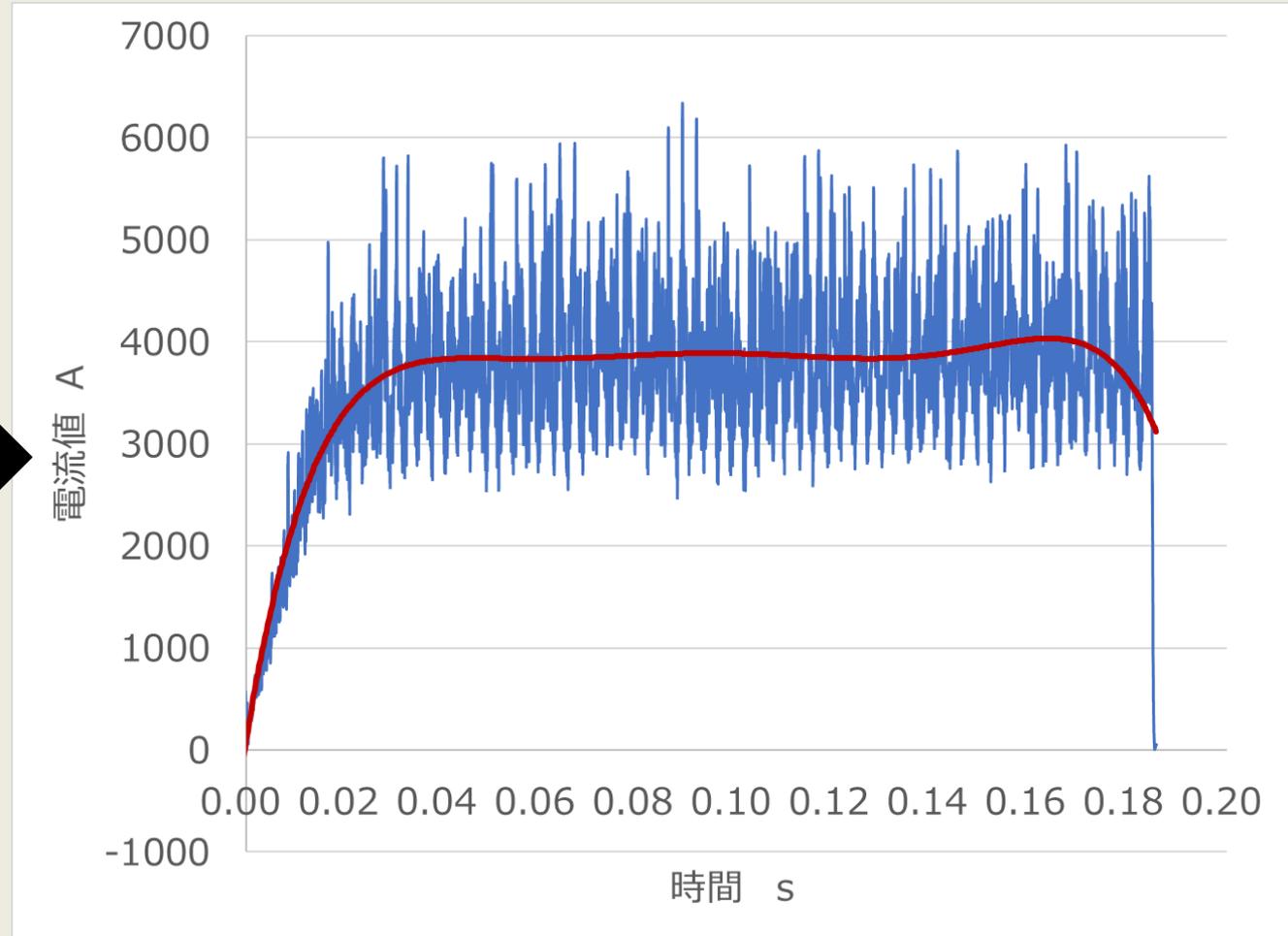
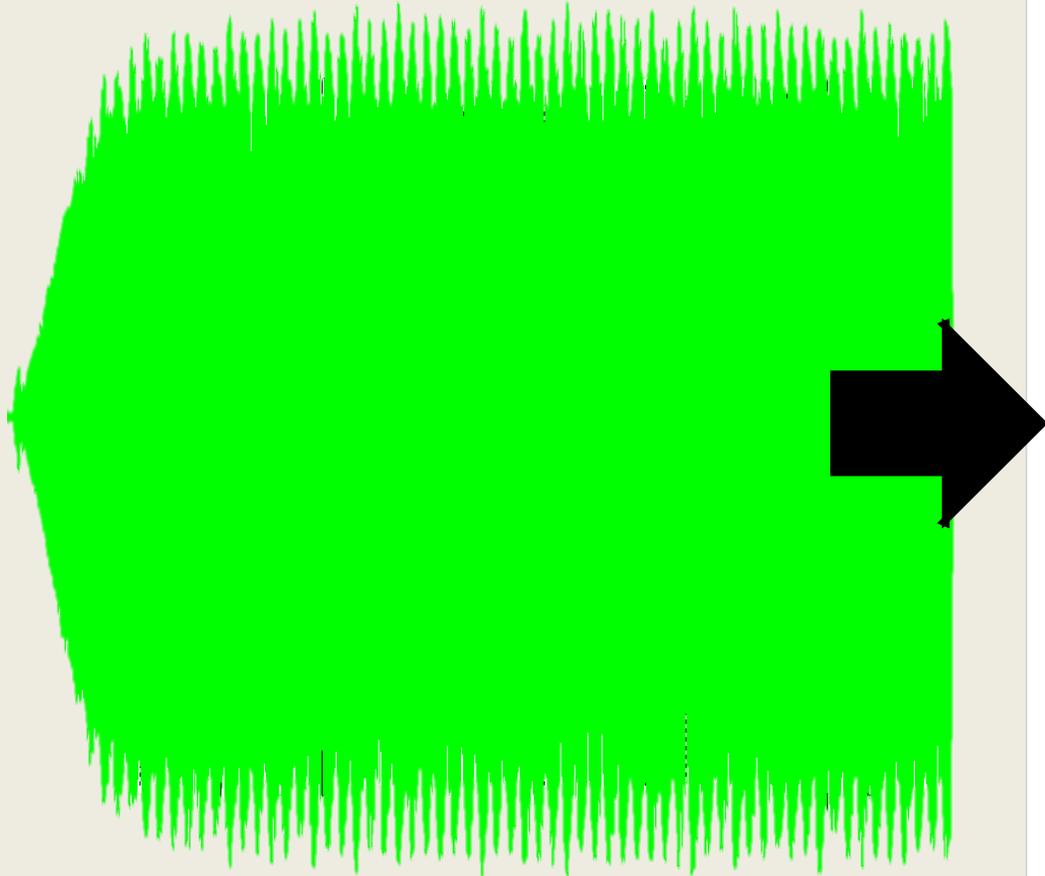


電流値の算出方法



デジタルレコーダーより実効値算出

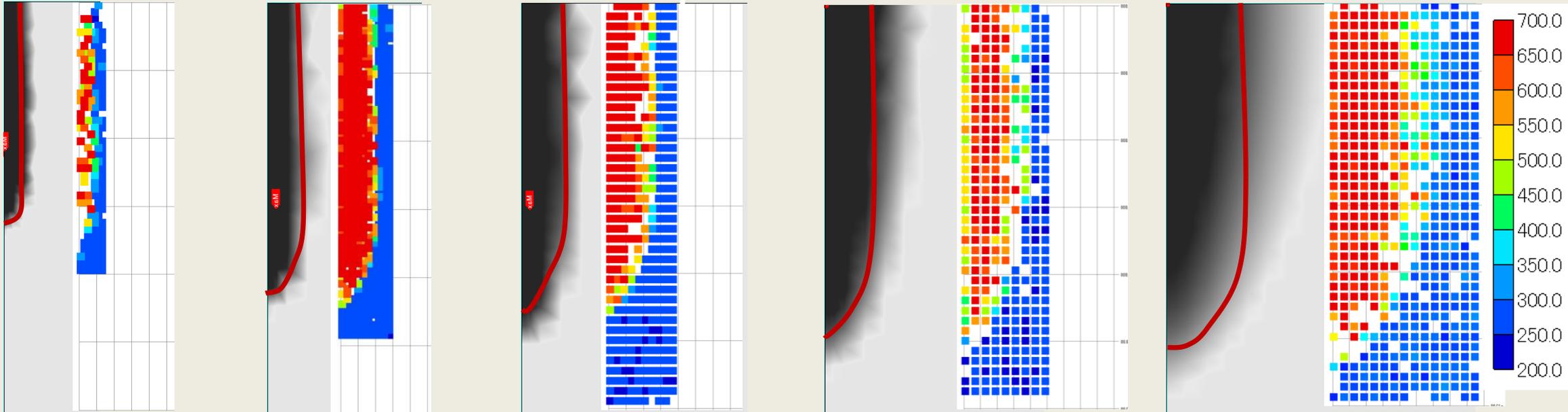
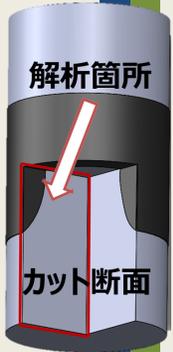
正弦波の生波形を実効値変換



解析結果と実験結果の比較 (交流波形)

実験結果の硬化層

※解析結果の750℃以上を黒色表示



解析と実験が一致

0.2s

0.5s

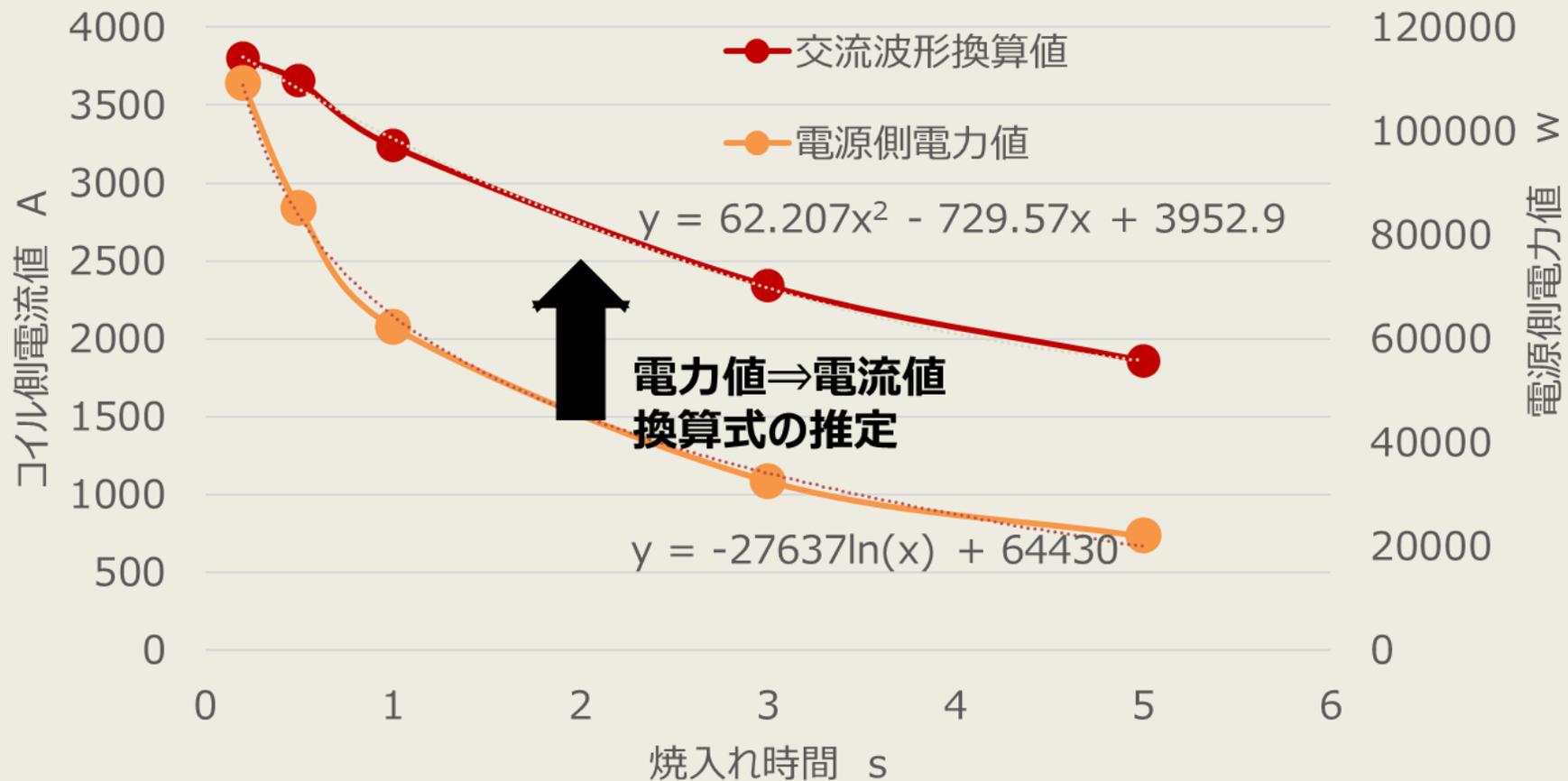
1.0s

3.0s

5.0s

解析条件の推定が可能に

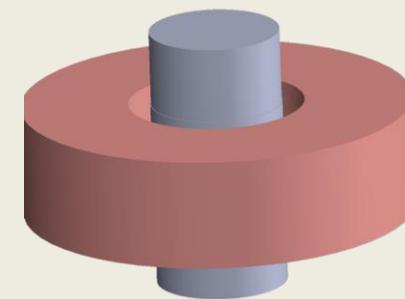
- 電力値（現場で容易にモニタリングできる数値）と電流値（専用の機材を使わないと測定できない数値）の関係性（電源損失等）を数値化



研究概要

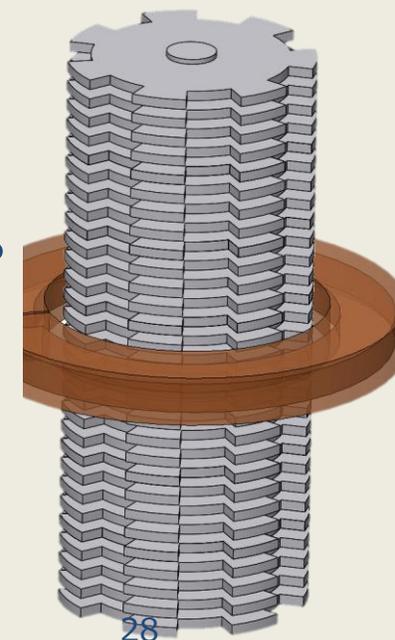
【研究課題①】短時間焼入れのメカニズム解明

対象ワークサイズが小さいと相変態速度より温度変化の速度が速くなり、焼きが十分に入らない（相変態しない）現象がある。φ20mmの丸棒を対象に実験と解析で検証



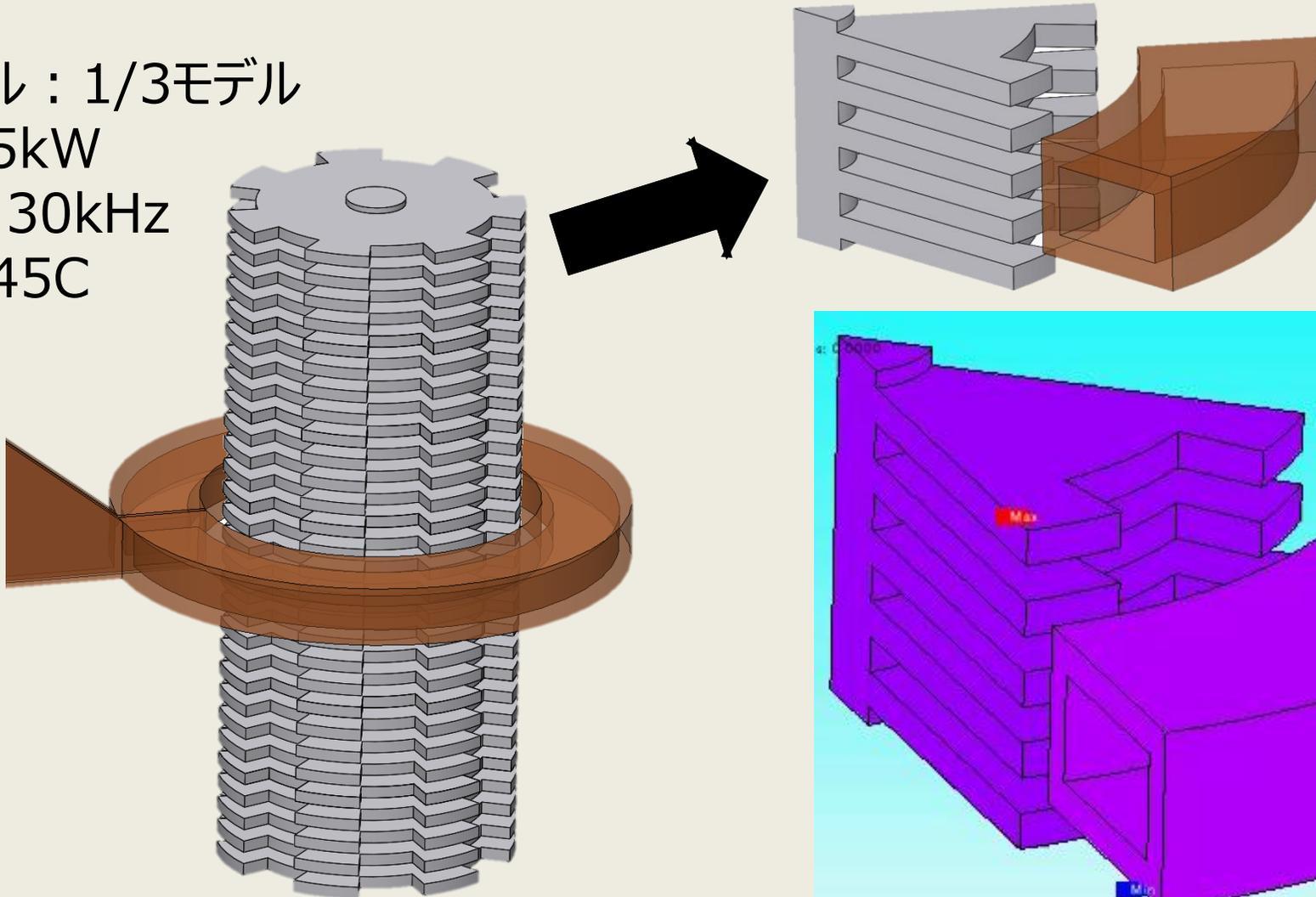
【研究課題②】磁束密度とジグ材質および形状の影響

複雑薄肉形状部品で刃先に焼きが入らず刃元に焼きが入る。特殊治具を開発し、実験と解析で検証

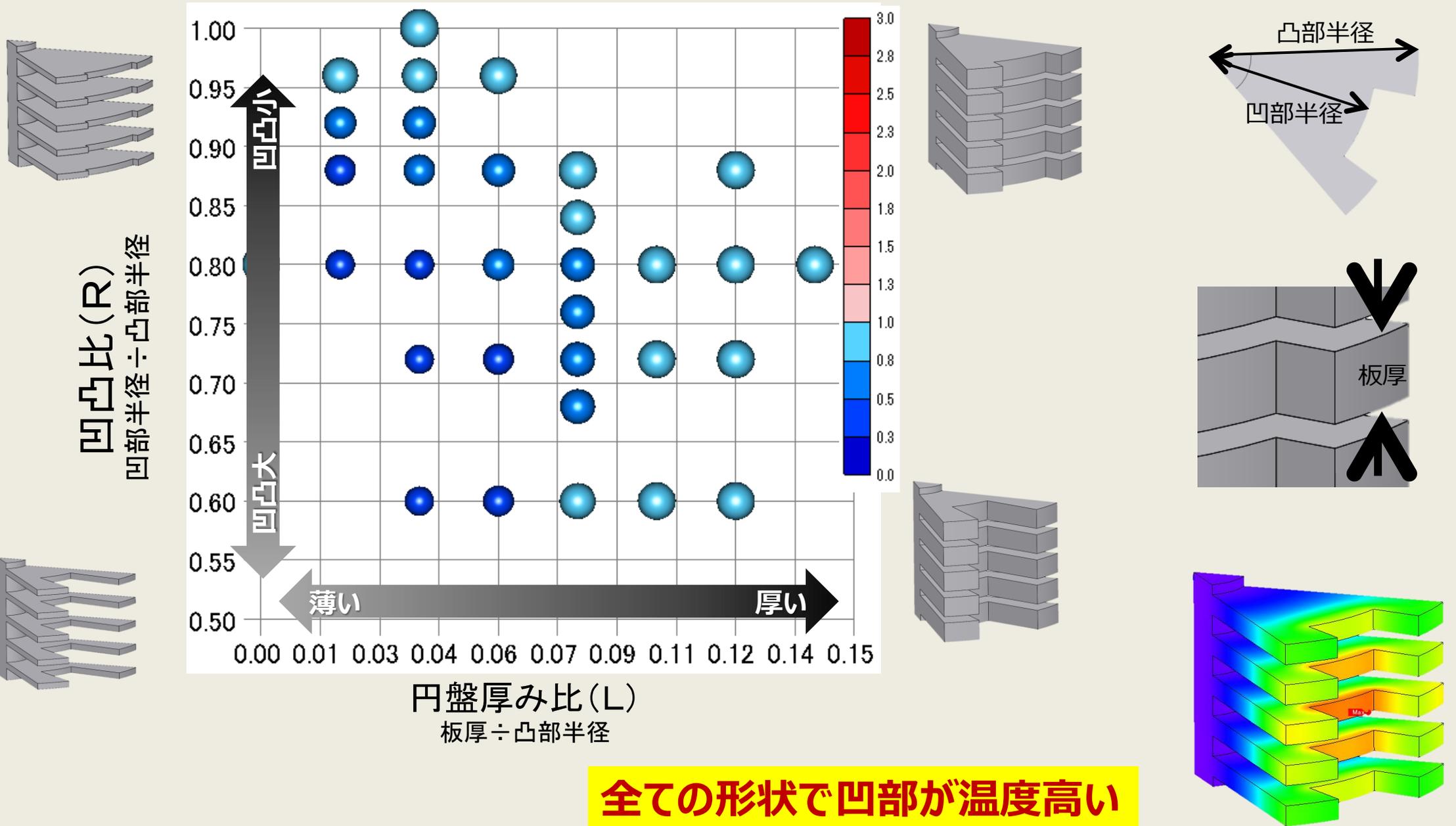


解析条件と解析結果

解析モデル：1/3モデル
電力：45kW
周波数：30kHz
材料：S45C



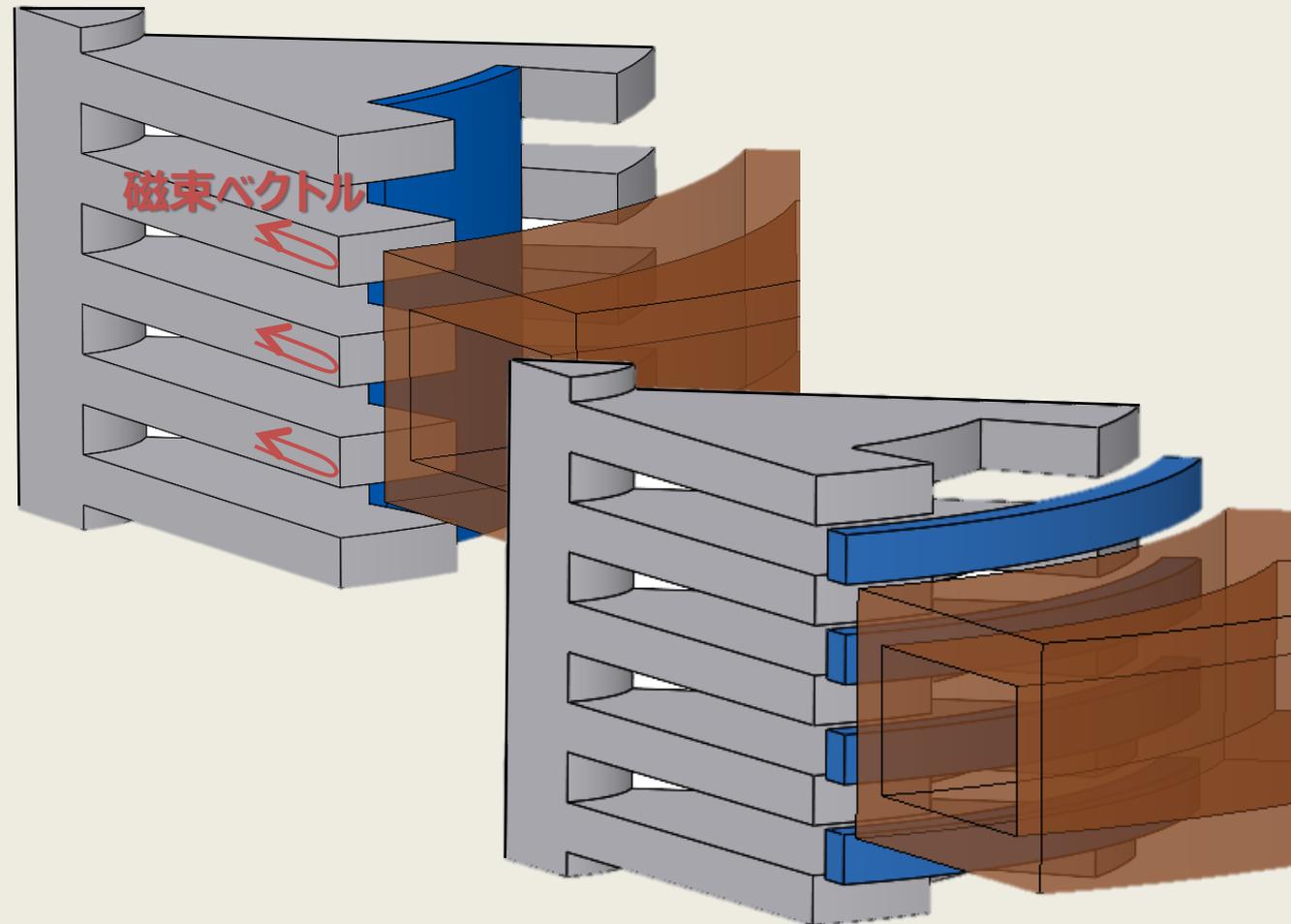
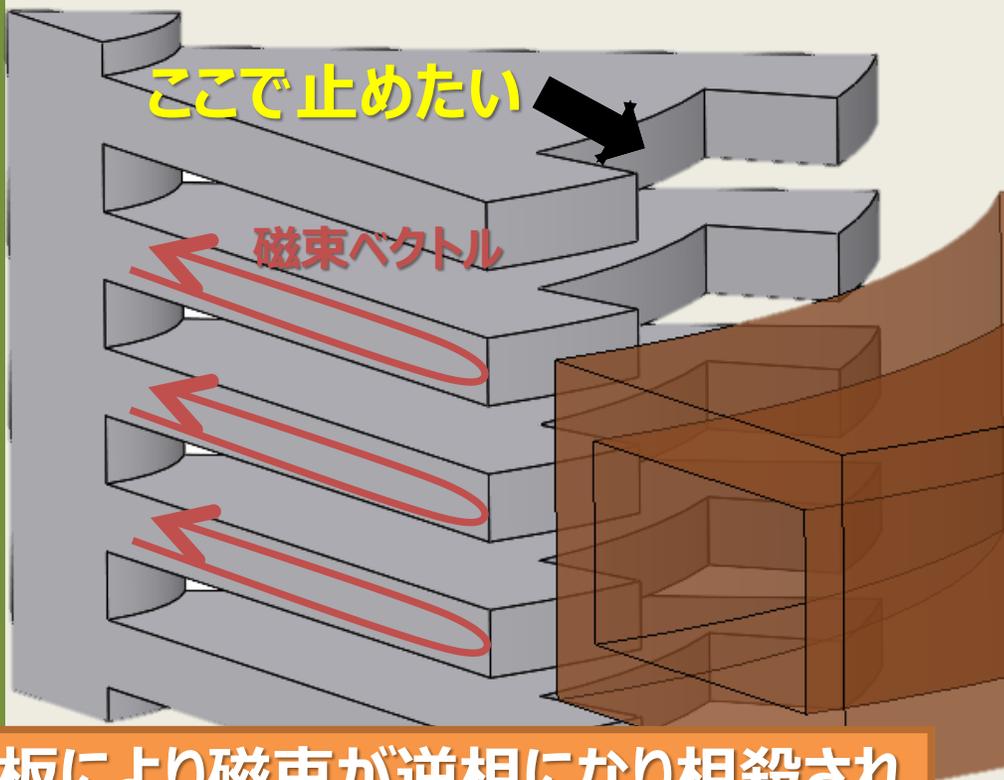
凸部と凹部の温度比 (凸部温度 ÷ 凹部温度)



全ての形状で凹部が温度高い

熱処理不良の原因と検討した治具形状

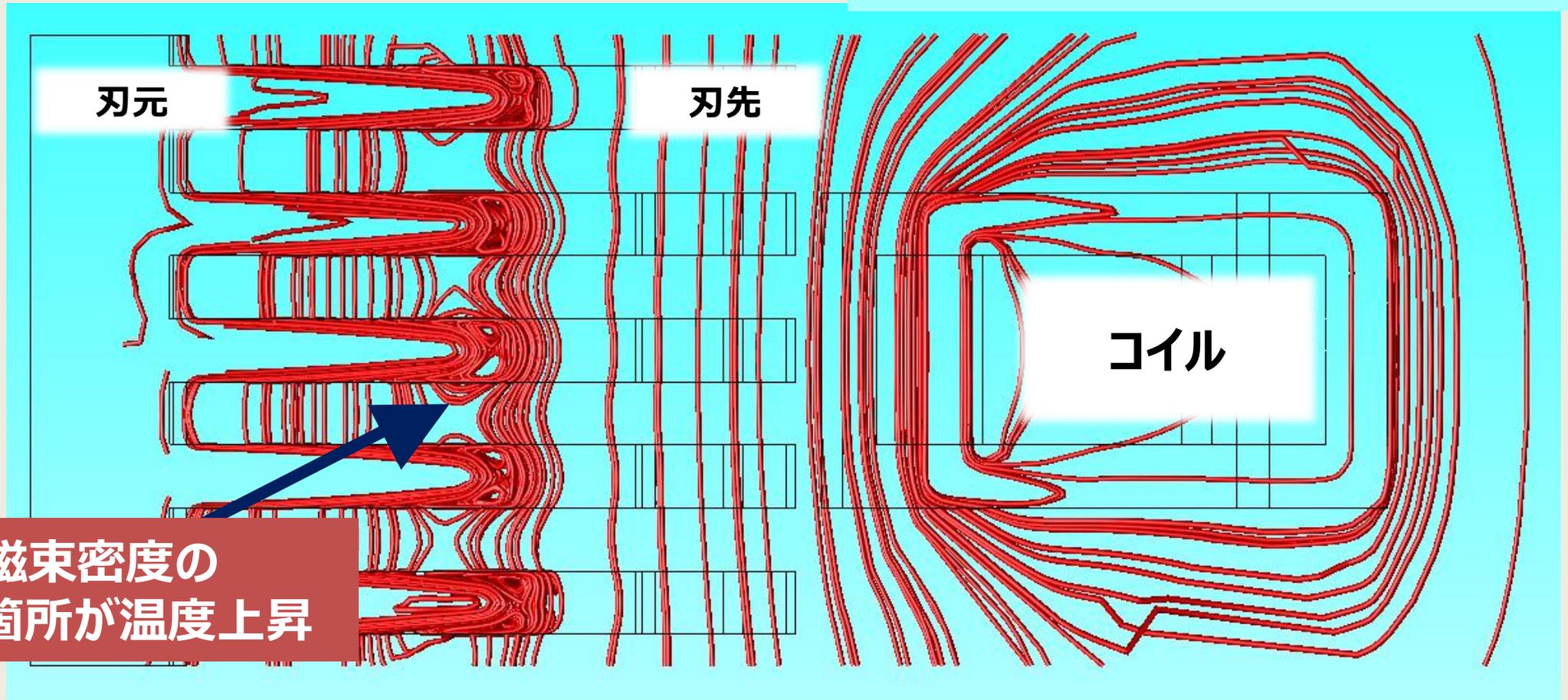
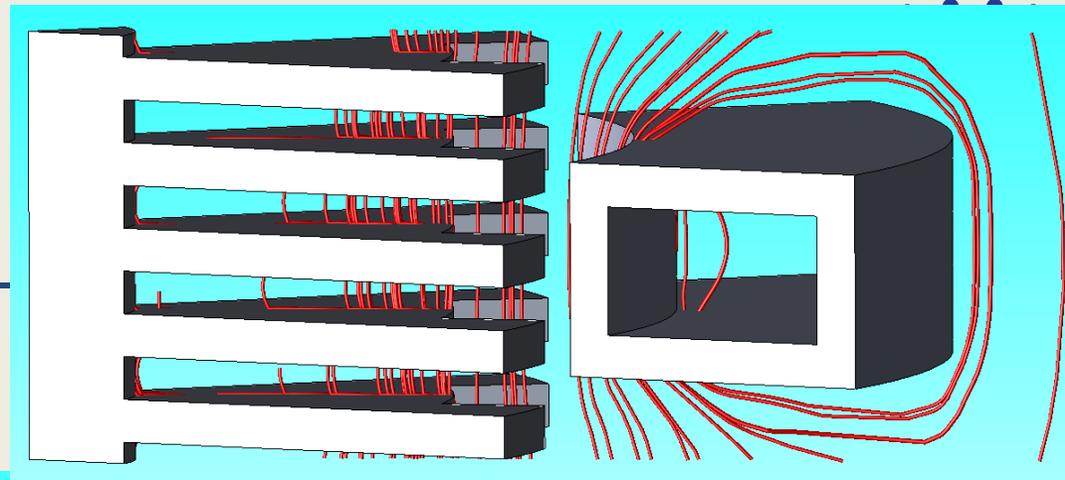
ポイント：刃元方向への磁束ベクトルを止める



薄板により磁束が逆相になり相殺され
渦電流が小さくなる

磁束密度分布

磁束密度分布



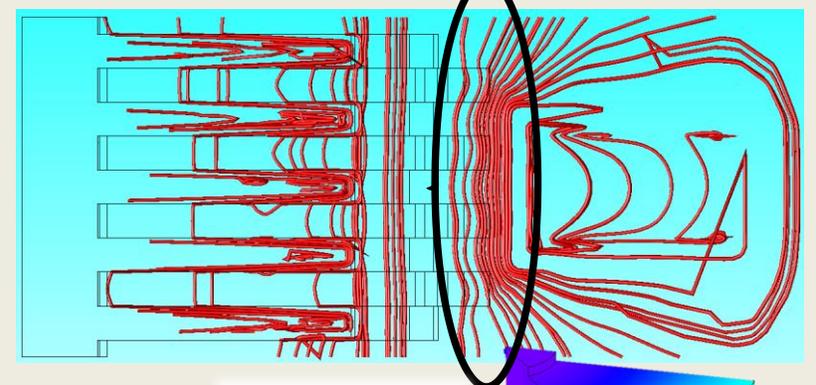
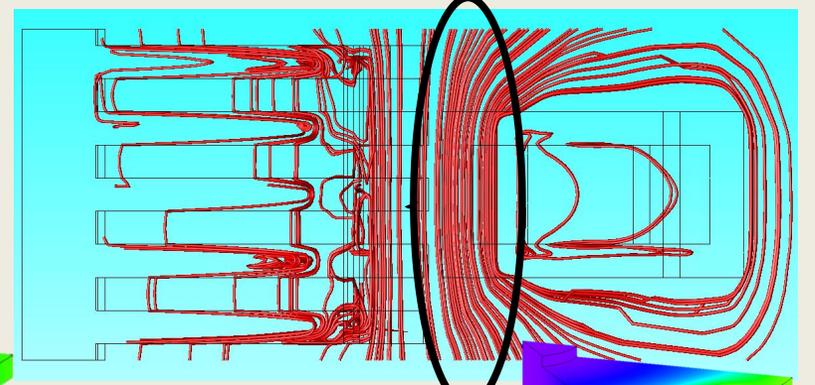
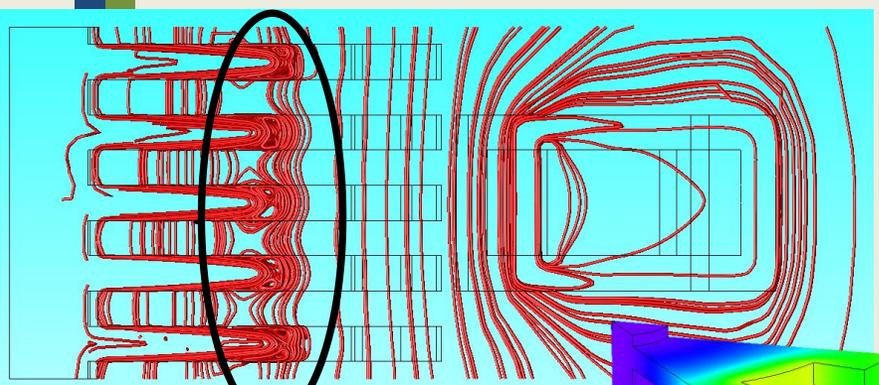
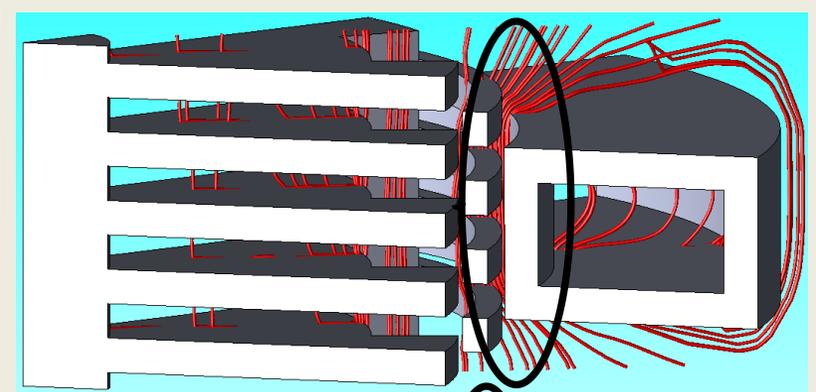
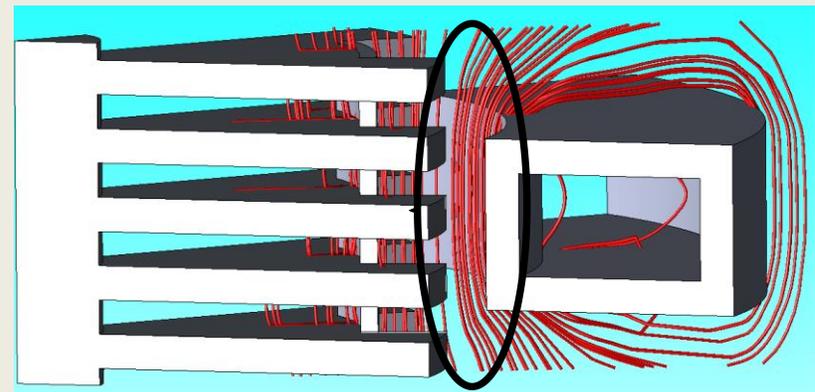
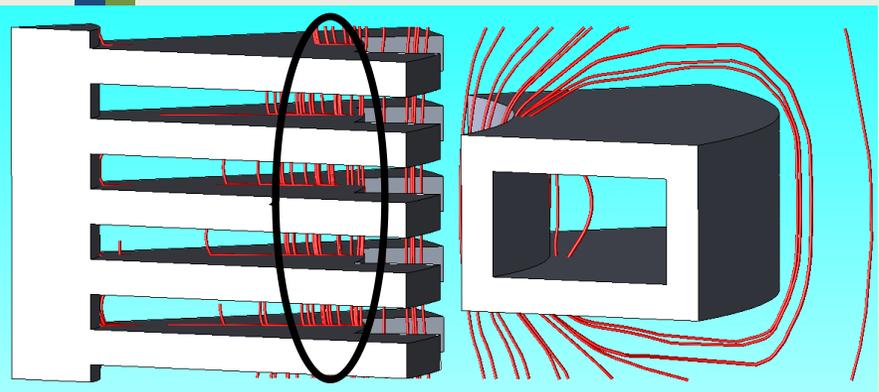
磁束密度の
高い箇所が温度上昇

磁束密度分布の違い

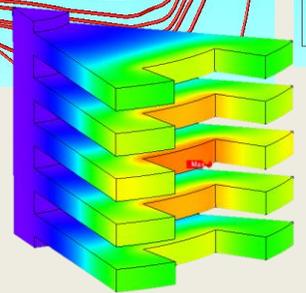
治具なし

治具①

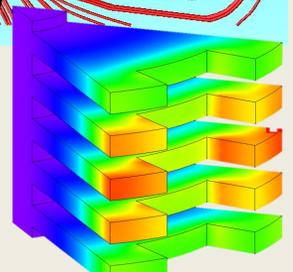
治具②



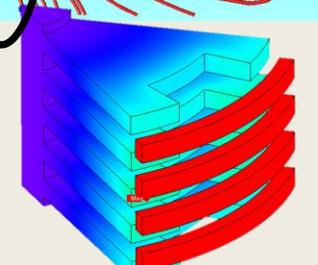
磁束密度大



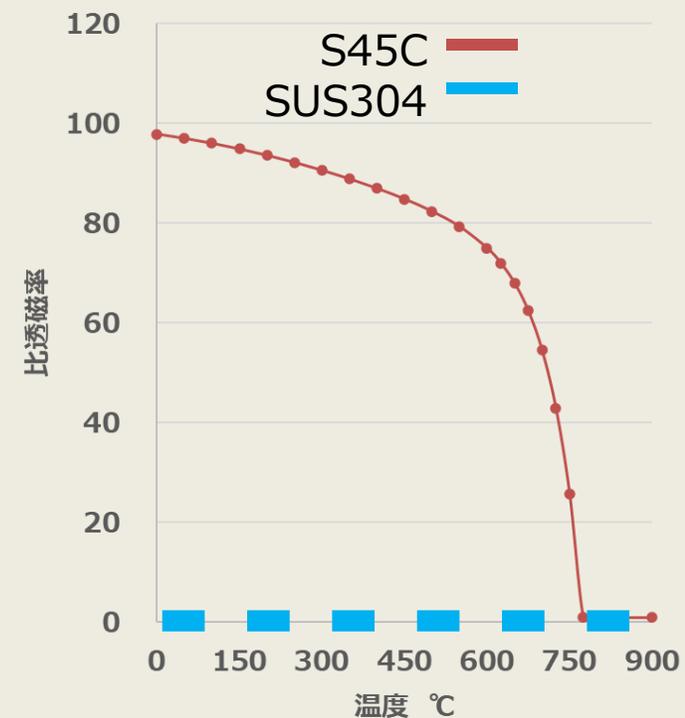
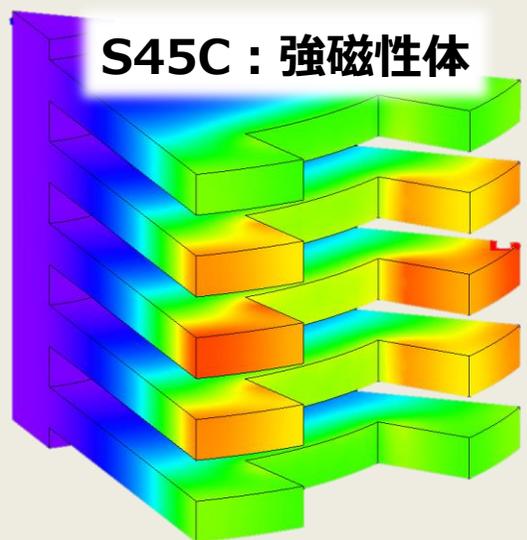
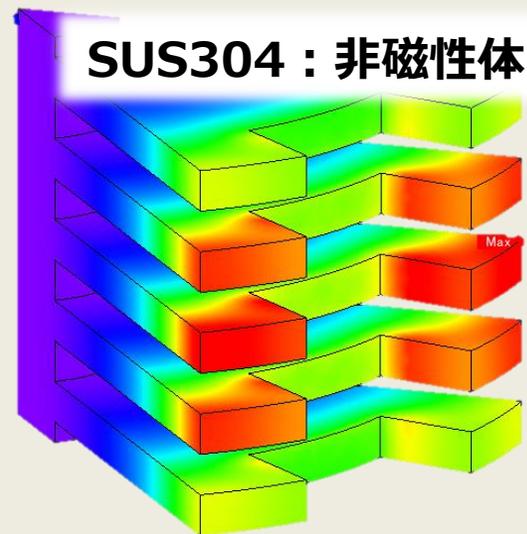
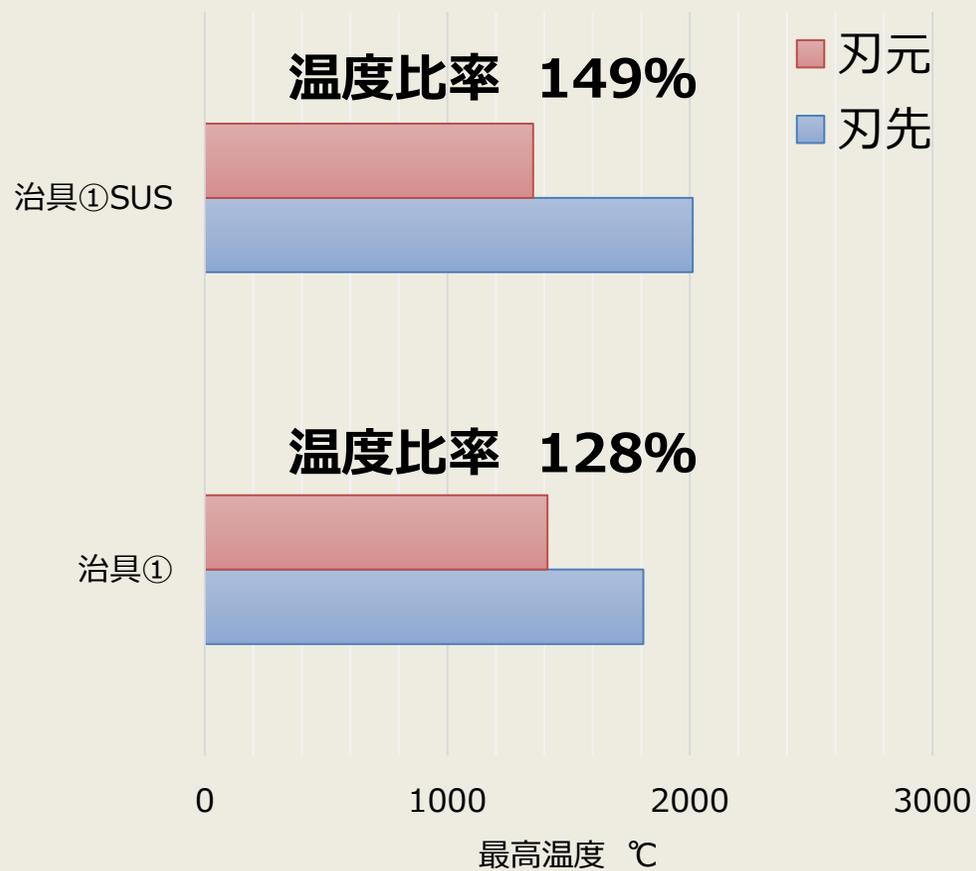
磁束密度大



磁束密度大

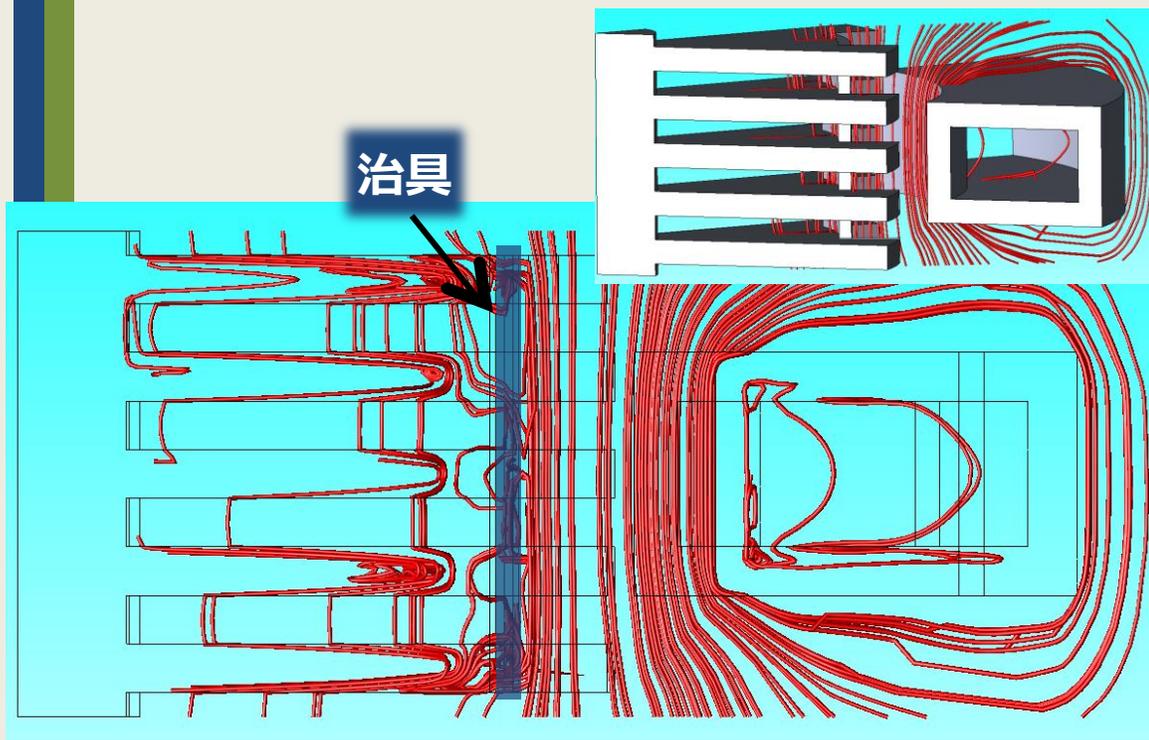


治具材質と温度分布の関係



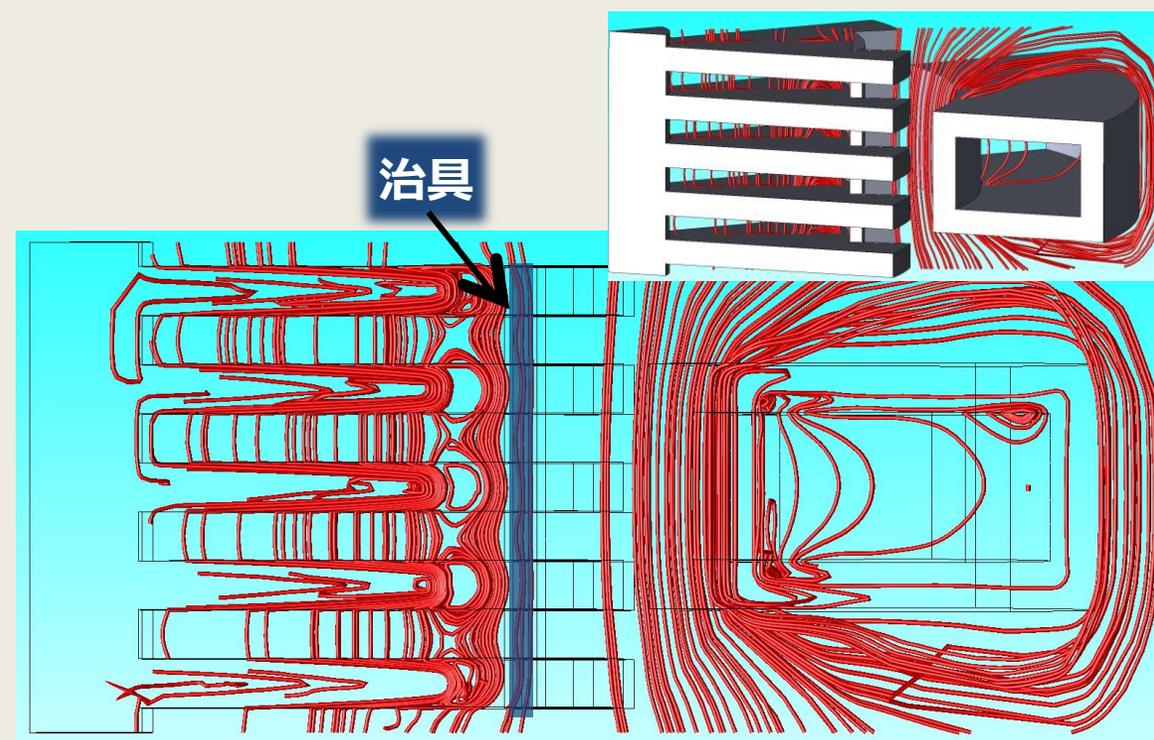
治具材質の違い

S45C:強磁性体



治具の右側は磁束密度が高い

SUS304:非磁性体



治具の右側は磁束密度が低い

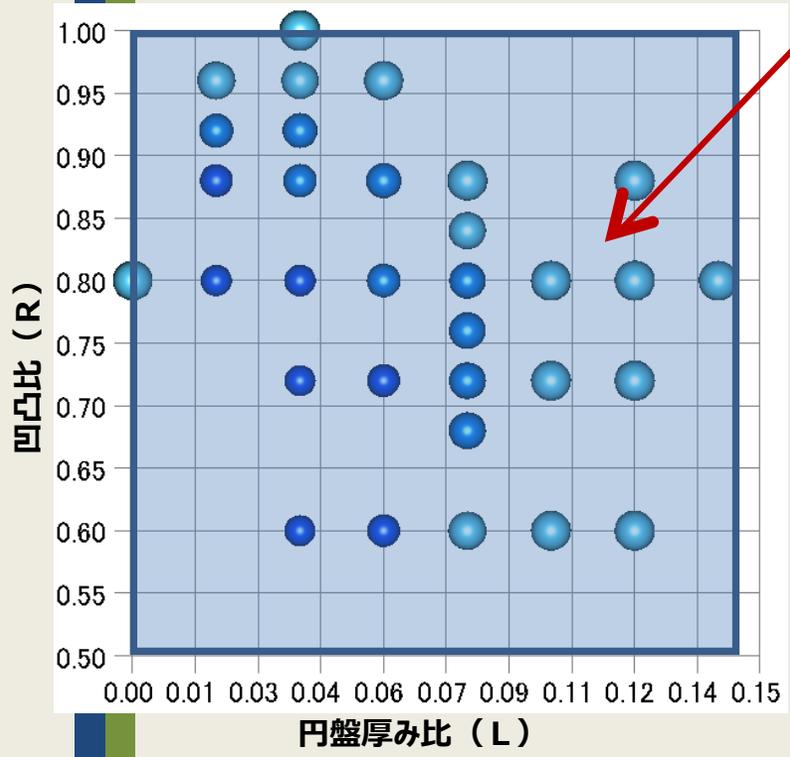
治具の材質で磁束密度を制御可能

温度の絶対値は、高周波誘導加熱時間や電流値で左右されるため、凸部温度と凹部温度の比率表記に変更

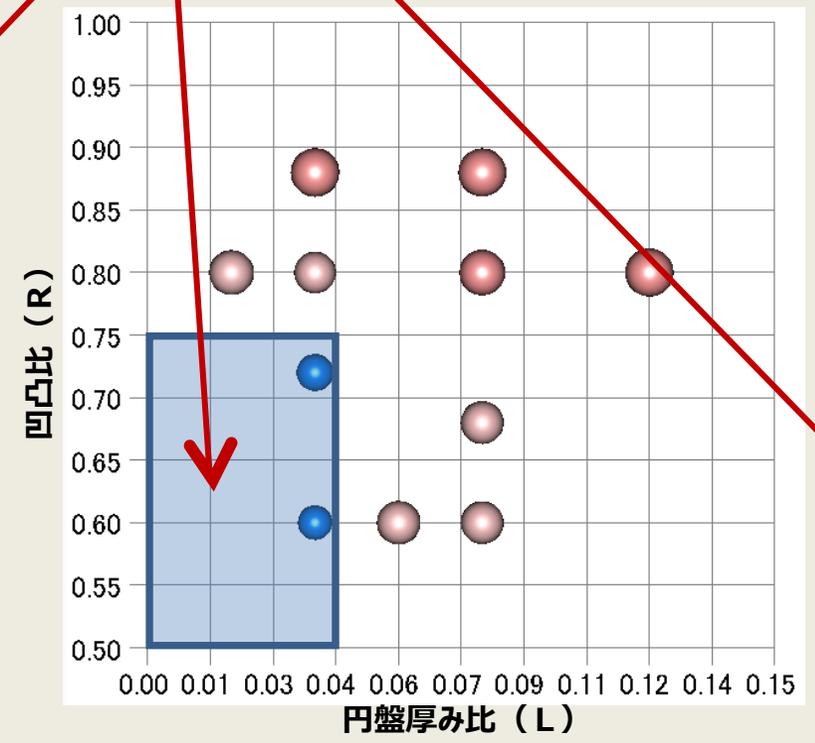
凹部より凸部の方が温度の低い領域

凸部温度 ÷ 凹部温度

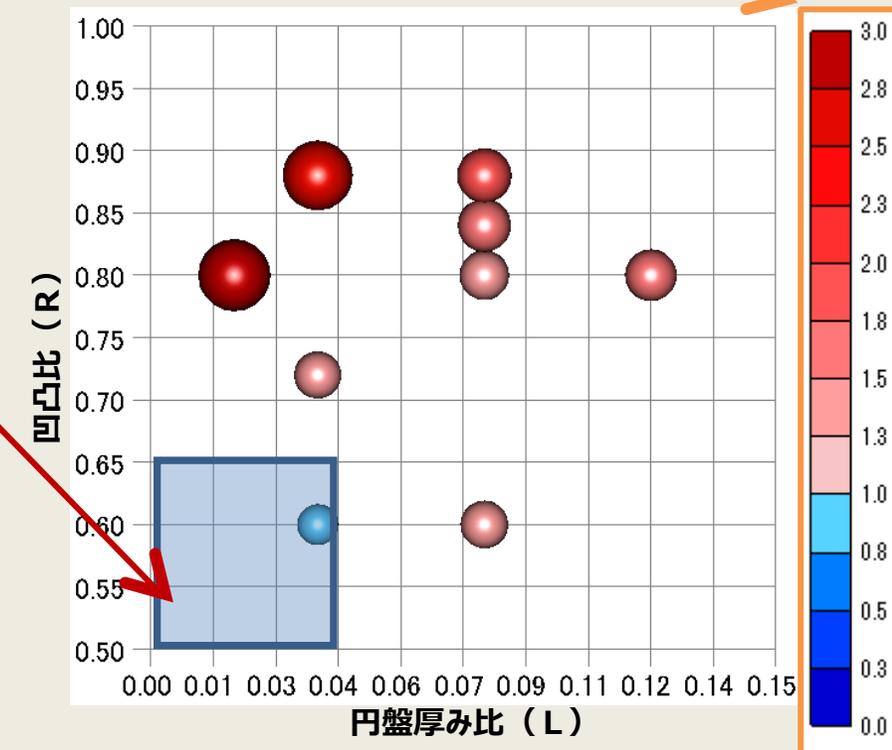
治具なしの場合



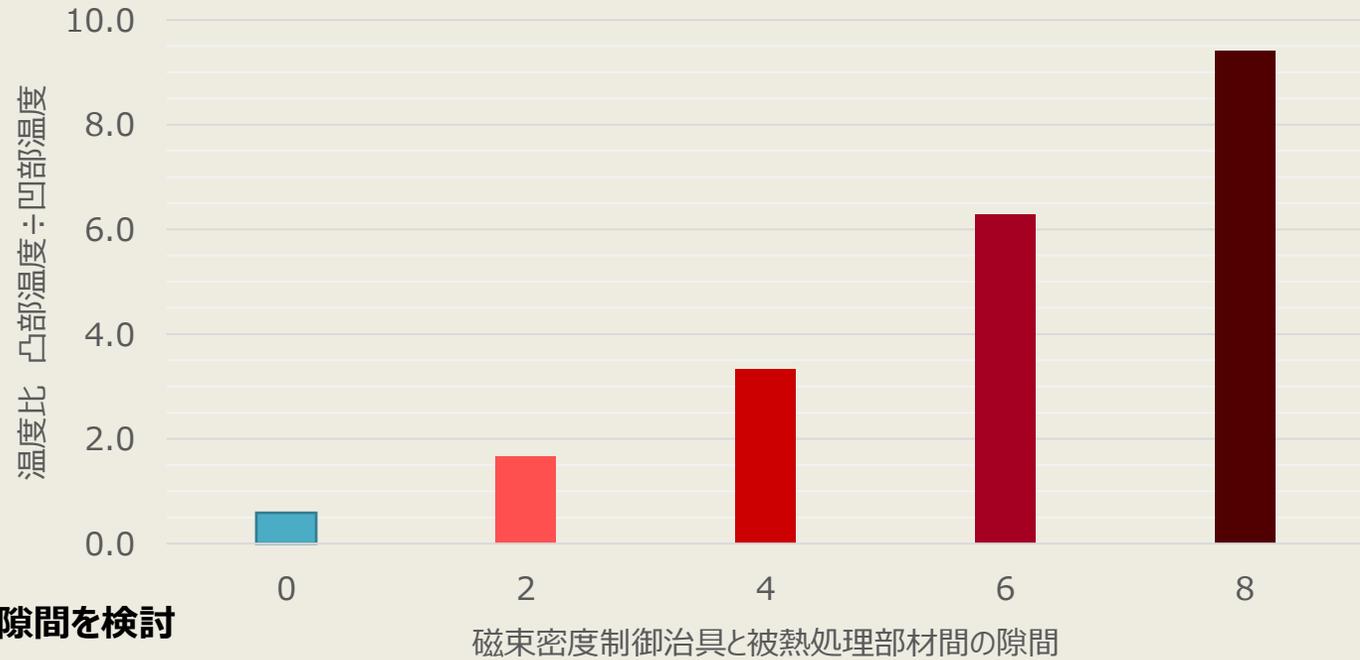
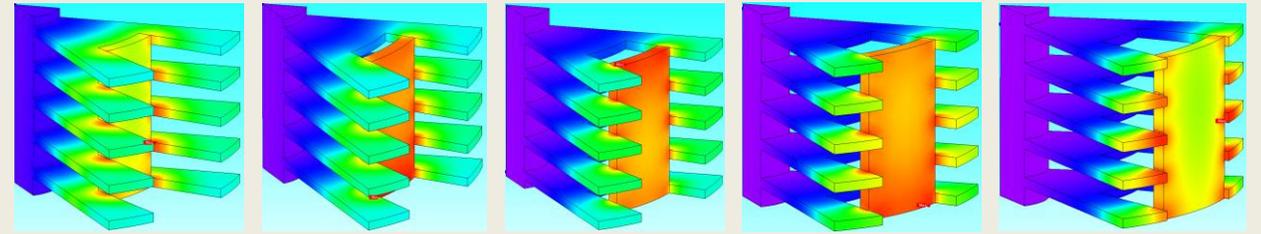
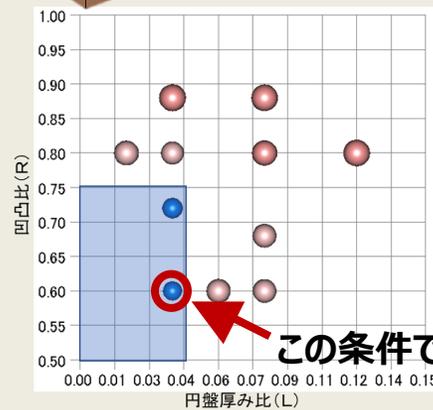
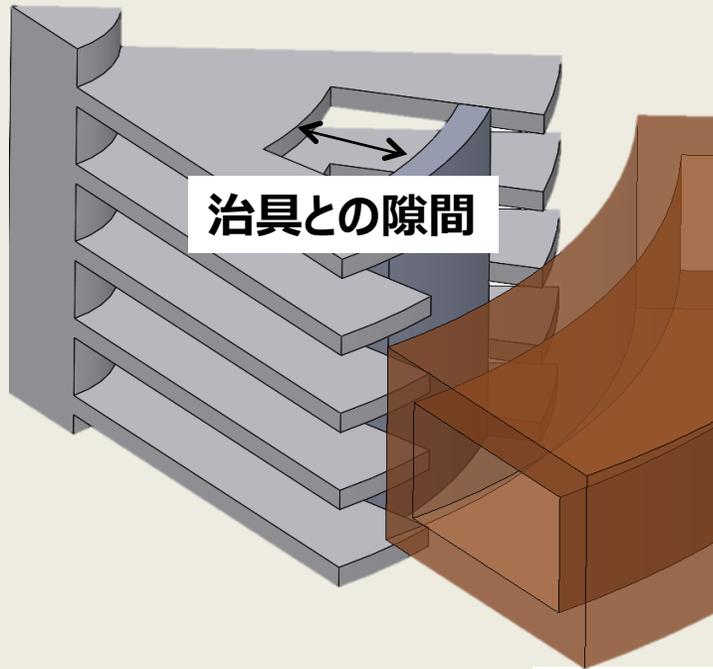
治具 (S45C) ありの場合



治具 (SUS304) ありの場合

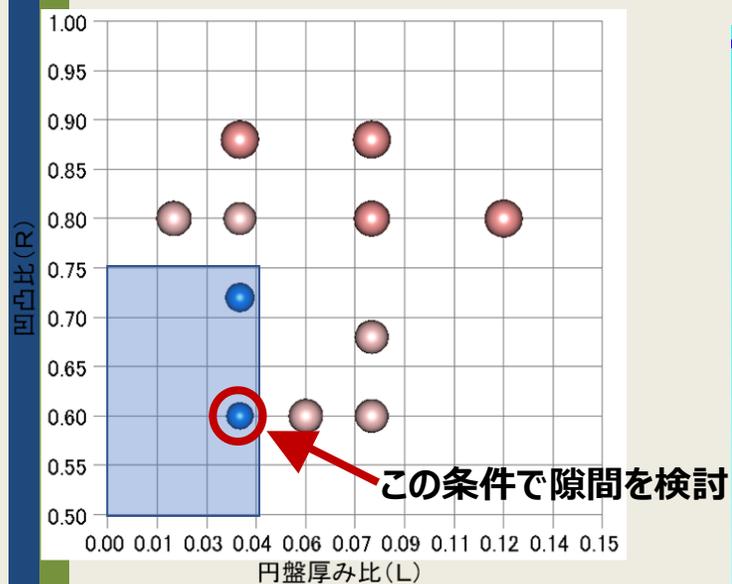


磁束密度制御治具と被熱処理部材間の隙間

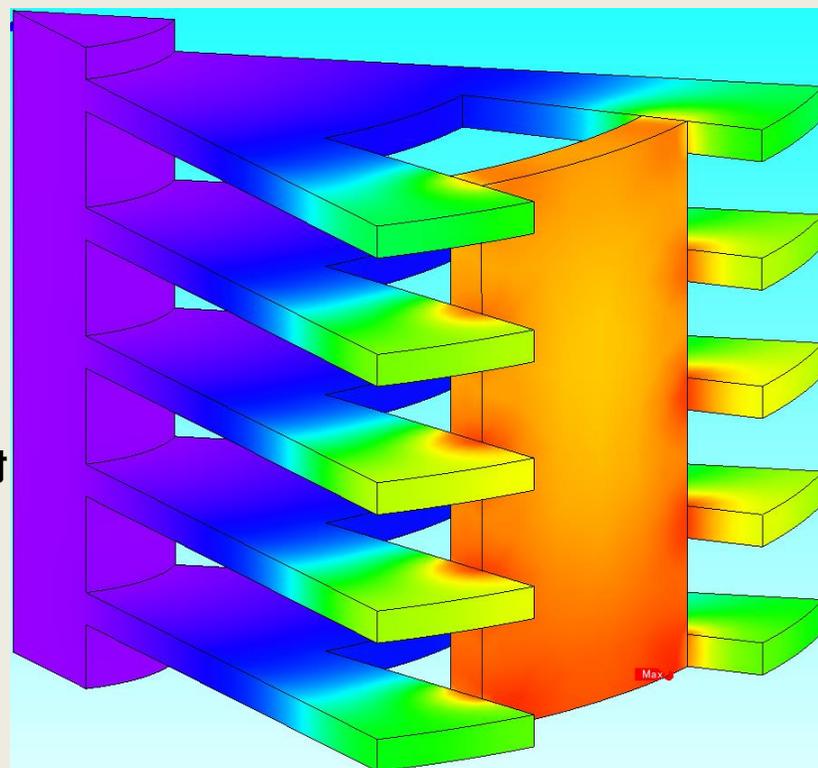


磁束密度制御治具と被熱処理部材の間にスペースを設けることで温度分布を制御可能

磁束密度制御治具と被熱処理部材間の隙間 ※S45CとSUS304の比較

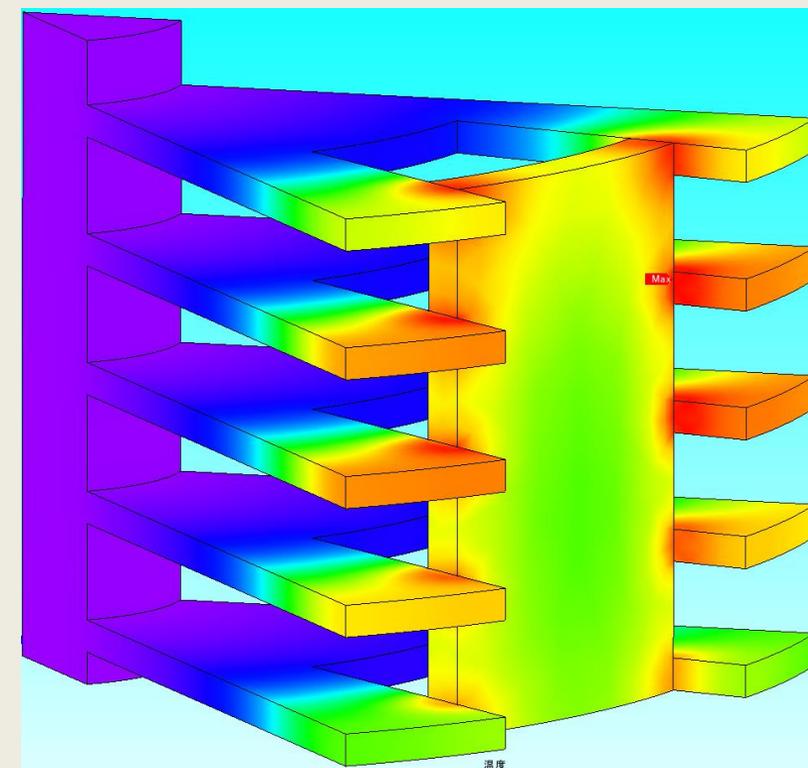


S45C



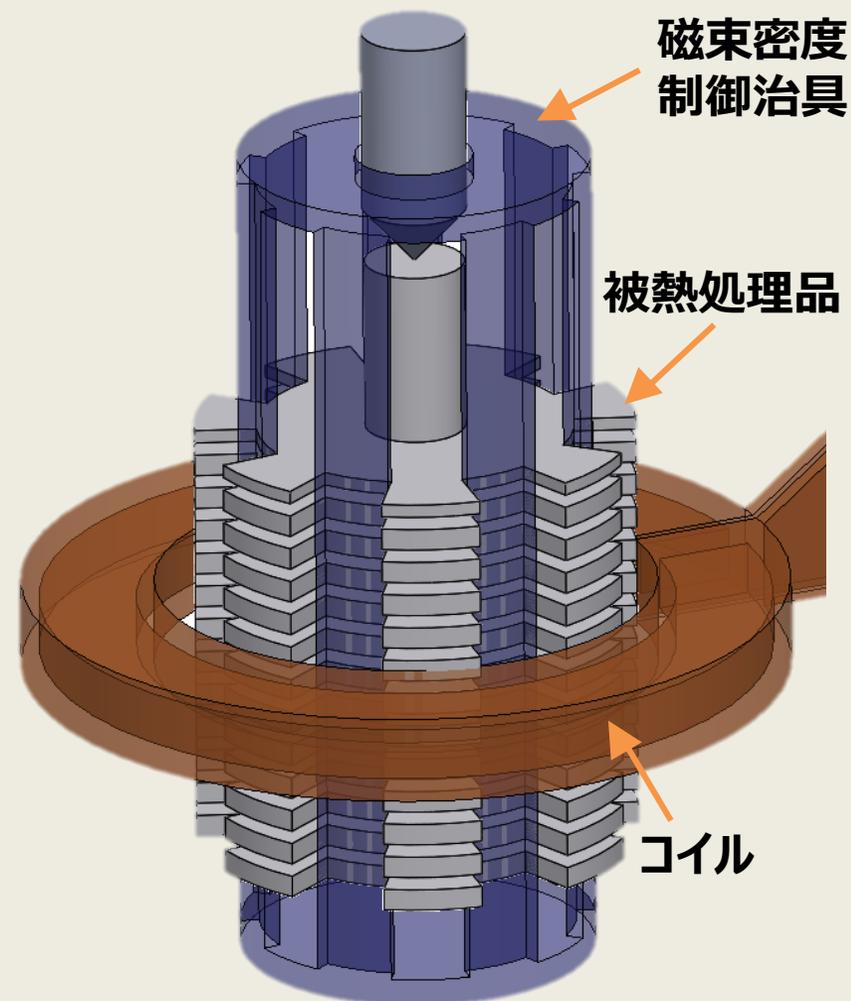
凸部と凹部の温度比 : 6.28

SUS304

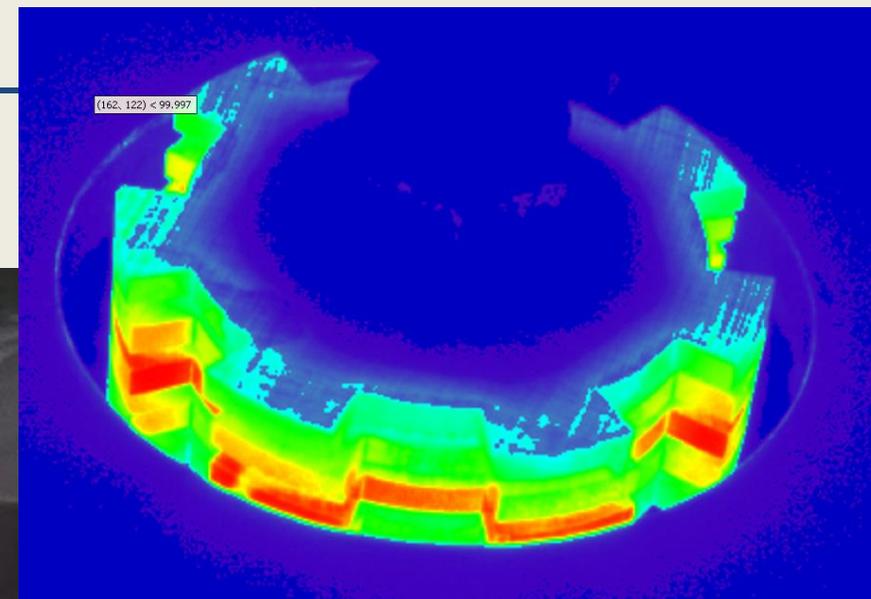
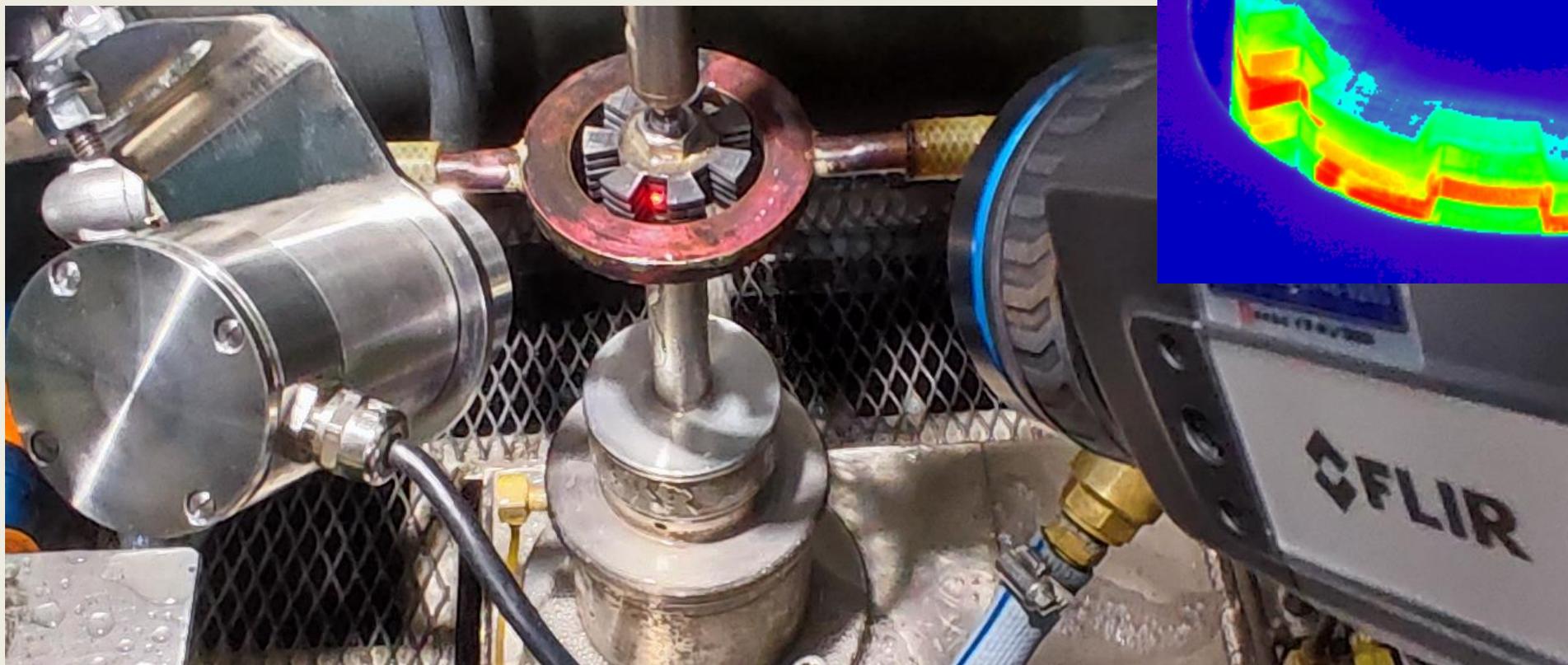


凸部と凹部の温度比 : 8.67

考案した治具形状



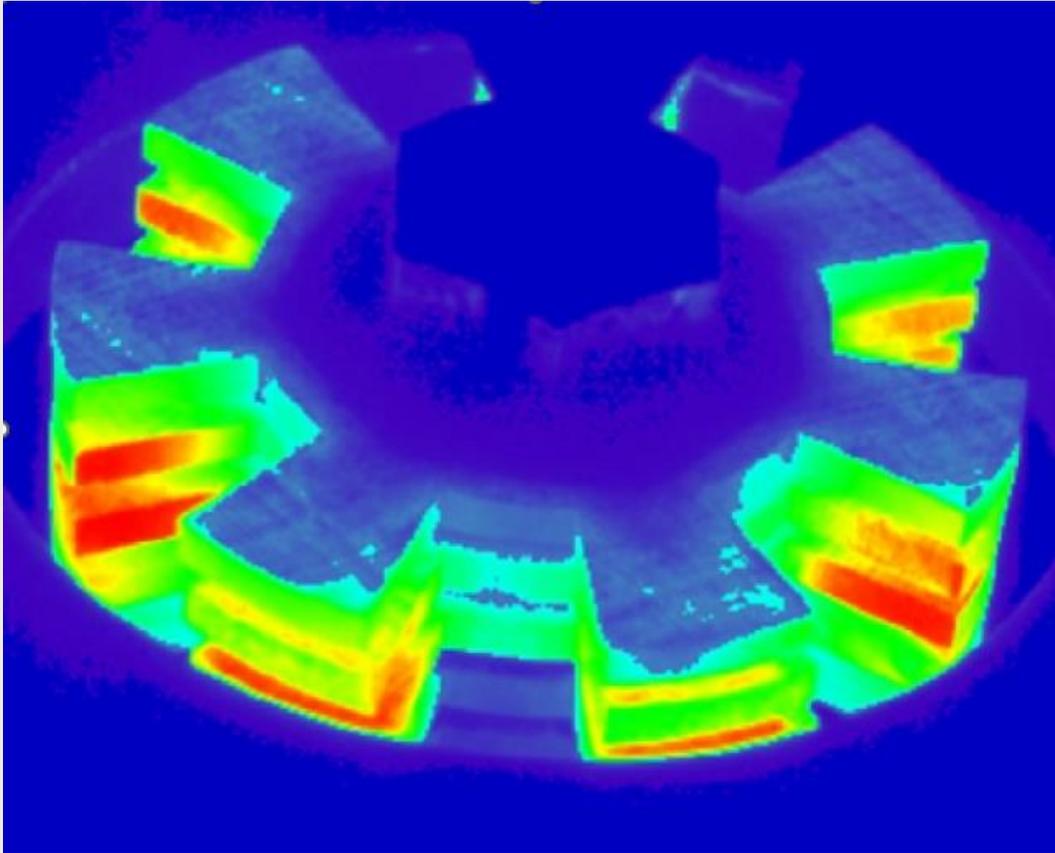
実験の様子



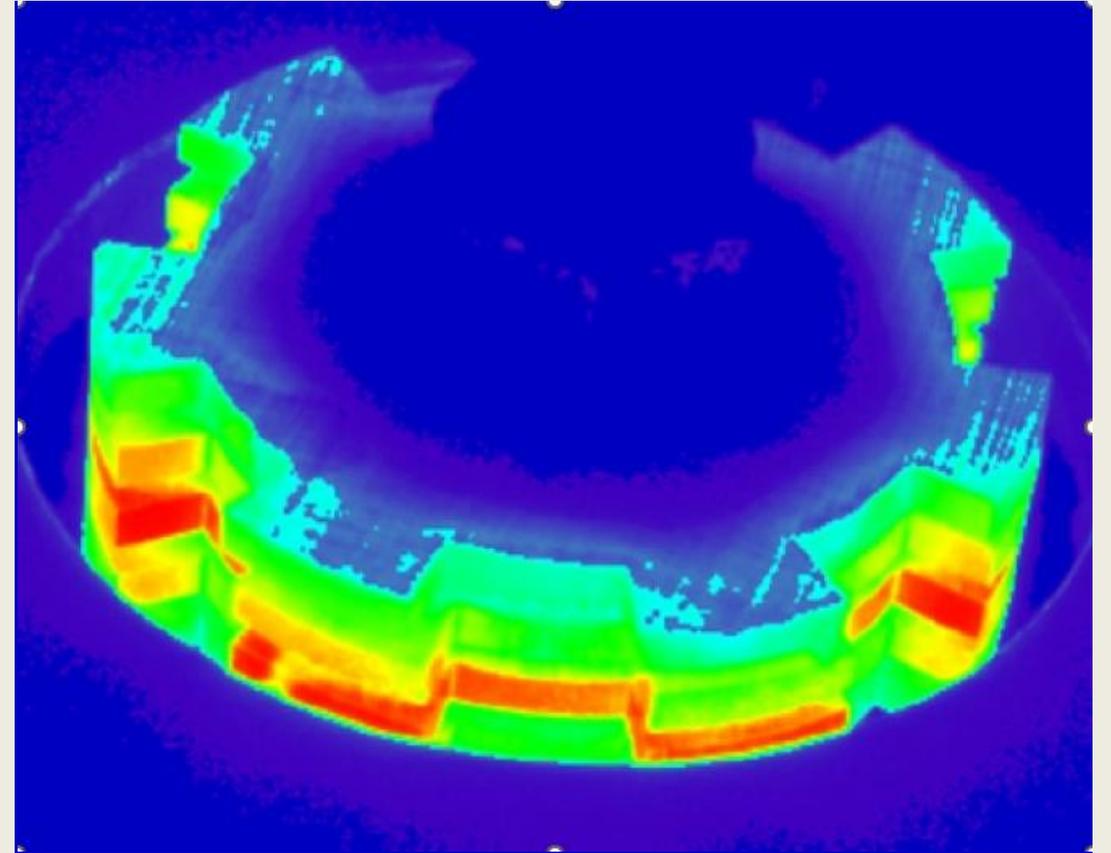
実験の様子



製品形状が温度分布に及ぼす影響



起伏が大きい製品

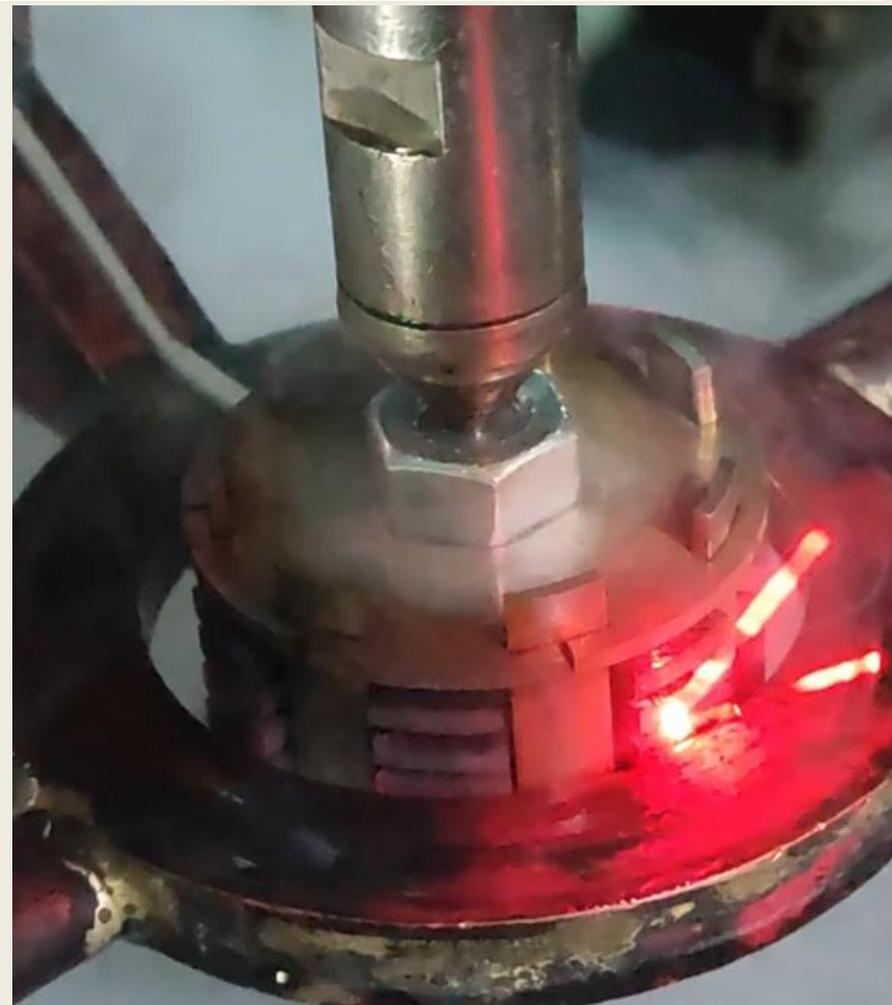


起伏が小さい製品

磁束密度制御治具の熱処理の様子

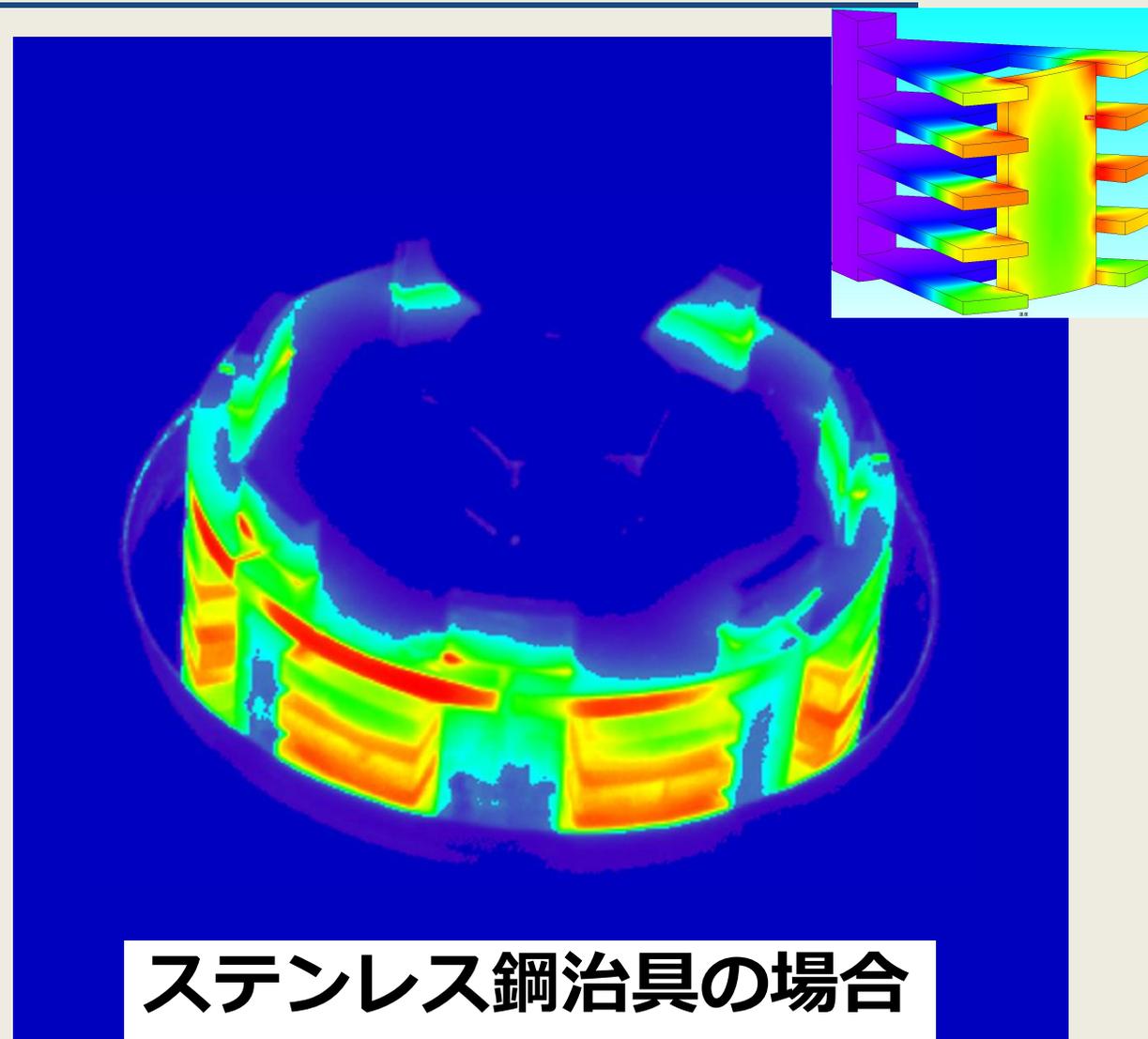
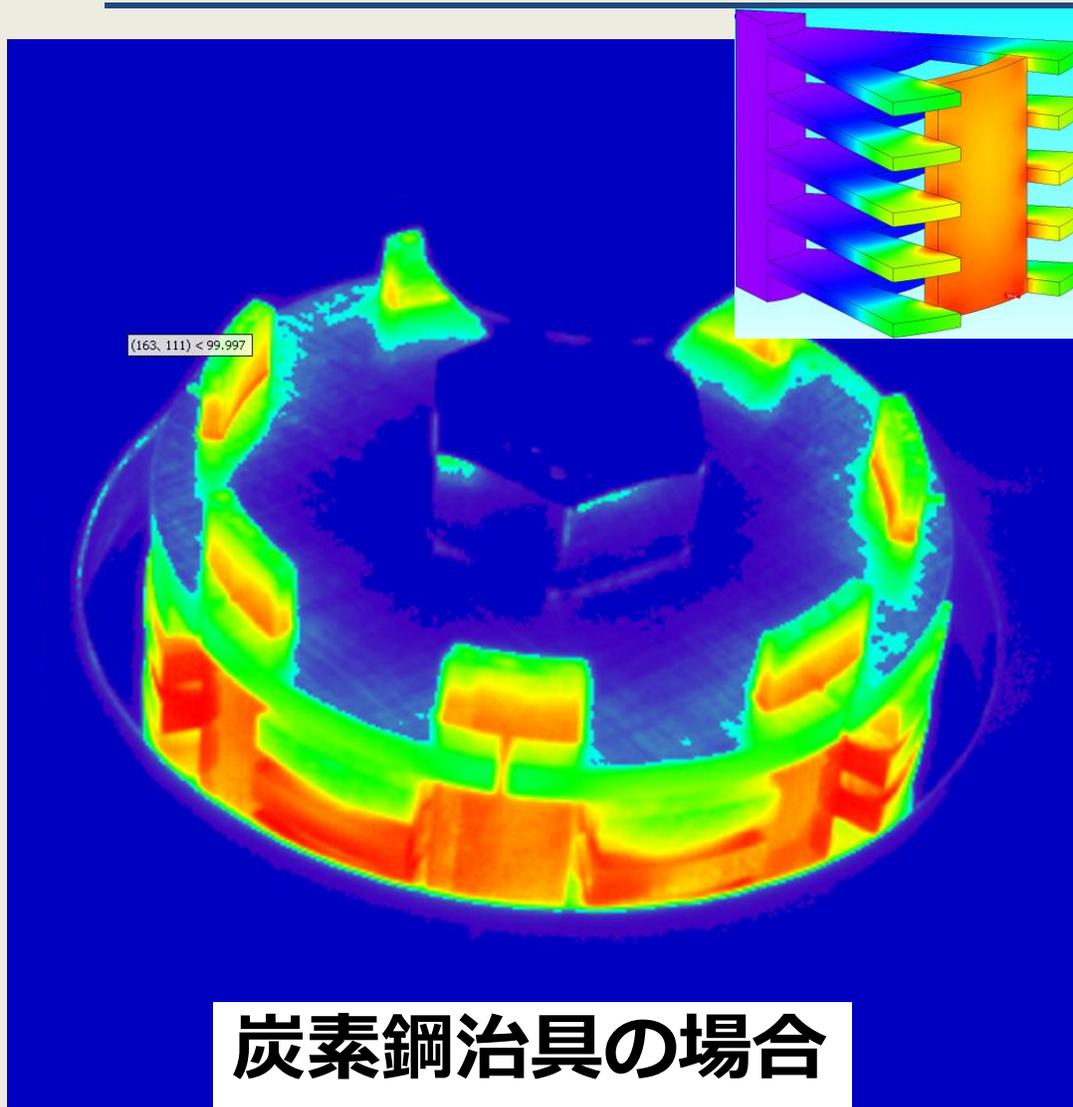


炭素鋼治具の場合



ステンレス鋼治具の場合

磁束密度制御治具が温度分布に及ぼす影響



tnit

本研究は、（公財）JKAの
2022年度公設工業試験研究所等が主体的に取り組む共同研究事業
で実施した内容です。
ここに記して謝意を表します。