

# 金属部品の焼入れにおける 表面熱伝達率の同定について

奈良崎 道治  
(宇都宮大学)

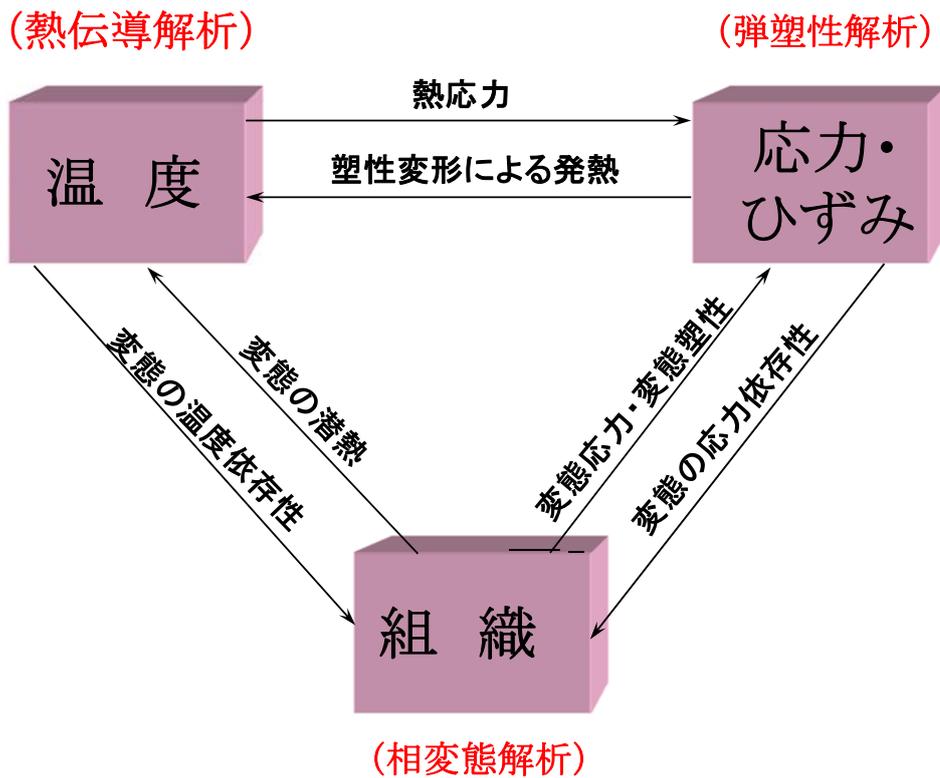


## まえがき

近年の熱処理シミュレーション技術の発達によって、鋼部品の焼入れプロセスの連成解析が可能となり、実験結果との比較検討によって、その解析精度が実用的レベルに近づきつつあることが確認されている。

ここでは特に鋼部品の熱処理プロセスの最適化や熱処理トラブル発生の抑制などを目的として熱処理シミュレーションを実施するために必要な焼入れ時の表面熱伝達率について解説する。

## 熱処理中に生じる現象とそれらの相互関係 変態・熱・力学的連成(井上)



## [熱処理解析に必要なデータ]

### ◆ 熱的境界条件に使用するデータ

特に冷却時の表面熱伝達率

### ◆ 材料の相変態に関連するデータ

TTT, CCTデータ、変態膨張率など

### ◆ 材料の各相の材料特性データ

熱伝導率、比熱、熱膨張率などの温度依存性  
各相の比体積の温度依存性や炭素濃度依存性など

### ◆ 材料の各相の応力ひずみ特性(温度依存性)

各相の応力ひずみ特性データ(代表温度での)  
各相間の変態塑性特性データ(変態塑性係数など)

## ◆ 熱的境界条件に使用するデータ

特に冷却時の表面熱伝達率

### 代表的冷却剤とその熱伝達率

Quench Medium	Heat Transfer Rate ( $W \cdot m^2 K^{-1}$ )
Still Air	50 - 80
Nitrogen (1 bar)	100 - 150
Salt bath or fluidized bed	350 - 500
Nitrogen (10 bar)	400 - 500
Helium (10 bar)	550 - 600
Helium (20 bar)	900 - 1000
Still Oil	1000 - 1500
Hydrogen (20 bar)	1250 - 1350
Circulated oil	1800 - 2200
Hydrogen (40 bar)	2100 - 2300
Circulated water	3000 - 3500

Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, Edited by G.Totten, M. Howes and T. Inoue, ASM International(2002), p.259.

## 冷却性能試験法の代表的規格(試片)

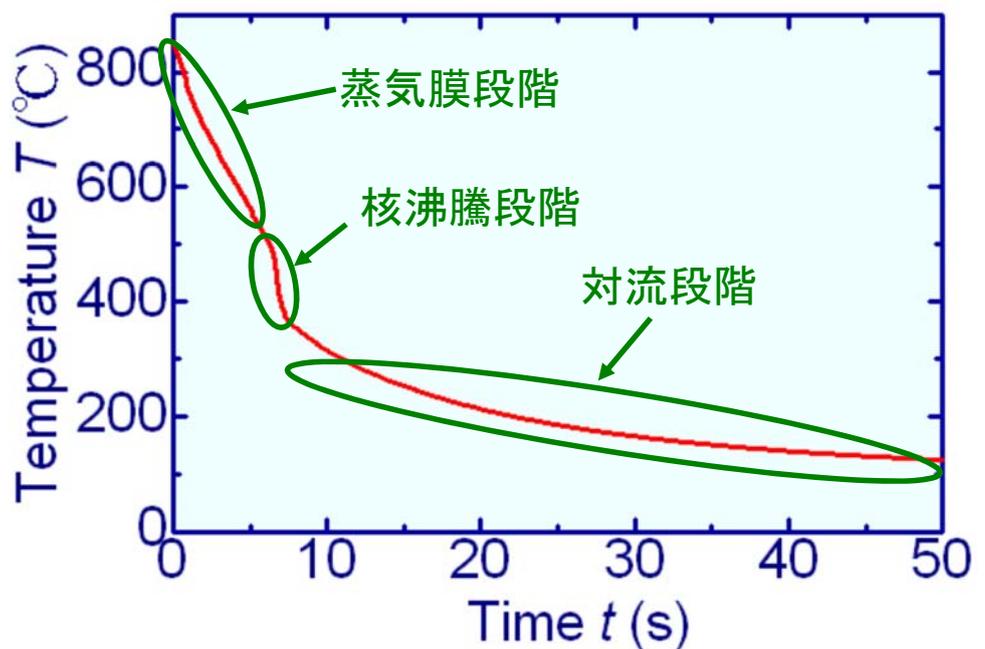
- ◆日本規格 JIS K2242 (直径10mm銀棒) : 1965年～
- ◆フランス規格 (直径16mm銀棒)
- ◆中国規格 (直径10mm銀棒)
- ◆国際規格 ISO 9950 (直径12.5mmニッケル合金棒) : 1995年
- ◆ASTM規格 ASTM D 6200-01  
(直径12.5mmニッケル合金棒) : 2001年
- ◆ASTM規格 D7646-10 (直径10mm銀棒) : 2010年  
アルミニウム合金の焼入れ, 水溶性ポリマー焼入れ液用

## 標準熱伝達率測定用銀円柱試片と 焼入冷却曲線

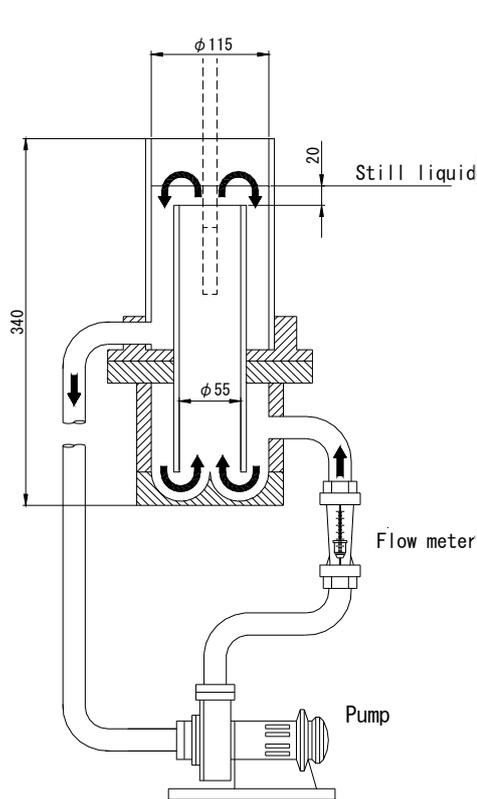


銀円柱

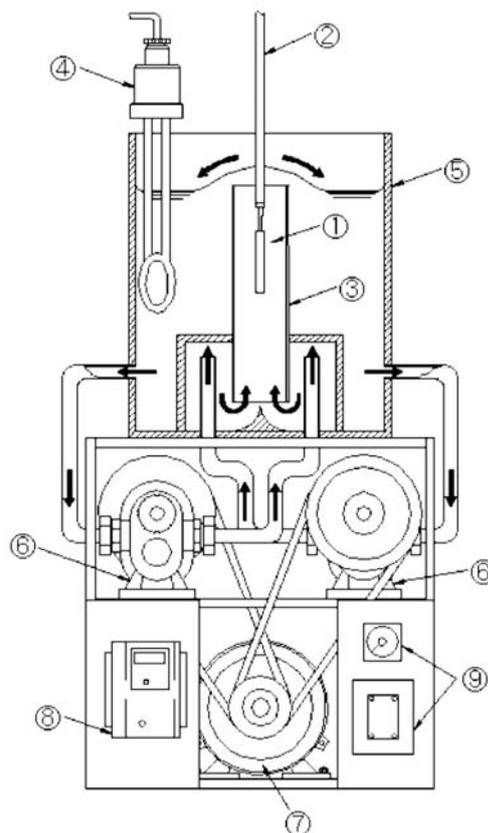
( $\Phi 10 \times 30\text{mm}$  JIS K2242(B法))



## 攪拌装置の例



a) for aqueous solution

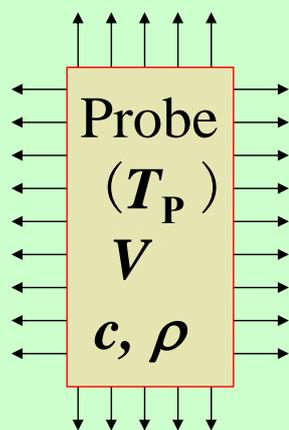


b) for oil

## 集中熱容量法

$$Q = hA(T_P - T_1) = -c\rho V dT_P / dt$$

$$\therefore q = h(T_P - T_1) = -(c\rho V/A)(dT_P/dt)$$

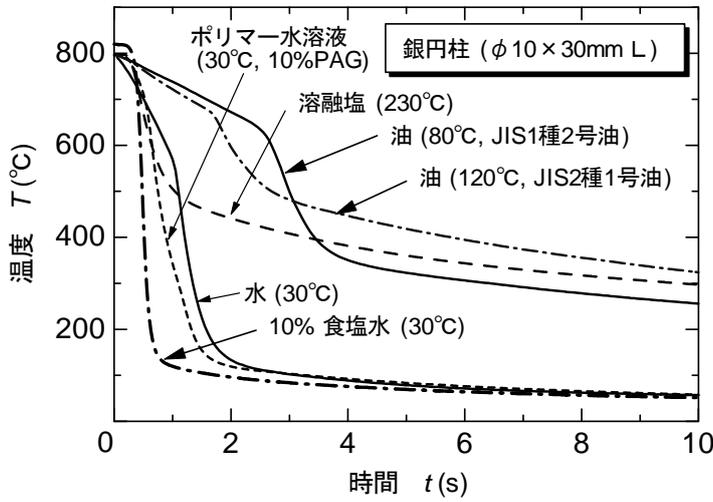


$Q$  : Heat loss

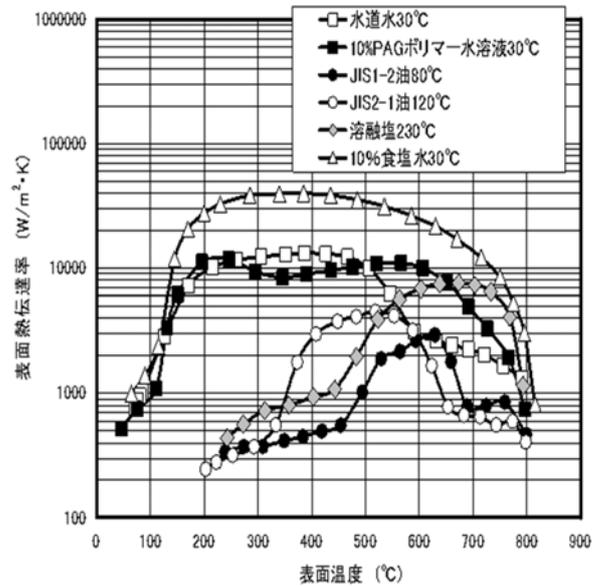
[Quenchant ( $T_1$ )]

$A$  : Surface area

# JIS銀棒の冷却曲線と熱伝達率の代表例



a) JIS銀棒冷却曲線



b) 熱伝達率

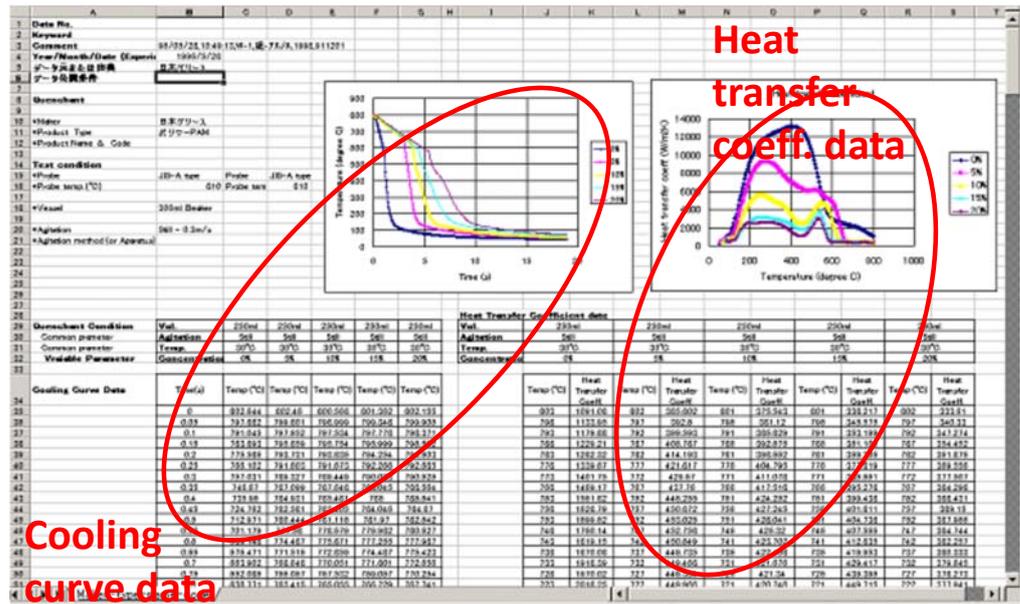
奈良崎道治; 材料, 第55巻第6号(2006), pp589-594.

## 焼入冷却剤の冷却能データベース (日本熱処理技術協会・研究部会)



A method (surface)      B method (center)

Silver Probes



Cooling curve data

Heat transfer coeff. data

Example of Data Sheet

## 実部品の焼入れ時の熱伝達率

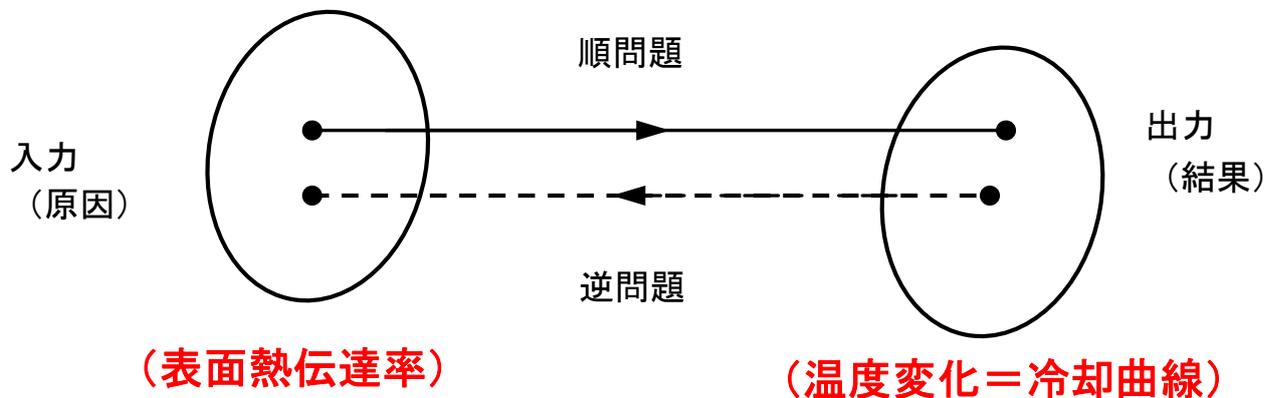
- ◆高温金属を焼入れした時の熱伝達率は、焼入れされる金属部品の形状、寸法、材質、表面条件によって影響を受ける。
- ◆実部品の焼入れ時の熱伝達率は、銀棒プローブの熱伝達率をベースに修正することが必要である。
- ◆沸騰性液体（油、水、水溶性）では蒸気膜の崩壊挙動が熱伝達率を大きく支配する。
- ◆蒸気膜の崩壊は鋭いエッジ形状や表面性状、表面の向きなどによって影響される。
- ◆不均一な蒸気膜崩壊は部品表面の冷却ムラを引き起こす。

## 実部品の焼入れ時の熱伝達率同定法

- ◆実部品の冷却曲線を実測し、冷却曲線（and/or 冷却速度曲線）のシミュレーション結果と実測値を比較検討してそれらがほぼ一致するまで表面熱伝達率の修正を繰り返す。
- ◆実部品の内部硬さ分布を実測し、硬さ分布のシミュレーション結果と実測値を比較検討してそれらがほぼ一致するように表面熱伝達率を修正する。（この方法が適用可能な場合はかなり制限される。）

（熱伝達率の修正は、試行錯誤法、最適化法、逆解析法などにより行う。）

# 逆解析による熱伝達率同定



## 順問題と逆問題

# 逆解析の問題点

- ◆解析手法によって解が異なる。
- ◆解の収束条件の設定により解が異なる。
- ◆初期値の与え方によって解が異なる。
- ◆実測データに含まれるノイズや誤差によって解やその安定性が大きく異なる。
- ◆解が一通りではない (解の不適切性)。

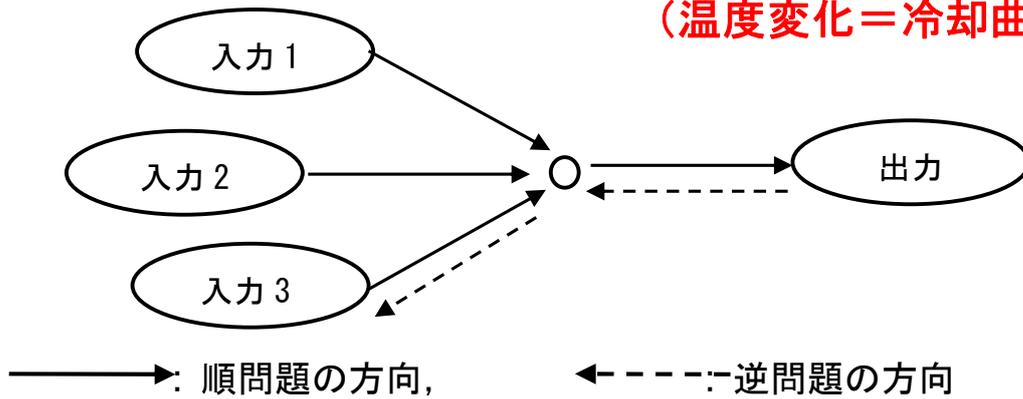
# 逆解析における不適切性

不適切性 (ill-posedness) をもつことは、以下の(1), (2), (3)の要件のうち、少なくとも一つが失われていることを意味している。

- (1) 答えが存在していること(解の存在性: existence),
- (2) 答えが一通りに決まること(解の一意性: uniqueness),
- (3) 逆解析で用いる情報にわずかな変化があっても答えが大きく変わらないこと(解の安定性: stability)

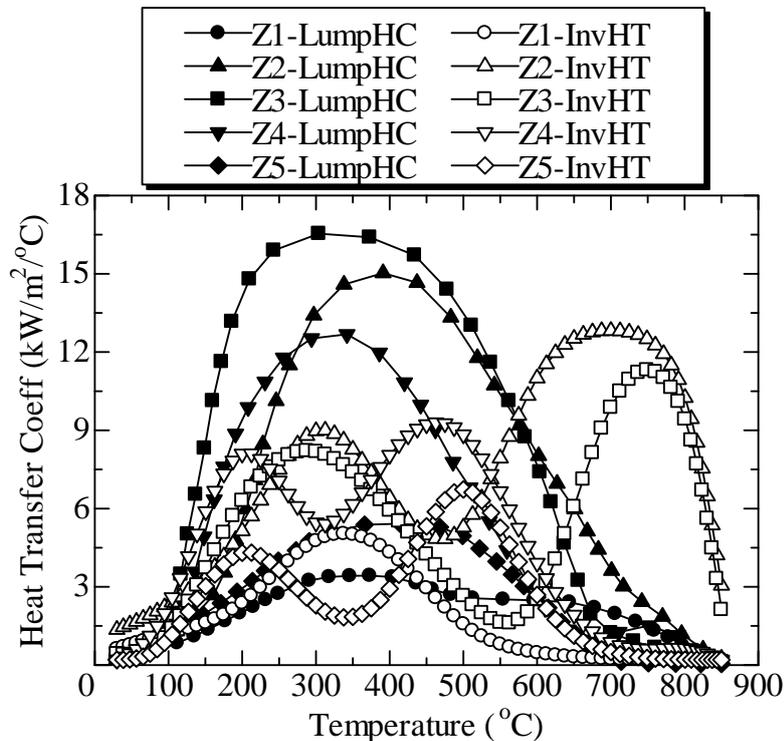
(表面熱伝達率)

(温度変化=冷却曲線)



順問題と逆問題における複数個の入力と出力

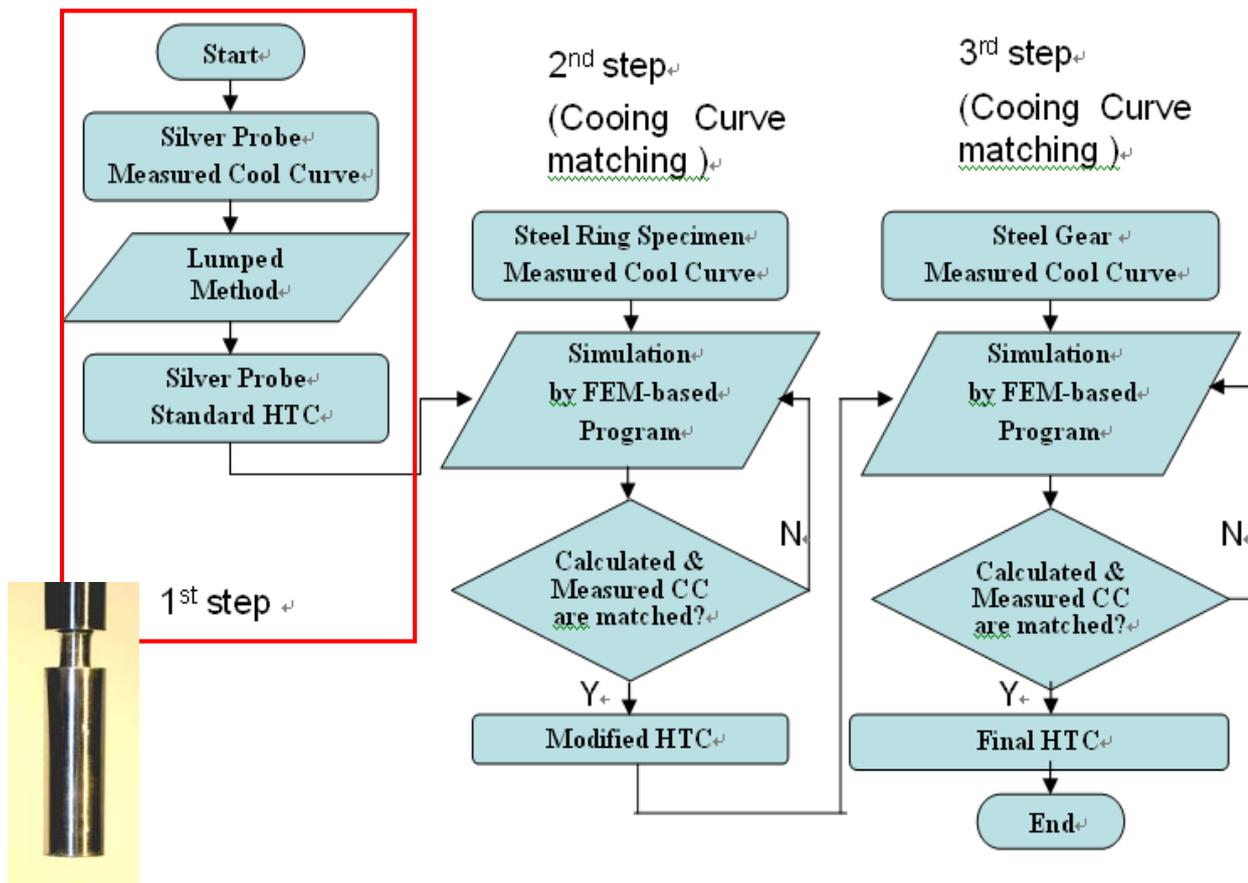
(配布資料中に無し)



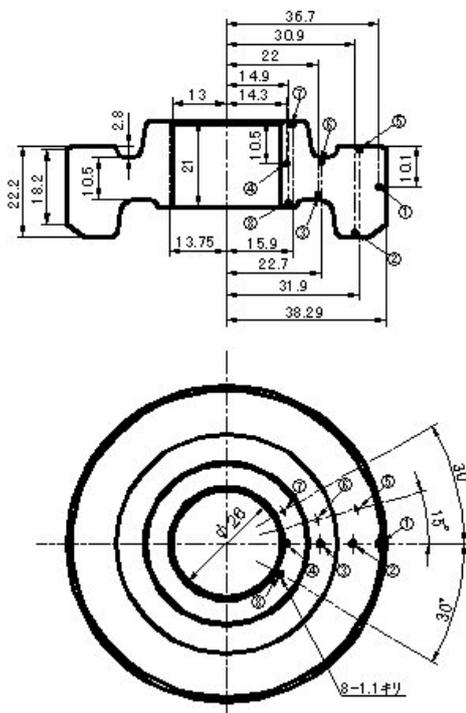
## 逆解析における不安定解の例

LumpHC: 集中熱容量法による解  
 InvHT: 逆解析法による解

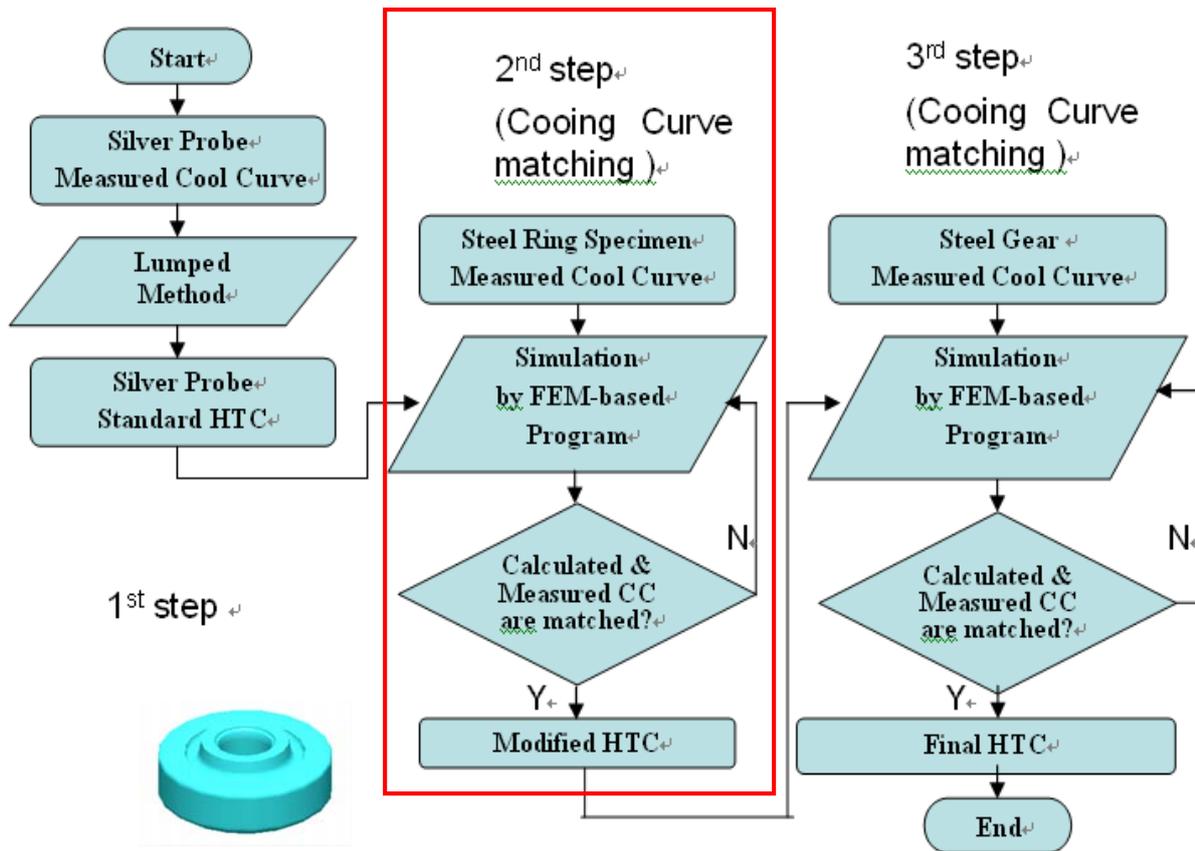
## 第1ステップ(銀棒+集中熱容量法)



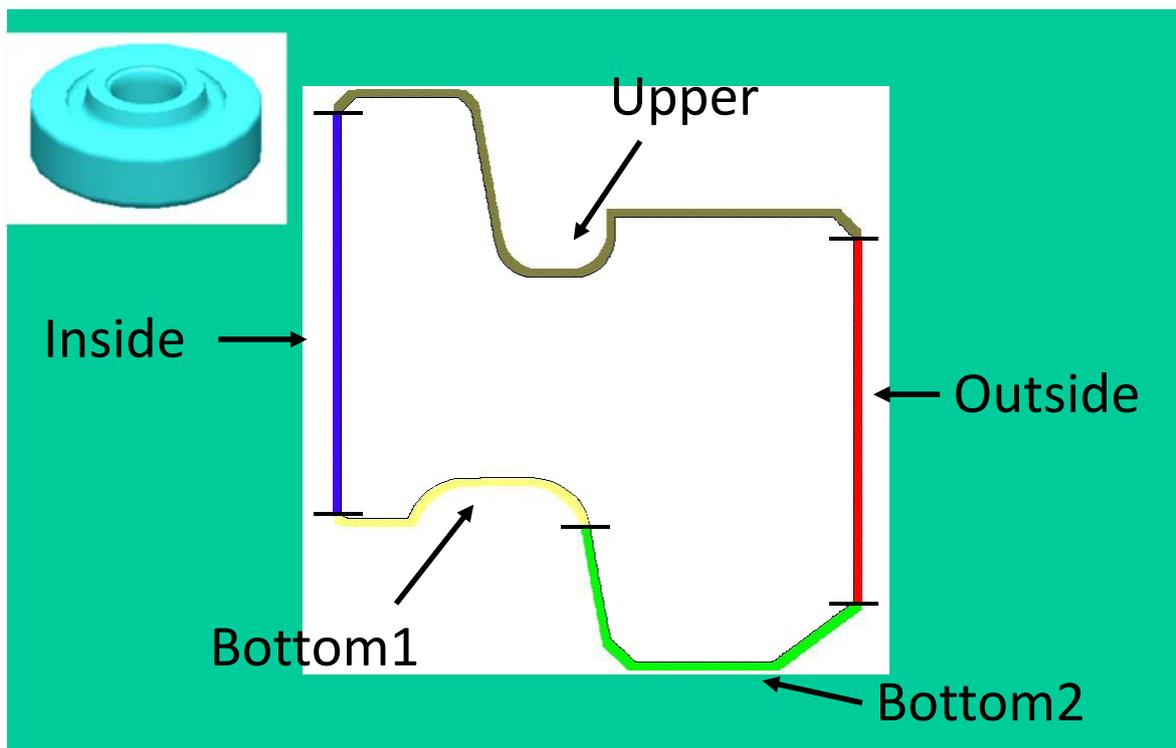
## SCr420 歯切り前リングと測温位置



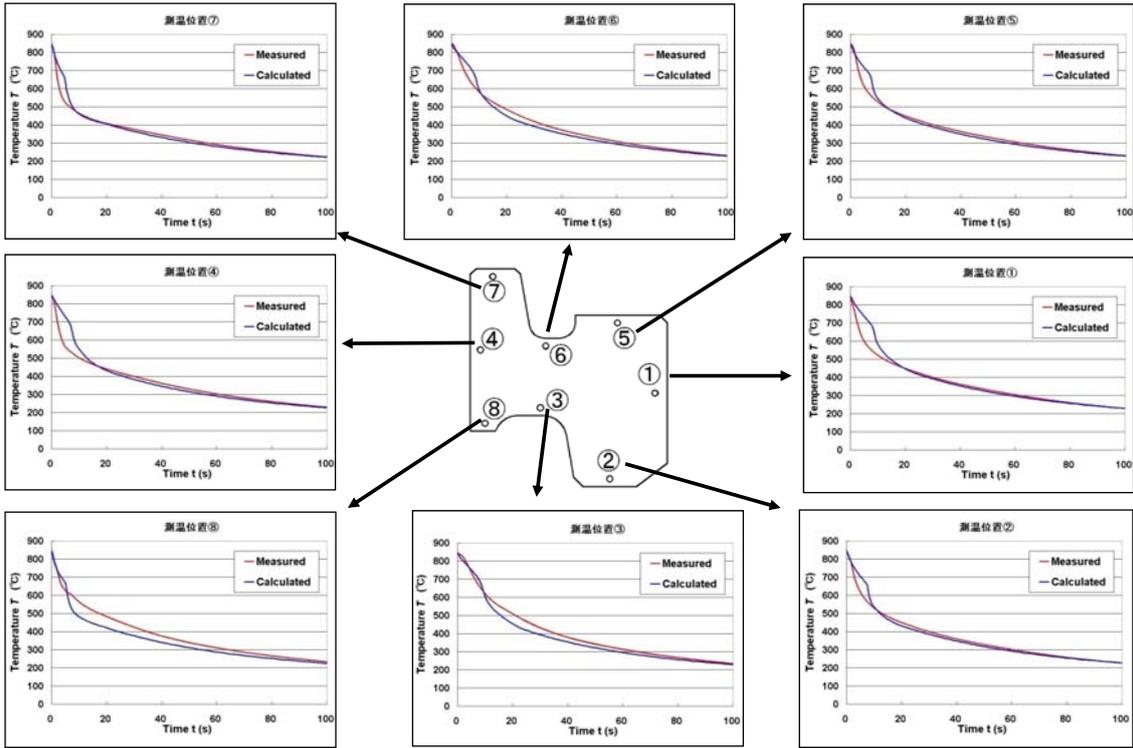
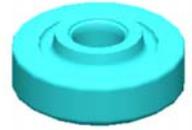
## 第2ステップ(歯切り前リング)



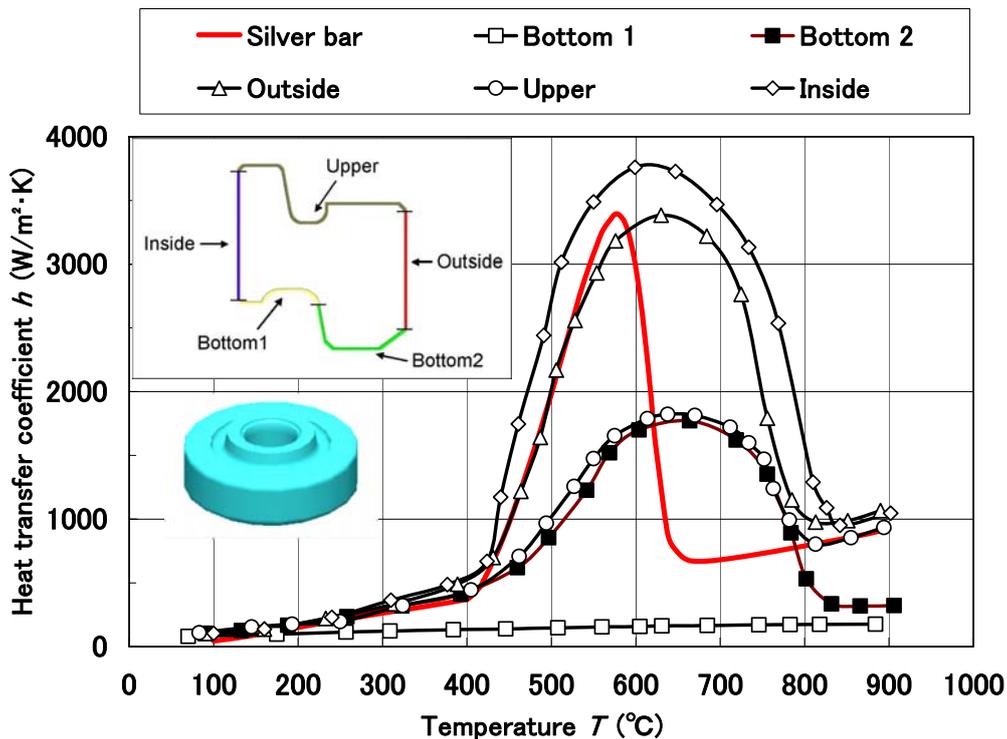
## 熱伝達率設定ゾーン(5 領域分割)



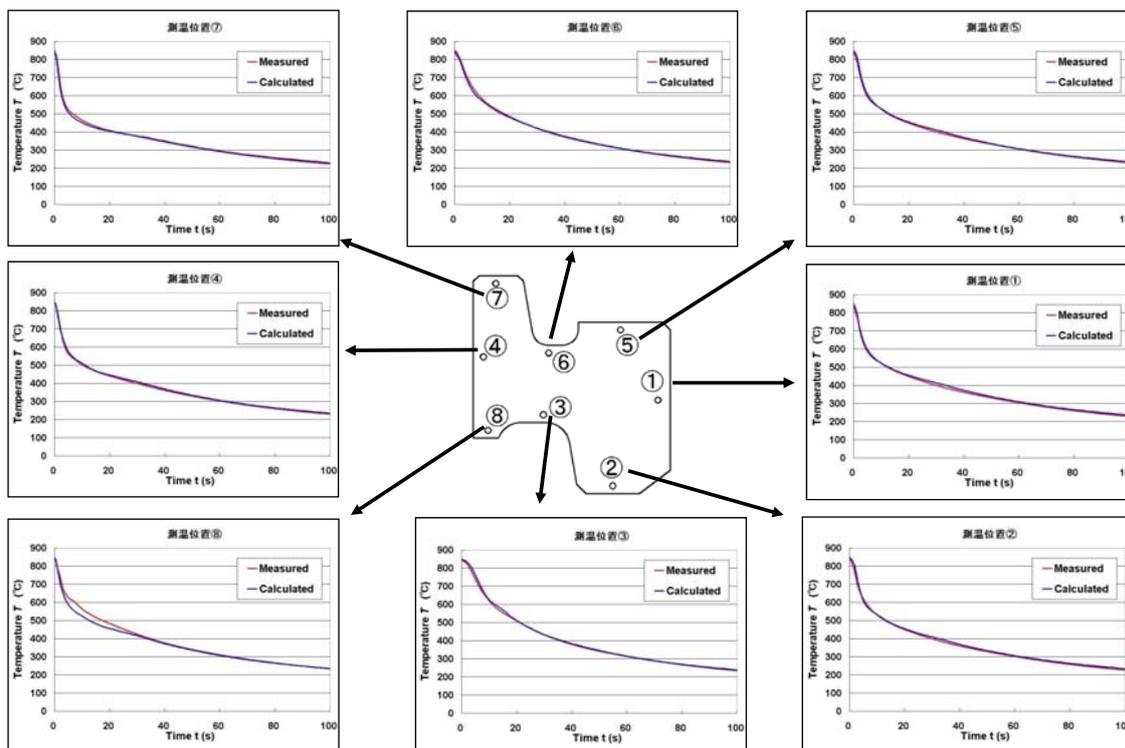
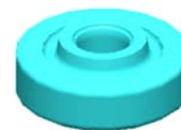
# 冷却曲線の実測値と解析値 (一様熱伝達率 = 銀棒の熱伝達率)



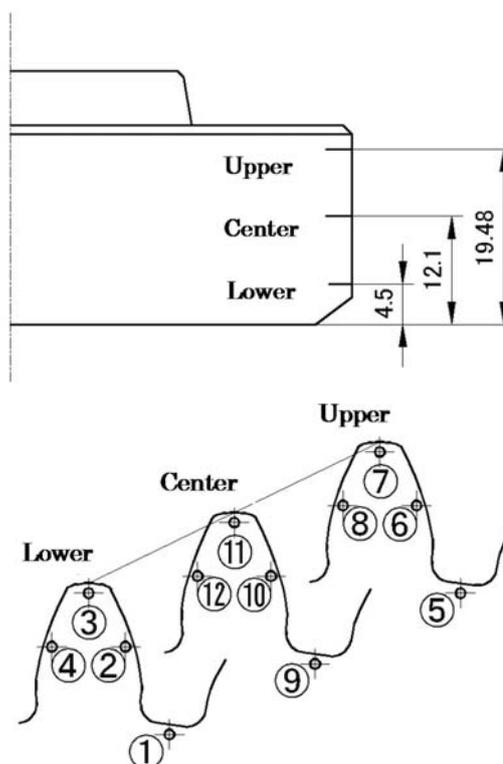
## Estimated HTC (5 HTC surfaces case)



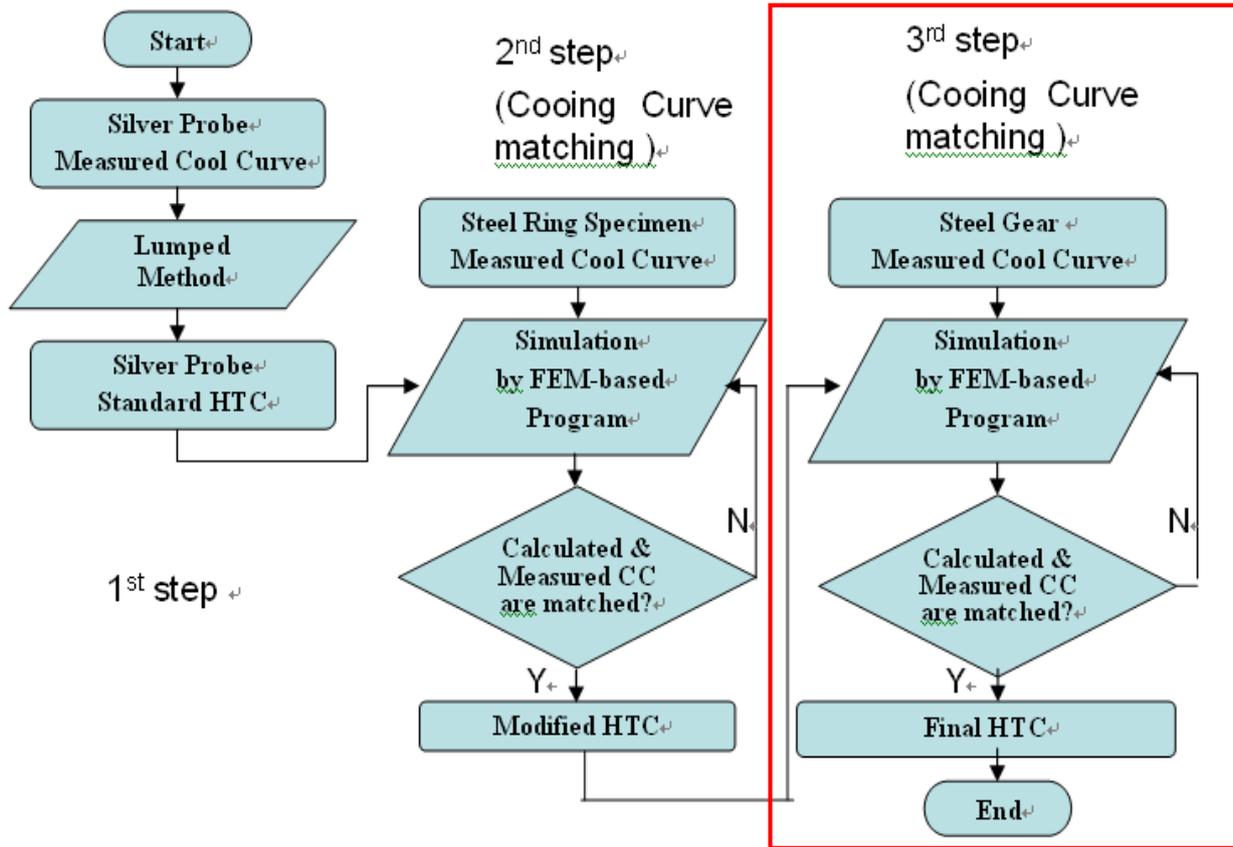
# 冷却曲線の実測値と解析値 (5領域に異なる熱伝達率を与えた場合)



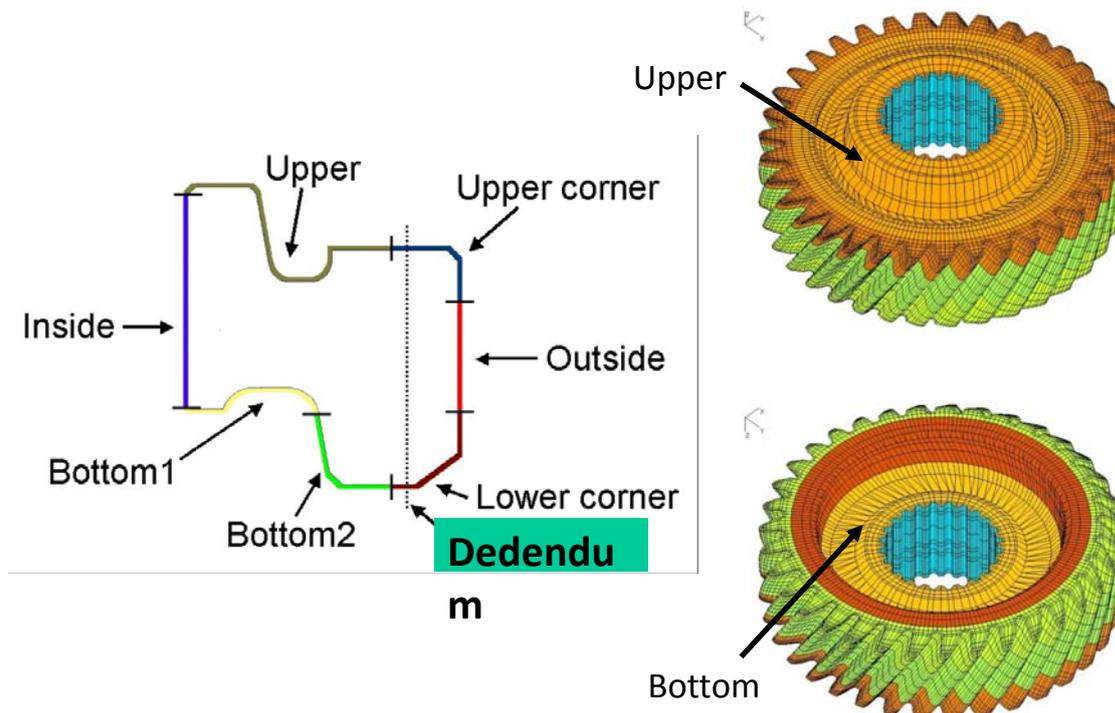
## 測温位置 ( SCr420H ヘリカルギヤ )



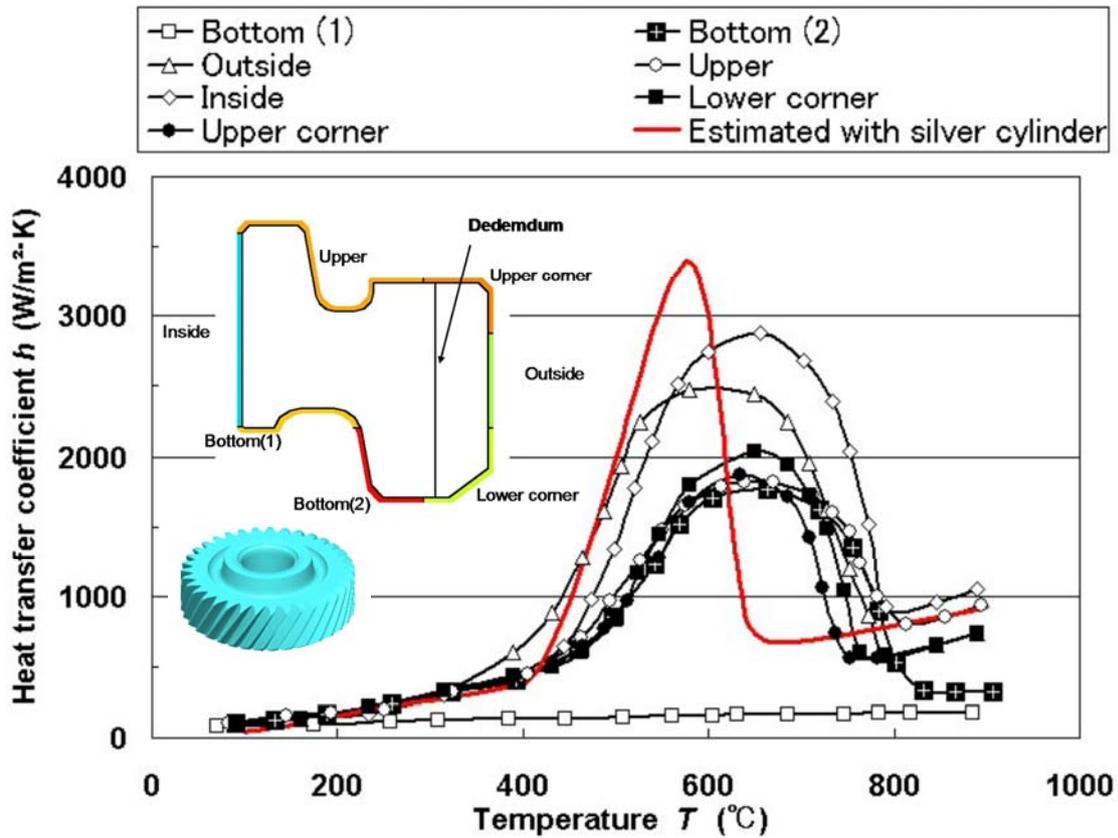
# 最終ステップ(歯車)



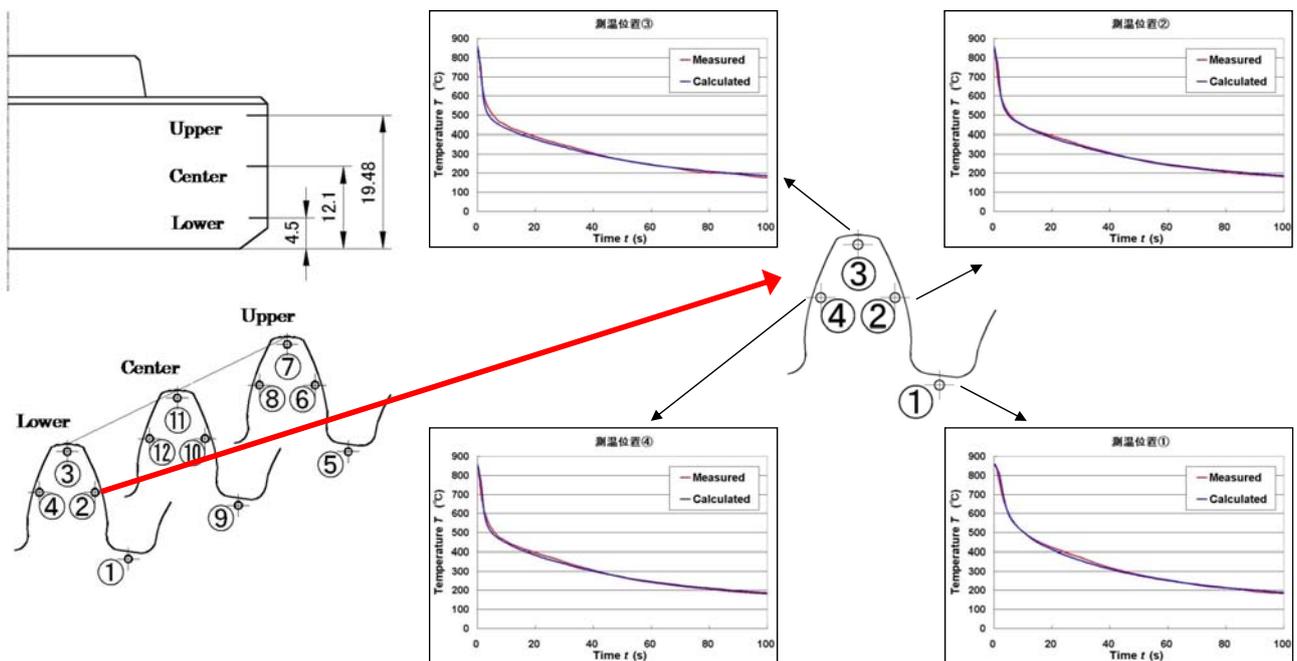
## 熱伝達率の設定 (7領域に分割)



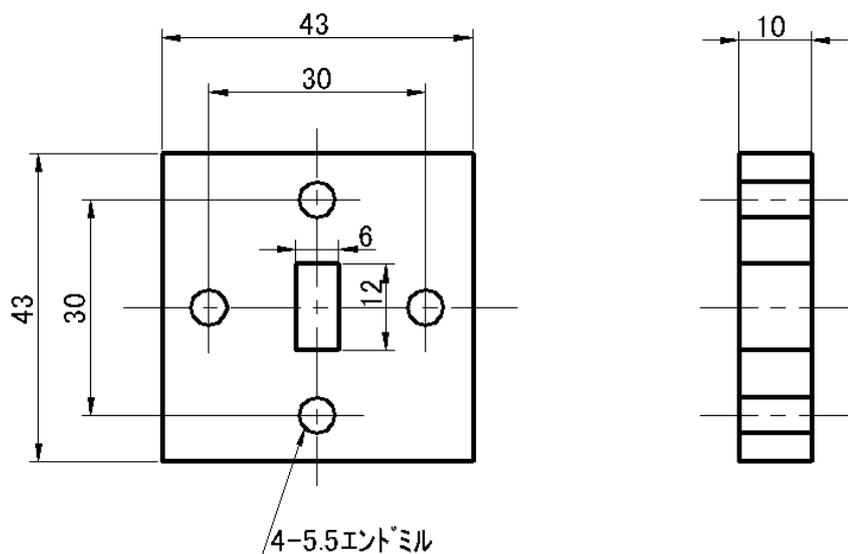
# 最終的な熱伝達率 (SCr420Hへリカルギヤ)



## 冷却曲線の実測値と解析値 (測温位置①②③④)



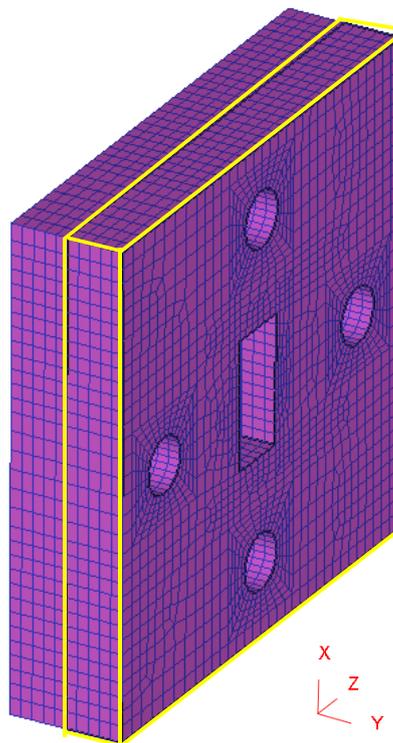
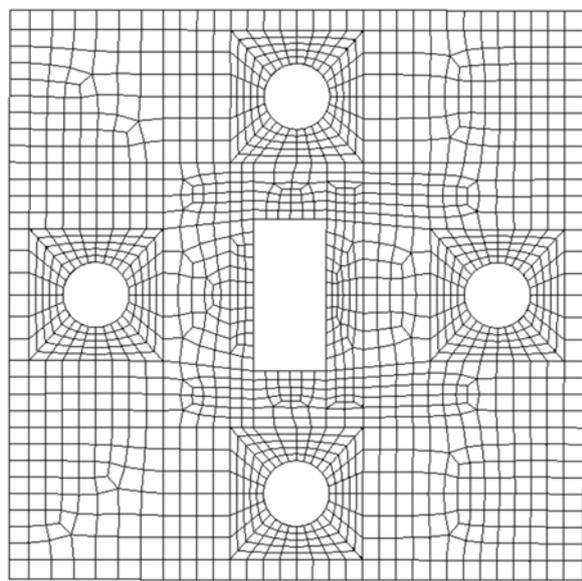
# 蒸気膜崩壊挙動観察による熱伝達率の精度改善例



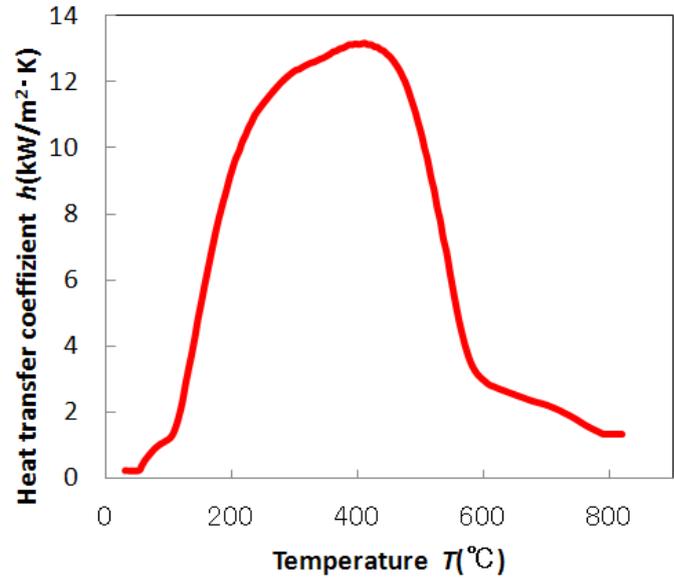
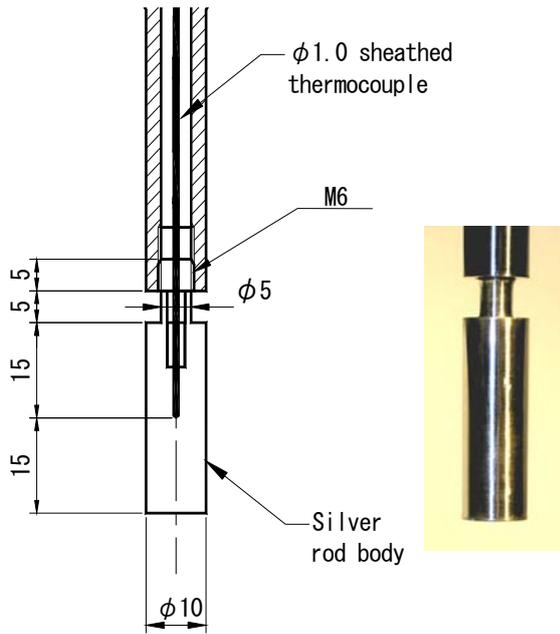
炭層工具鋼試片の形状・寸法

## 解析モデル(1/2)

要素数:7740  
節点数:10092  
1/2 FEM model

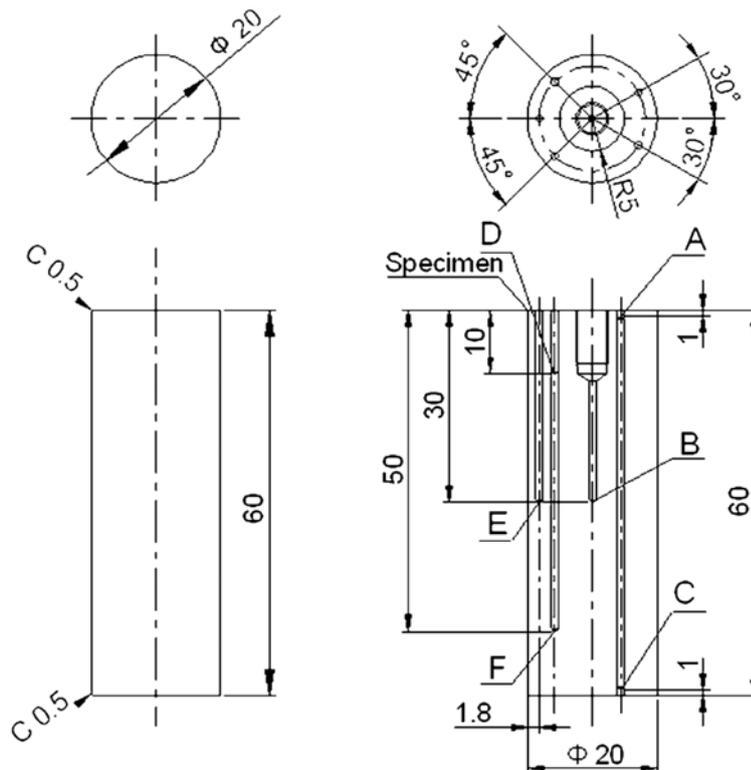


# JIS銀棒の冷却曲線から求めた表面熱伝達率 (30°C 静止水焼入れ)

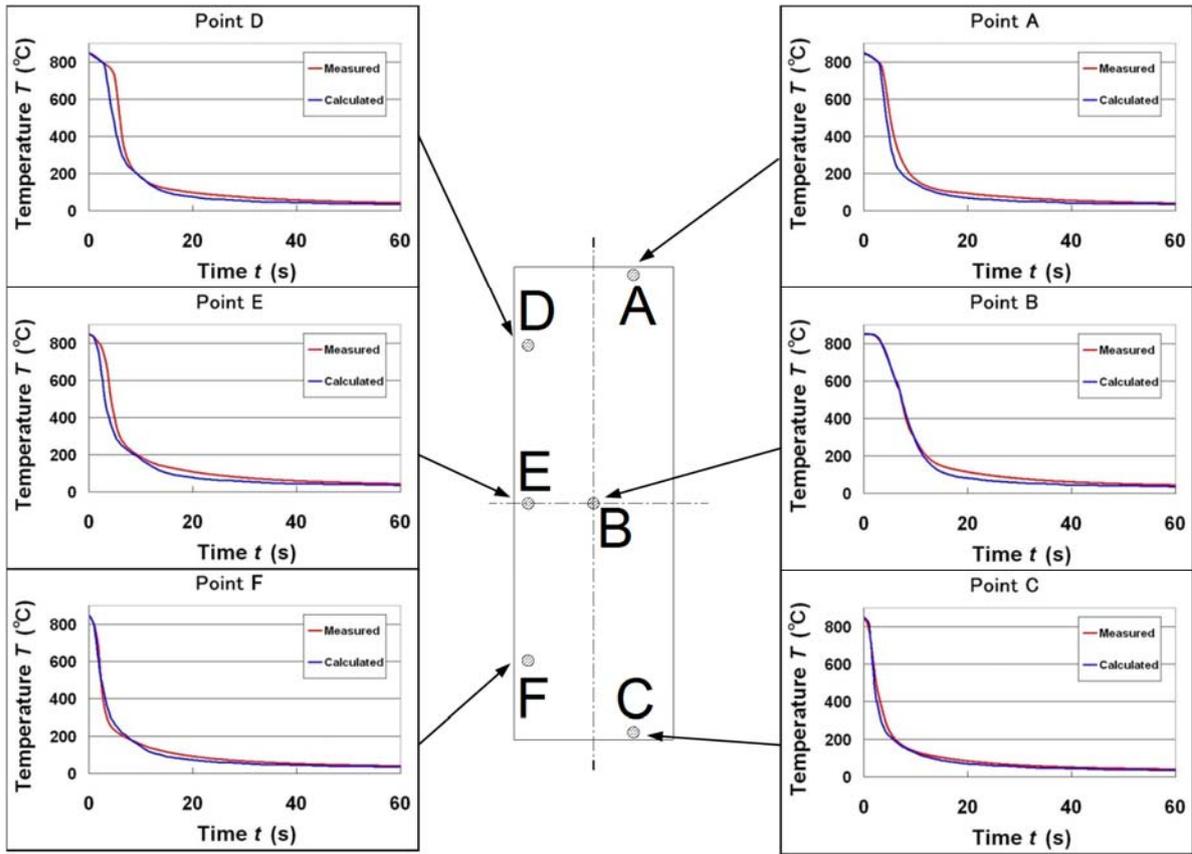


銀棒試片 (JIS K2242 B法)

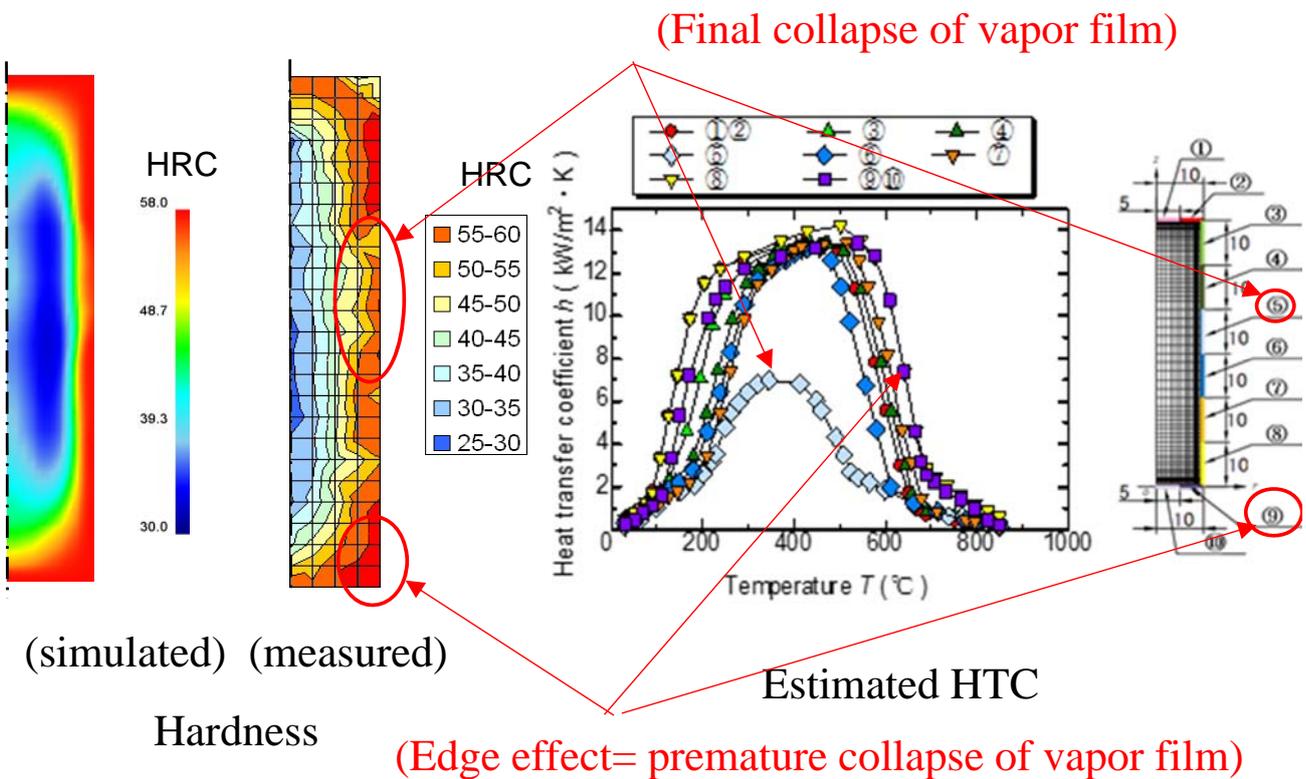
## 炭素鋼円柱と冷却曲線測定位置



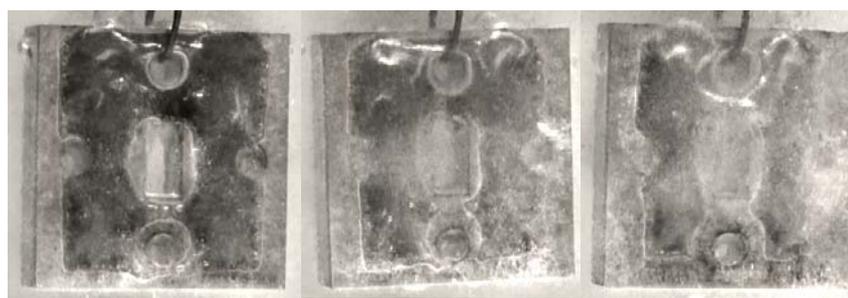
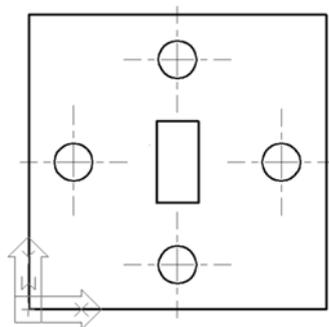
# 冷却曲線の実測値と解析値の比較



## Hardness distribution of 0.45 %C steel cylinder and HTSs on each surface zones



# 水焼入れ時の沸騰様相



0.1 s

0.2 s

0.3 s



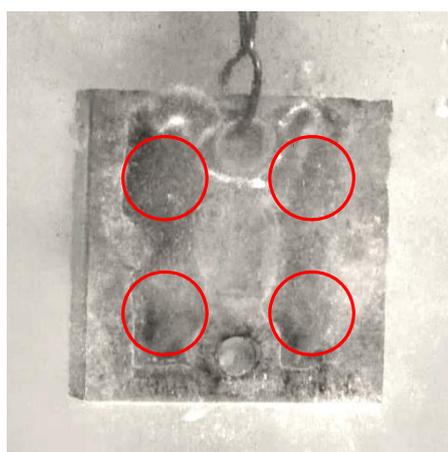
0.6s

1.0s

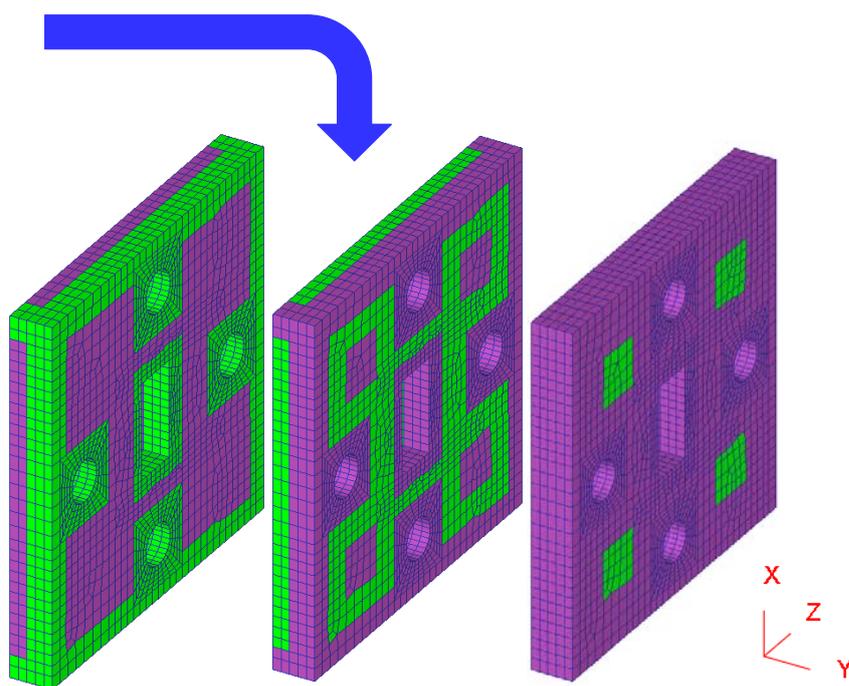
2.0s

浸漬直後に試片全表面に蒸気膜が生成され、その後、角部と穴周辺から中央へ伝播的に崩壊している。

# 表面熱伝達率の設定方法(初期設定)



蒸気膜崩壊挙動

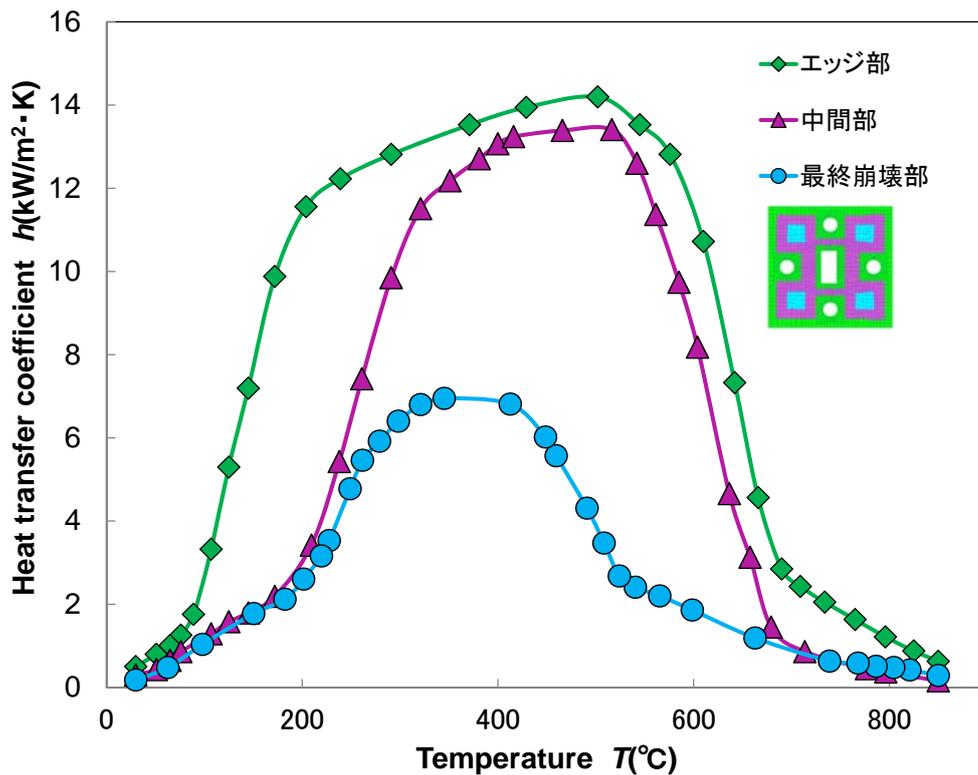


エッジ部

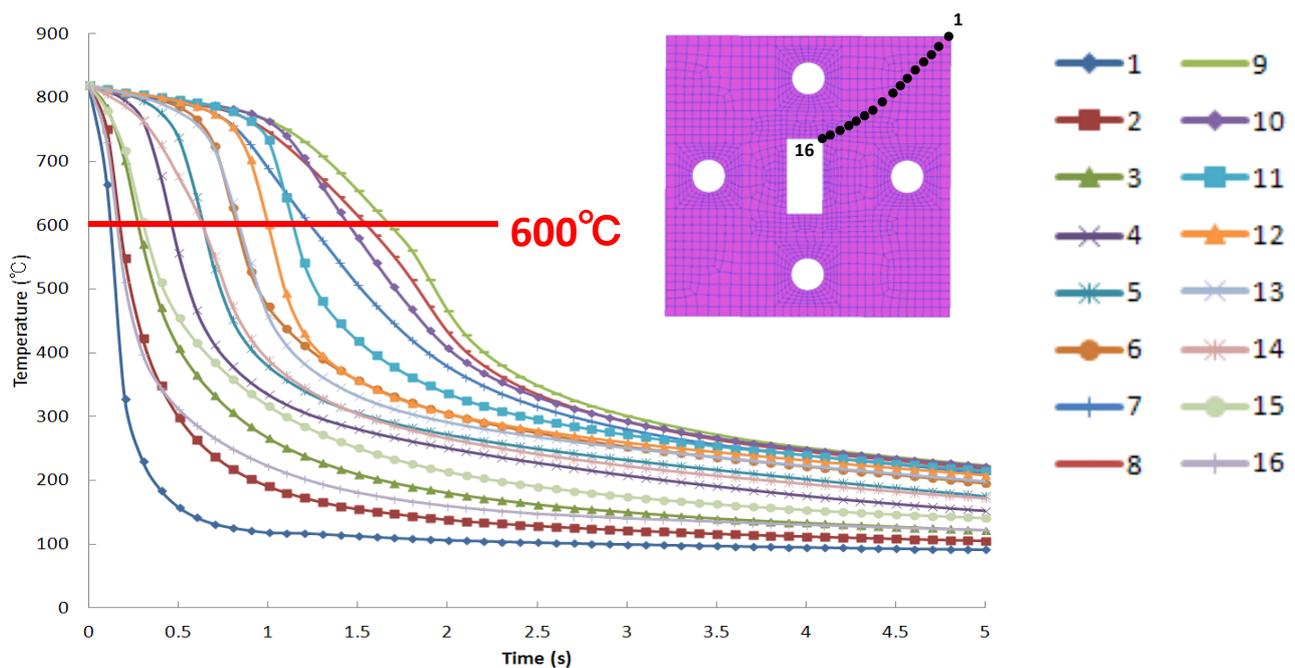
中間部

最終崩壊部

## 鋼円柱の冷却曲線と硬さ分布から求めた表面熱伝達率



## 工具鋼試片の冷却曲線 (解析値)



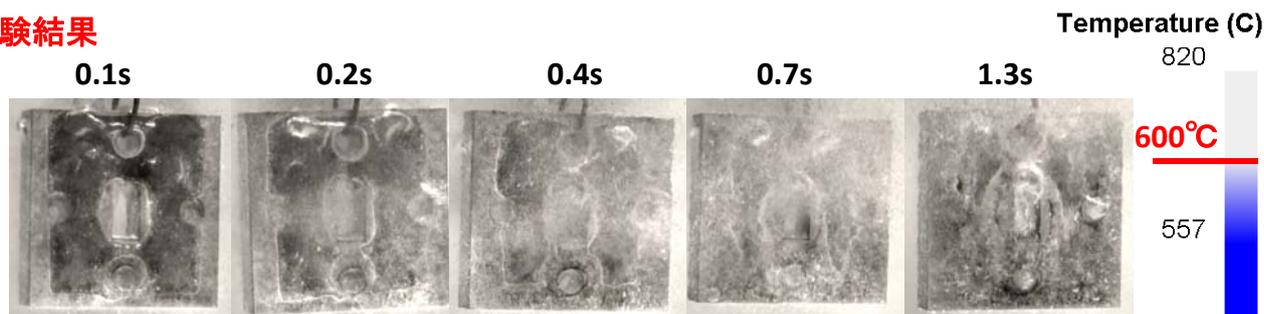
冷却曲線は約600°Cで最大冷却速度を示している。



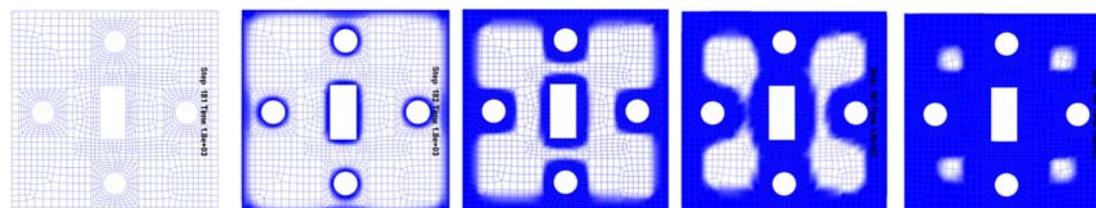
蒸気膜崩壊時の表面温度は約600°Cと考えられる。

# 水焼入れ時の沸騰様相(実験結果)と表面温度分布(解析結果)

## 実験結果

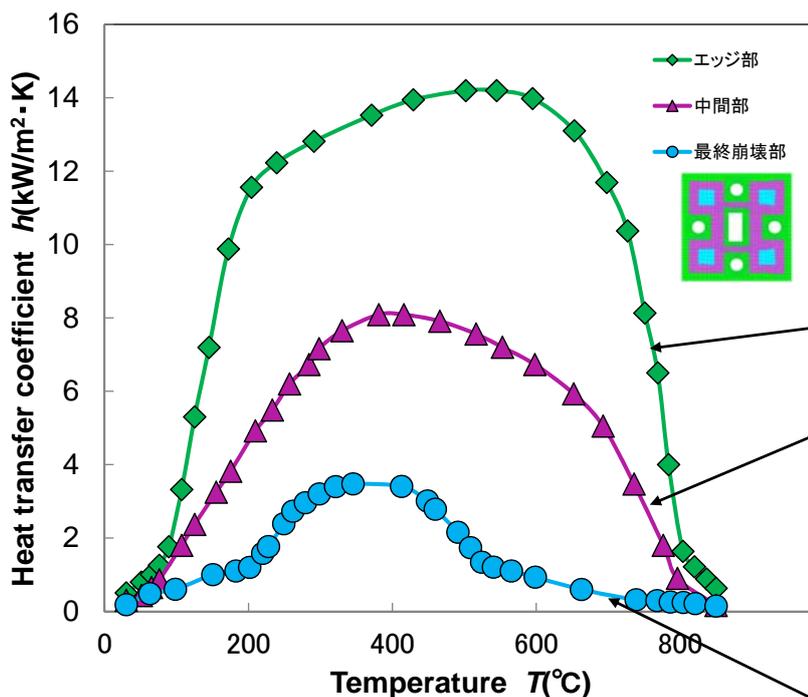


## 解析結果



→ 実験結果に比べ、エッジ部近傍は表面温度分布の解析結果が遅れており、最終冷却部は蒸気膜の消滅よりも解析値の温度降下が早い。

# 実測値と解析値の比較から修正した表面熱伝達率



エッジ部近傍の蒸気膜崩壊よりも解析値の温度降下が遅れていることから蒸気膜段階の熱伝達率を上げるように修正。

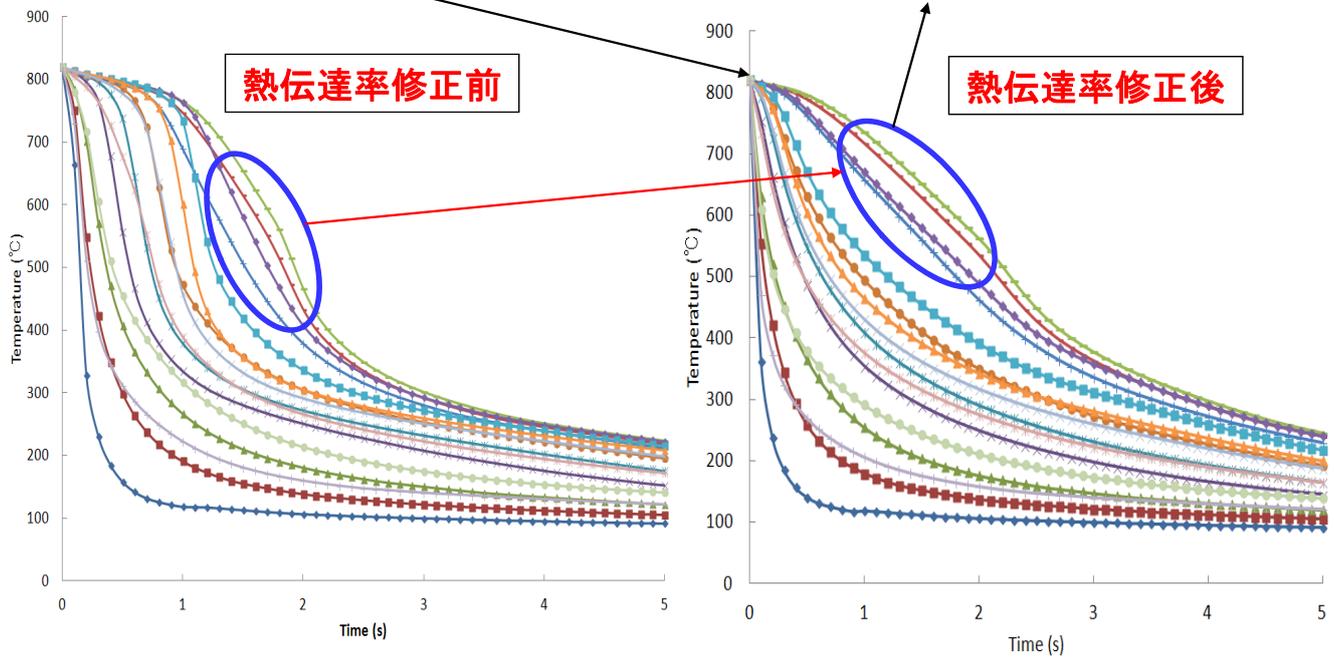
エッジ部, 最終冷却部の中間をとる値に修正。

最終冷却部の蒸気膜の消滅よりも解析値の温度降下が早いため全体を約1/2の値に修正。

# 熱伝達率修正前と後の冷却曲線の比較

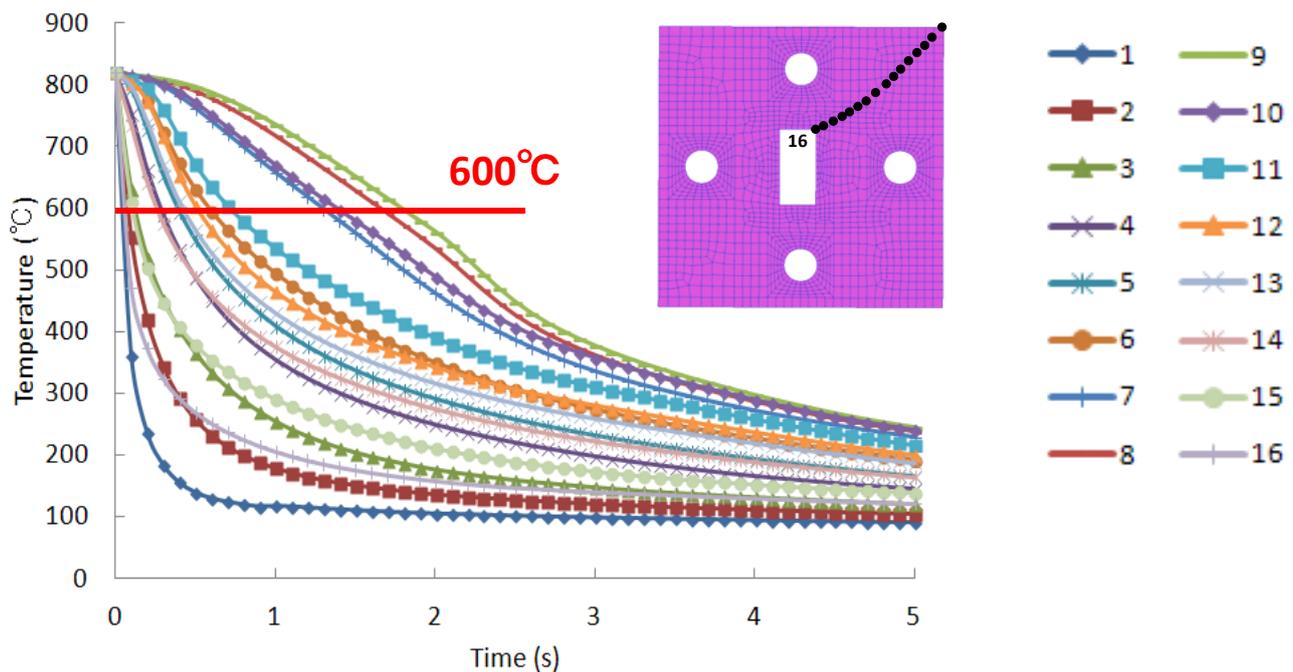
エッジ部, 中間部における蒸気膜段階が短くなった。

最終冷却部の傾きが緩やかになった。



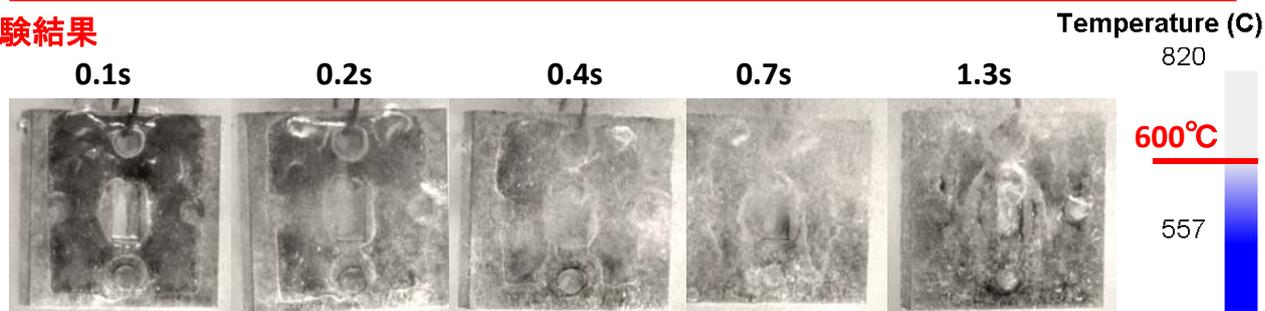
# 熱伝達率②修正後の冷却曲線(解析値)

1

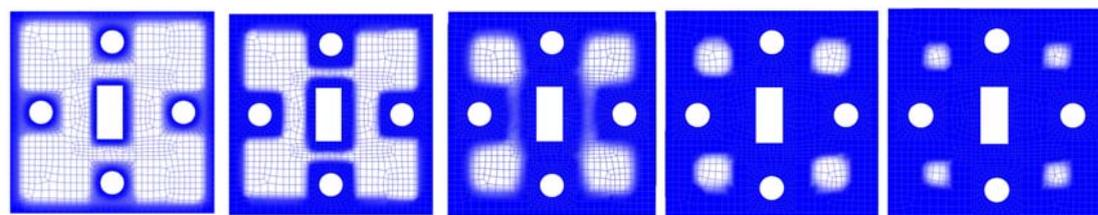


## 水焼入れ時の沸騰様相(実験結果)と表面温度分布(解析結果)

実験結果



解析結果



➡ 修正前に比べ、蒸気膜の崩壊と表面温度分布の解析結果の対応が良くなった。

## 今後の展望

冷却特性データに関しては、日本熱処理技術協会の研究会活動においてJIS銀棒によるデータの収集整理が進められており、データベースとして公開される予定である。その結果、基礎的な熱伝達率データとして熱処理シミュレーションに用いることが可能となるが、シミュレーションの精度向上には、実部品の焼入れ時の熱伝達率同定精度の向上が臨まれる。

実部品焼入れ時の熱伝達率同定方法として、冷却曲線、焼入れ後の硬さ分布、蒸気膜崩壊挙動など、多くの情報より部品表面の熱伝達率を求める方法の確立が望まれる。さらに冷却液の沸騰や流動状態の数値解析による熱伝達率同定が可能になれば、より容易に焼入れ時の熱伝達率を求めて実部品の焼入れシミュレーションが実施できると考えられる。