

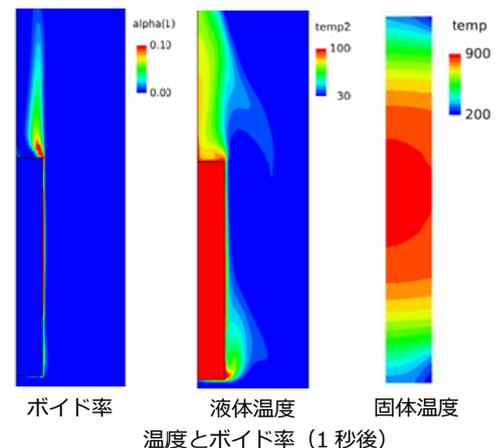
【技術セミナー】シミュレーションによる 金属熱処理特別講演

2015年10月22日(木)開催

プログラム

13:30~13:40 (10分)	主催者あいさつ アドバンスソフト株式会社のご紹介..... 3 研究主席 中森 一郎
13:40~14:20 (40分)	特別講演 1「鋼部品の焼入れにおける沸騰シミュレーションの適用の検討」 7 日産自動車株式会社 杉本 剛 様
14:20~14:40 (20分)	気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP の機能紹介 35 主管研究員 杉中 隆史
14:40~15:00 (20分)	沸騰を伴う気液二相流の解析 45 主管技師長 湊 明彦
15:00~15:10 (10分)	(休憩)
15:10~15:30 (20分)	気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP を使った 焼入れ解析事例紹介..... 51 主管研究員 杉中 隆史
15:30~16:20 (50分)	特別講演 2「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」 63 宇都宮大学 准教授 奈良崎 道治 様
16:20~16:30 (10分)	気液二相流解析関連サービス紹介、質疑応答 主査 田口 浩一

memo



アドバンスソフト株式会社のご紹介

研究主席 中森 一郎

【技術セミナー】シミュレーションによる金属熱処理特別講演
2015年10月22日（木）
アドバンスソフト株式会社

会社概要

名称 アドバンスソフト株式会社
(英文社名 AdvanceSoft Corporation)

本社 〒101-0062
東京都千代田区神田駿河台4-3
新お茶の水ビル17階
TEL: 03-6826-3970
FAX: 03-5283-6580

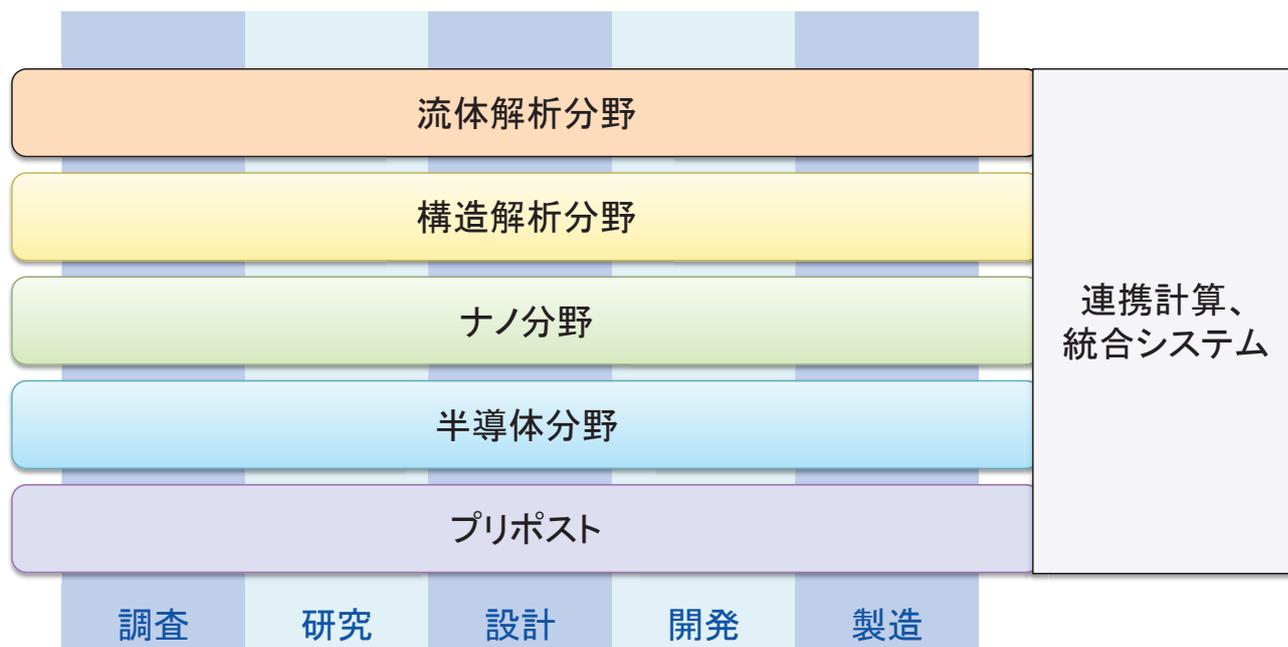
設立 2002年(平成14年)4月24日

資本金 3,724万円

社員数 76名(2015年10月5日現在)

事業部	部	課	業務概要
-	総合企画部	コンサルティンググループ	アドバンス/スーパーコンピューティングサービス・防災シミュレーション・コンサルティングサービスの提供など
		解析グループ	解析サービスの提供など
第1事業部	技術第1部	第2課	ナノ材料の第一原理計算、量子化学計算やメソ領域の開発など
	技術第2部	第5課	プリポスト・可視化システム・連成システム開発、構造解析エンジニアリングなど
	技術第6部	第10課	次世代CADシステムの開発など
第2事業部	技術第4部	第8課	混相流に係わる次世代流体システム開発など
	技術第5部	第11課	原子力・エネルギー利用に係る安全性解析など
第3事業部	技術第3部	第4課	乱流、燃焼、化学反応等に係わる次世代流体システム開発など
		第6課	J-PARCに係わるプロジェクトの実施等
	技術第7部	商品販売推進課	発電・化学プラントやライフライン等の管路系流体解析エンジニアリング業務、次世代流体解析システム保守・販売サポート
営業本部	営業部	営業第1課	お客さま窓口
		営業第2課	お客さま窓口
		営業第3課	お客さま窓口
東海事業所			お客さま窓口

事業分野



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

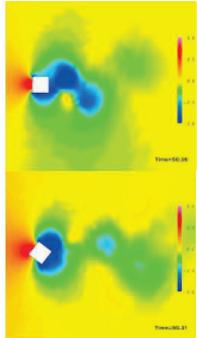
ソフトウェア名称	解析内容
Advance/FrontFlow/red	流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MP	気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流解析・爆発解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/SSMP	超音速気液二相流解析ソフトウェア
Advance/EVE SAYFA	火災解析・環境安全解析シミュレータ
Advance/FrontNet	管路系1次元流体解析ソフトウェア群
Advance/FrontSTR	汎用構造解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise	音響解析ソフトウェア
Advance/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ
Advance/PHASE	第一原理バンド計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
Advance/OCTA	ソフトマテリアル統合シミュレータ

(注)表には主要なものを挙げている。詳細はwww.advancesoft.jpをご覧ください

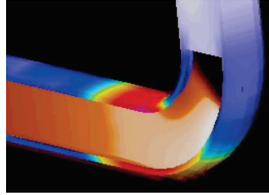
アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

流体

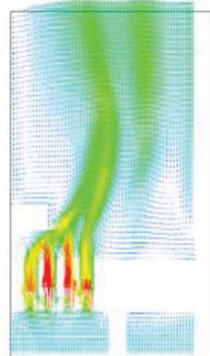
Advance/FrontFlow/red



Advance/FrontFlow/FOCUS



Advance/FrontFlow/MP

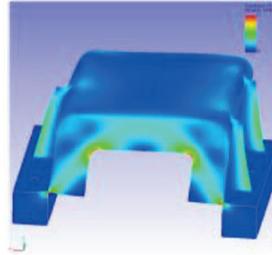


Advance/FrontNetシリーズ



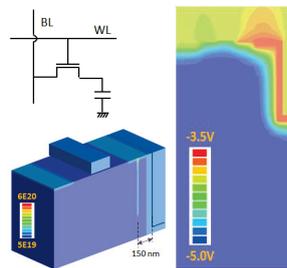
構造

Advance/FrontSTR



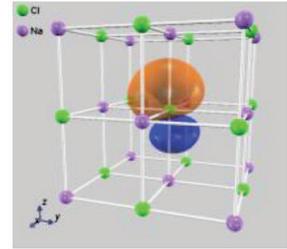
半導体

Advance/DESSERT



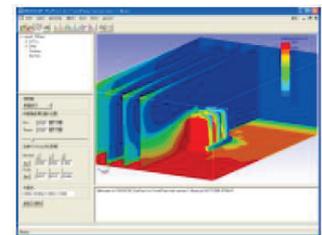
ナノ

Advance/PHASE



プリポスト

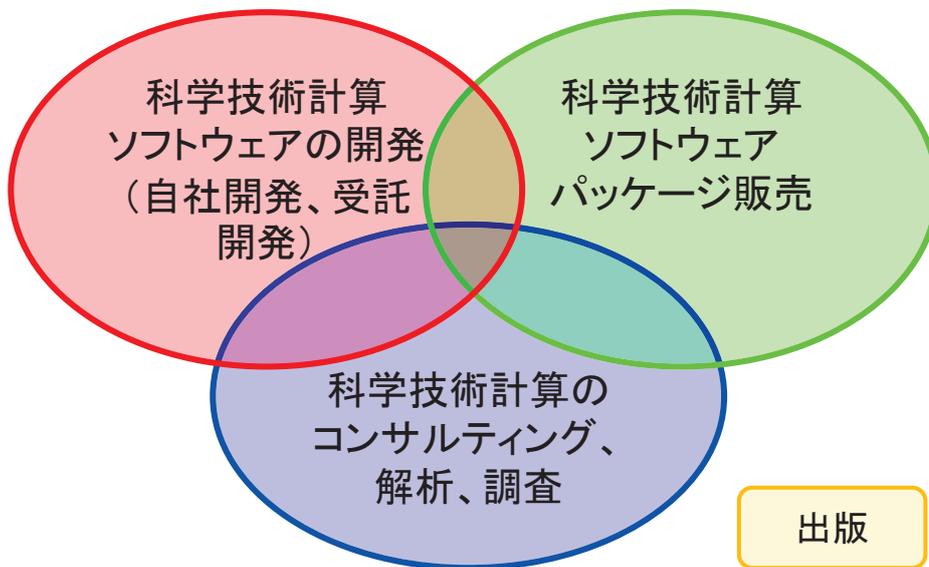
Advance/REVOCAP



※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP(www.advancesoft.jp)をご参照ください。

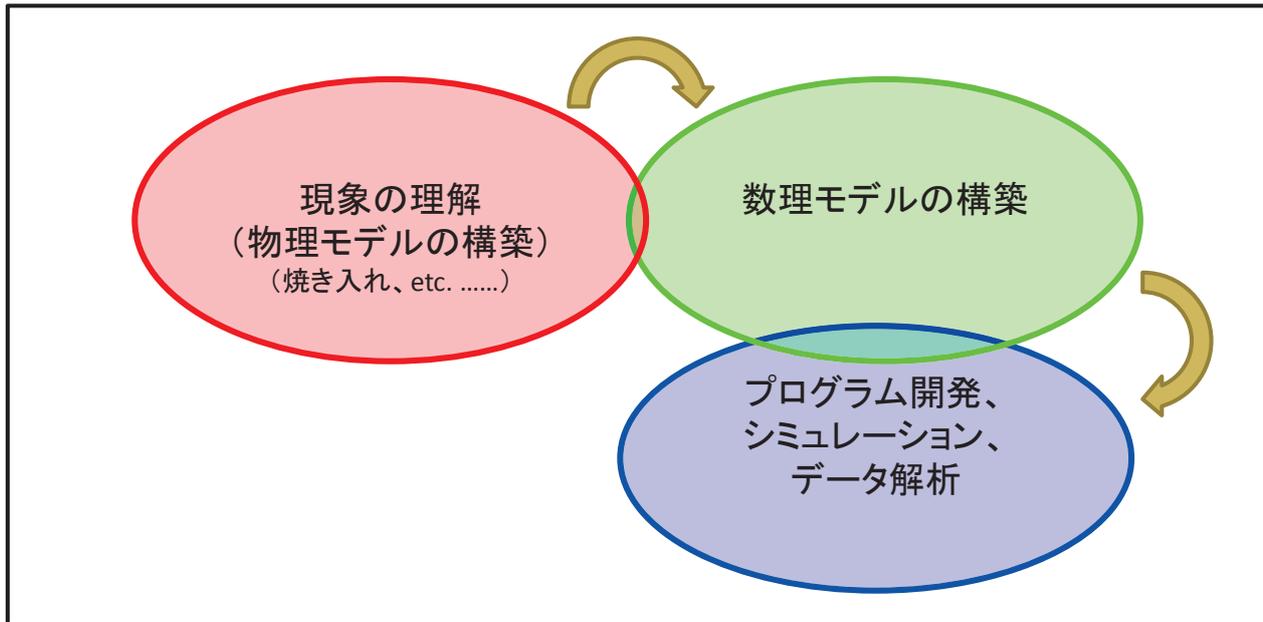
事業内容

アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。

事業内容



産業分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、科学技術計算によるソリューションをご提供します。



Advance Soft

「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」

facebook、YouTubeでも当社の情報を発信しています

<https://www.facebook.com/advancesoft.jp>

<https://www.youtube.com/user/advancesoft>

NISSAN MOTOR CORPORATION



鋼部品の焼入れにおける 沸騰シミュレーションの 適用の検討

Oct, 22th, 2015

Sugimoto, Tsuyoshi
Powertrain Technology and
Prototype development
department
Nissan Motor Co., Ltd

<Agenda>

- 日産自動車と工程のご紹介
- 浸炭焼入れ熱処理とハイポイドギアの製造方法
- 熱処理歪の要因調査
- 熱伝達率のカタログ化
- 熱伝達率の荷姿内バラツキに関する調査
- 二相流解析に関する調査
- まとめ

<Agenda>

- **日産自動車と工程のご紹介**
- 浸炭焼入れ熱処理とハイポイドギアの製造方法
- 熱処理歪の要因調査
- 熱伝達率のカタログ化
- 熱伝達率の荷姿内バラツキに関する調査
- 二相流解析に関する調査
- まとめ

NISSAN MOTOR CORPORATION

日産自動車のご紹介

設立	1933年(昭和8年)12月26日
資本金	6,058億13百万円
従業員数	23,085名 (2014年3月末) グローバル:約14.3万名(2014年3月末)
グローバル本社	神奈川県横浜市西区高島1丁目1番1号
事業内容	自動車の企画・製造・販売及び関連事業
国内拠点	3車両生産工場, 2ユニット組立工場, 総合研究所、テクニカルセンター
海外拠点	車両生産拠点 20ヶ国 31拠点

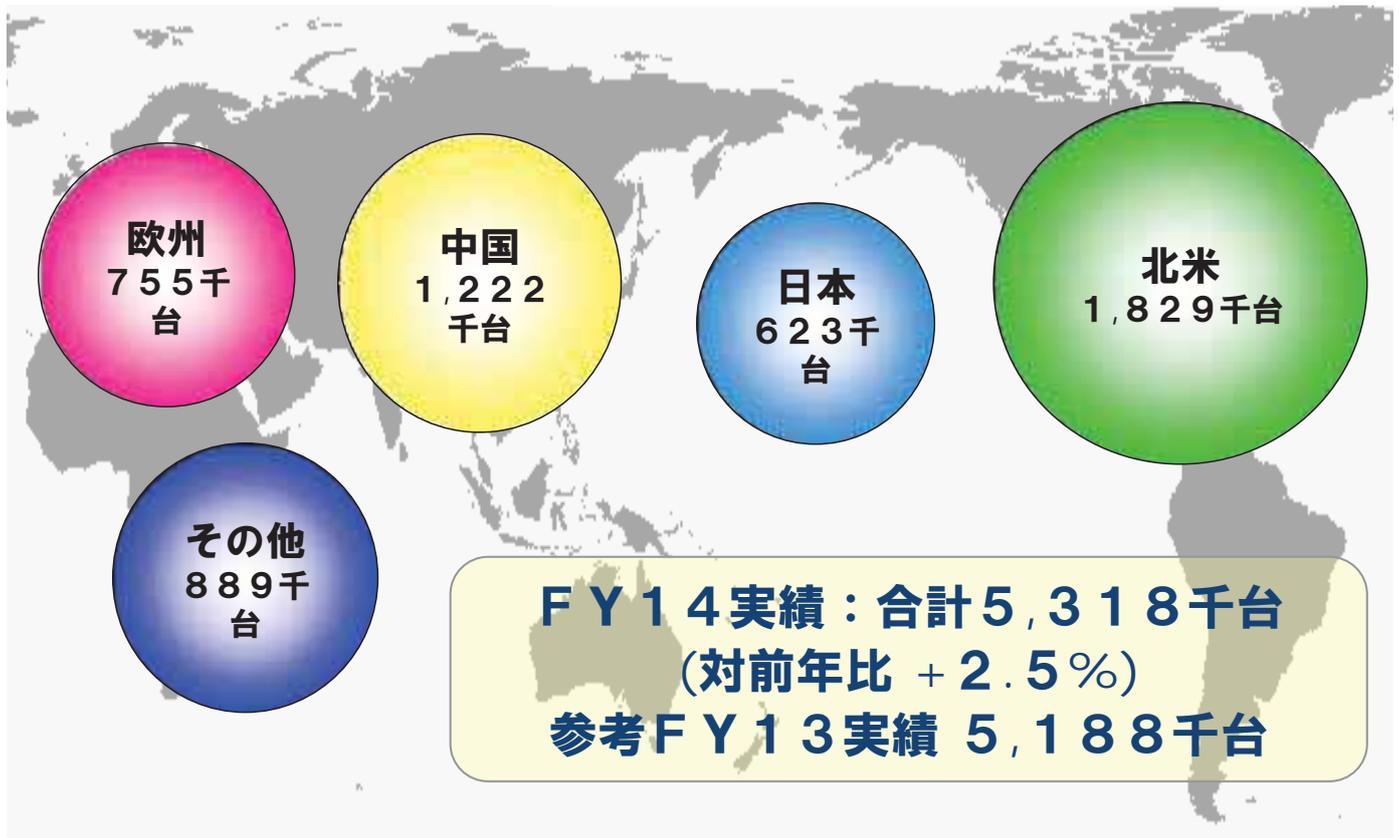


2014年度実績

売上高	11兆3,572億円
グローバル販売台数	5,318千台
グローバル生産台数	5,030千台

NISSAN MOTOR CORPORATION

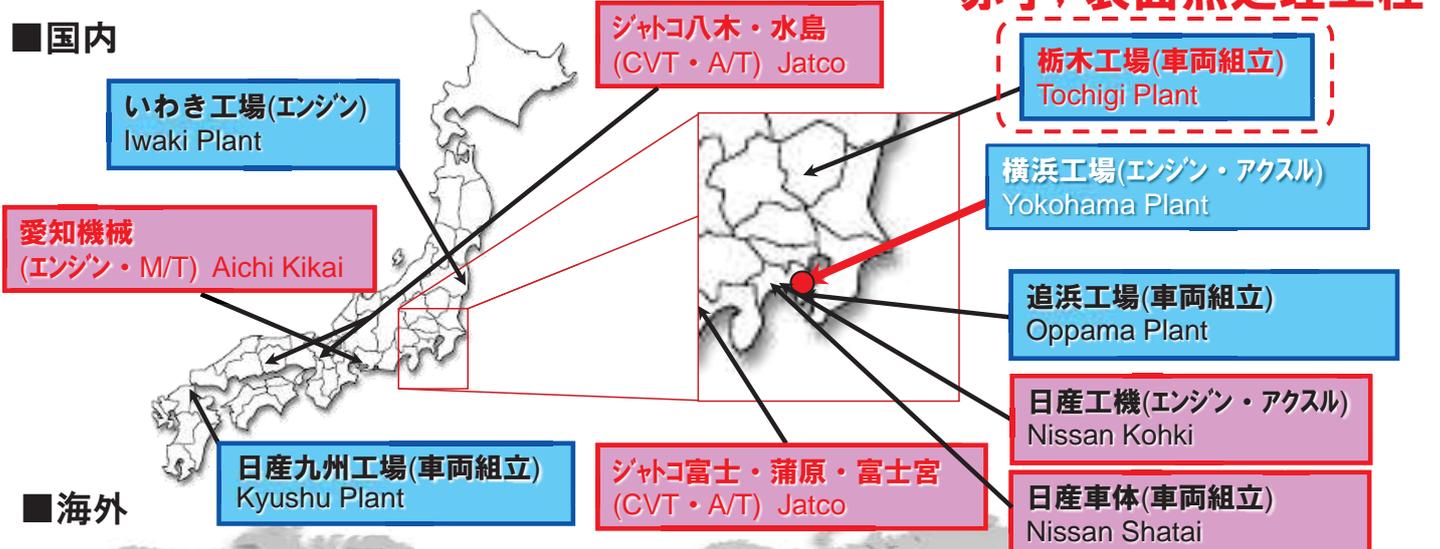
地域別販売実績



NISSAN MOTOR CORPORATION

国内・国外の主な生産拠点

国内



海外



20カ国31拠点 31Bases in 20countries

NISSAN MOTOR CORPORATION

栃木工場所在地



所在地: 栃木県 河内郡 上三川町
 東京より約100Km 宇都宮より約15Km

NISSAN MOTOR CORPORATION

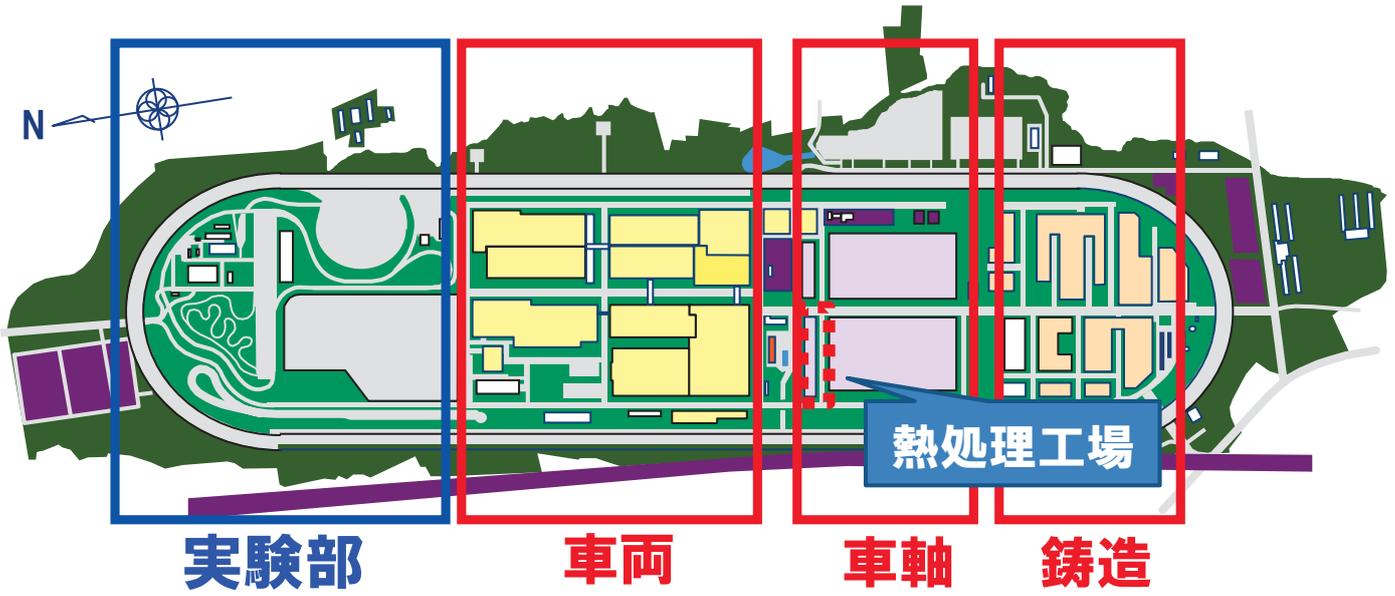
栃木工場の沿革

	新商品関連	一般事項
1968	鑄造部品生産開始	
1969	車軸部品生産開始	
1971	セドリック・グロリア生産開始	
1988	シーマ生産開始 	テストコース完成 PM優秀事業場賞受賞 PM優秀事業場賞特別賞受賞 ISO 9002認証取得 デミング賞事業所表彰
2006	スカイライン生産開始 	ISO 14001認証取得 J.D.POWER初期品質調査 高品質工場 銅賞受賞
2007	スカイラインクーペ・NISSAN GT-R INFINITI EX 生産開始 	350Zプレミアムスポーツ車No.1受賞
2008	INFINITI FX フェアレディーZ生産開始 	J.D.POWER初期品質調査 高品質工場 銀賞受賞  INFINITI M,EX セグメントNo.1受賞
2009	INFINITI Gコンバーチブル フェアレディーZロードスター フーガ生産開始 	J.D.POWER初期品質調査 フェアレディーZ セグメントNo.1受賞
2010	フーガハイブリッド生産開始	高級車を主軸に置いた 日産自動車の技術の核となる工場

NISSAN MOTOR CORPORATION

栃木工場レイアウト

鑄造～車軸～車両の「一貫生産工場」

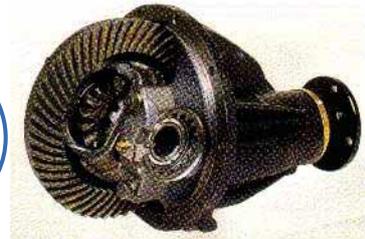
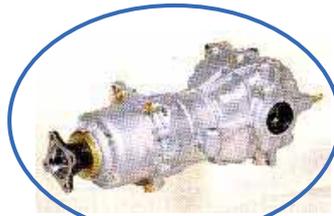


■敷地面積約 293 万㎡ (約92万坪)
 ■建物面積 約 83 万㎡ (約25万坪)

NISSAN MOTOR CORPORATION

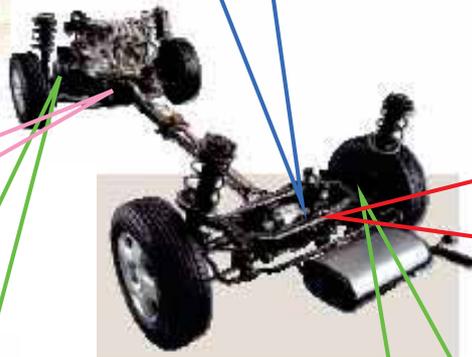
主な生産品目

ファイナルドライブユニット組立
及び機械加工



アクスルユニット組立

FFデフケースユニット組立
及び機械加工



アクスル部品
機械加工



NISSAN MOTOR CORPORATION

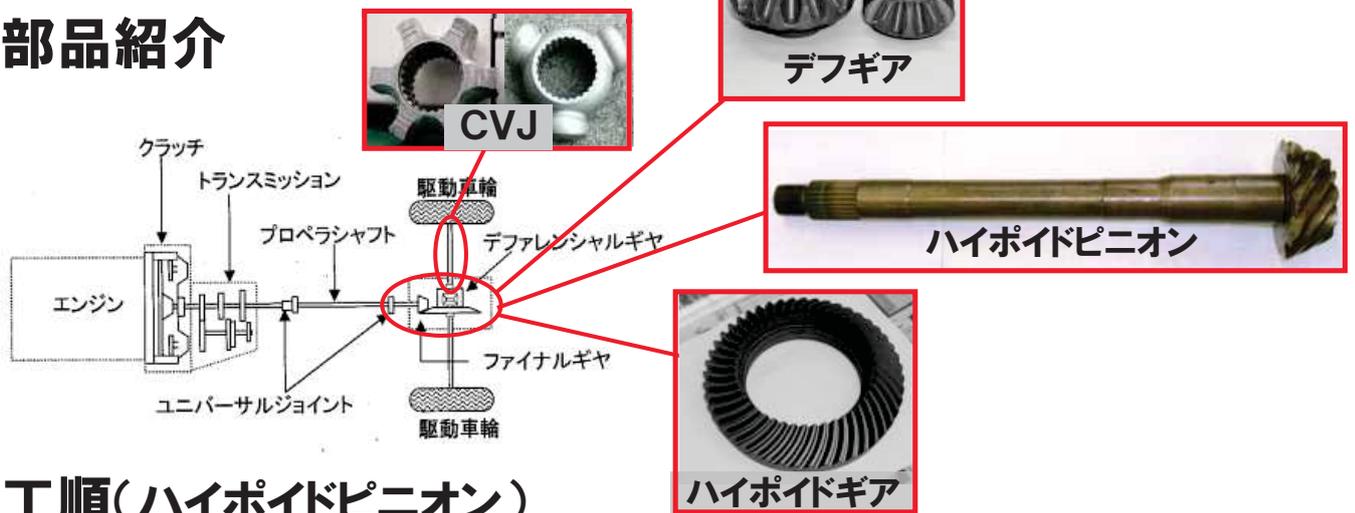
<Agenda>

- ・日産自動車と工程のご紹介
- ・**浸炭焼入れ熱処理とハイポイドギアの製造方法**
- ・熱処理歪の要因調査
- ・熱伝達率のカタログ化
- ・熱伝達率の荷姿内バラツキに関する調査
- ・二相流解析に関する調査
- ・まとめ

NISSAN MOTOR CORPORATION

熱処理部品、工順紹介

◆ 部品紹介

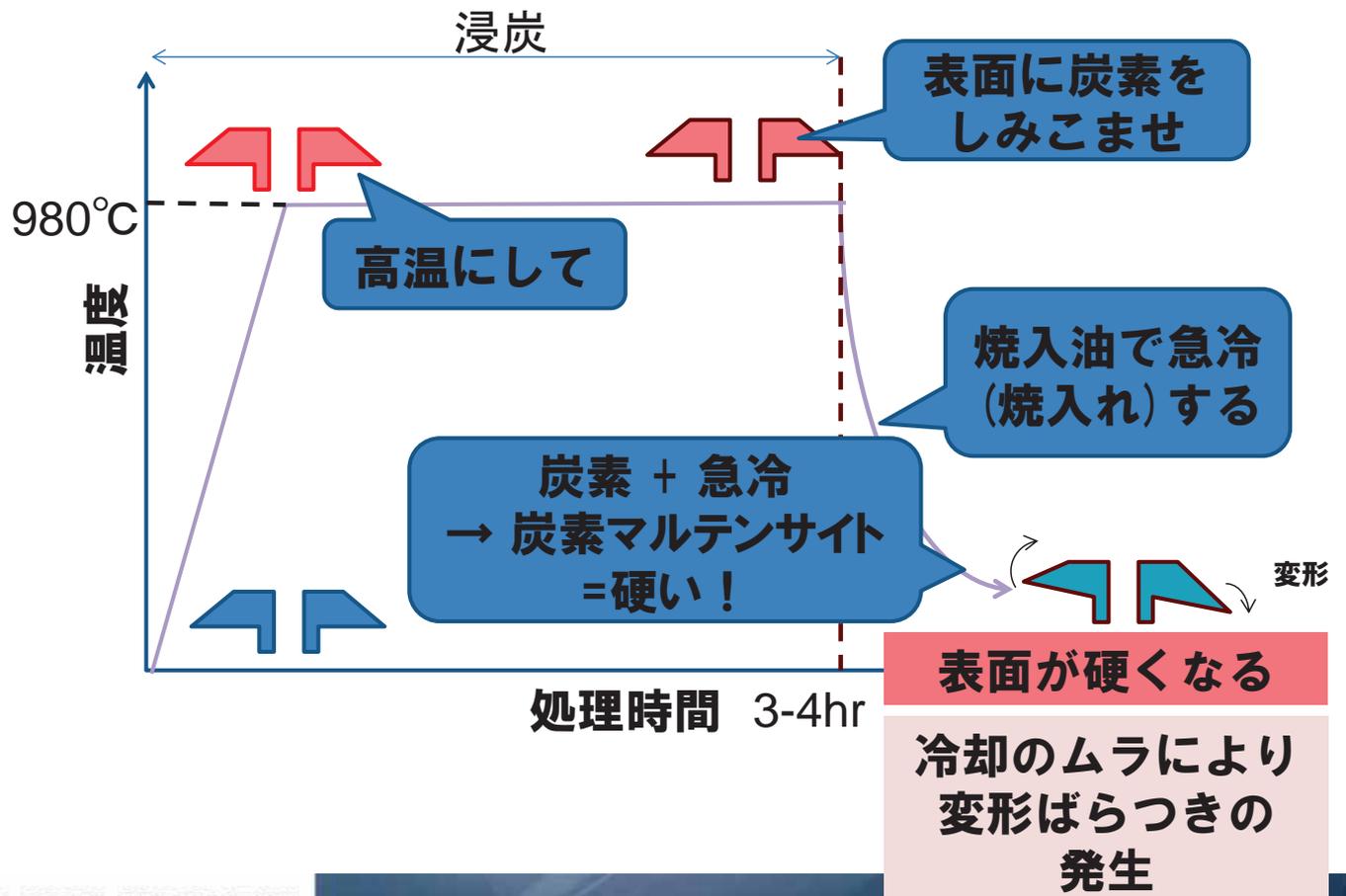


◆ 工順(ハイポイドピニオン)



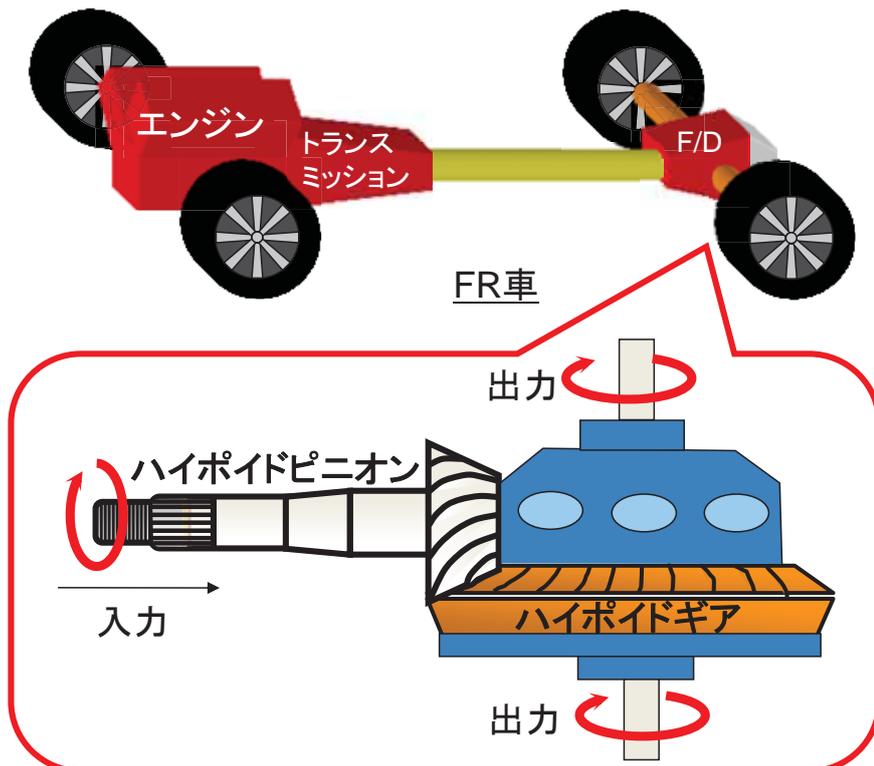
NISSAN MOTOR CORPORATION

浸炭熱処理とは



NISSAN MOTOR CORPORATION

ハイポイドギアとは？



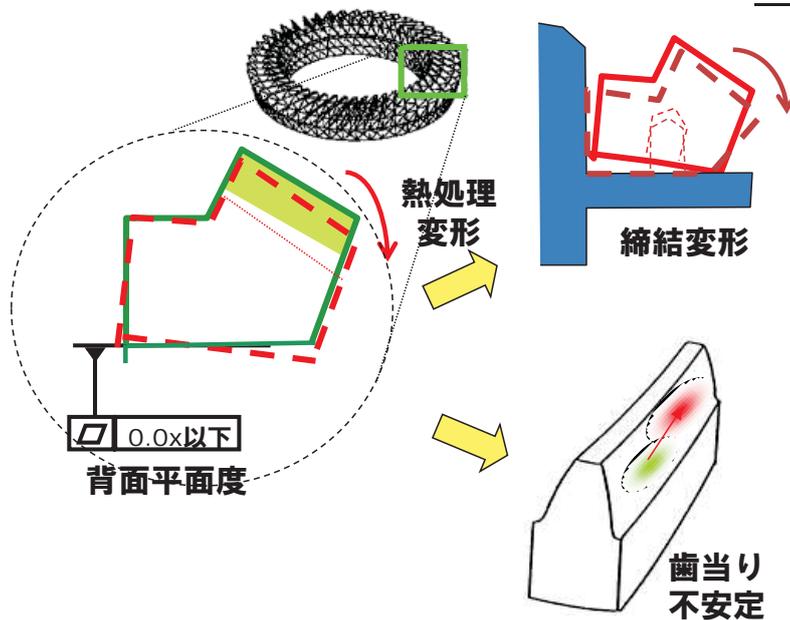
ハイポイドギアの要求特性

- 駆動トルクに耐える歯元・歯面強度
- 高すべり率に耐える歯面ピッチング強度
- F/Dノイズを発生しない安定した回転

NISSAN MOTOR CORPORATION

ハイポイドギアの品質と性能への影響

ハイポイドギアの品質と影響



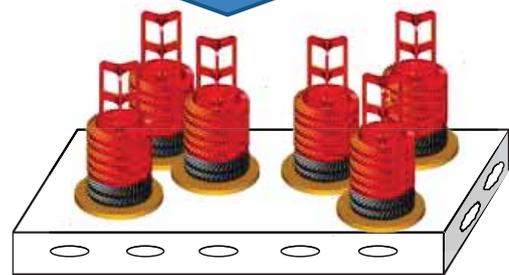
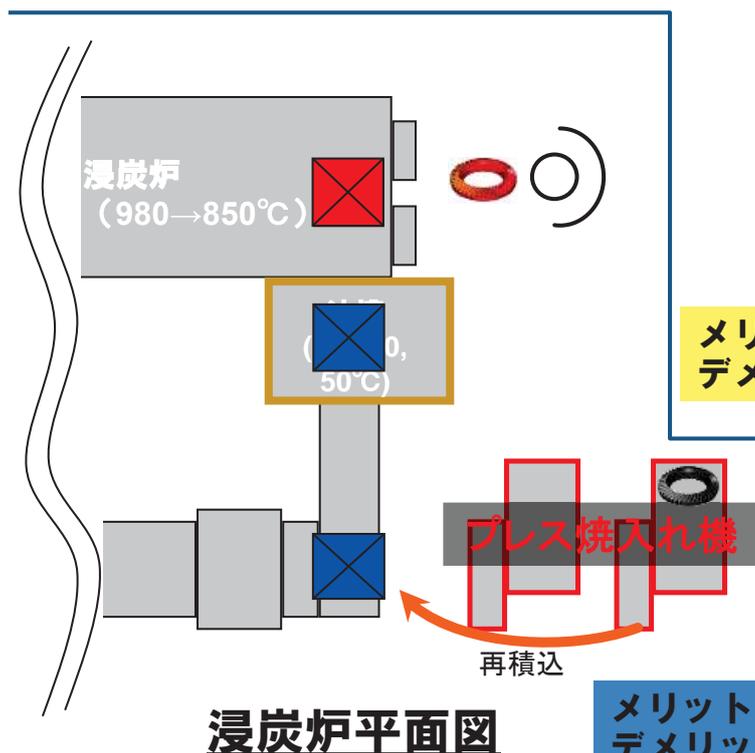
背面平面度が悪いと....

- ・デフケース締結が不安定になり、正しい歯当たりだしができない。
- ・熱処理時に歯当たり位置がずれる

NISSAN MOTOR CORPORATION

ハイポイドギアの熱処理

生産性の向上の為、ダイレクト焼入れでハイポイドギアの歪みを抑制したい



ダイレクト焼入れ(集団処理)

メリット : CO2排出量削減. 暑熱作業廃止
デメリット : 熱処理歪み ばらつき 大

プレス焼入れ(一個処理)

メリット : 熱処理歪み ばらつき 小
デメリット : 再積み込み要 エネルギーロス大

NISSAN MOTOR CORPORATION

<Agenda>

- ・日産自動車と工程のご紹介
- ・浸炭焼入れ熱処理とハイポイドギアの製造方法
- ・**熱処理歪の要因調査**
- ・熱伝達率のカタログ化
- ・熱伝達率の荷姿内バラツキに関する調査
- ・二相流解析に関する調査
- ・まとめ

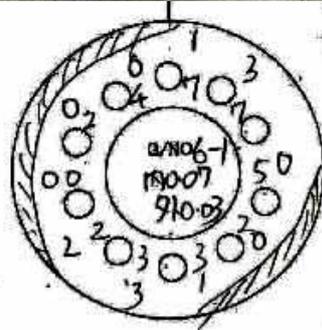
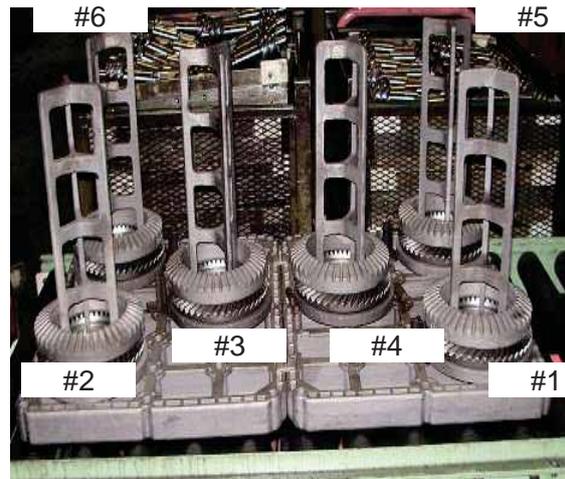
NISSAN MOTOR CORPORATION

解析対象

解析部品:Hypoid Gear



背面の変形が課題
テーパー
周方向のうねり

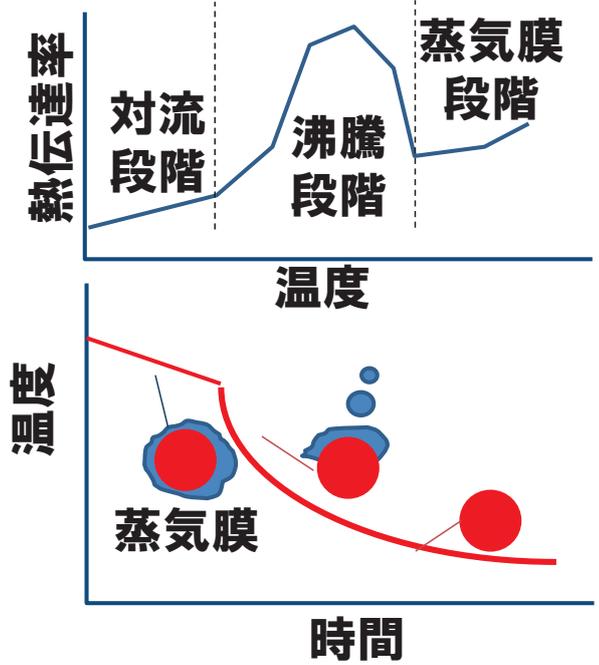


NISSAN MOTOR CORPORATION

焼入現象の可視化実験



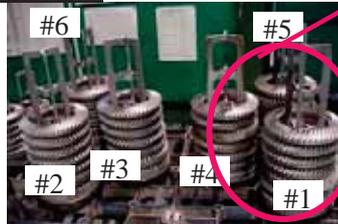
ハイポイドギアの焼入れの様子



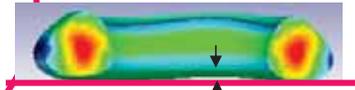
蒸気膜の崩落タイミングが円周方向でばらつく
⇒円周方向の冷却バラツキ大

NISSAN MOTOR CORPORATION

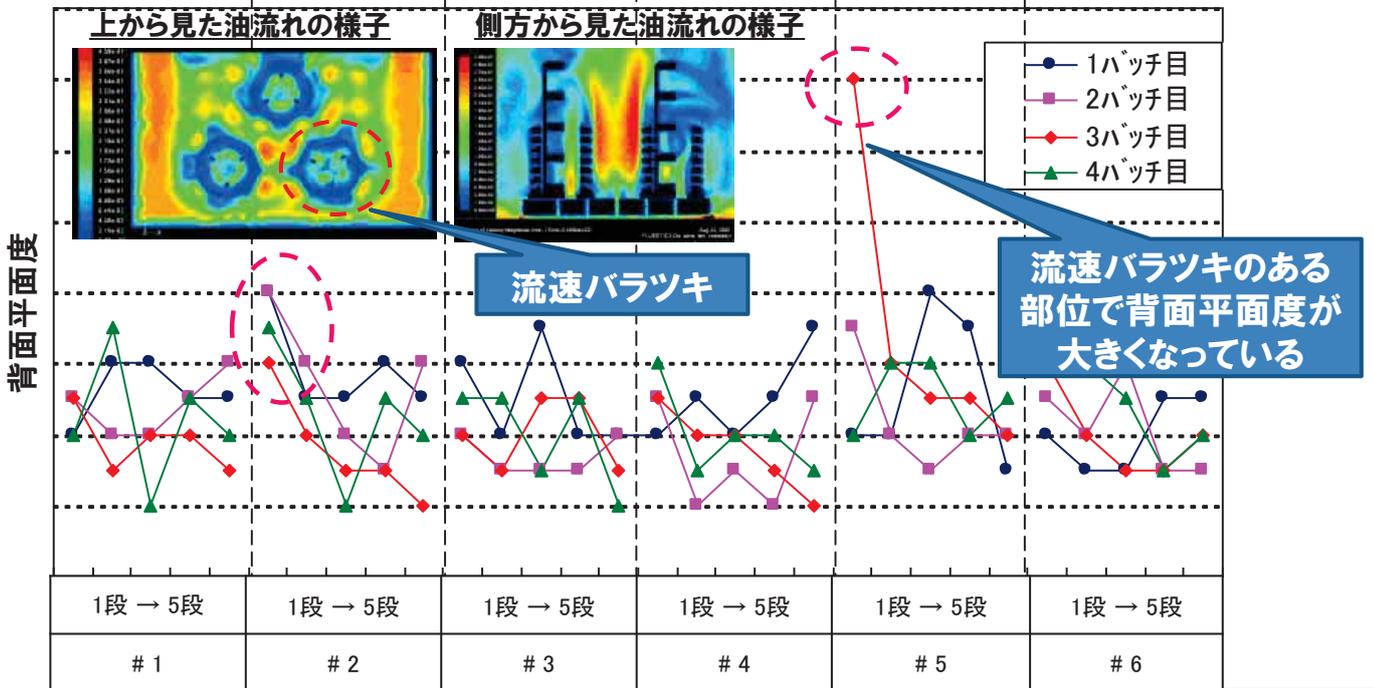
実荷姿での歪の様子



一般的な傘歯歯車の集団焼入れ



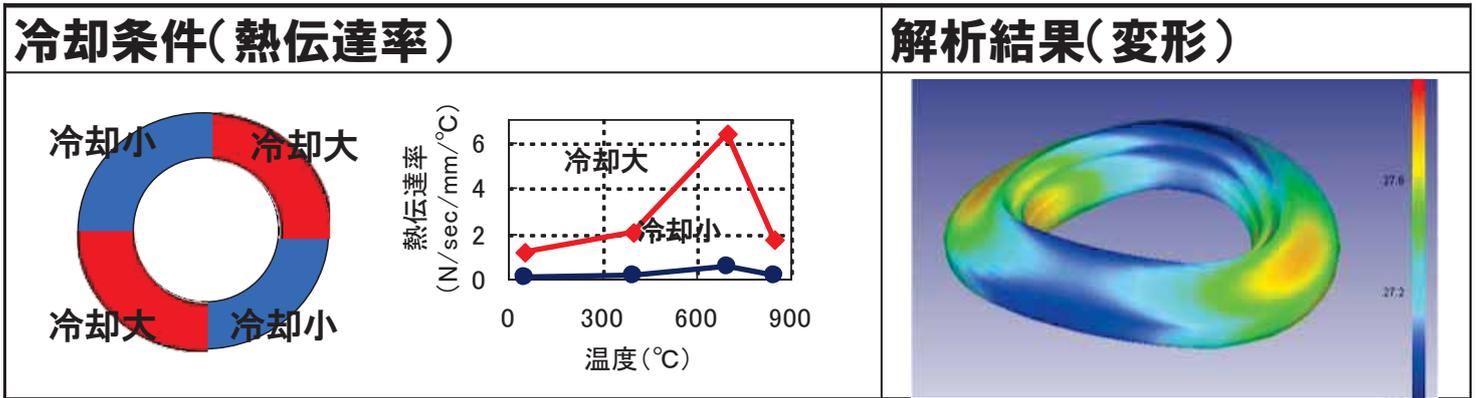
背面平面度



NISSAN MOTOR CORPORATION

ひずみ要因解析

周方向に冷却速度差を与えて解析



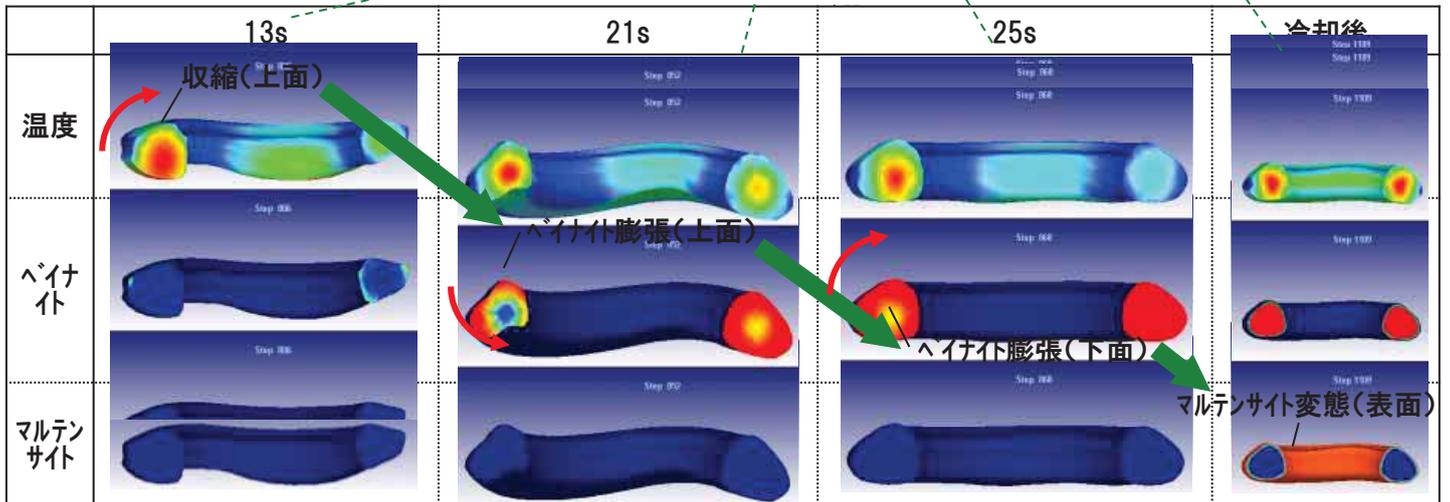
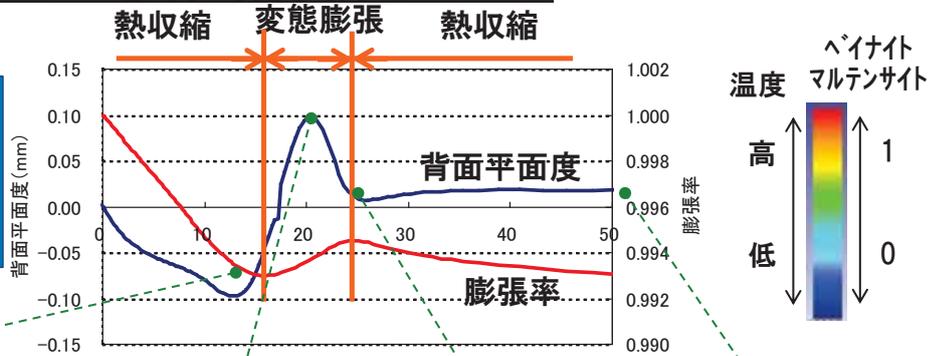
周方向蒸気膜崩落ばらつき⇒歪発生

冷却のムラが周方向の振れを発生させることが再現できた

NISSAN MOTOR CORPORATION

ハイポイドギアの歪み要因解析まとめ

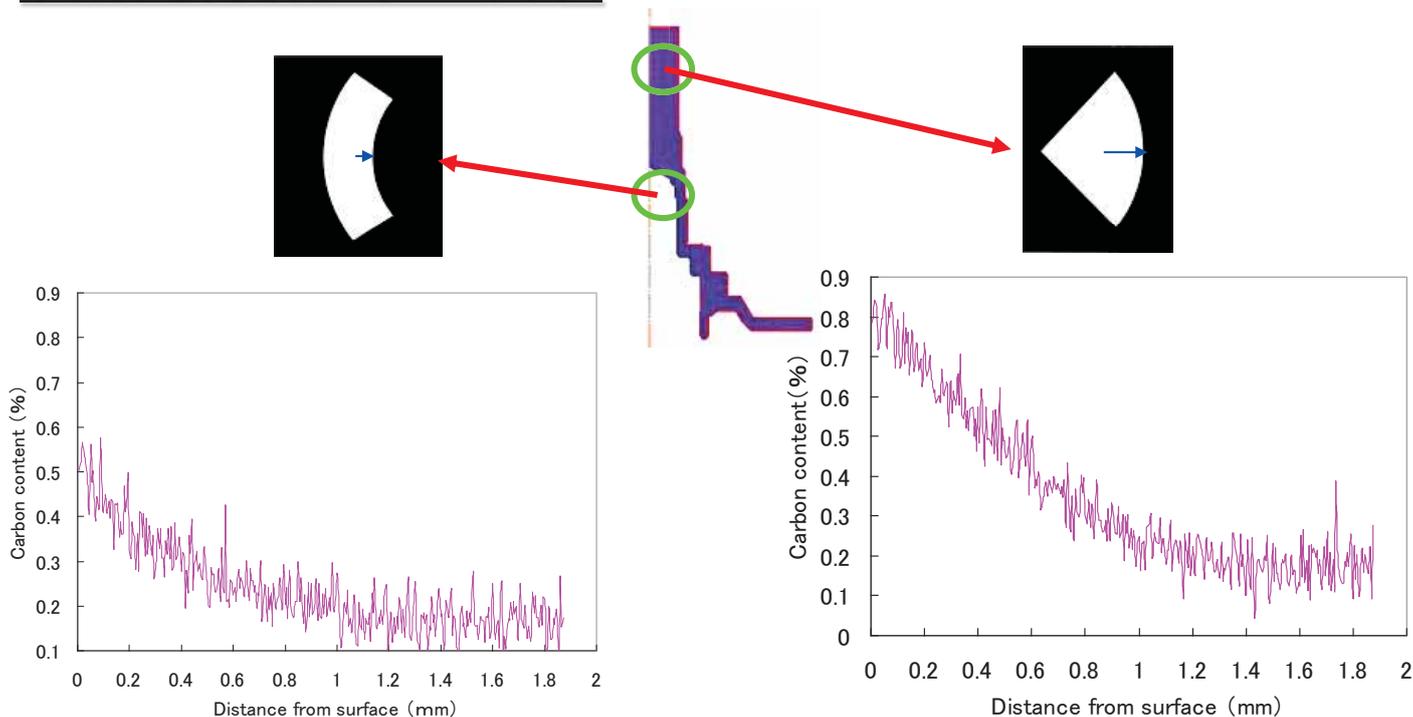
変態膨張が発生する18sec後の冷却条件の改善がキーになる。



⇒周方向の冷却速度差による熱収縮、ベイナイト膨張のタイミング差により歪み発生

NISSAN MOTOR CORPORATION

炭素濃度分布の反映



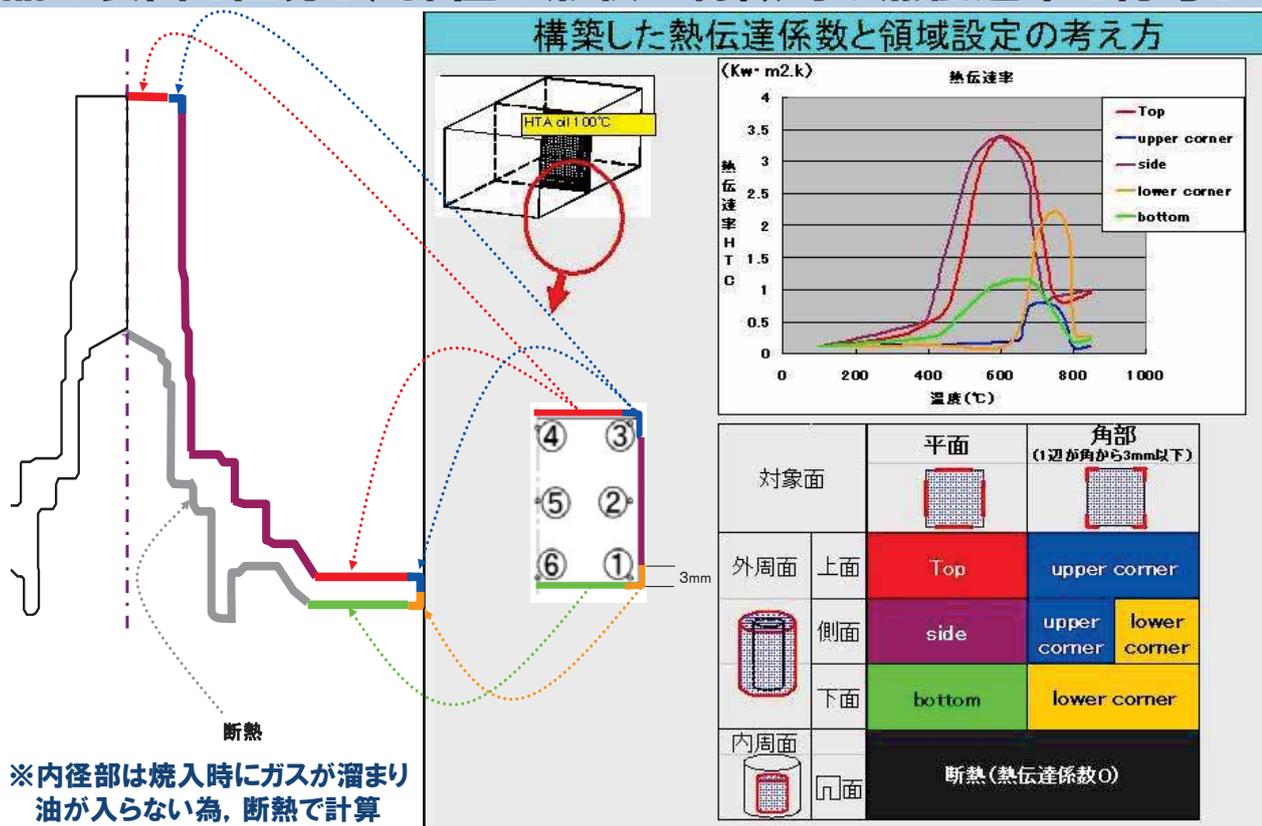
浸炭雰囲気ガス滞留による炭素濃度分布の違いの折込みを実施した

NISSAN MOTOR CORPORATION

熱伝達率のカタログ化

部品の表面を区分し、部位の形状に特徴的な熱伝達率を付与した

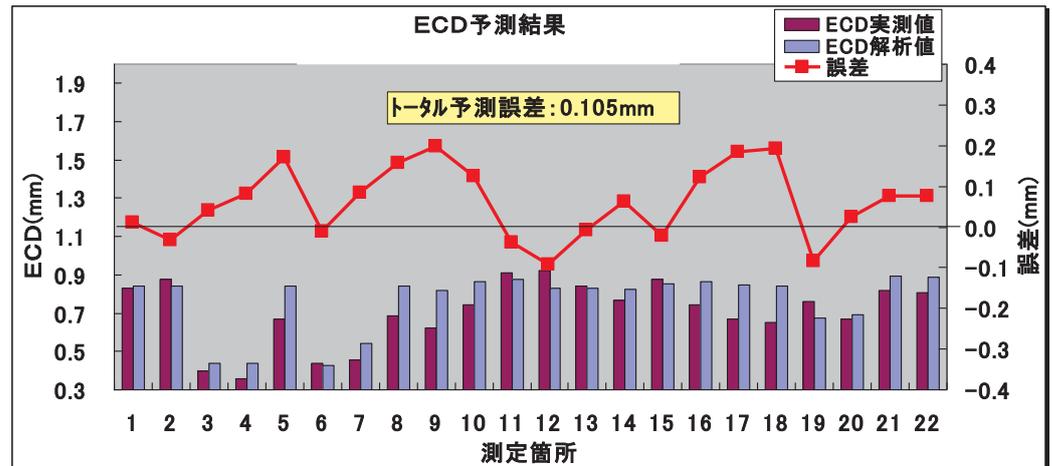
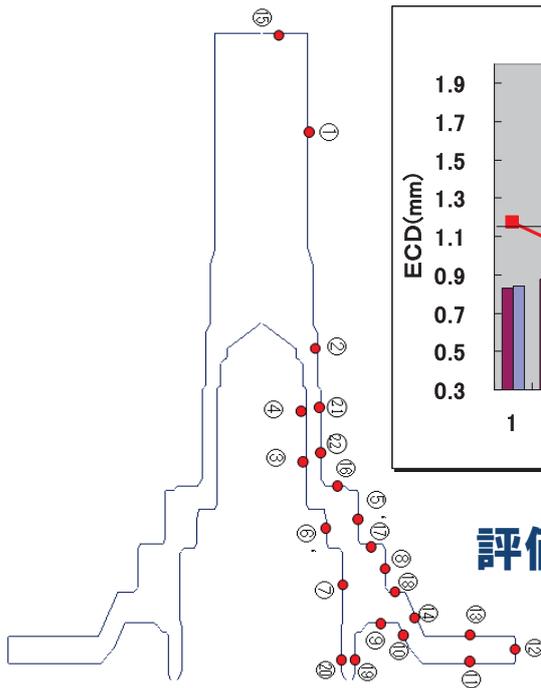
構築した熱伝達係数と領域設定の考え方



NISSAN MOTOR CORPORATION

ECD予測結果

熱伝達率のカタログ化により、解析精度は0.105mmとなった。
繰り返しバラツキ・荷姿内の位置による差等は反映できない



評価位置22点のトータル予測誤差は0.105mm

$$\text{予測誤差} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{差}_i)^2}{n}}$$

<Agenda>

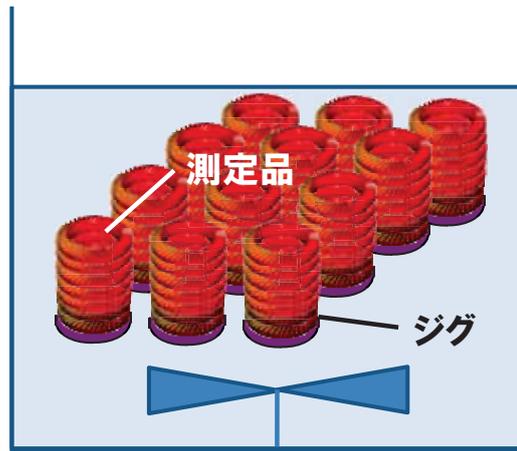
- ・日産自動車と工程のご紹介
- ・浸炭焼入れ熱処理とハイポイドギアの製造方法
- ・熱処理歪の要因調査
- ・熱伝達率のカタログ化
- ・**熱伝達率の荷姿内バラツキに関する調査**
- ・二相流解析に関する調査
- ・まとめ

荷姿内の冷却ばらつきを反映させる検討



対象部品
(輪物, ハイポイドギア)

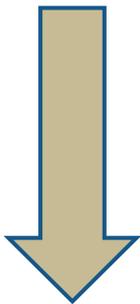
材質	SCr417H
外形	145(mm)
内径	88(mm)
歯数(組合せ)	37(37/15)
歯幅	22.5(mm)
モジュール	3.919



NISSAN MOTOR CORPORATION

歪・熱処理品質の把握

集団荷姿での
浸炭焼入れ 及び
焼入冷却速度把握実験



熱処理歪の実測

部品表面での
熱伝達率の算出

熱処理歪・品質
シミュレーション

比較検証

焼入状況の把握

油槽内の油流れ
把握実験

油槽内の油流れ
シミュレーション

比較検証

実験

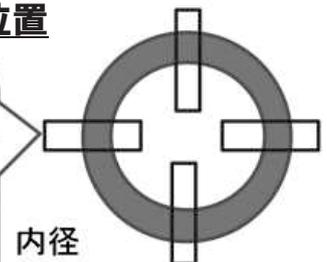
シミュレーション

検証

冷却速度測定位置



熱電対径 1.6mm



温度測定位置

内径, 外周, 背面

:表面から1.5mm

歯面: 歯の体積中心

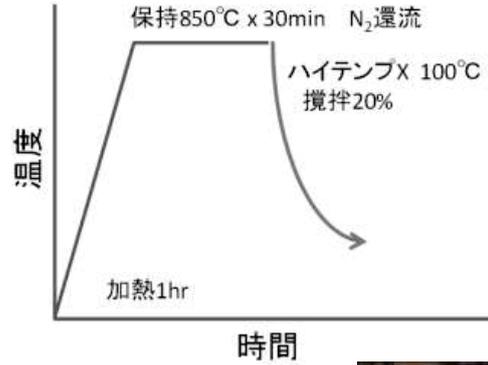
NISSAN MOTOR CORPORATION

実験方法

1) 測定品 浸炭処理



3) 焼入れ



2) ダミー品 浸炭処理



時間

時間



焼入荷姿



焼入実験炉



焼入実験の様子

NISSAN MOTOR CORPORATION

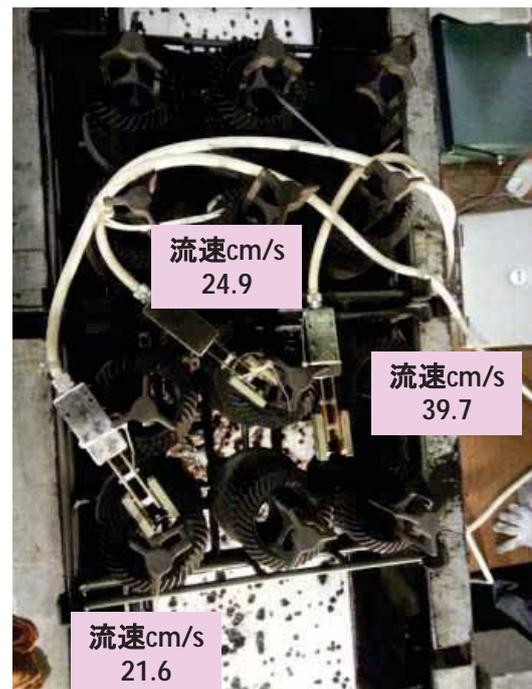
流速測定実測結果

装置外観(片袖油槽)

攪拌機



プローブ配置:測温位置

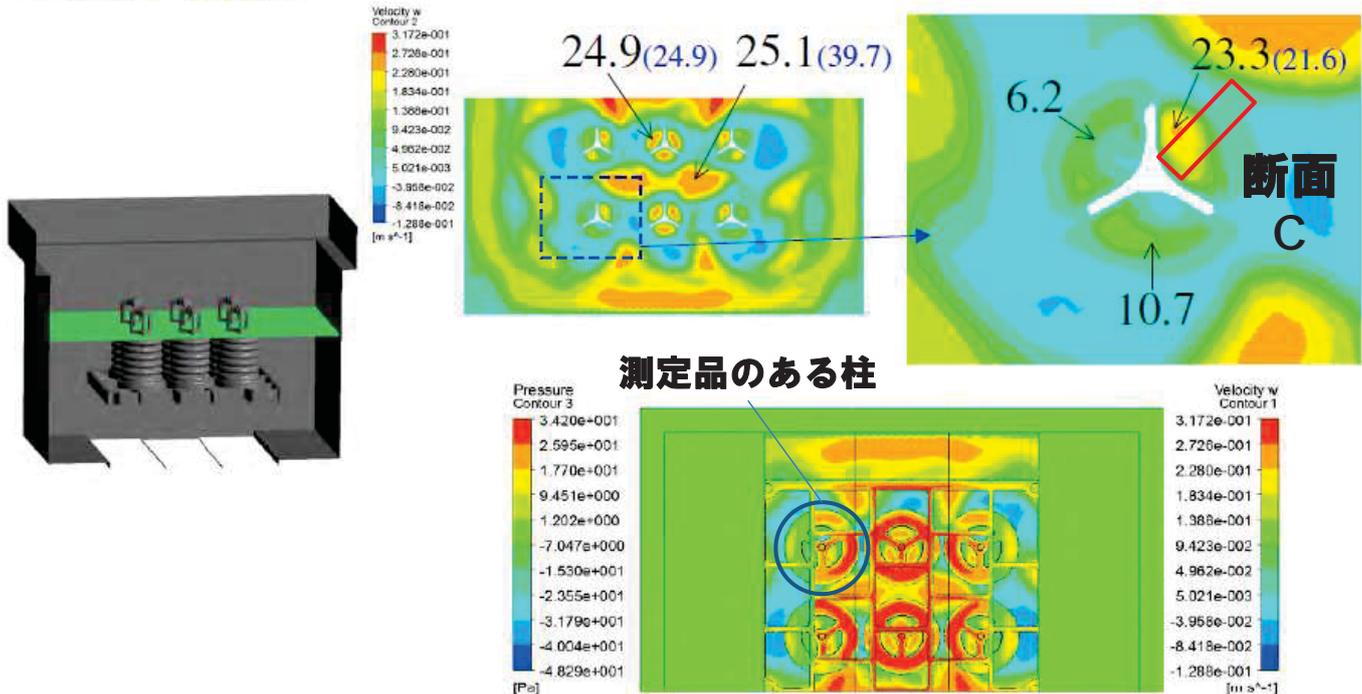


処理物の上部は流速が遅く、処理物の間は流速が速い

NISSAN MOTOR CORPORATION

流体解析と流速実測結果の比較

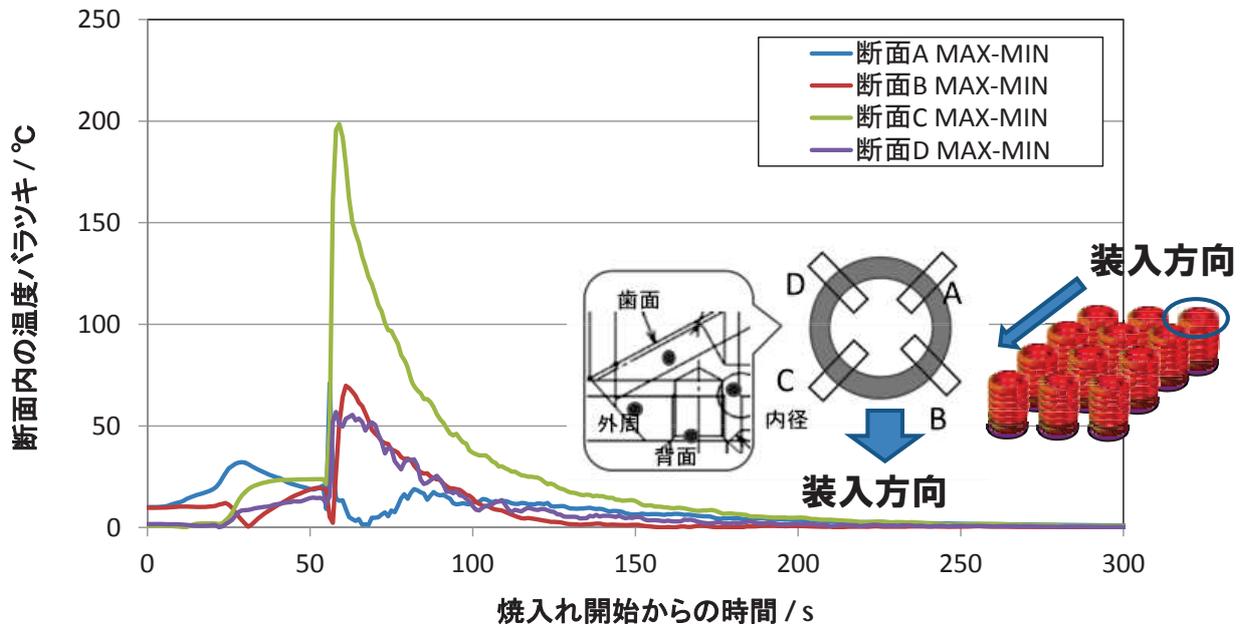
* 解析値(実測値)



- ・実測流速と解析の流速は近くなった。
- ・冷却速度バラツキの大きい断面Cの近傍は流速勾配が大きくなっている

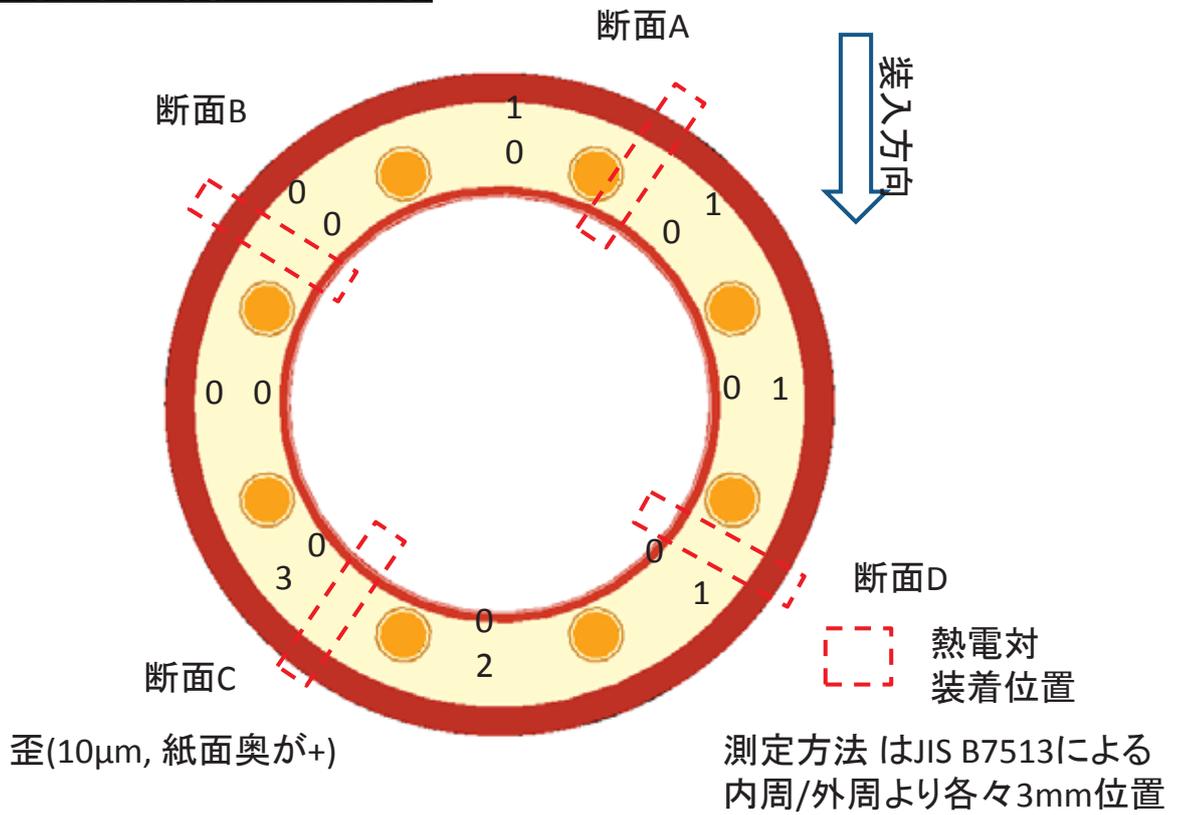
NISSAN MOTOR CORPORATION

焼入れ時断面内温度ばらつき



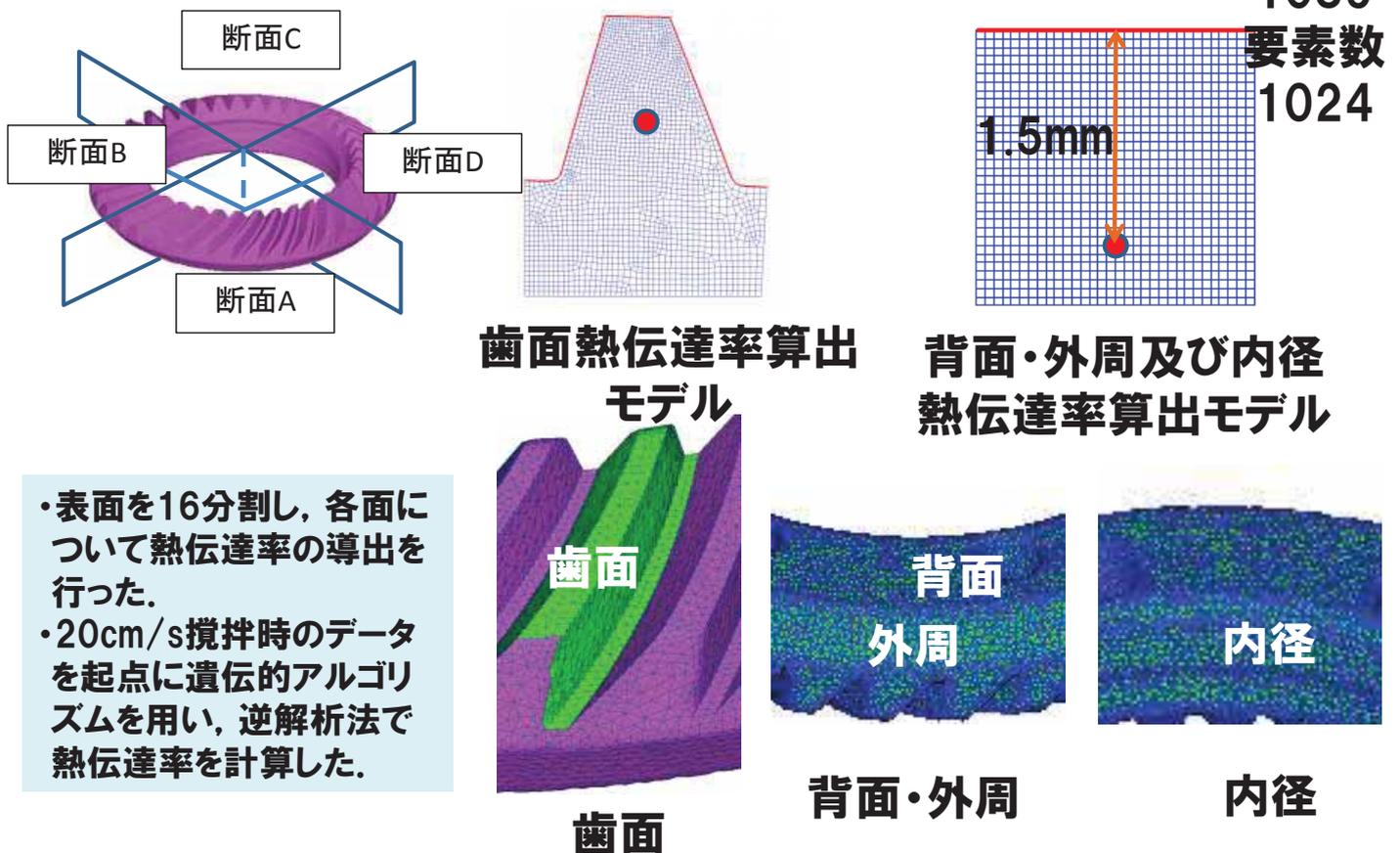
- ・冷却速度バラツキは断面 C>B≒D>Aとなっている
- ・冷却速度ばらつきが最大になる時間は断面によらず60秒近傍である

熱処理歪 (背面平面度) 測定結果

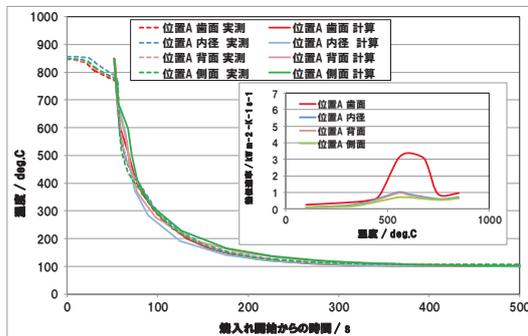
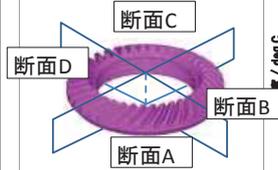
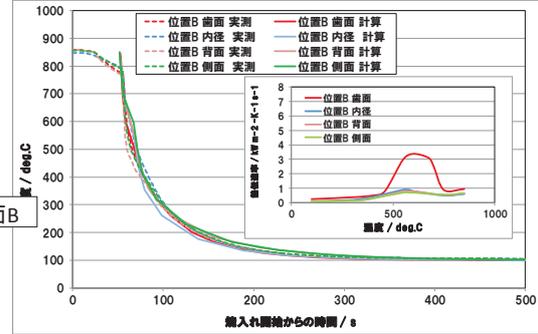
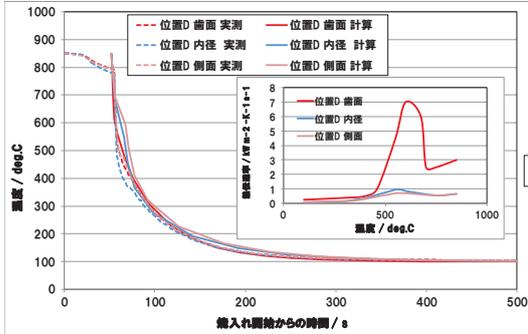
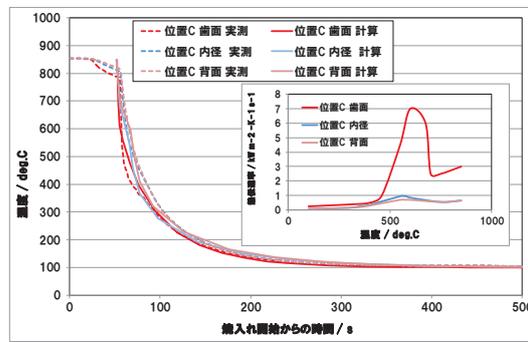


・冷却速度バラツキの最大となる断面Cで、背面の変形も最大となった

熱伝達率導出方法



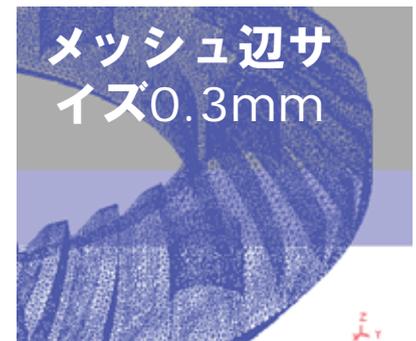
熱伝達率導結果



- 沸騰段階での歯面の熱伝達率は他の部位に較べ大きい。
- 蒸気膜段階の歯面の熱伝達率の断面間のバラツキは他の部位に較べて大きい
- 断面Cでの熱伝達率バラツキは他の断面に比較して大きい

NISSAN MOTOR CORPORATION

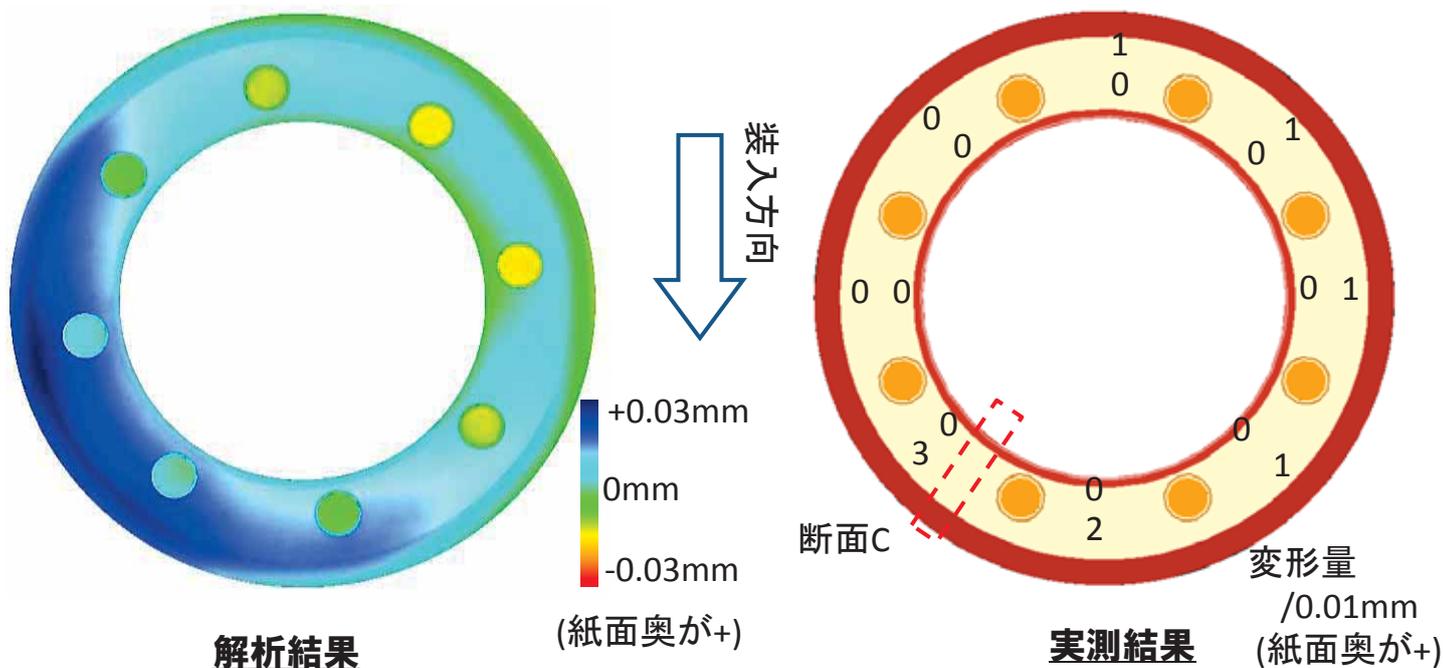
項目	内容
ソルバ	DEFORM-HT V10.2 64bit
ワークステーション	HP Z420 (Windows7)
CPU, メモリ	Inter Xeon 2.8GHz(4core), 32GB
計算時間	約480Hr(浸炭, 加熱含む)
焼入計算ステップ	0.0001s(初期), 5°Cステップに自動調整
要素数	814763
節点数	172946
メッシュ形式	テトラ, 均一メッシュ



項目	内容
浸炭条件	930°C浸炭 表面炭素濃度0.67%, ECD0.85mm狙
焼入条件	焼入保持温度850°Cx30min, 冷却条件 冷却曲線より DEFORM-HTの熱伝達率計算WZを使用.
材料データ	SCr417H (JMatProによる)

NISSAN MOTOR CORPORATION

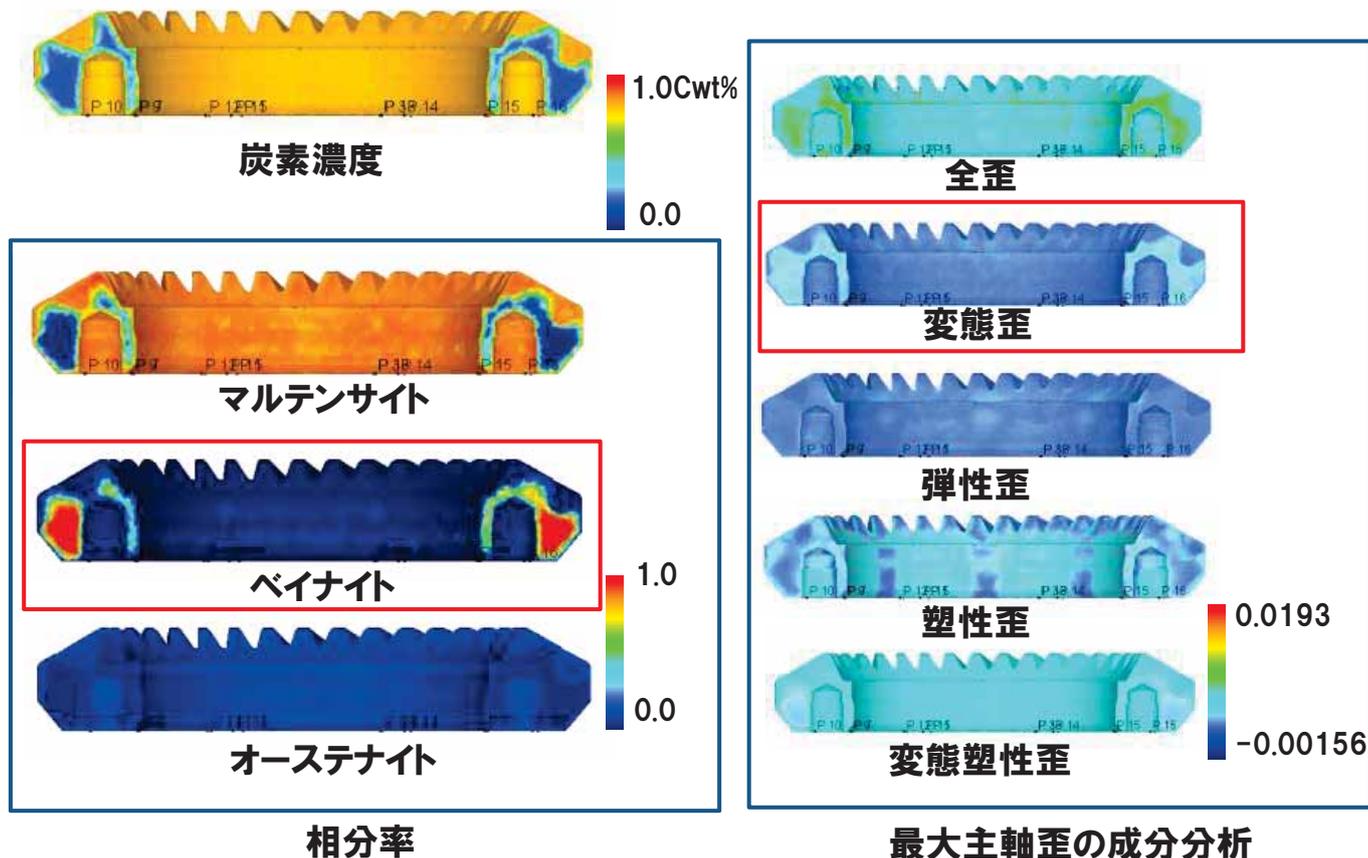
シミュレーション結果の出力と歪要因の分析



流体解析を用いることで、歪の傾向を再現できる可能性が見いだせた

NISSAN MOTOR CORPORATION

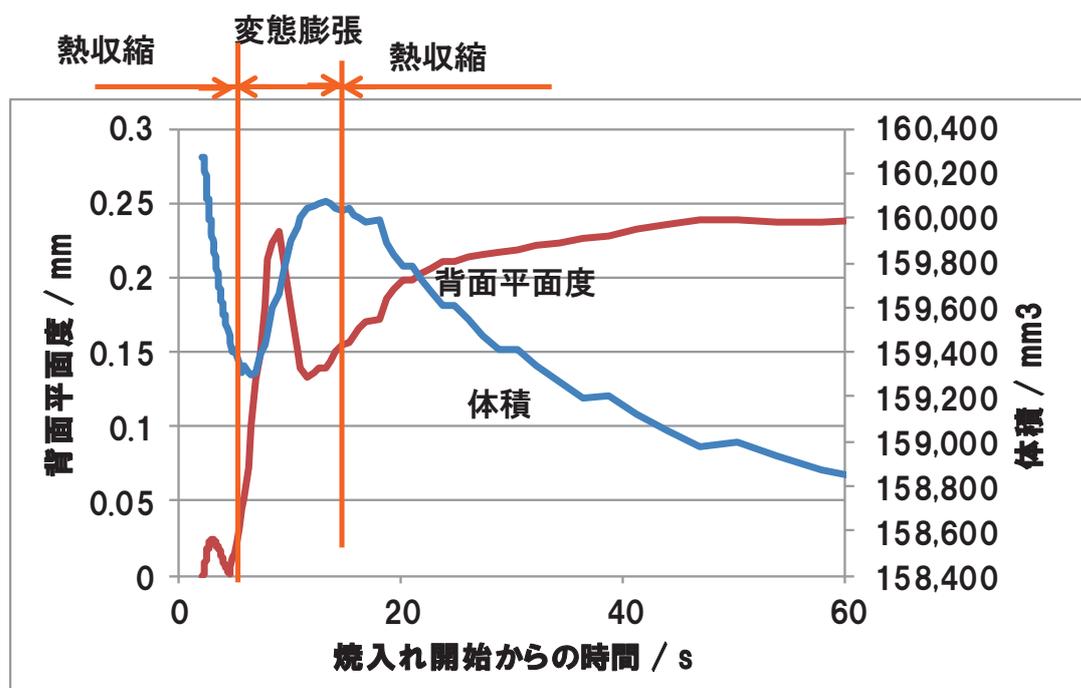
<活用例>シミュレーション結果の出力と歪要因の分析①



- ・ベイナイト変態の生じる断面内部で変態歪が大きくなっている。
- ・変態塑性歪は全体にほぼ均一に発生している。

NISSAN MOTOR CORPORATION

<活用例>歪の要因分析②</h2>

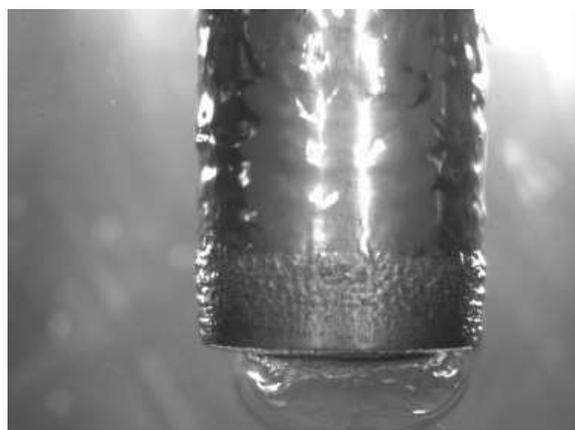
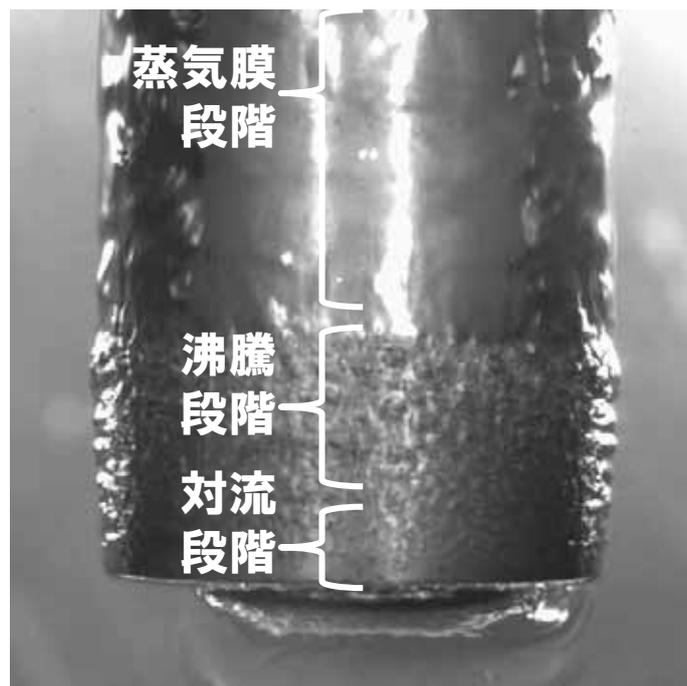


- 焼き入れ初期 (0-20秒) 付近で変形量が決定している。
- 0-20秒近傍では変態による膨張・収縮が起きている

<Agenda>

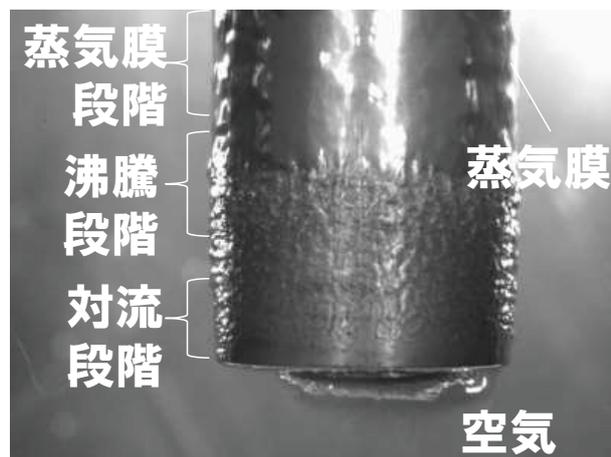
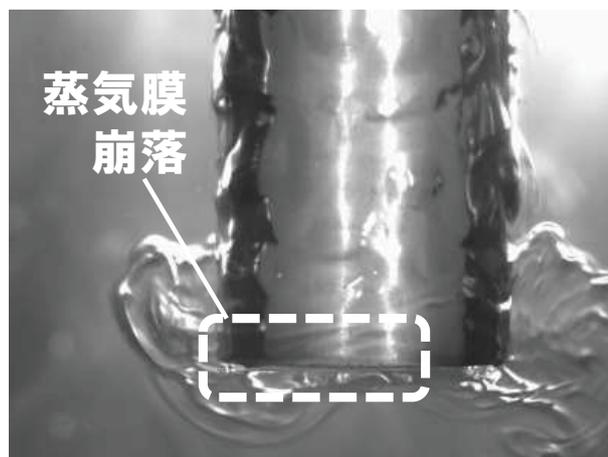
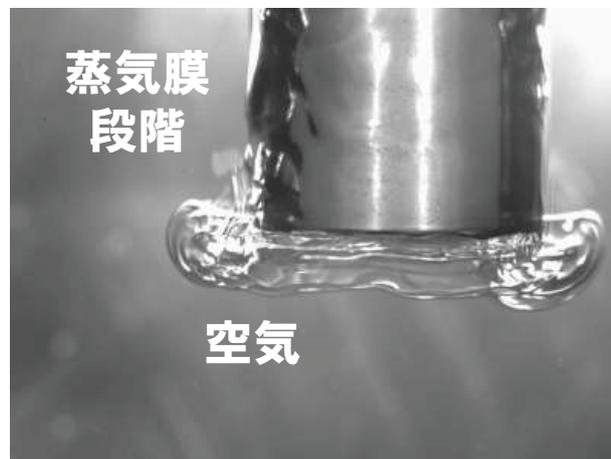
- 日産自動車と工程のご紹介
- 浸炭焼入れ熱処理とハイポイドギアの製造方法
- 熱処理歪の要因調査
- 熱伝達率のカタログ化
- 熱伝達率の荷姿内バラツキに関する調査
- **二相流解析に関する調査**
- まとめ

二相流解析を用いて冷却状況を予測する試み



丸棒での焼入時の蒸気膜崩落の様子

NISSAN MOTOR CORPORATION



NISSAN MOTOR CORPORATION

構成式モデル (1)

(1) 気相と液相それぞれの質量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k) + \nabla(\rho_k \alpha_k v_k) = \Gamma_k$$

(2) 気相と液相それぞれの運動量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k v_k) + \nabla(\rho_k \alpha_k v_k v_k) = -\nabla(\alpha_k \tau_k) - F_{wk} - F_{ik} - F_{gk} - \alpha_k \nabla P + \Gamma_k v_{ik}$$

$$F_{ik} = F_{bk} + F_{dk} + F_{mk}$$

(3) 気相と液相それぞれのエネルギー保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k h_k) + \nabla(\rho_k \alpha_k h_k v_k) = -\nabla(\alpha_k q_k) + \alpha_k \frac{DP}{Dt} + \Gamma_k h_{ik} + q_{ik} + q_{wk}$$

(4) 固体の熱伝導方程式 (エネルギー方程式)

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T$$

ここで、 k : 液相か気相かを表すインデックス
($k=1$ のときは気体を、 $k=2$ のときは液体を表す)

ρ_k : k 相の密度

α_k : k 相の体積割合

v_k : k 相の速度

Γ_k : k 相の質量生成率 (沸騰と凝縮速度)

τ_k : k 相のせん断応力

F_{wk} : 壁面が k 相に及ぼす摩擦力

F_{ik} : 界面摩擦力 (全体)

F_{bk} : 気泡流領域における気液界面摩擦力 (気泡と液体の間で働く力)

F_{dk} : 噴霧流領域における気液界面摩擦力 (液滴と気体の間で働く力)

F_{mk} : 中間領域における気液界面摩擦力

g_k : 重力加速度

F_{gk} : 体積力として k 相に働く重力 (= $\rho_k \alpha_k g_k$)

P : 圧力 (静圧)

v_{ik} : 気液界面の速度 (相手側の速度を使用)

h_{ik} : k 相のエンタルピー

q_k : k 相の熱流束

q_{ik} : 気液界面での k 相への熱流束

q_{wk} : 壁面での k 相への熱流束

ρ_s : 固体の密度

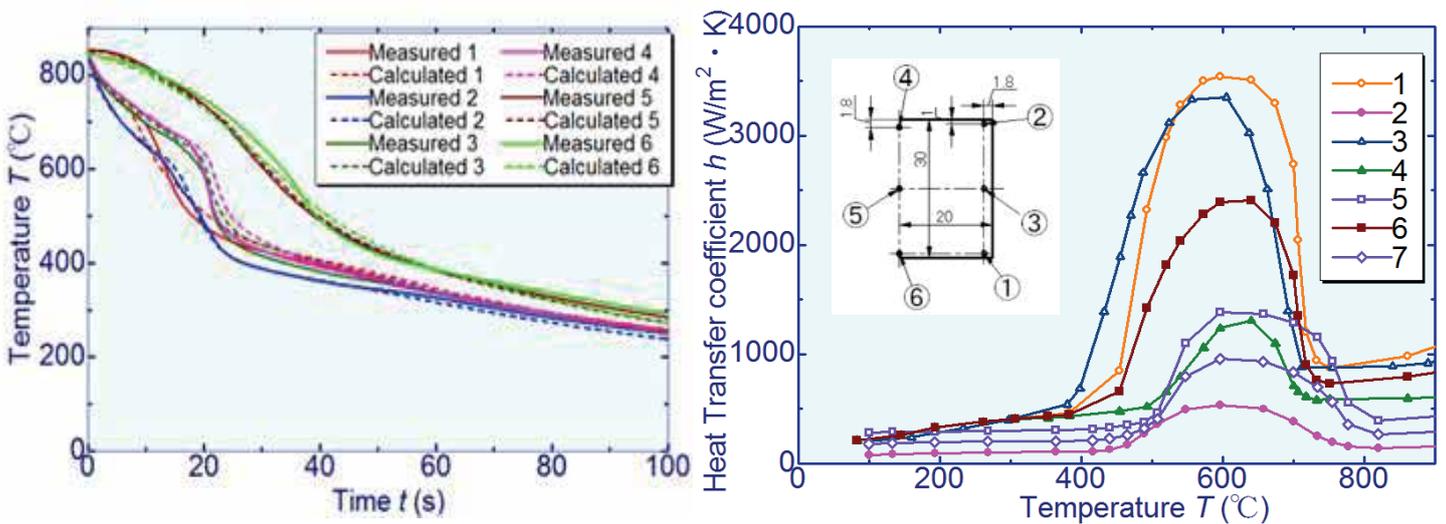
c_s : 固体の比熱

T : 温度

λ_s : 固体の熱伝導率

NISSAN MOTOR CORPORATION

物性値と冷却曲線



実測冷却曲線と熱伝達率(引用元:奈良崎先生ご提供資料)

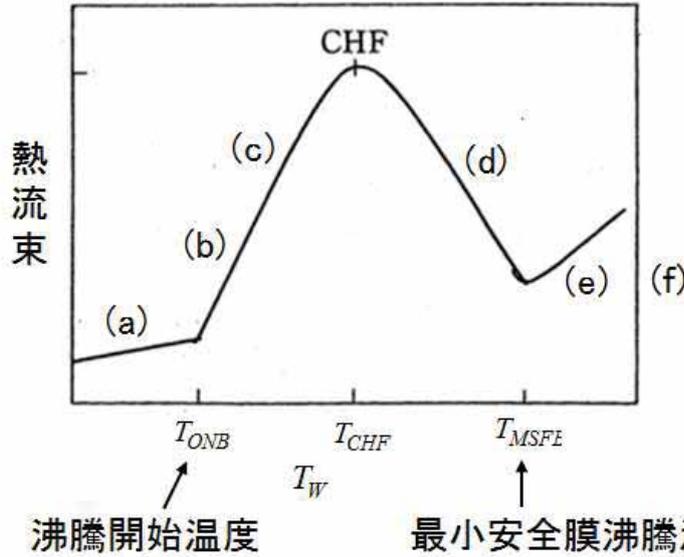
密度(kg/m ³)	7920
比熱(J/kg/K)	499
熱伝導率(W/m/K)	16.0

SUS304の物性値

引用元:<http://materiallab.seesaa.net/article/155239503.html>

NISSAN MOTOR CORPORATION

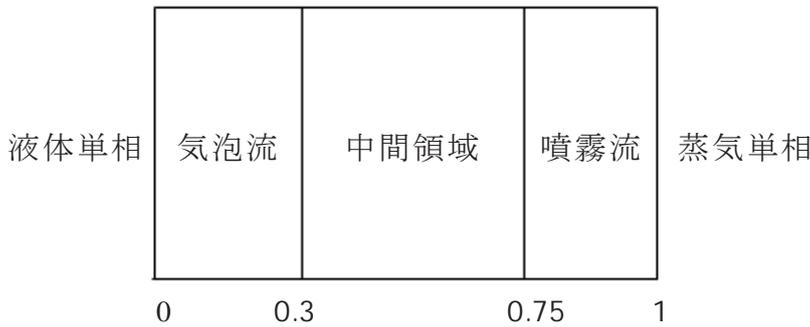
沸騰の様式



- (a) 液单相
- (b) サブクール核沸騰
- (c) 飽和核沸騰
- (d) 遷移沸騰
- (e) 膜沸騰
- (f) 蒸気单相

沸騰開始温度

最小安全膜沸騰温度



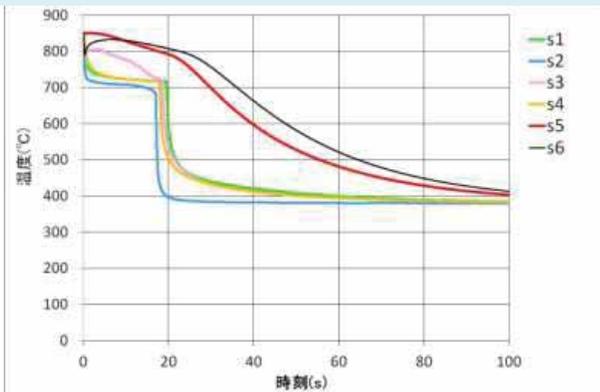
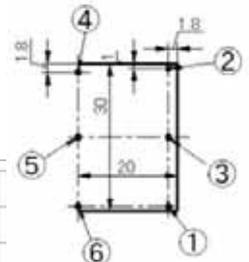
	液体	気体
密度(kg/m ³)	894.2	3.960
粘性係数(Pa·s)	0.01663 (=894.2 × 18.60E-6)	2.767E-5
定圧比熱(J/kg/K)	4186	3348.8
熱伝導率(W/m/K)	0.1163	0.04651
飽和エンタルピー(J/kg)	2.734E6	2.943E6
表面張力係数(N/m)	0.300	
飽和温度(°C)	380 (図3.4より推定)	

引用元：石油系燃料, 流体の熱物性値集, 日本機械学会, 2006. 丸善.

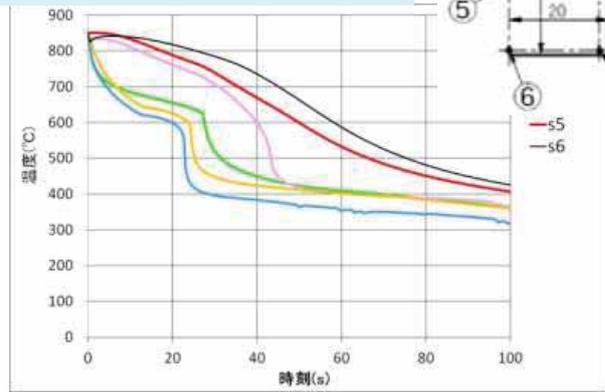
NISSAN MOTOR CORPORATION

混相流解析による冷却曲線

冷却速度の順序は一致するが、冷却曲線形状は大きく異なる。
エッジ効果 (角部が優先的に蒸気膜崩落する現象) が再現できた

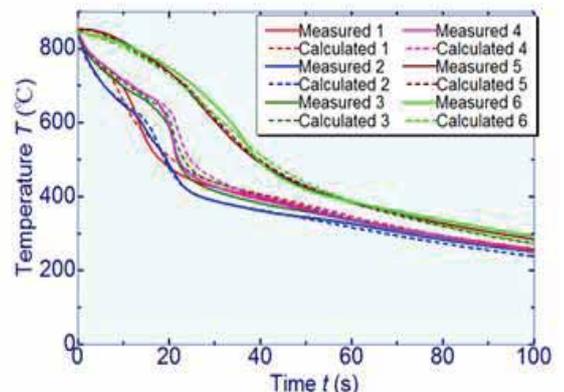


CASE1
計算条件



CASE2

	Case1	Case2
気相单相・凝縮領域	考慮しない	考慮しない
最小安全膜沸騰温度	750°C	600°C
限界熱流束温度	650°C	400°C
蒸気膜崩落が起こるポイド率 (film break)	崩落モデルなし	0.001
膜沸騰熱伝達率に対する係数	20	4
遷移沸騰熱伝達率に対する係数	1	3
核沸騰熱伝達率に対する係数	1	0.5
液相单相時の熱伝達率に対する係数	1	10
バルクの物理量の定義位置	1mm	1mm
時間刻み	0.005	0.005



実測の冷却曲線

NISSAN MOTOR CORPORATION

<Agenda>

- ・ 日産自動車と工程のご紹介
- ・ 浸炭焼入れ熱処理とハイポイドギアの製造方法
- ・ 熱処理歪の要因調査
- ・ 熱伝達率のカタログ化
- ・ 熱伝達率の荷姿内バラツキに関する調査
- ・ 二相流解析に関する調査
- ・ **まとめ**

<まとめ>

- ・ 荷姿内バラツキ等を考慮できる熱伝達率の導出方法と熱処理品質シミュレーションを組み合わせることで、量産での集団焼入れ処理での熱処理品質予測、品質向上にシミュレーションを用いる事が出来る可能性がある
- ・ 二相流解析によって焼入時の冷却状態を予測できる可能性がある

END

NISSAN MOTOR CORPORATION

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MPの機能紹介

主管研究員 杉中 隆史

気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MPによる焼入れ解析セミナー
2015年10月22日（木）
アドバンスソフト株式会社

発表内容

- 焼入れ解析
- 焼入れの気液二相流解析
- 二流体モデル(Euler-Euler法)の特長
- 二流体モデル(Euler-Euler法)の基礎方程式
- 焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式
- まとめ



メカニズムを解明する

焼入れ解析

ボイド率分布
速度分布
温度分布

気液二相流解析ソフトウェアの担当部分

出力
気液二相流解析

流体ソフトによる
固体熱伝導解析の
相変態はカスタマ
イズで対応可能

表面熱伝達率

入力(境界条件)

固体熱伝導解析
変形と残留応力解析

鋼などでは
相変態を考慮

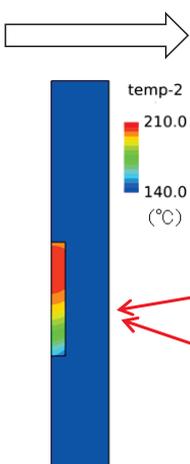
構造解析ソフトウェアの担当部分



焼入れの気液二相流解析

①壁面上の各メッシュで壁面熱伝達様式を以下から判別する

- 膜沸騰
- ↓
- 遷移沸騰
- ↓
- 飽和核沸騰
- ↓
- サブクール核沸騰
- ↓
- 液単相

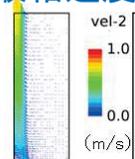


固体温度

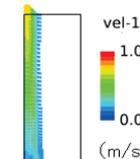
③固体の温度を計算する

②気液二相流動と壁面温度から、壁面上の各メッシュで熱流束を計算する

液相速度



⑥気泡と液体の界面摩擦力と、液体温度分布による自然対流を考慮して液体の流動を計算する



気相速度

⑤気泡の流動を計算する

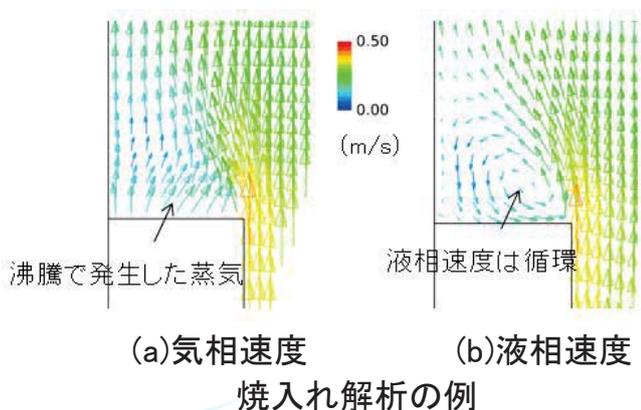
④気泡と液体の流動を考慮して沸騰と凝縮を計算する

ボイド率

各時刻において、全てのメッシュで、気相と液相の質量・運動量・エネルギー輸送と①から⑥を収束させる(陰解法を使用)

二流体モデル(Euler-Euler法)の特長

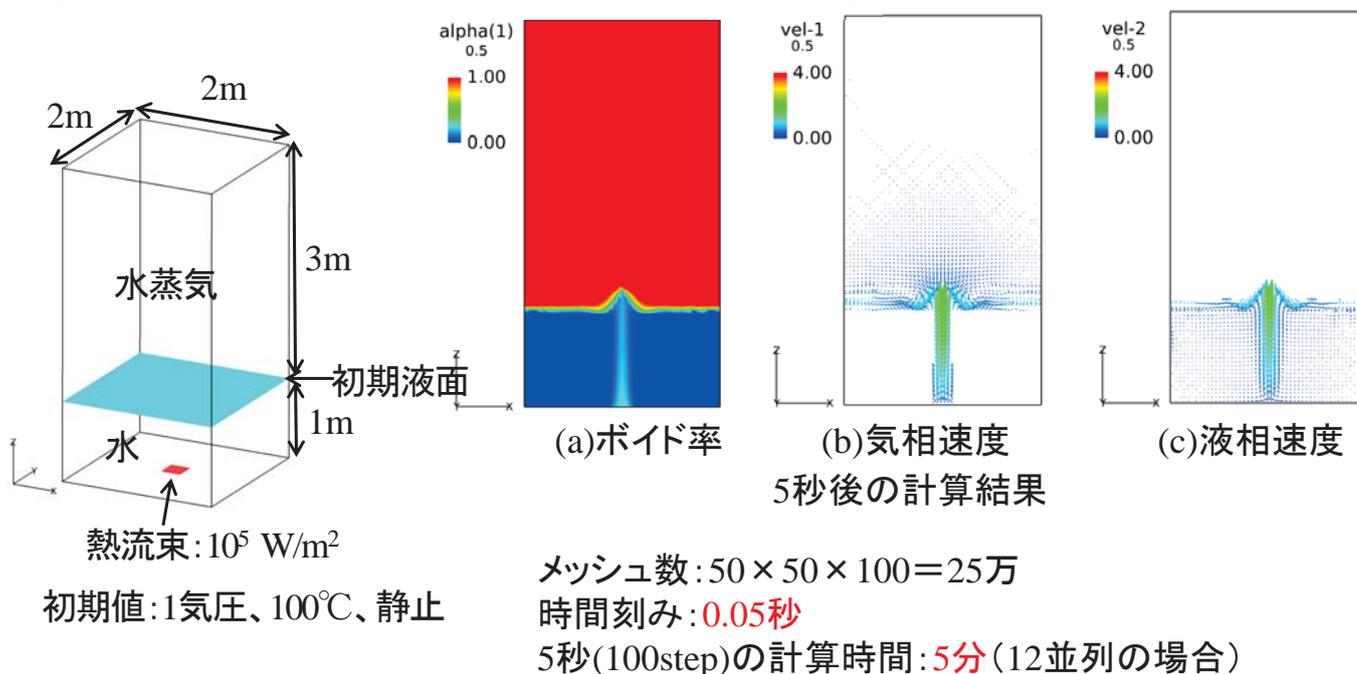
- ・気相と液相で、質量・運動量・エネルギーの保存方程式を別々に解く。
 →同一メッシュで、気相と液相の異なる速度を計算できる。
 →二流体の力学的非平衡状態と熱的非平衡状態を計算できる。
- ・気液界面や壁面での質量・運動量・エネルギー輸送は構成方程式(実験相関式)を使用する。
- ・メッシュより小さい気泡や液滴の質量を保存して計算できる。
 →メッシュサイズや時間刻みが大きくとれ、実用的な解析ができる。



二流体モデル(Euler-Euler法)の特長

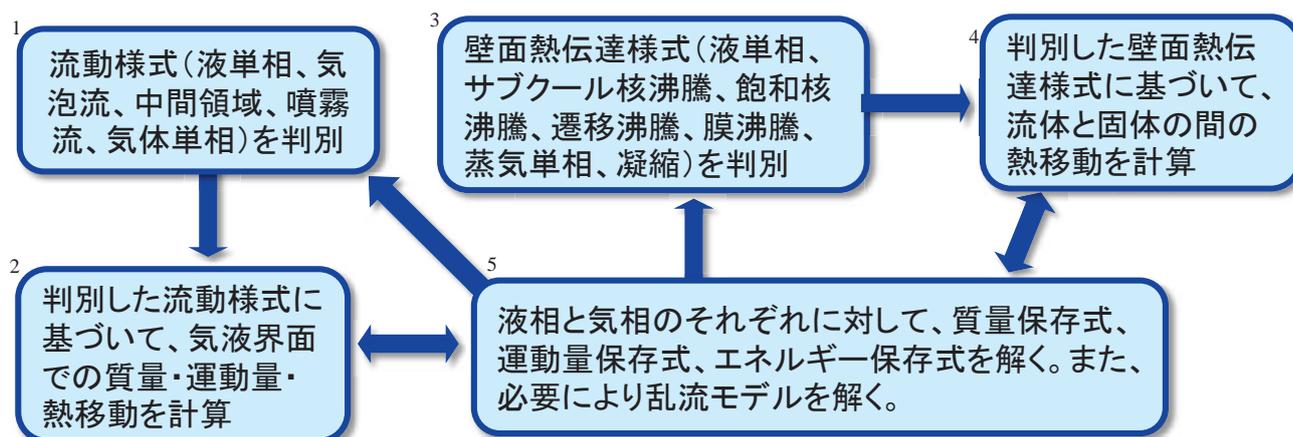
粗いメッシュで気泡流と自由表面と相変化を扱うことができる。

沸騰解析の例(Advance/FrontFlow/MP使用)



二流体モデル(Euler-Euler法)の基礎方程式

- ・気相と液相の質量保存方程式
- ・気相と液相の運動量保存方程式
- ・気相と液相のエネルギー保存方程式
- ・構成方程式



焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

流動様式

各時刻において、全てのメッシュで流動様式を求め、流動様式に応じて構成方程式を切り替える。

①混相状態は気泡流のみ

②混相状態は気泡流・中間領域・噴霧流



①と②の両方とも、沸騰した気泡が低温の液体で凝縮する挙動を計算することができる。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

気液間の運動量交換

気泡流の場合には、以下の式で単位体積当たりの力を表現する。

$$F_{D,g} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{8} a_j C_D \rho_l |V_g - V_l| (V_g - V_l)$$

気泡の運動

- ①気泡径が小さいか表面張力が大きい場合
- ・気泡は球形で直線的に運動する。
 - ・高純度の液体では、気泡内部に循環が形成されて粘性抵抗が減少して、終端速度が大きくなる。
- ②気泡径が大きい場合表面張力が小さい場合
- ・気泡は非球形で振動的に運動する。
 - ・液体の純度は影響しない。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

①と②の両方を考慮できて、広範囲な気泡径と流体物性に対する実験データをフィッティングした神戸大・富山らの次式を使用している。

$$C_D = \begin{cases} \max \left[\min \left[\frac{16}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{48}{Re} \right], \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} & \text{高純度の液体の場合} \\ \max \left[\min \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{72}{Re} \right], \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} & \text{中純度の液体の場合} \\ \max \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} & \text{低純度の液体の場合} \end{cases}$$

ここで Eo : エトベス数(浮力と表面張力の比)

M : モルトン数(流体の物性値の影響を示す)

Re : 気泡レイノルズ数(Eo 、 M 、 C_D から計算)

富山・ほか, 機論, 61-587, B(1995), 2357

- ・ $10^{-2} < Eo < 10^3$ 、 $10^{-14} < M < 10^7$ 、 $10^{-3} < Re < 10^5$ という広範囲な気泡径と流体物性において実測値と良好に一致し、気泡が群として運動する影響が考慮されている。
- ・表面張力支配の小さいスケールの流れでは、気泡径(例 0.01~0.1 μm)と C_D (例 Ishiiらの式)で与える。
- ・液滴流の C_D は剛体球の実験式を使用している。
- ・中間領域では、気泡流と噴霧流の界面摩擦力を3次式で滑らかに補間している。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

気液間の熱伝達

気泡流に対する相間熱伝達率 h_{il} 、 h_{ig} と界面積 A_i の計算式

$$h_{il} = \begin{cases} \max(h_{il1}, h_{il2}) & (T_l \geq T_s) \\ 0.02\rho_l V_r \frac{\partial e_l}{\partial T_l} & (T_l < T_s) \end{cases} \quad \cdot \cdot \text{液体側の相間熱伝達率}$$

$$h_{ig} = \begin{cases} 1000 & (T_g \geq T_s) \\ = 10000 & (T_g < T_s) \end{cases} \quad \cdot \cdot \text{蒸気側の相間熱伝達率}$$

$$A_i = 6\alpha_g \frac{1}{D_b} \quad \cdot \cdot \text{界面積}$$

ここで

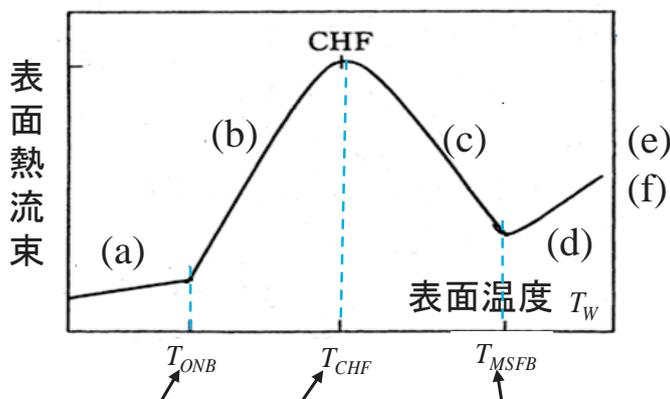
$$h_{il1} = \frac{\lambda_l}{D_b} (2 + 0.74\text{Re}_b^{0.5})$$

$$h_{il2} = 3.81972(T_l - T_s) \frac{\lambda_l}{D_b} \frac{\rho_l \frac{\partial e_l}{\partial T_l}}{\rho_g (h_{sg} - h_{sl})}$$

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

(a)から(g)までの表面熱流束式を切り替えて使用している。例えばRohsenowの核沸騰式だけで全体を表現することはできない。

沸騰曲線



沸騰開始温度 限界熱流束温度 最小安全膜沸騰温度

- (a) 液単相
- (b) サブクール核沸騰(サブクール、飽和)
- (c) 遷移
- (d) 膜沸騰
- (e) 蒸気単相
- (f) 凝縮

焼入れでは、表面の熱伝達様式は (d)→(c)→(b)→(a) の順に変わる。

表面温度と流れ場に依存するバルク(温度境界層より外)の温度、速度、ボイド率を使用して、各時刻、各メッシュで、(a)から(g)を判別して、各領域の表面熱流束式を計算している。

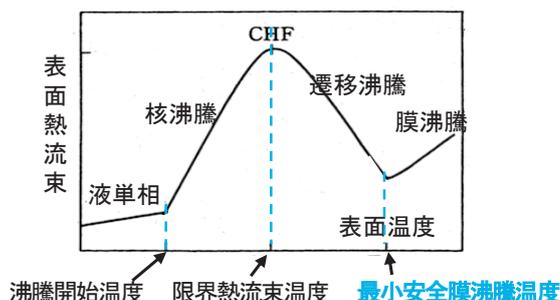
↑
バルクの物理量を使用することで、メッシュサイズに依存しないで、気液二相流の流動を考慮している。

- $T_w \leq T_{CHF}$: 膜沸騰
- $T_{CHF} < T_w \leq T_{MSFB}$: 核沸騰
- $T_{MSFB} \leq T_w$: 遷移沸騰

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

最小安全膜沸騰温度

最小安全膜沸騰温度は、膜沸騰から遷移沸騰に切り替わる表面温度のことである。



均質沸騰核生成温度 T_{HN} に基づく式で最小安全膜沸騰温度 T_{MSFB} を求めている。

$$T_{MSFB} = T_{HN} + (T_{HN} - T_l) \left(\frac{\lambda_l \rho_l C_{pl}}{\lambda_w \rho_w C_{pw}} \right)^{0.5}$$

ここで

$$T_{HN} = 705.44 - (4.722 \times 10^{-2}) DP + (2.3907 \times 10^{-5}) DP^2 - (5.8193 \times 10^{-9}) DP^3$$

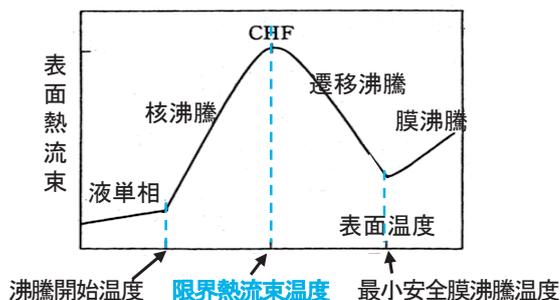
$$DP = 3203.6 - P$$

T_{MSFB} は流体の種類、表面性状、形状、材質に影響される。
上記のほかに、実験式あるいは実験値を場所ごとに与えることができる。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

限界熱流束温度

限界熱流束温度は、遷移沸騰から核沸騰に切り替わる表面温度のことである。



以下の(a)と(b)の熱流束相関式が一致するように限界熱流束温度 T_{CHF} を求めている。

(a)Chenによる核沸騰熱流束式

ここで

$$q_{CHEN}'' = h_{nucb} (T_w - T_l)$$

$$h_{nucb} = 0.00122 \frac{\lambda_l^{0.79} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} (h_{sg} - h_{sl})^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_w - T_s)^{0.24} (p_w - p)^{0.75} S W_{n2}$$

(b)Zuberによる限界熱流束式

$$q_{CHF}'' = 0.15 h_{fg} \rho_g^{0.5} \{ \sigma g (\rho_l - \rho_g) \}^{0.25}$$

$$S = \begin{cases} 1.0 & (\text{Re}_{TPP} \leq 0) \\ (1 + 0.12 \text{Re}_{TPP}^{1.14})^{-1} & (0 < \text{Re}_{TPP} \leq 32.5) \\ (1 + 0.42 \text{Re}_{TPP}^{0.78})^{-1} & (32.5 < \text{Re}_{TPP} \leq 70) \\ (1 + 0.42 \times 70^{0.78})^{-1} & (70 < \text{Re}_{TPP}) \end{cases}$$

上記のほかに、実験式あるいは実験値を場所ごとに与えることができる。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

膜沸騰の表面熱流束

輻射熱伝達率、Bromleyの膜沸騰熱伝達率、Forslund-Rohsenowの液滴の熱伝達率で液相の熱伝達率 h_{wl} を表現している。

$$h_{wl} = h_r \frac{T_W - T_S}{T_W - T_l} + h_f \frac{T_W - T_S}{T_W - T_l} + h_d$$

ここで

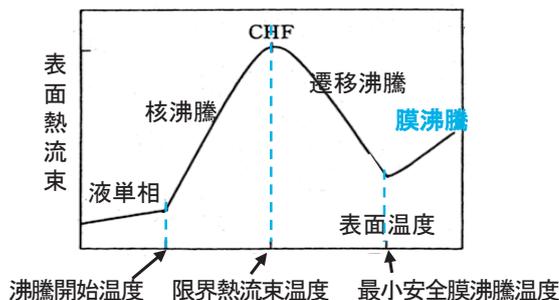
$$h_r = (1 - \alpha_g) \sigma_{SB} \varepsilon_r \frac{T_W^4 - T_S^4}{T_W - T_S}$$

$$h_f = \begin{cases} h_{f0} & (\alpha_g \leq 0.5) \\ h_{f0} (3 - 2X_1) X_1^2 & (0.5 < \alpha_g \leq 0.75) \\ 0 & (0.75 \leq \alpha_g) \end{cases}$$

$$h_{f0} = 0.62 \left\{ \frac{\rho_g \lambda_g^3 (\rho_l - \rho_g) g h'_{lg}}{\mu_g (T_W - T_S) \lambda} \right\}^{0.25} \quad \text{Bromleyの膜沸騰熱伝達率}$$

h_d Forslund-Rohsenowの液滴の熱伝達率

水や油の種類により修正して使用している。



焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

遷移沸騰の表面熱流束

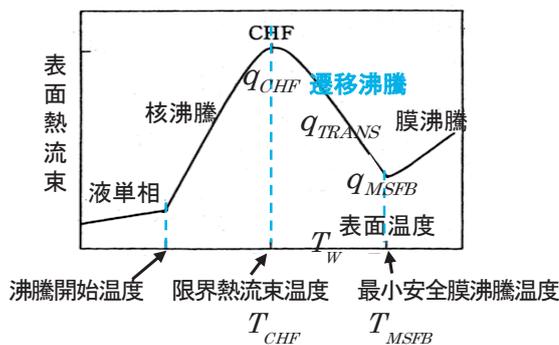
限界熱流速温度における熱流束 q_{CHF} と最小安全膜沸騰温度における熱流束 q_{MSFB} を補間して、遷移沸騰の表面熱流束 q_{TRANS} を求めている。

$$q_{TRANS} = \gamma q_{CHF} + (1 - \gamma) q_{MSFB}$$

ここで

$$\gamma = \left(\frac{T_W - T_{MSFB}}{T_{CHF} - T_{MSFB}} \right)^2$$

水や油の種類により修正して使用している。



焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

サブクール核沸騰の表面熱流束

Chenの式をサブクール域に拡張した式を使用している。

$$q_{wI} = (1 - \varepsilon)q_{NB} + \varepsilon q_C + q_{SPL}$$

ここで

$$q_{NB} = 0.00122 \frac{\lambda_l^{0.79} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} (h_{sg} - h_{sl})^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_W - T_s)^{0.24} (p_W - p)^{0.75} S W_{n2} (T_W - T_l)$$

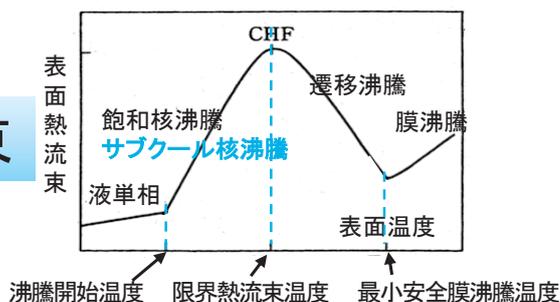
Chenの核沸騰熱流束式

q_C Hancox-Nicollの流束式から強制対流分を除いた凝縮に使用される熱流束

q_{SPL} Dittus-Boelterの乱流強制対流熱流束式とNusselt数4の大きい方を使用

ε Rouhaniモデルにより、サブクール水を熱するのに費やされる割合

水や油の種類により修正して使用している。



まとめ

気液二相流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/MPを使用して、焼入れ解析のための表面熱伝達率を解析する機能を紹介した。

沸騰を伴う気液二相流の解析

主管技師長 湊 明彦

【技術セミナー】シミュレーションによる金属熱処理特別講演
2015年10月22日（木）
アドバンスソフト株式会社

内容

- 基礎式
- 非圧縮性二流体モデルによる沸騰解析
- 圧縮性二流体モデルによる沸騰解析
- 沸騰解析の難しさについて

基礎式

(1)質量保存則

- ・蒸発による質量移行を考慮
(水 → 蒸気)

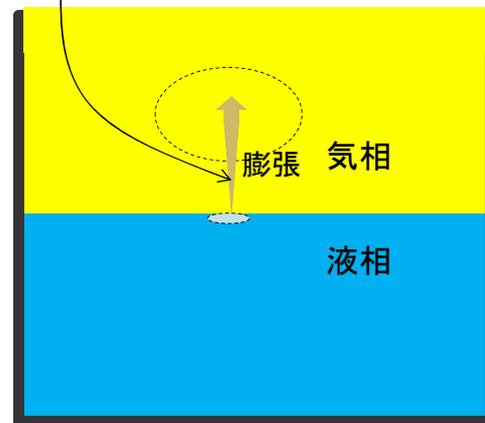
(2)運動量保存則

- ・蒸発による運動量移行を考慮
(水運動量 → 蒸気運動量)

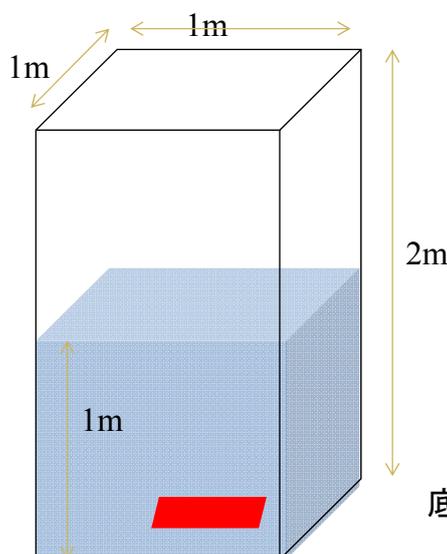
(3)エネルギー保存則

- ・蒸発によるエネルギー移行を考慮
(水エンタルピー → 蒸気エンタルピー)
(過熱水) (飽和蒸気)

運動量,エネルギーを持った質量が移行



非圧縮性二流体モデルによる 沸騰解析



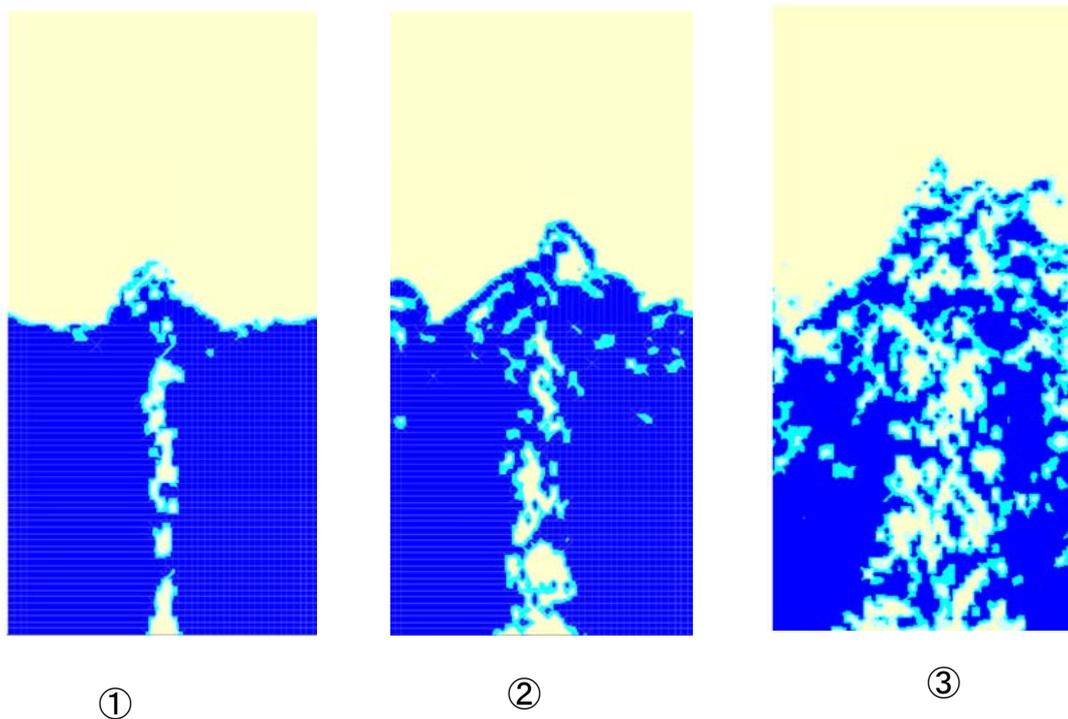
上面のみ圧力境界(大気圧)
側面,底面は壁
格子は50×50×100→25万

熱は計算せず,底面の蒸気湧き出しで模擬

底面発熱部:熱流束 $3.3 \times 10^5 \text{W/m}^2$

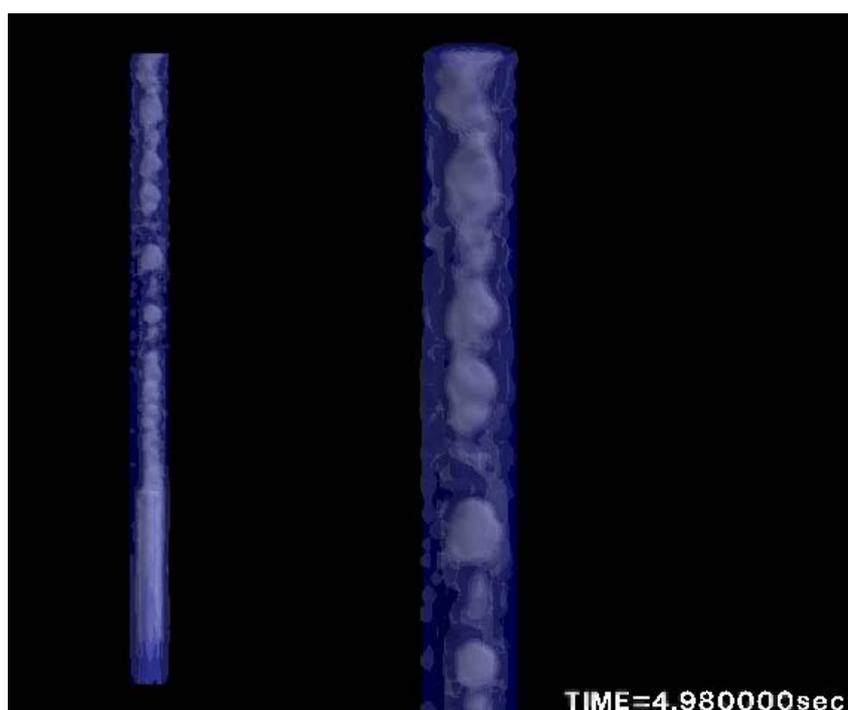
- ① 0.12m × 0.12m
- ② 0.32m × 0.32m
- ③ 0.60m × 0.60 m

3秒経過 縦断面ポイド率分布



Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

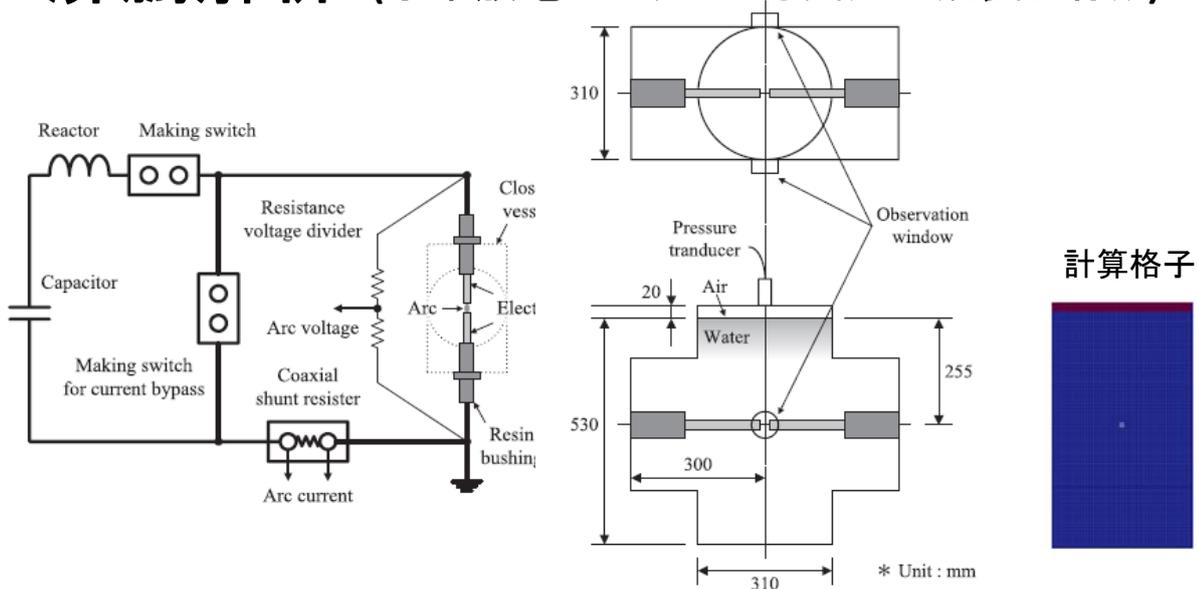
発熱する円柱を模擬した自然循環解析



Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

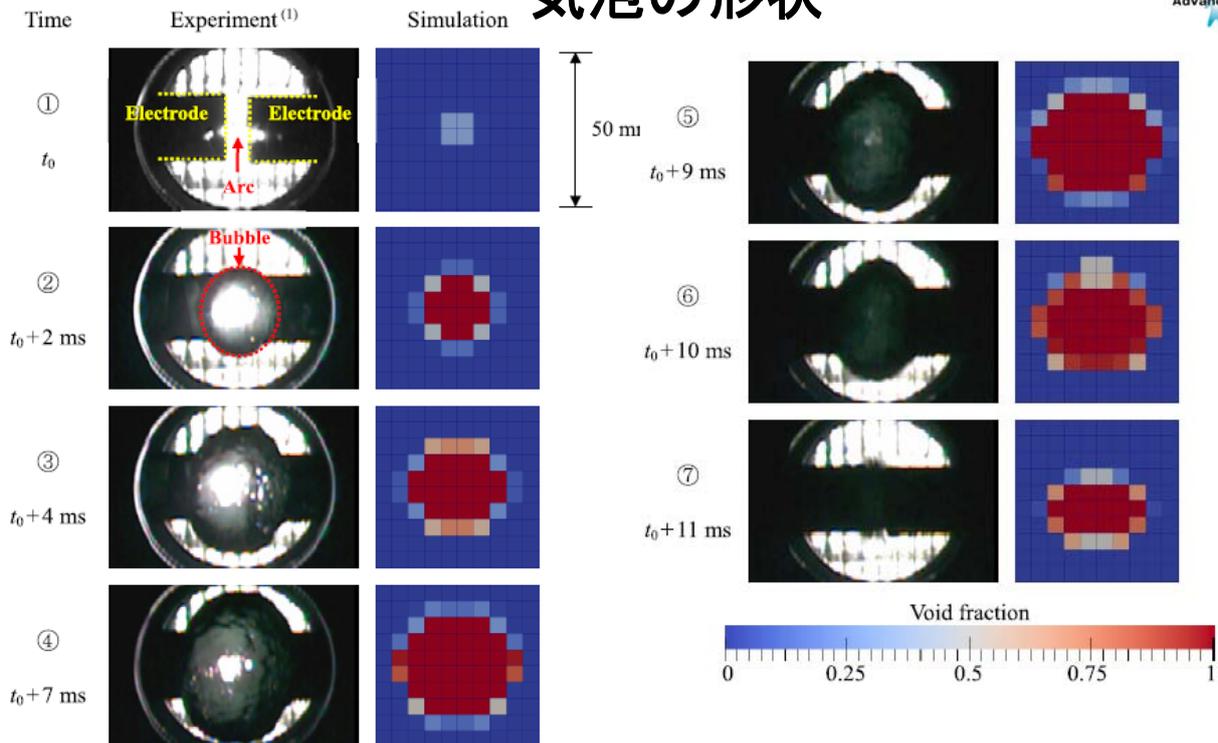
圧縮性二流体モデルによる

沸騰解析 (水中放電アークによる気泡の成長と消滅)



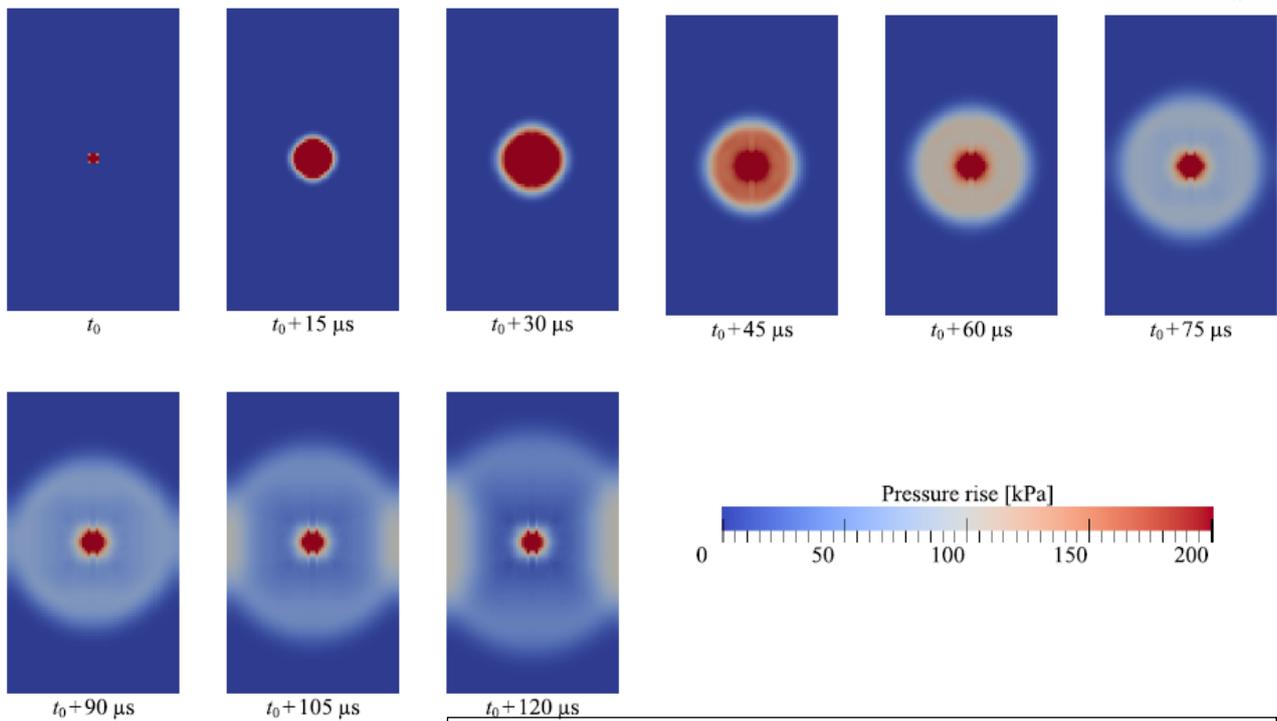
大高聡也, 田所兼, 神足将司, 天川正士
 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌)
 Vol. 134 (2014) No. 7 P 604-613
 「水中アークを対象とした圧力上昇数値解析モデルの基礎検討」

気泡の形状



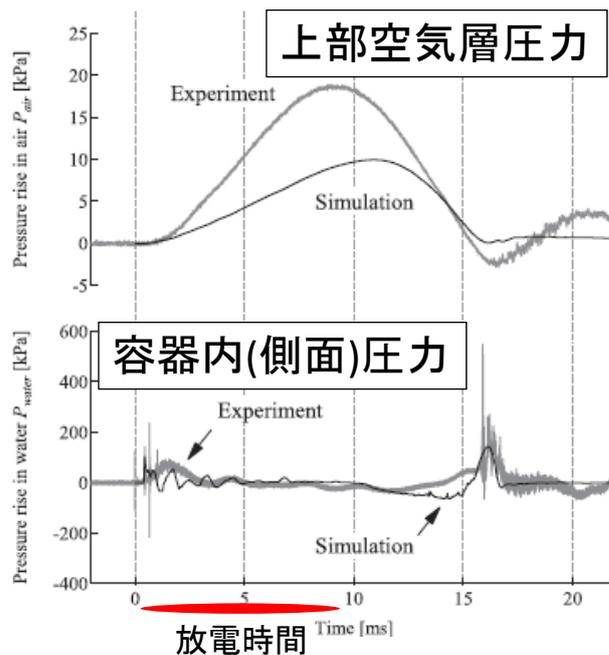
大高聡也, 田所兼, 神足将司, 天川正士
 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌)
 Vol. 134 (2014) No. 7 P 604-613
 「水中アークを対象とした圧力上昇数値解析モデルの基礎検討」

気泡発生にともなう圧力波伝播の解析



大高聡也, 田所兼, 神足将司, 天川正士
 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌)
 Vol. 134 (2014) No. 7 P 604-613
 「水中アークを対象とした圧力上昇数値解析モデルの基礎検討」

圧力挙動



大高聡也, 田所兼, 神足将司, 天川正士
 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌)
 Vol. 134 (2014) No. 7 P 604-613
 「水中アークを対象とした圧力上昇数値解析モデルの基礎検討」

沸騰解析の難しさについて

- ・熱非平衡を考慮した蒸発速度 (分子運動,熱力学)
- ・沸騰の微細機構 (マイクロレイヤー,キャビティ,沸騰核)
- ・微視的気泡/液滴の発生と運動
- ・界面の不安定 (Taylor不安定,Helmholtz不安定)
- ・界面の熱伝達 (輻射,対流,潜熱)
- ・ドライアウト/バーンアウト機構 (液膜,CCFL)

対応

解析経験
文献調査
実験との整合

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MPを使った 焼入れ解析事例紹介

主管研究員 杉中 隆史

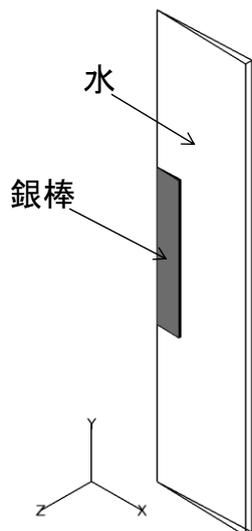
気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MPによる焼入れ解析セミナー
2015年10月22日（木）
アドバンスソフト株式会社

発表内容

- 解析事例1 銀棒の水焼入れ
- 解析事例2 銀棒の油焼入れ
- まとめ

解析事例1 銀棒の水焼入れ

解析条件

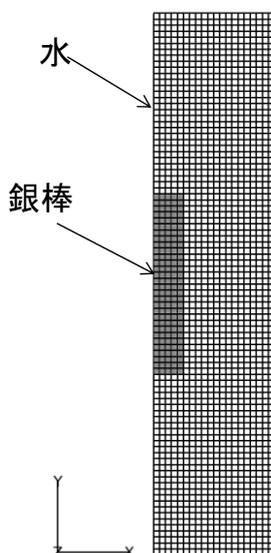


解析領域全体図

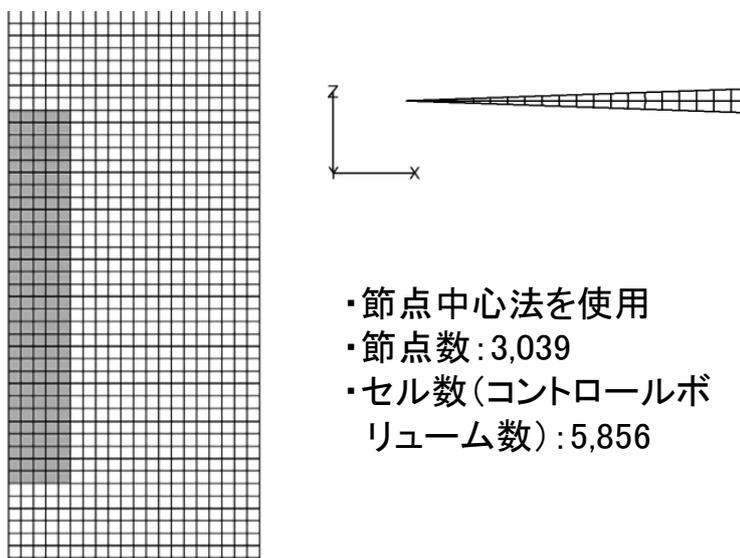
- ・ワークの材質: 銀(相変態なし)
- ・ワーク形状: 直径10mm、長さ30mmの円柱
- ・ワークの姿勢: 垂直
- ・ワークの初期温度: 800°C
- ・冷却剤: 水
- ・水槽内の初期水温: 30°C
- ・壁面の熱伝達様式: 「気体単相の対流」、「膜沸騰」、「遷移沸騰」、「飽和核沸騰」、「サブクール核沸騰」、「液体単相の対流」に区別して、熱伝達様式に応じて構成方程式を使用
- ・現象時間: 10秒
- ・時間刻み: 0.05秒一定

解析事例1 銀棒の水焼入れ

計算格子



計算格子(拡大図)

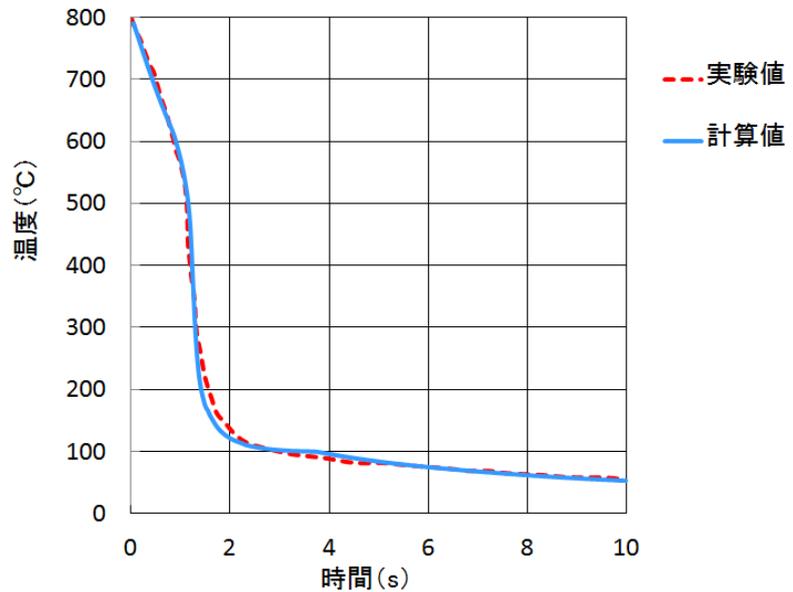
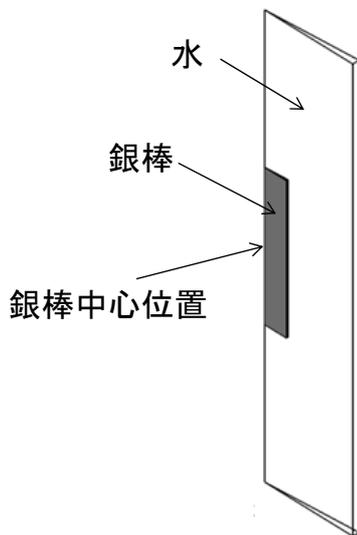


- ・節点中心法を使用
- ・節点数: 3,039
- ・セル数(コントロールボリューム数): 5,856

現象10秒までの計算時間: 2分48秒(2並列)

解析事例1 銀棒の水焼入れ

銀棒中心位置の冷却曲線



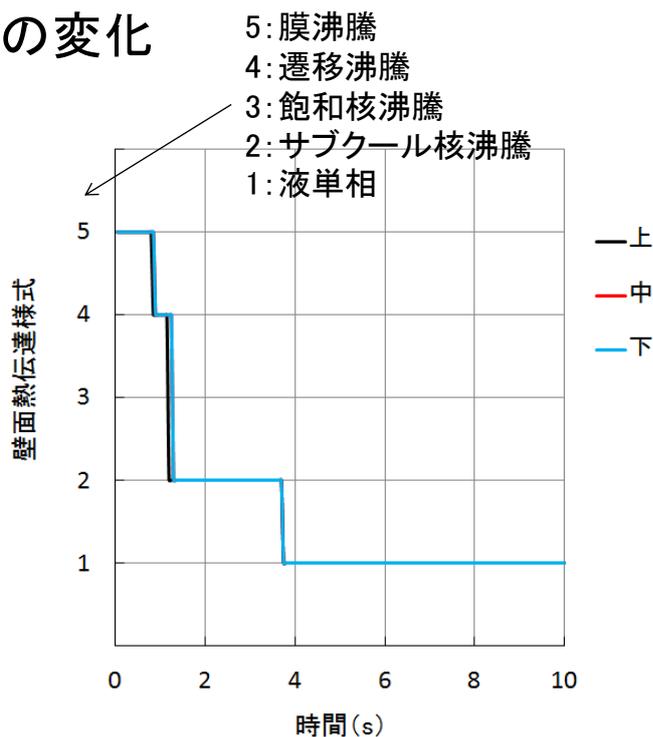
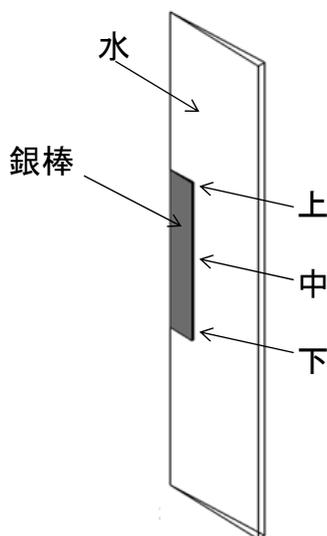
実験値の引用文献:

奈良崎道治, 焼入冷却と焼入れシミュレーション, 不二越, vol.15(2008) pp5.

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

解析事例1 銀棒の水焼入れ

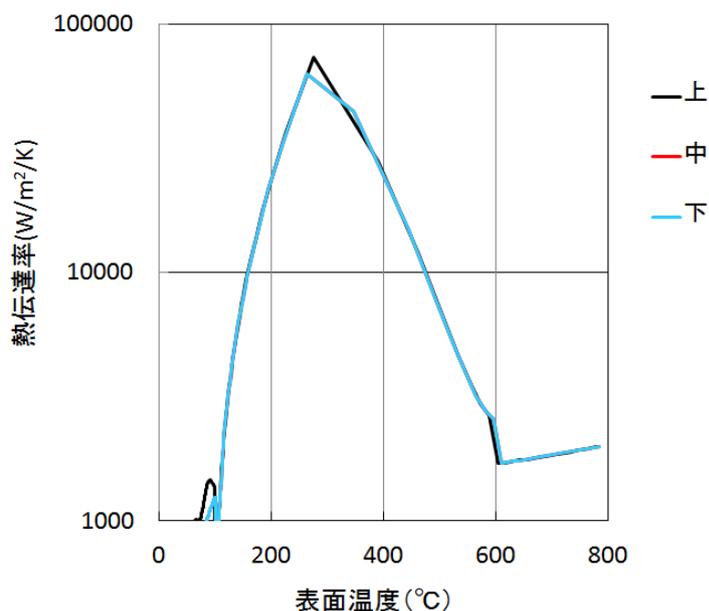
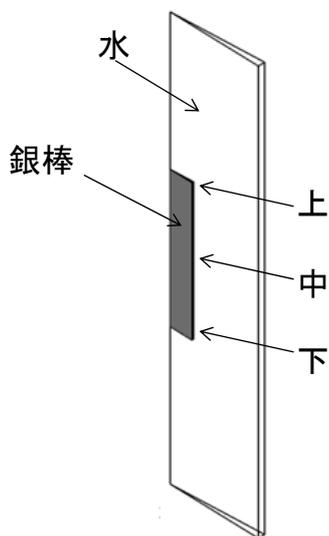
表面熱伝達様式の変化



Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

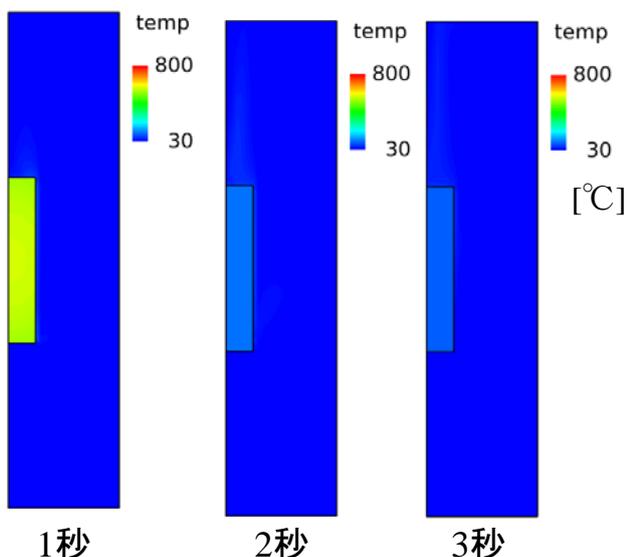
解析事例1 銀棒の水焼入れ

表面熱伝達率



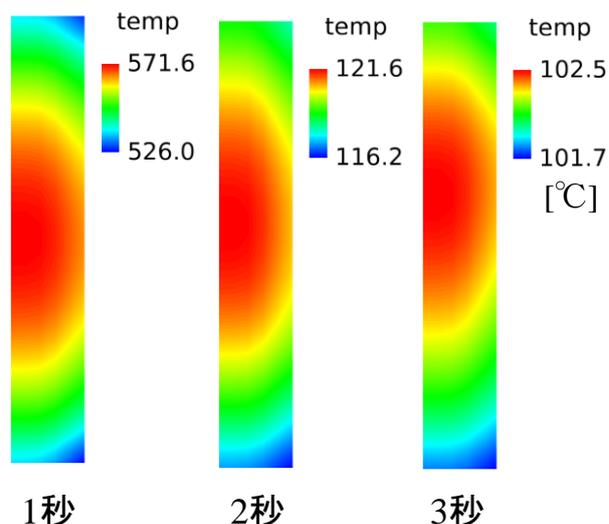
解析事例1 銀棒の水焼入れ

流体と固体の温度



温度レンジ: 30°C~800°C

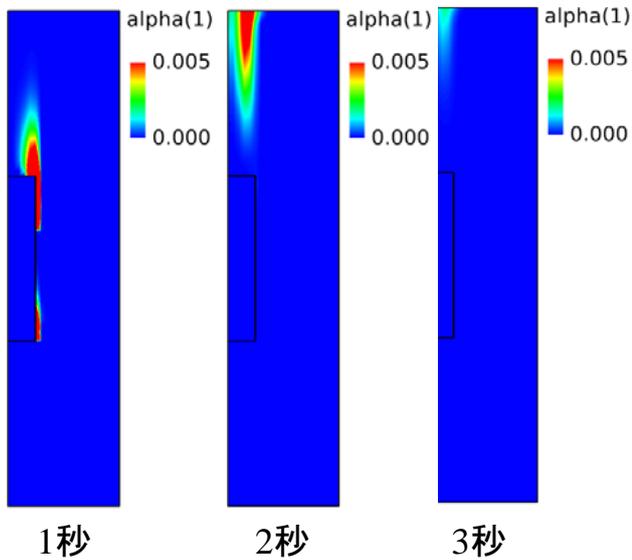
固体温度(拡大図)



温度レンジ: 最低温度~最高温度

解析事例1 銀棒の水焼入れ

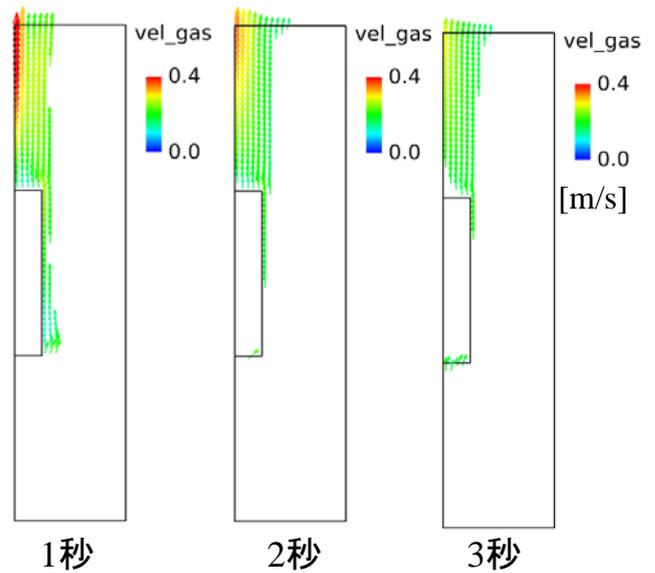
ボイド率



気泡は飽和温度以下の液体
によって凝縮する。

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

気相速度

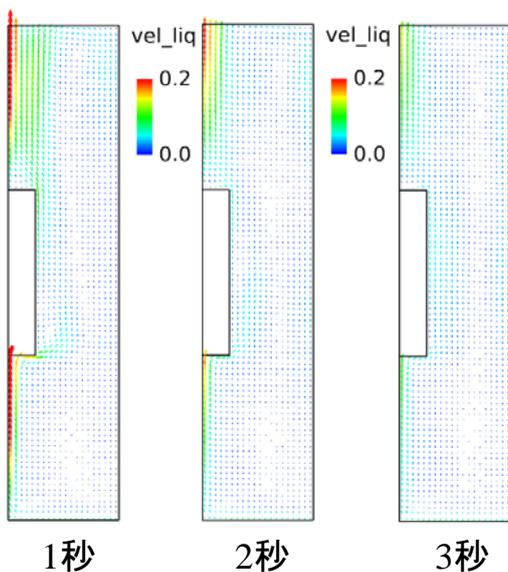


ボイド率 10^{-6} 以上の気相速度
(ボイド率の初期値は 10^{-7})

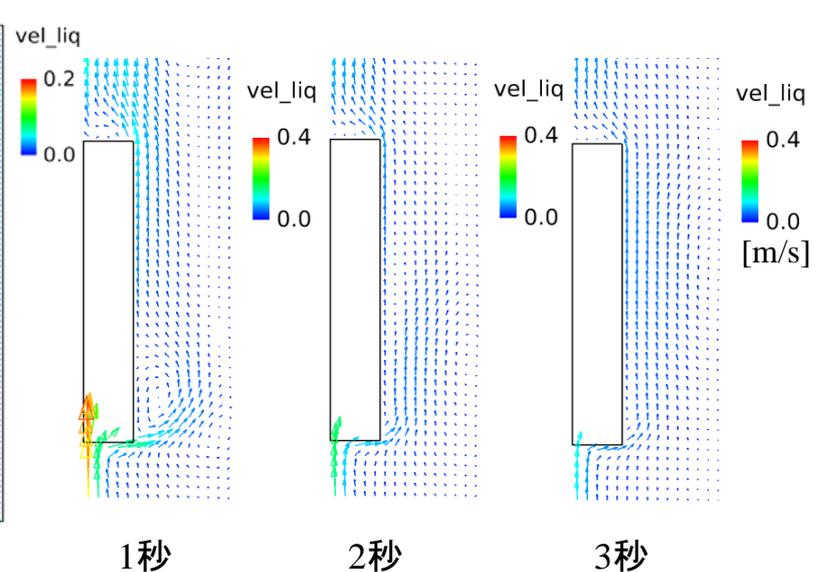
9

解析事例1 銀棒の水焼入れ

液相速度



液相速度(拡大図)

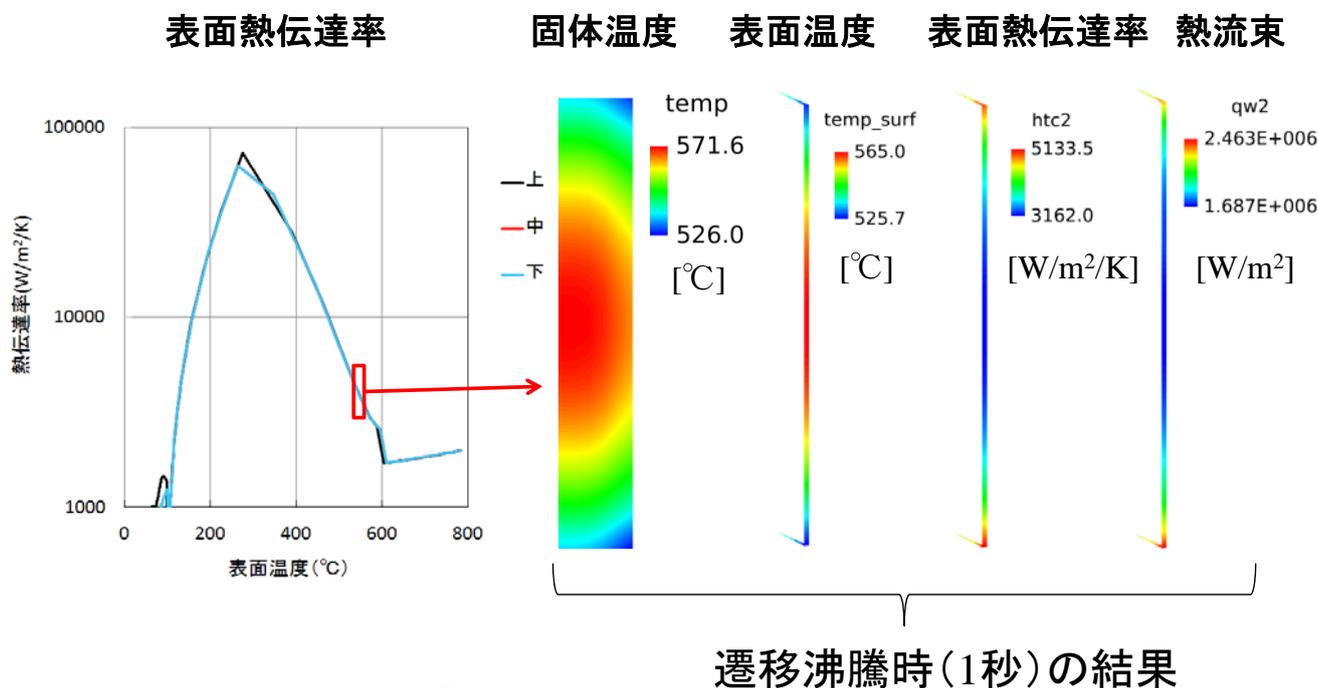


沸騰によって発生した気泡の浮力
が液体を駆動する。

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

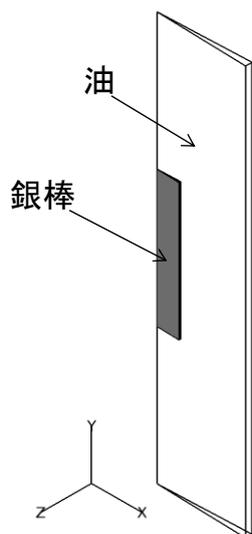
10

解析事例1 銀棒の水焼入れ



解析事例2 銀棒の油焼入れ

解析条件

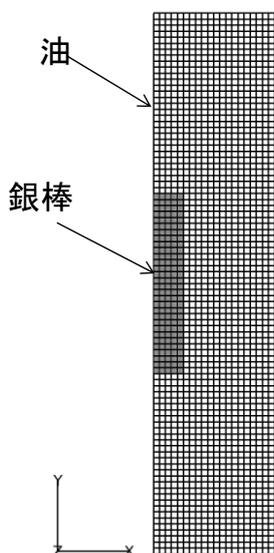


解析領域全体図

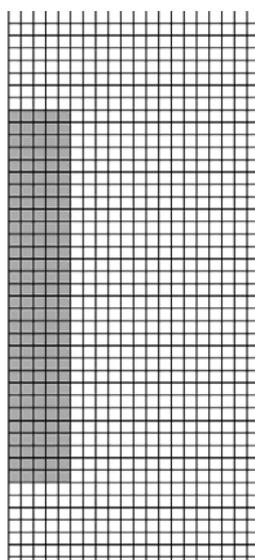
- ・ワークの材質: 銀(相変態なし)
- ・ワーク形状: 直径10mm、長さ30mmの円柱
- ・ワークの姿勢: 垂直
- ・ワークの初期温度: 800°C
- ・冷却剤: 油
- ・水槽内の初期油温: 80°C
- ・壁面の熱伝達様式: 「気体単相の対流」、「膜沸騰」、「遷移沸騰」、「飽和核沸騰」、「サブクール核沸騰」、「液体単相の対流」に区別して、熱伝達様式に応じて構成方程式を使用
- ・現象時間: 10秒
- ・時間刻み: 0.05秒一定

解析事例2 銀棒の油焼入れ

計算格子



計算格子(拡大図)

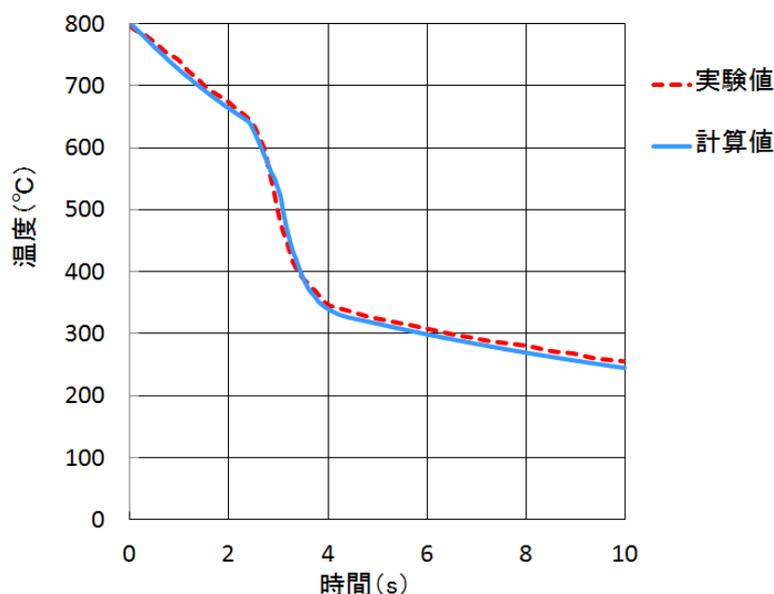
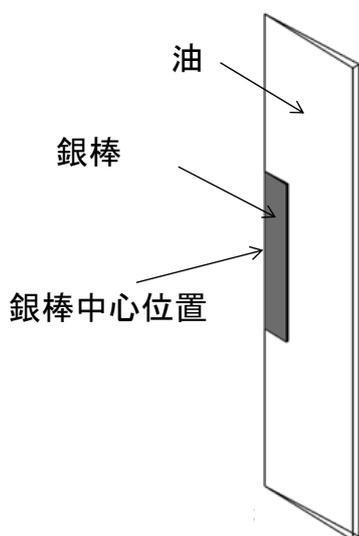


- ・節点中心法を使用
- ・節点数:3,039
- ・セル数(コントロールボリューム数):5,856

現象10秒までの計算時間: 2分40秒(2並列)

解析事例2 銀棒の油焼入れ

銀棒中心位置の冷却曲線

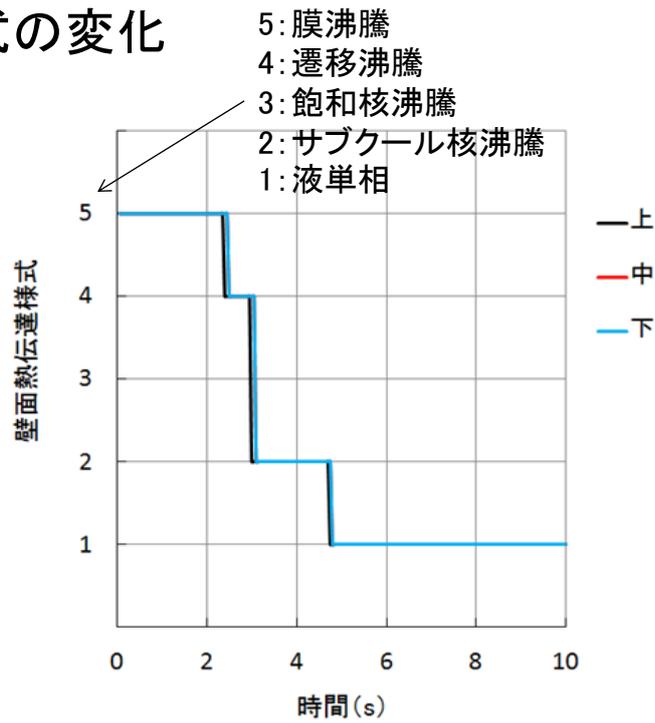
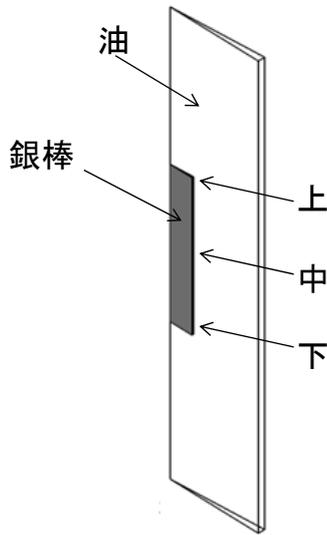


実験値の引用文献:

奈良崎道治, 焼入冷却と焼入れシミュレーション, 不二越, vol.15(2008) pp5.

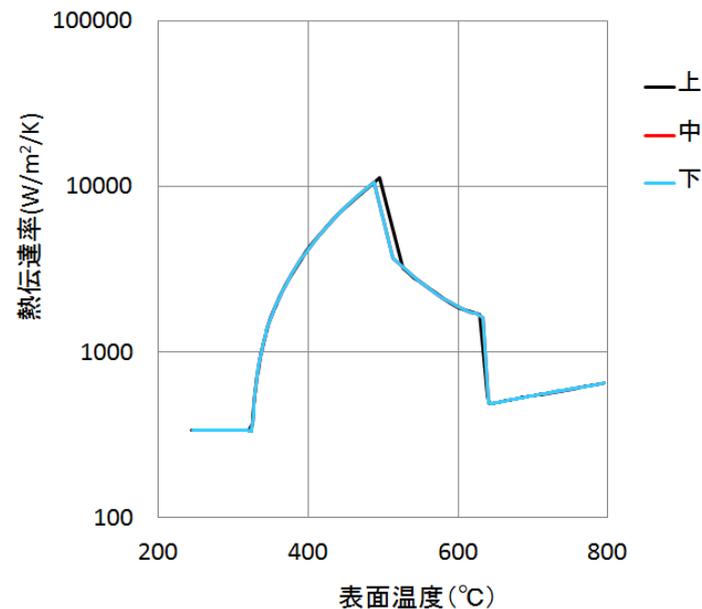
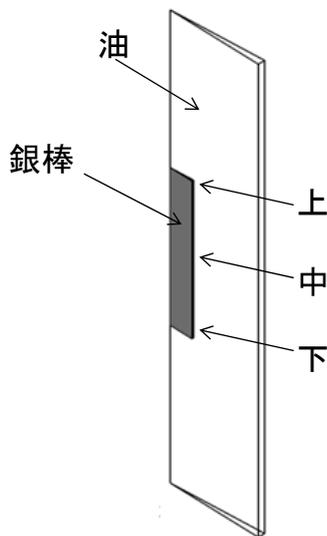
解析事例2 銀棒の油焼入れ

表面熱伝達様式の変化



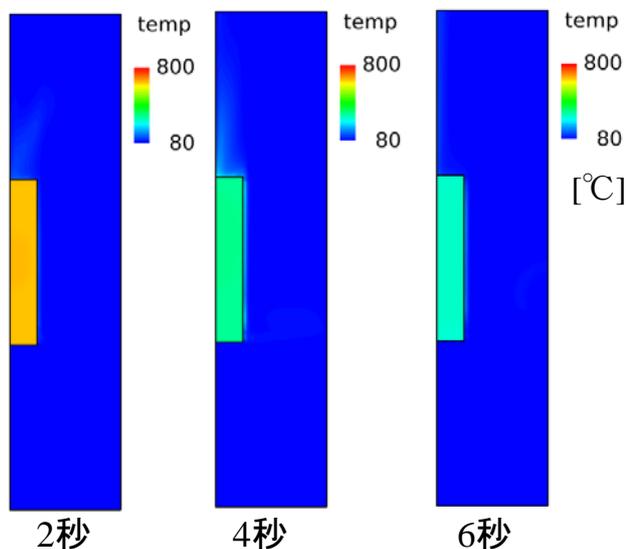
解析事例2 銀棒の油焼入れ

表面熱伝達率



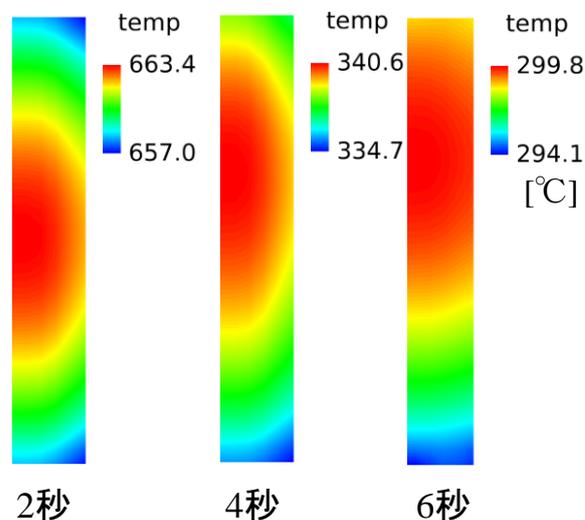
解析事例2 銀棒の油焼入れ

流体と固体の温度



温度レンジ: 80°C~800°C

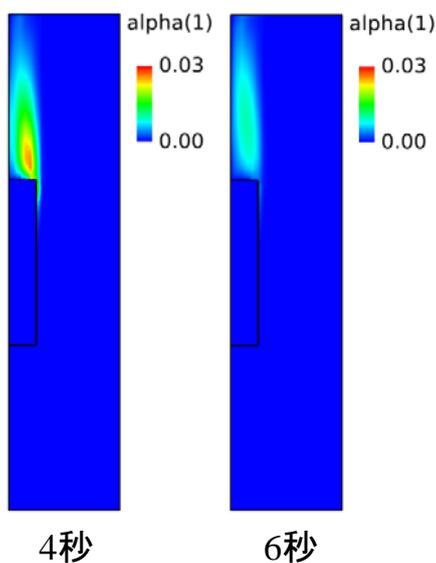
固体温度(拡大図)



温度レンジ: 最低温度~最高温度

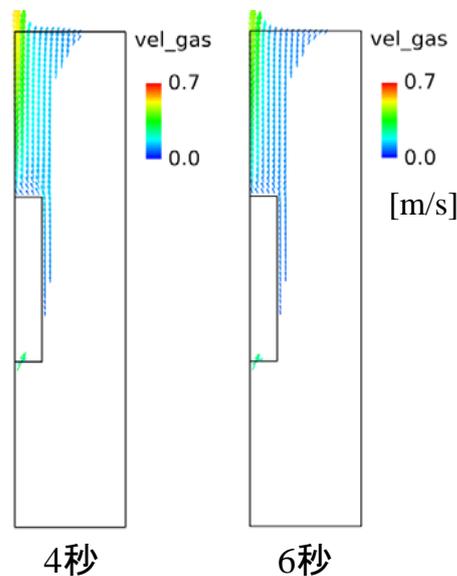
解析事例2 銀棒の油焼入れ

ボイド率



気泡は飽和温度以下の液体によって凝縮する。

気相速度

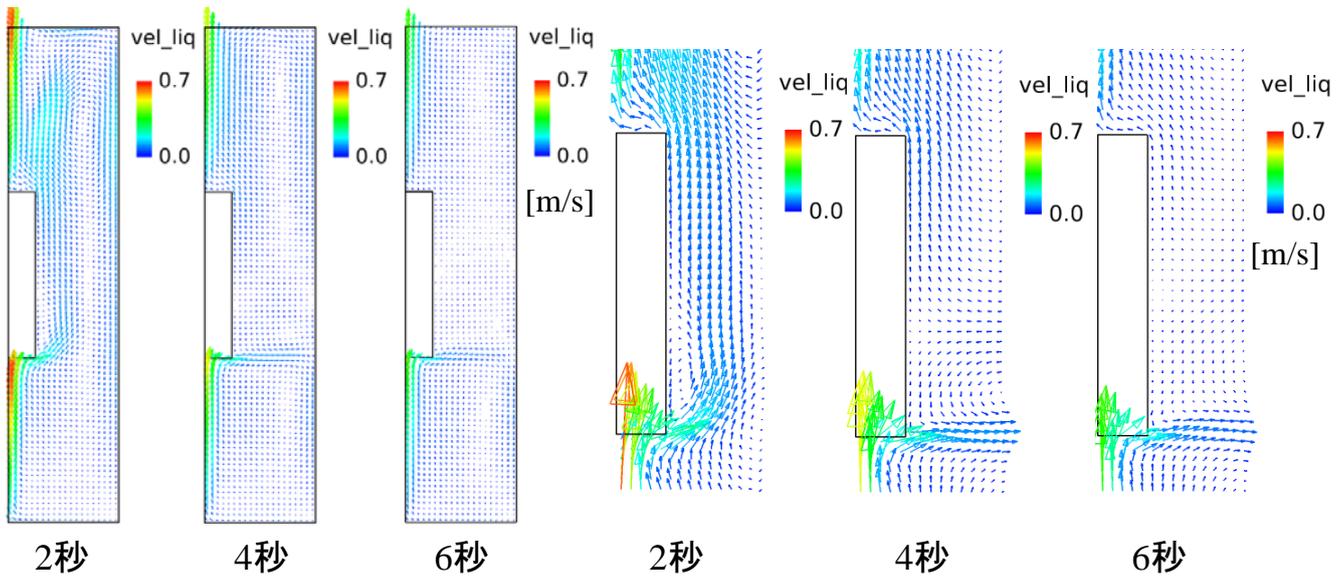


ボイド率 10^{-6} 以上の気相速度 (ボイド率の初期値は 10^{-7})

解析事例2 銀棒の油焼入れ

液相速度

液相速度(拡大図)



沸騰によって発生した気泡の浮力が液体を駆動する。

解析事例2 銀棒の油焼入れ

表面熱伝達率は、熱流束/(表面温度-バルク温度) の値を出力している。
 上面の表面熱伝達率が高いのは、液体のバルク温度が高いためである。
 表面熱伝達率は、熱流束/(表面温度-基準温度) の値を出力することもできる。

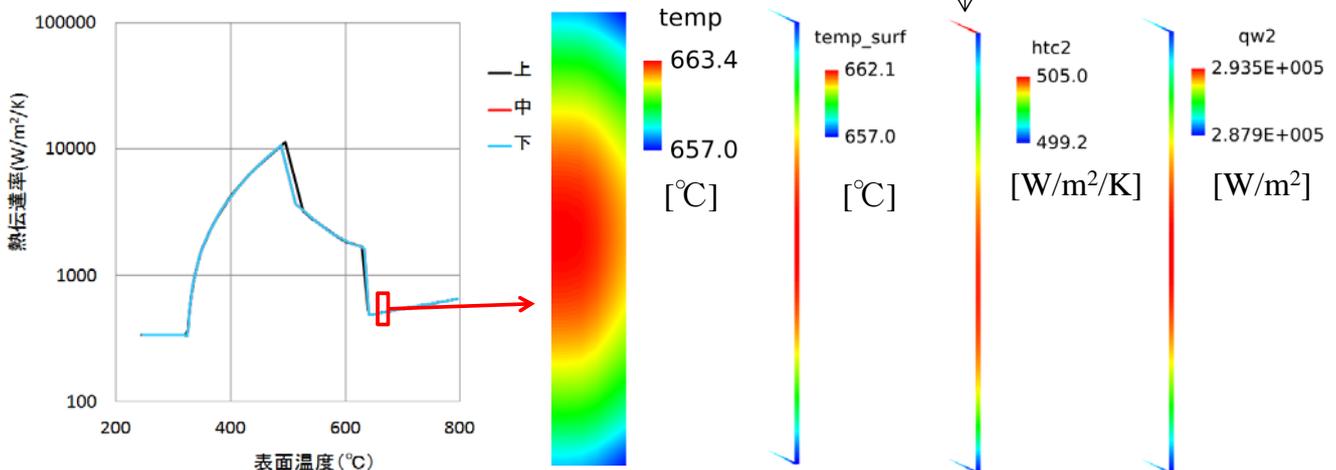
表面熱伝達率

固体温度

表面温度

表面熱伝達率

熱流束



膜沸騰時(2秒)の結果

まとめ

Advance/FrontFlow/MPによる焼入れの気液二相流解析の事例を紹介した。

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)

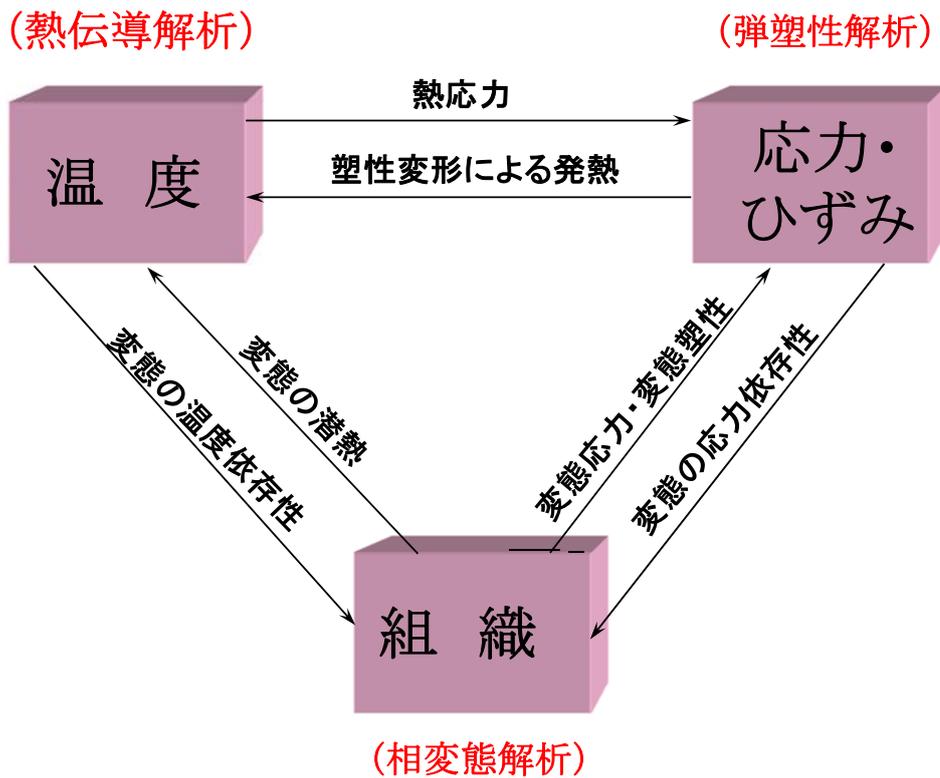


まえがき

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

熱伝達率、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)

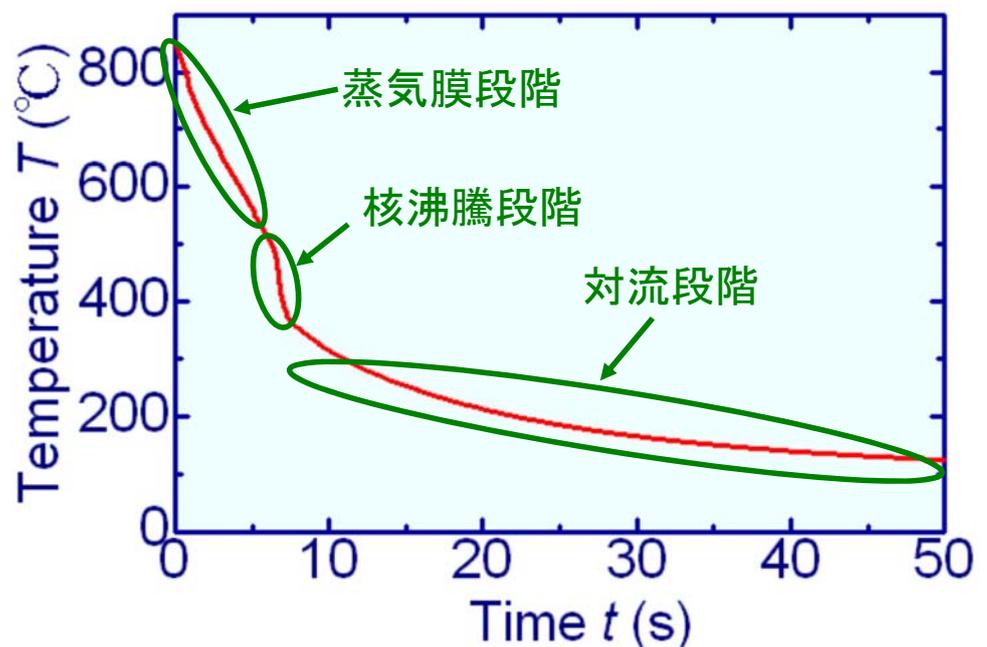
- ◆日本規格 JIS K2242 (直径10mm銀棒) : 1965年～
- ◆フランス規格 (直径16mm銀棒)
- ◆中国規格 (直径10mm銀棒)
- ◆国際規格 ISO 9950 (直径12.5mmニッケル合金棒) : 1995年
- ◆ASTM規格 ASTM D 6200-01
(直径12.5mmニッケル合金棒) : 2001年
- ◆ASTM規格 D7646-10 (直径10mm銀棒) : 2010年
アルミニウム合金の焼入れ, 水溶性ポリマー焼入れ液用

標準熱伝達率測定用銀円柱試片と 焼入冷却曲線

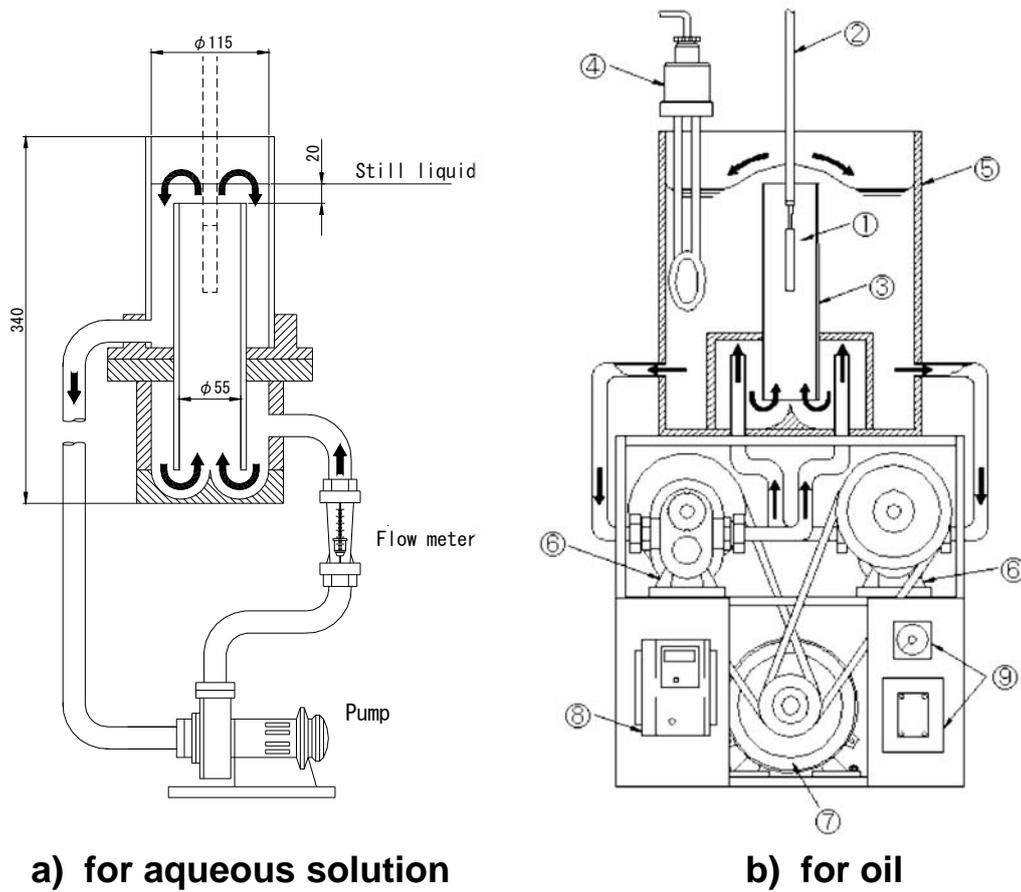


銀円柱

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



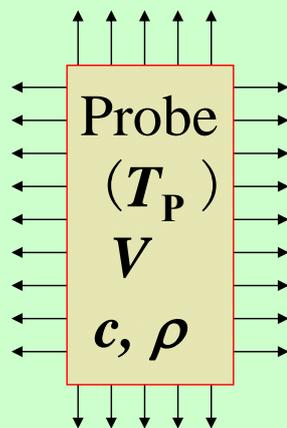
攪拌装置の例



集中熱容量法

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

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

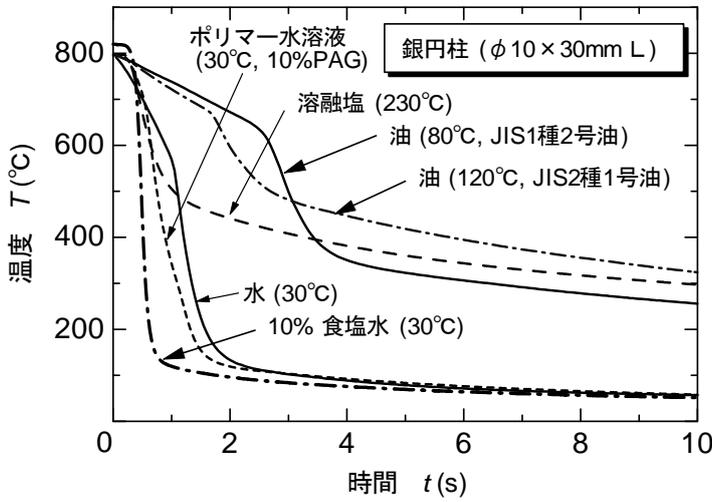


Q : Heat loss

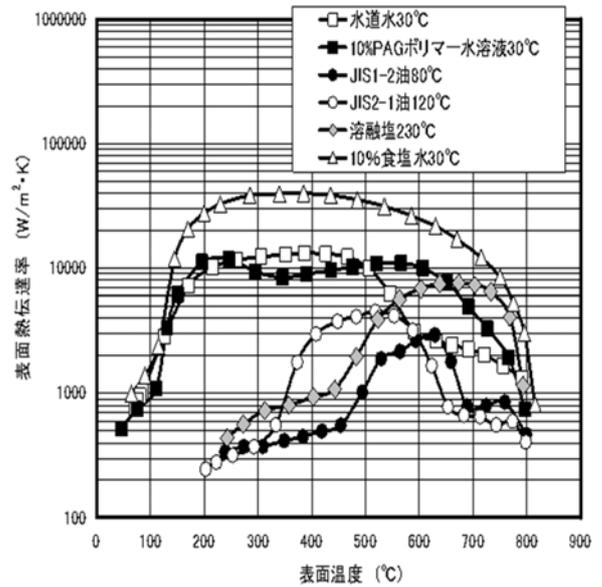
[Quenchant (T_1)]

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

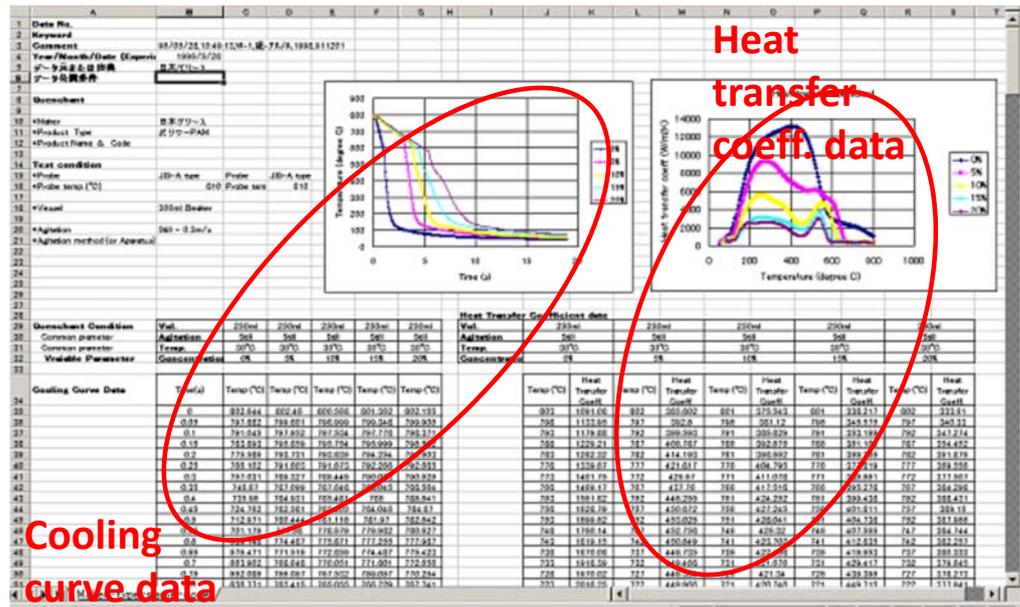
奈良崎道治; 材料, 第55巻第6号(2006), pp589-594.

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

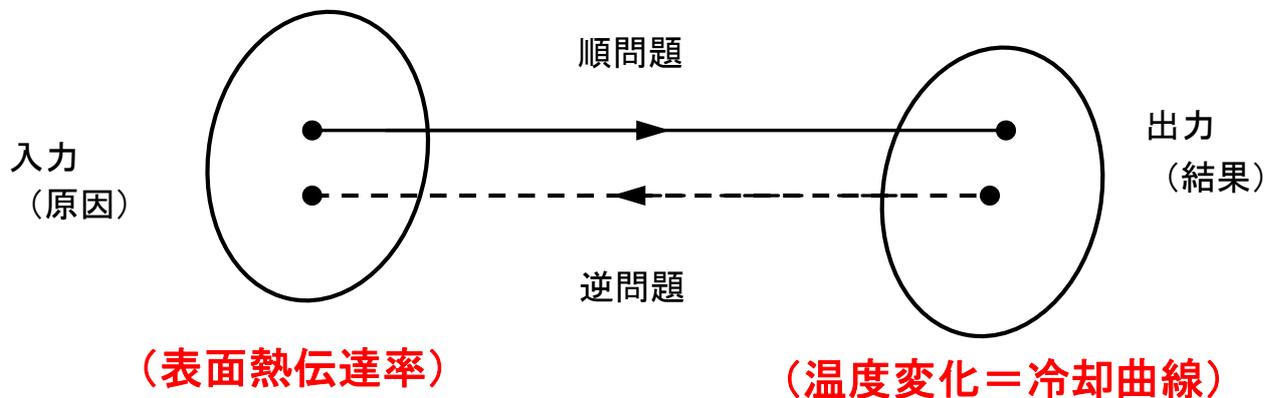
- ◆高温金属を焼入れした時の熱伝達率は、焼入れされる金属部品の形状、寸法、材質、表面条件によって影響を受ける。
- ◆実部品の焼入れ時の熱伝達率は、銀棒プローブの熱伝達率をベースに修正することが必要である。
- ◆沸騰性液体（油、水、水溶性）では蒸気膜の崩壊挙動が熱伝達率を大きく支配する。
- ◆蒸気膜の崩壊は鋭いエッジ形状や表面性状、表面の向きなどによって影響される。
- ◆不均一な蒸気膜崩壊は部品表面の冷却ムラを引き起こす。

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)。

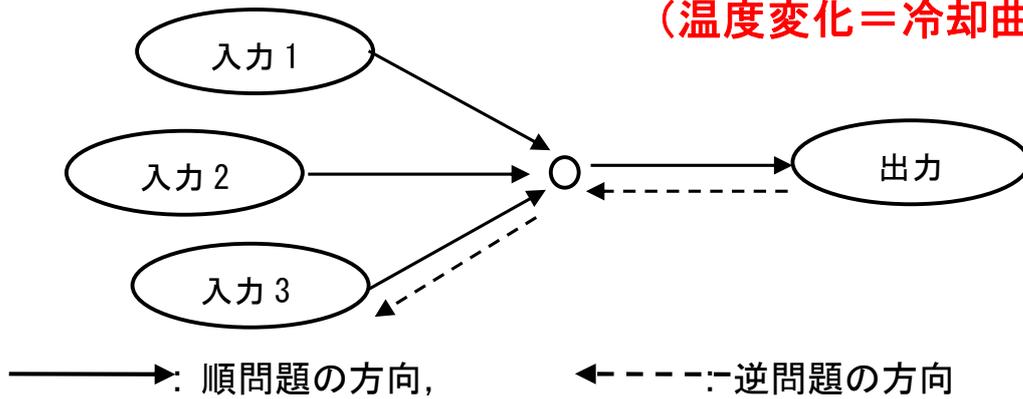
逆解析における不適切性

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)

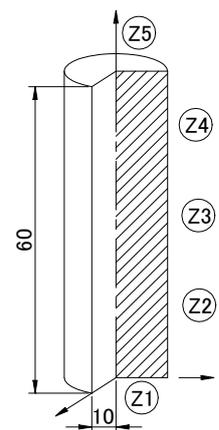
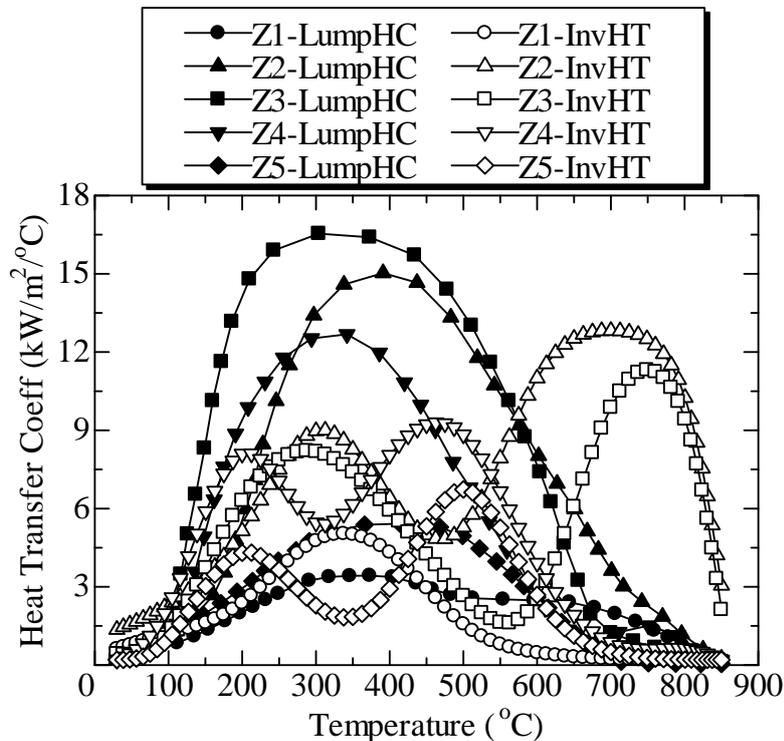
(表面熱伝達率)

(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

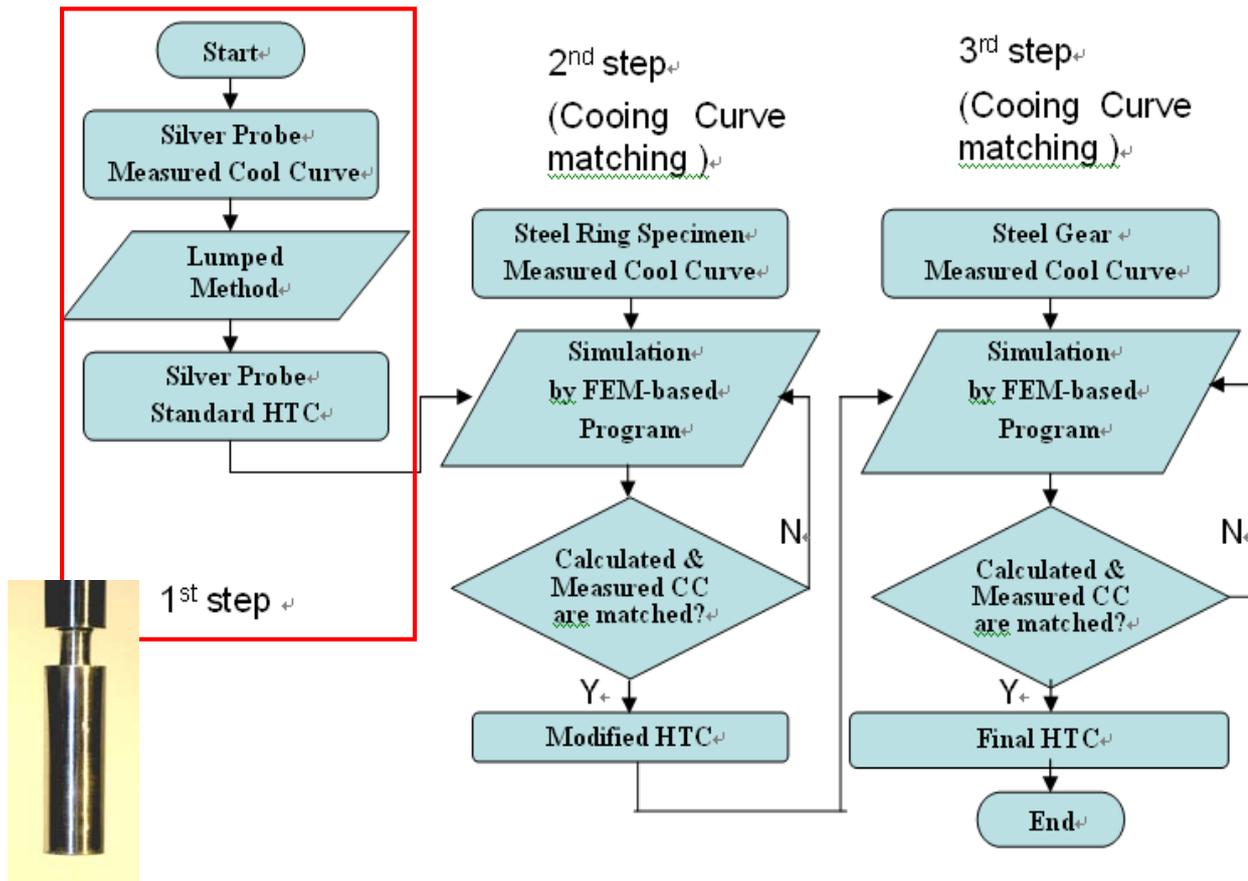
(配布資料中に無し)



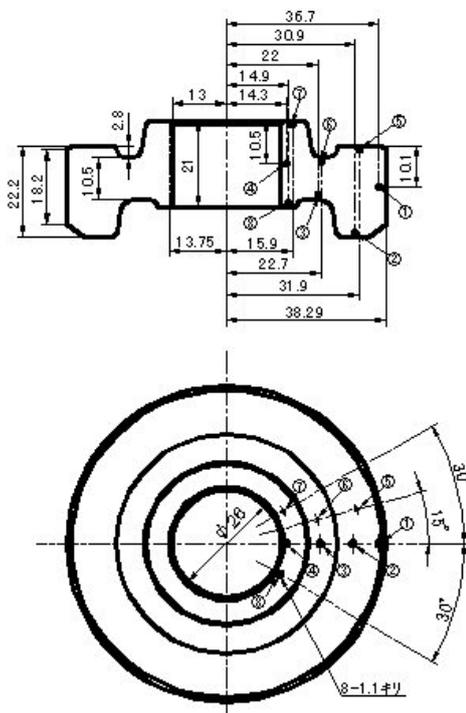
逆解析における不安定解の例

LumpHC: 集中熱容量法による解
 InvHT: 逆解析法による解

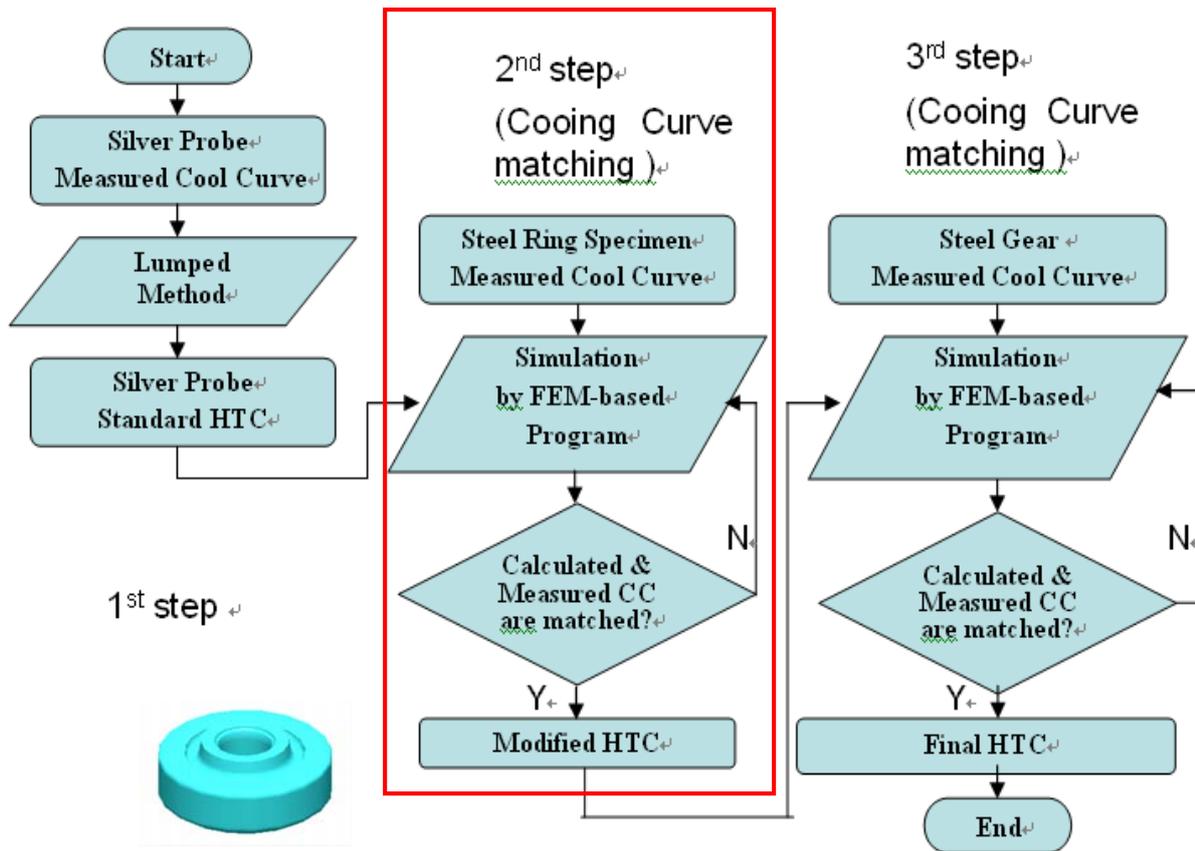
第1ステップ(銀棒+集中熱容量法)



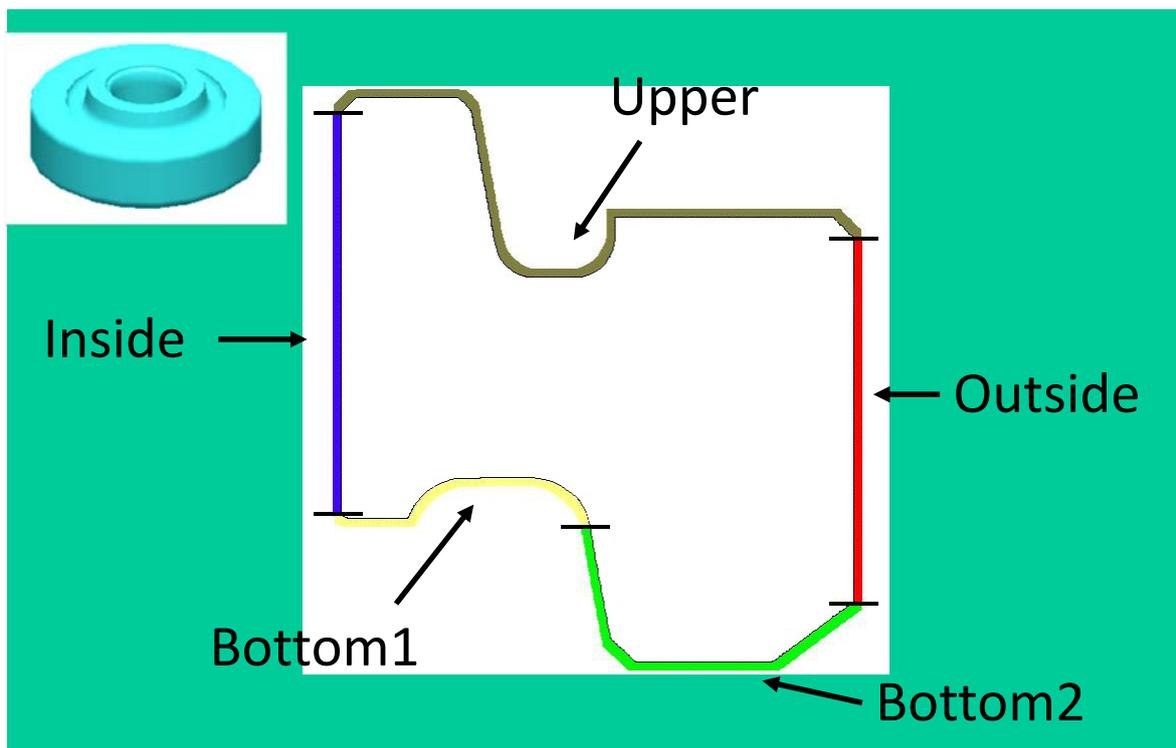
SCr420 歯切り前リングと測温位置



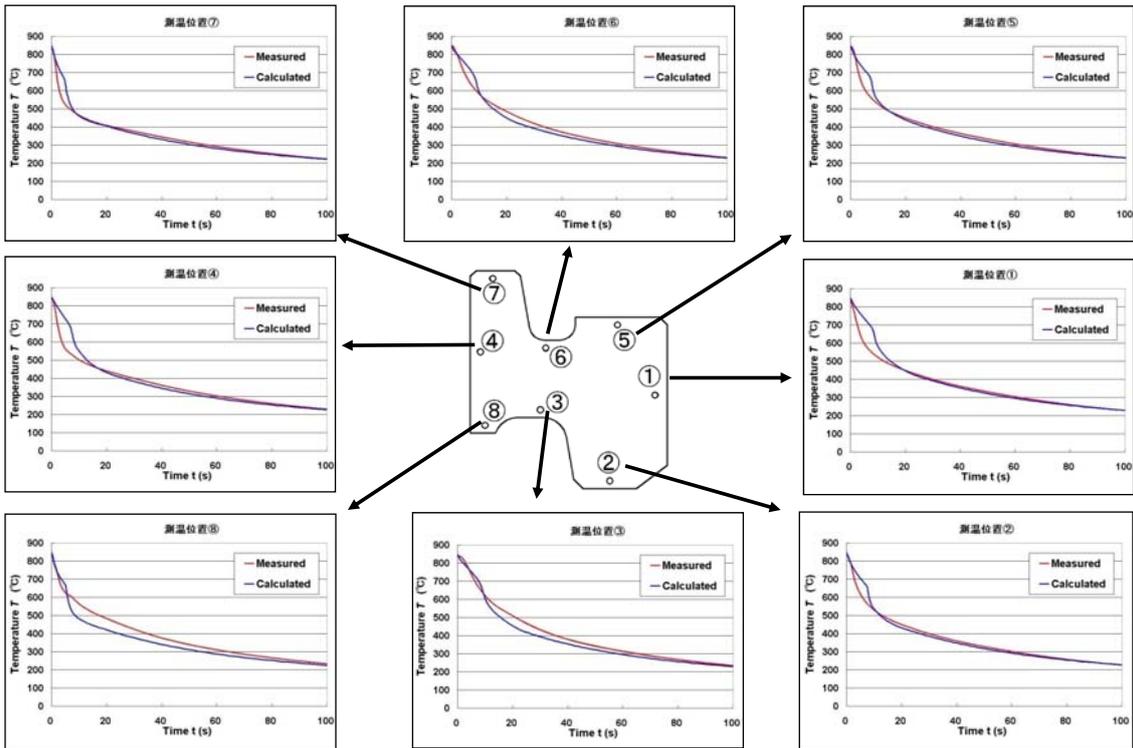
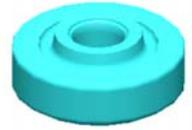
第2ステップ(歯切り前リング)



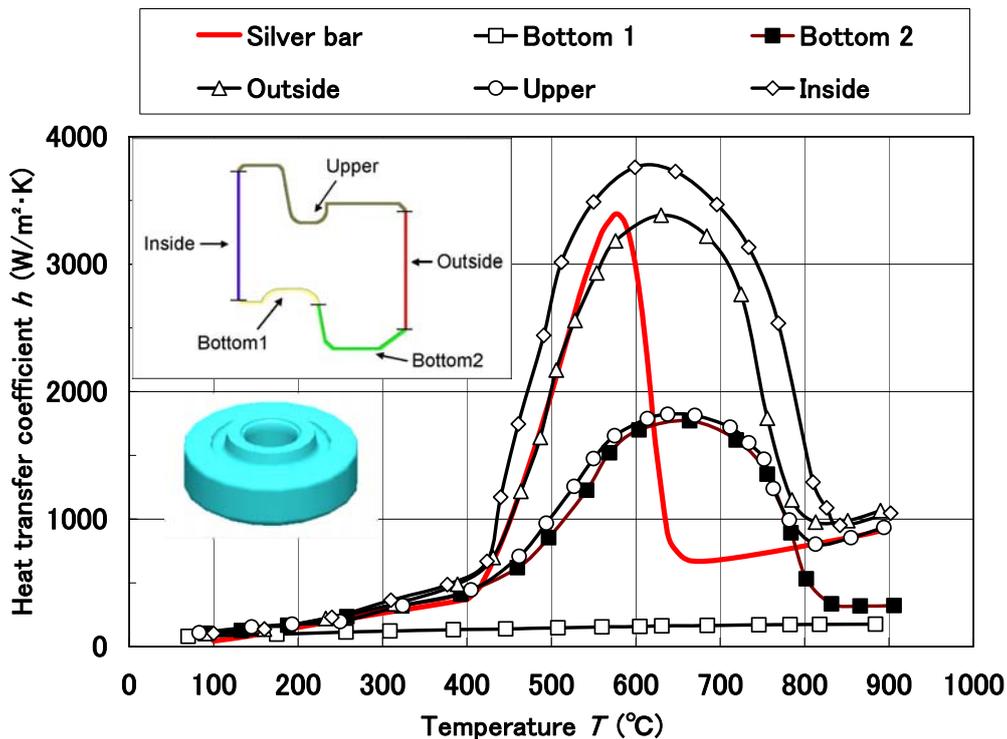
熱伝達率設定ゾーン(5領域分割)



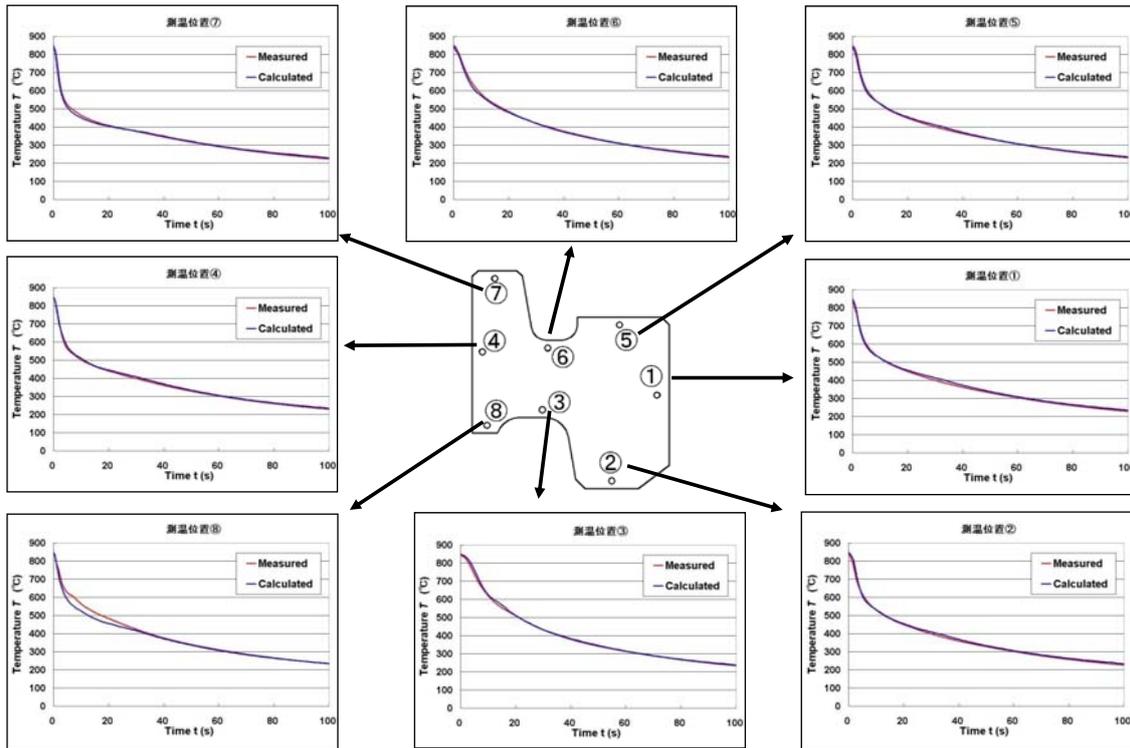
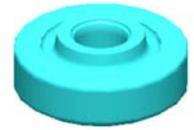
冷却曲線の実測値と解析値 (一様熱伝達率 = 銀棒の熱伝達率)



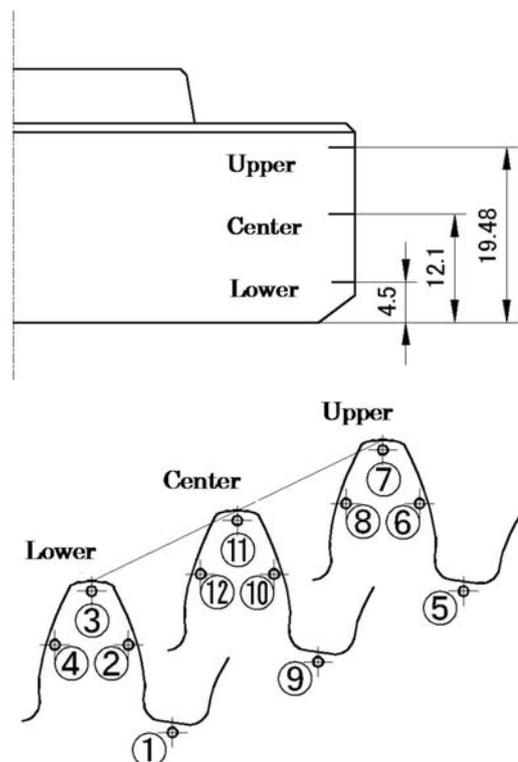
Estimated HTC (5 HTC surfaces case)



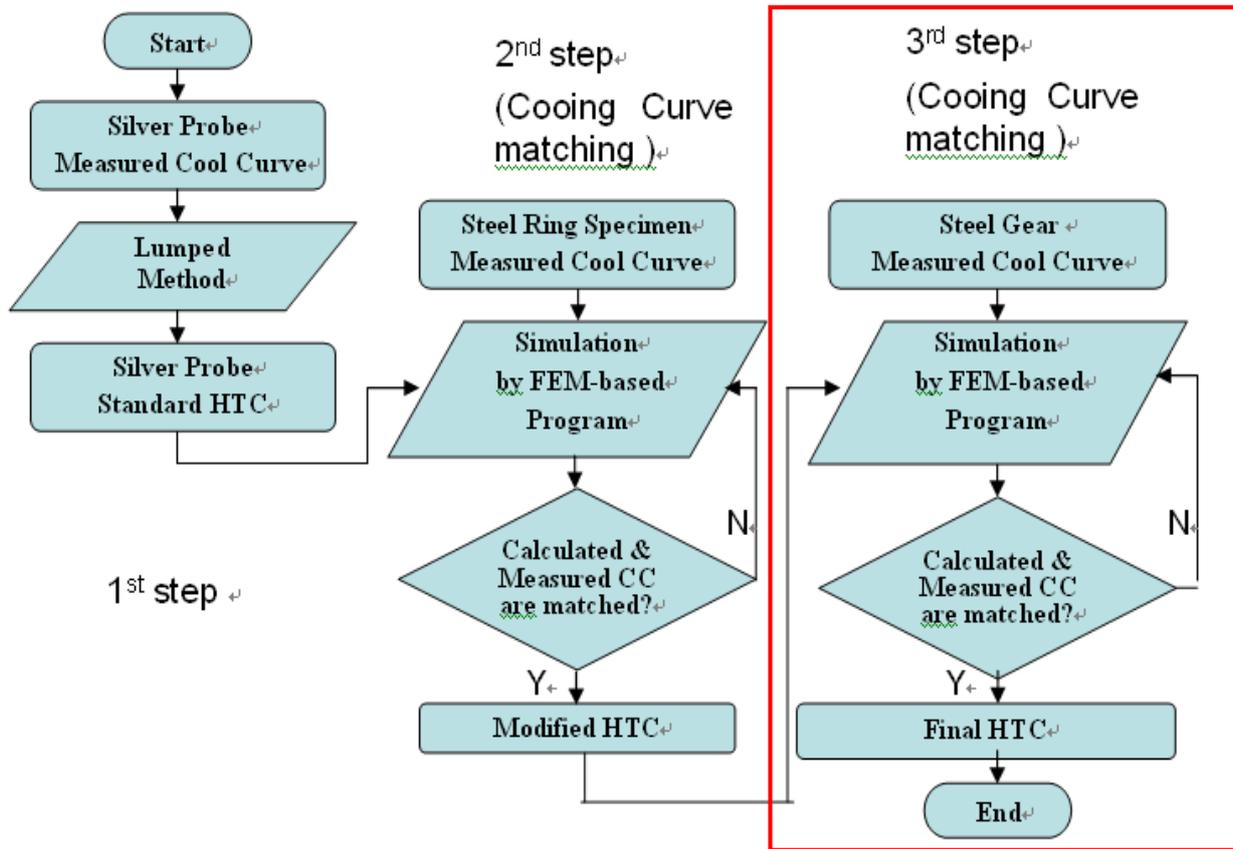
冷却曲線の実測値と解析値 (5領域に異なる熱伝達率を与えた場合)



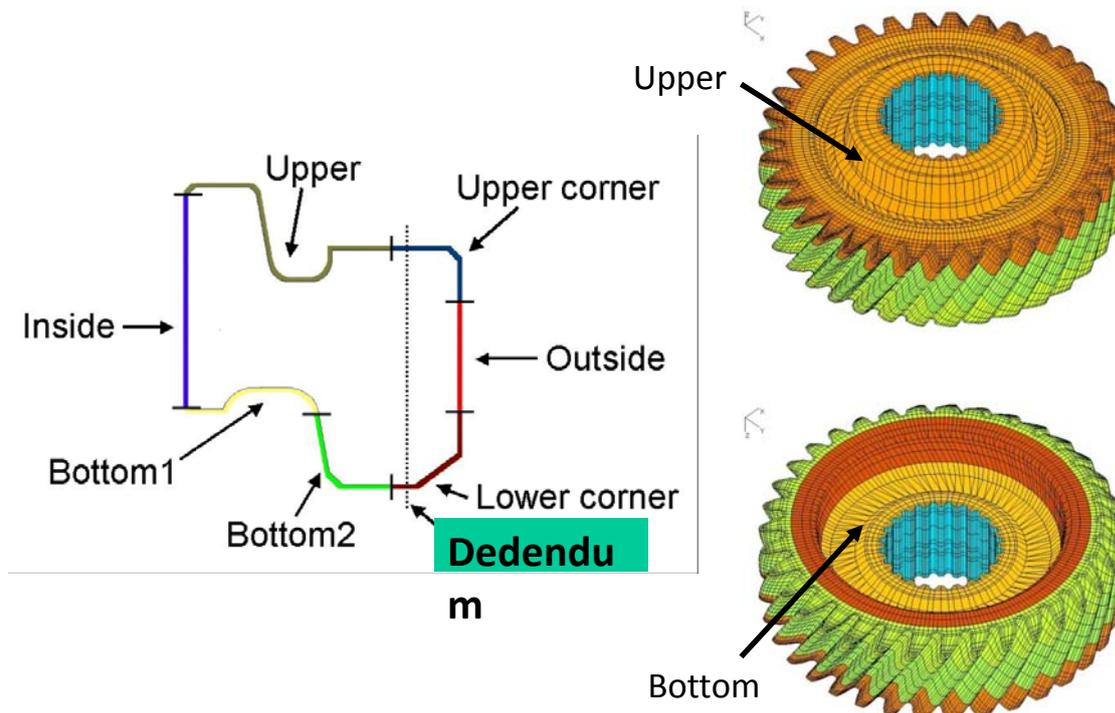
測温位置 (SCr420H へリカルギヤ)



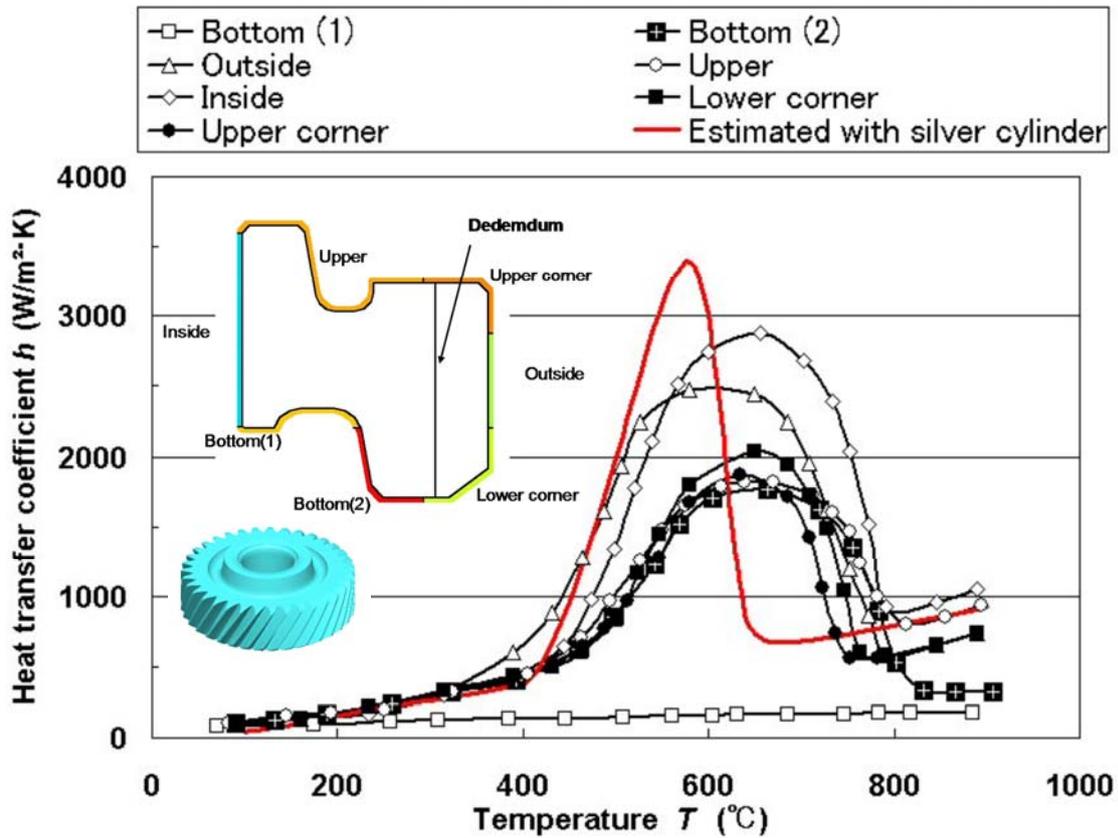
最終ステップ(歯車)



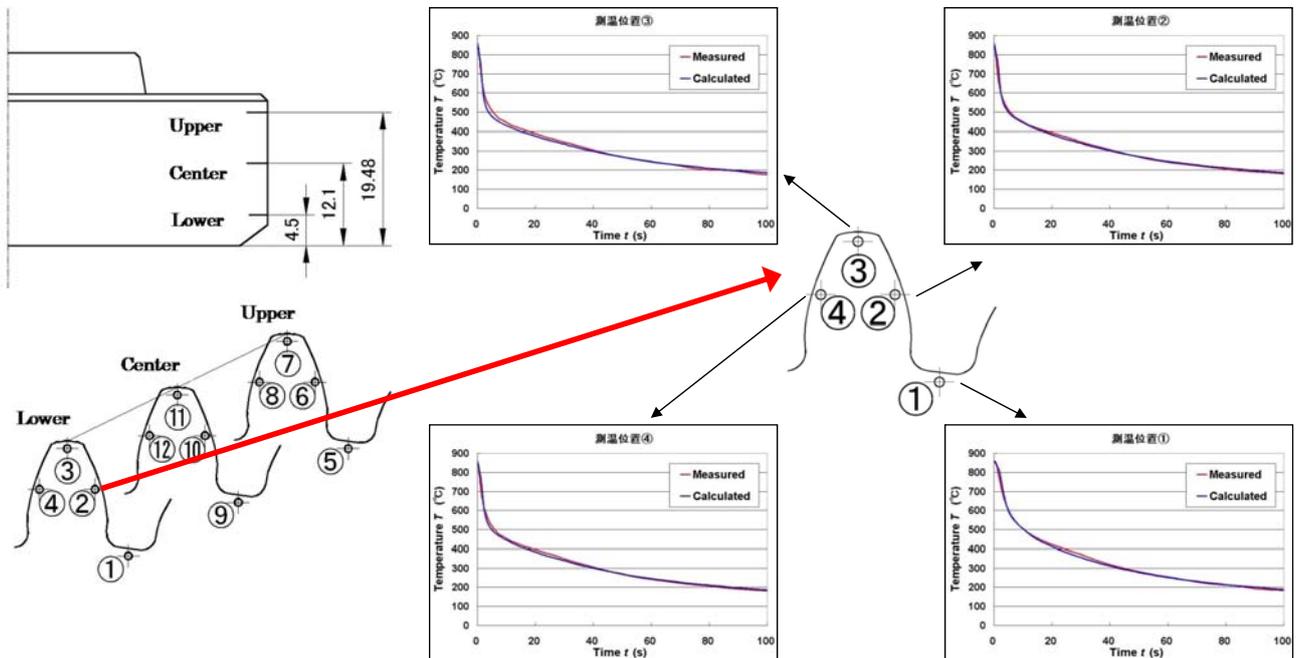
熱伝達率の設定 (7領域に分割)



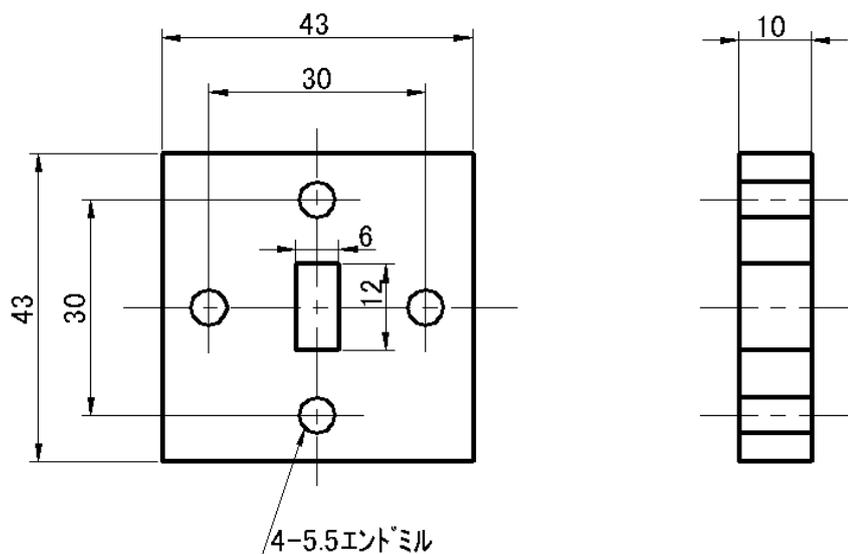
最終的な熱伝達率 (SCr420Hへリカルギヤ)



冷却曲線の実測値と解析値 (測温位置①②③④)



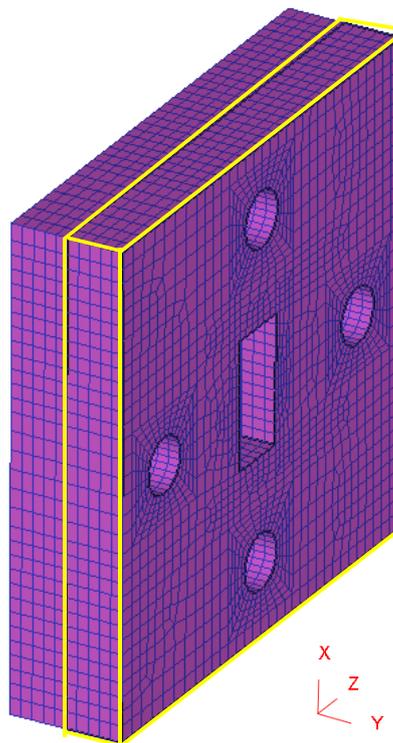
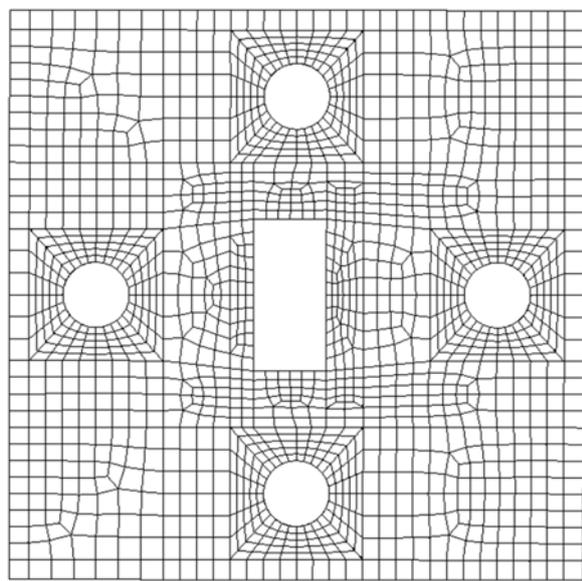
蒸気膜崩壊挙動観察による熱伝達率の精度改善例



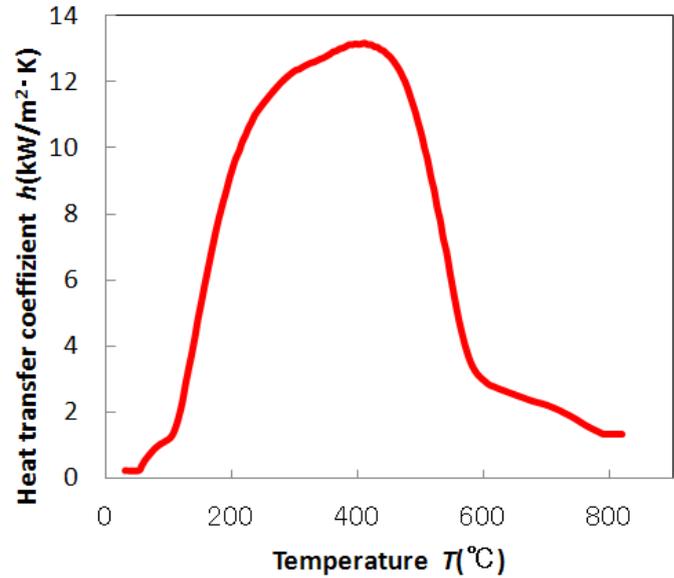
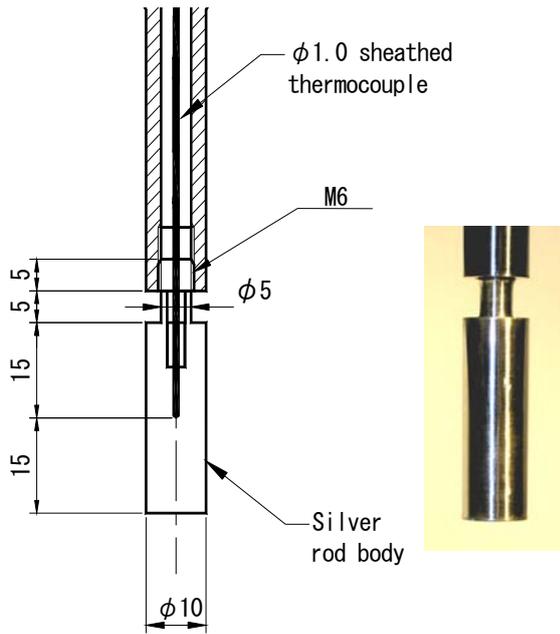
炭層工具鋼試片の形状・寸法

解析モデル(1/2)

要素数:7740
節点数:10092
1/2 FEM model

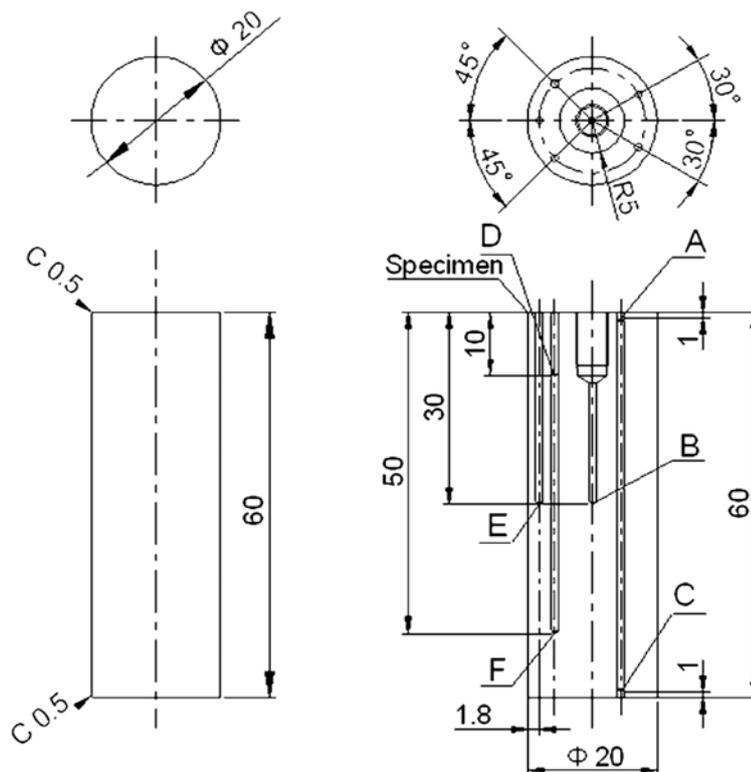


JIS銀棒の冷却曲線から求めた表面熱伝達率 (30°C 静止水焼入れ)

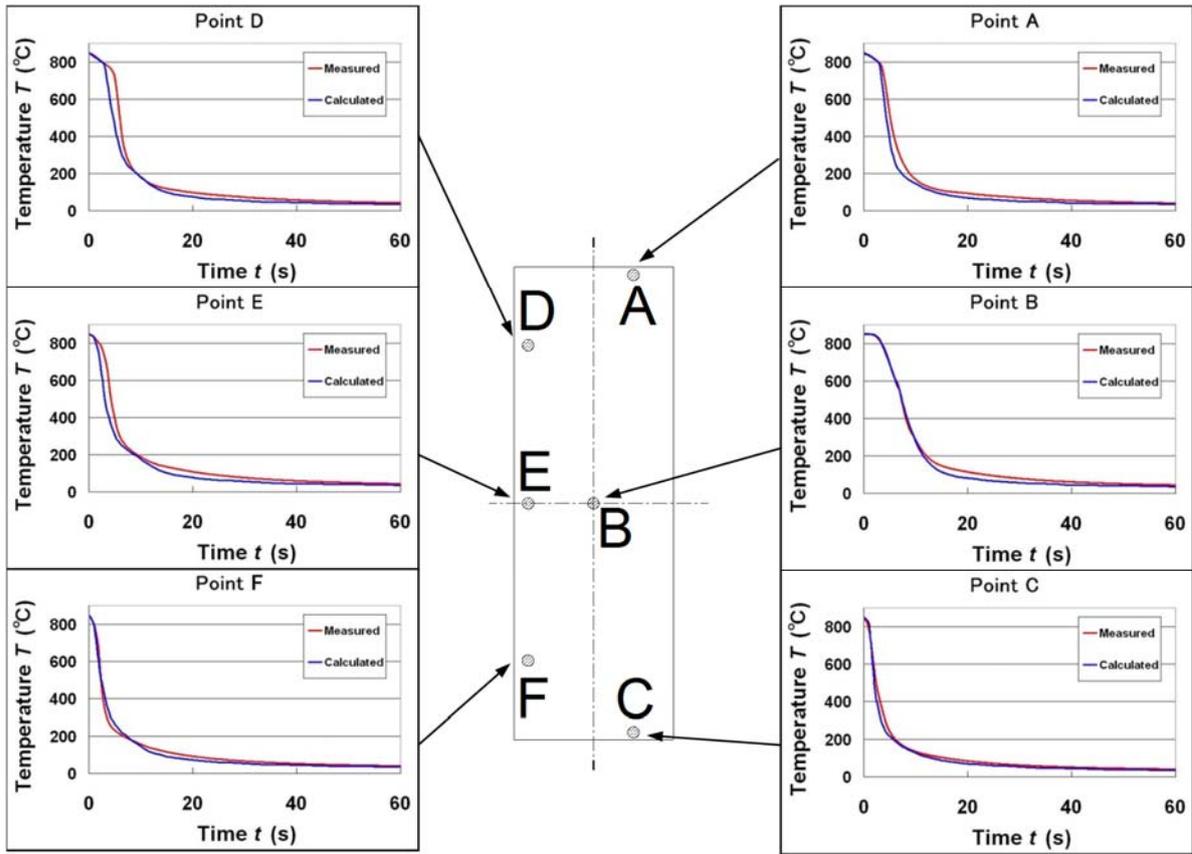


銀棒試片 (JIS K2242 B法)

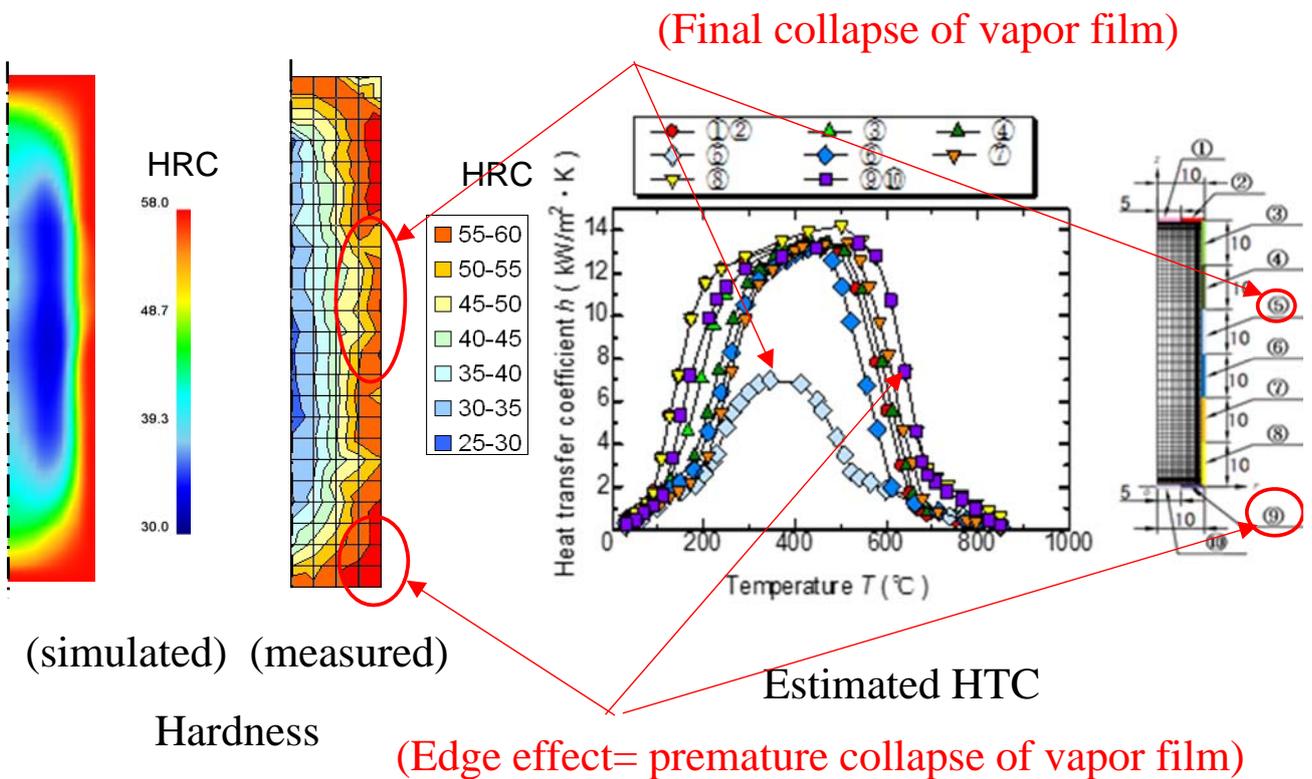
炭素鋼円柱と冷却曲線測定位置



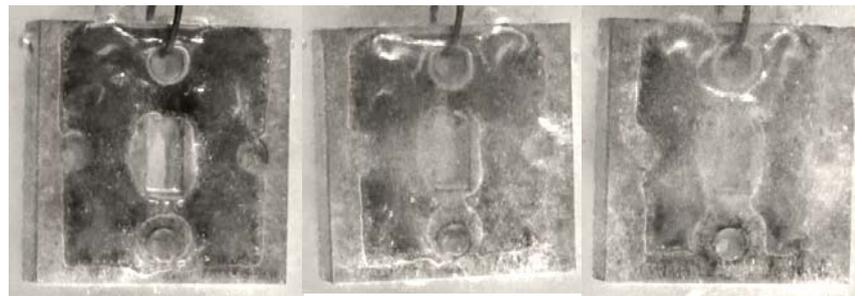
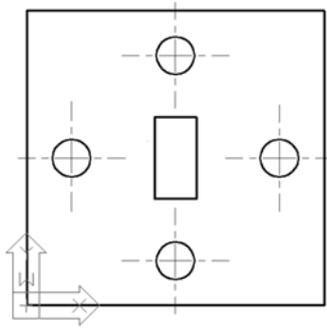
冷却曲線の実測値と解析値の比較



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



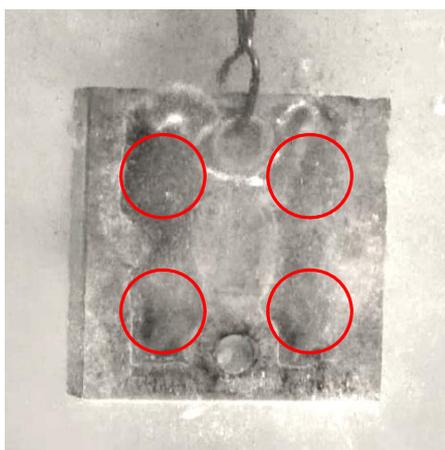
0.6s

1.0s

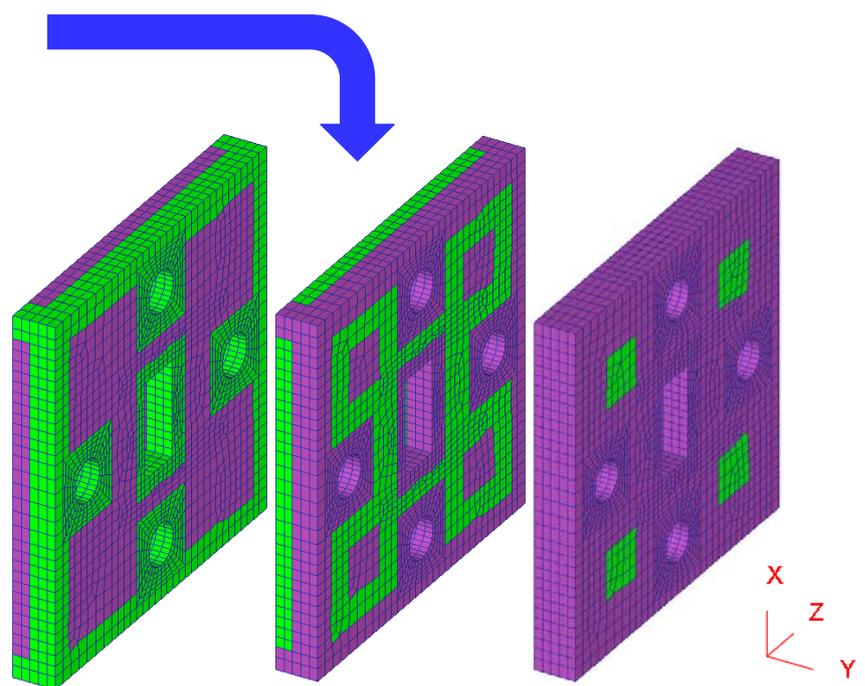
2.0s

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

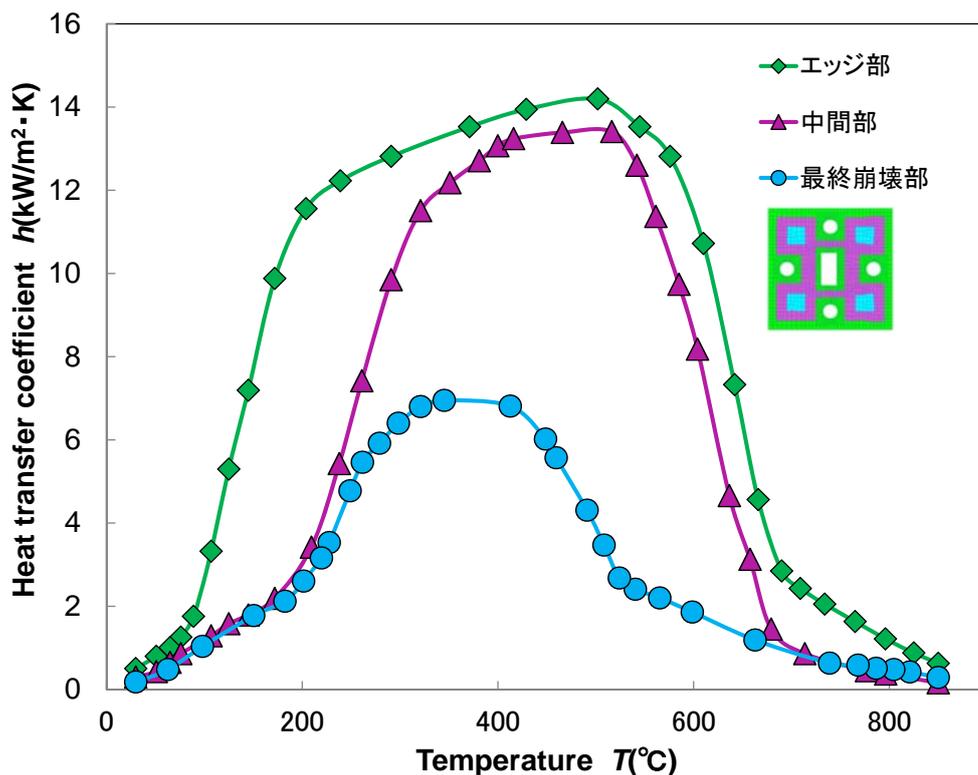


エッジ部

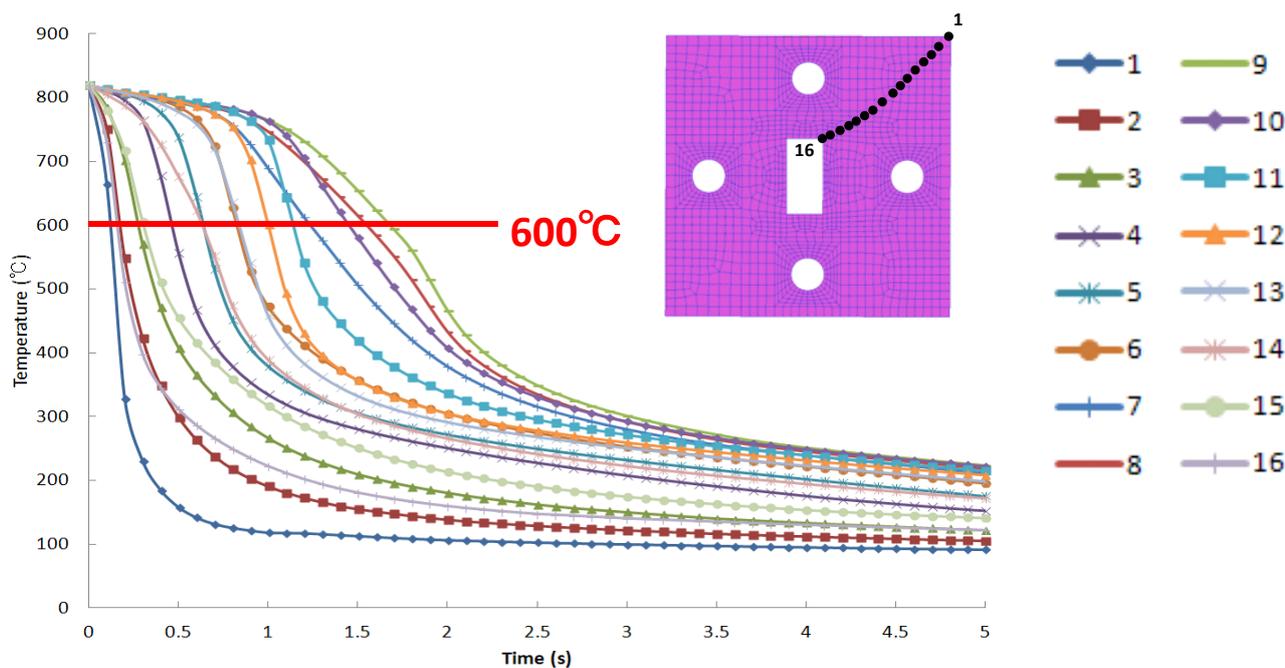
中間部

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)



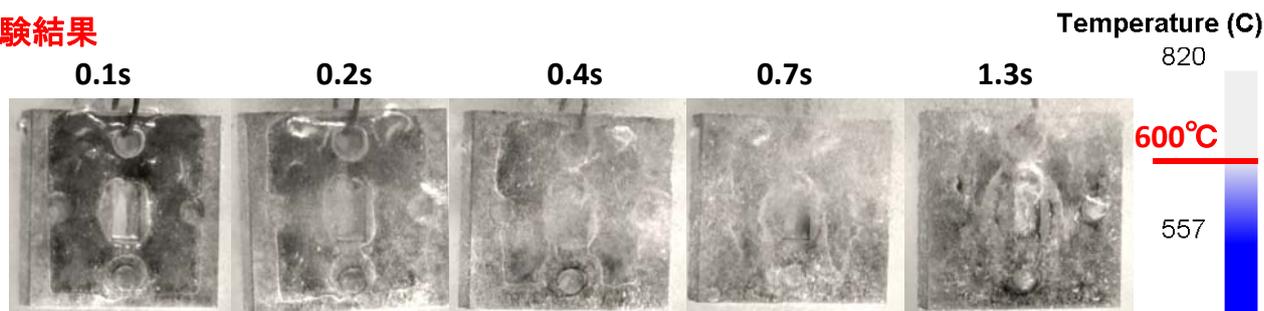
冷却曲線は約600°Cで最大冷却速度を示している。



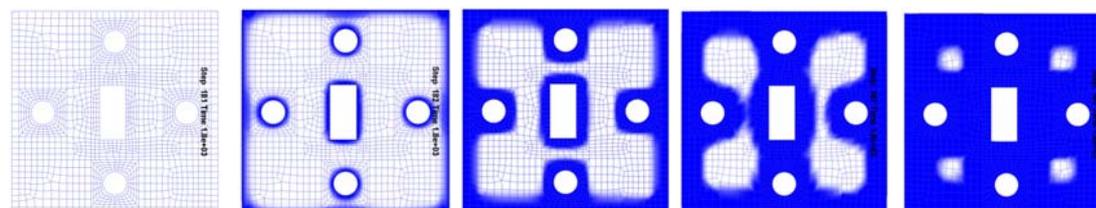
蒸気膜崩壊時の表面温度は約600°Cと考えられる。

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

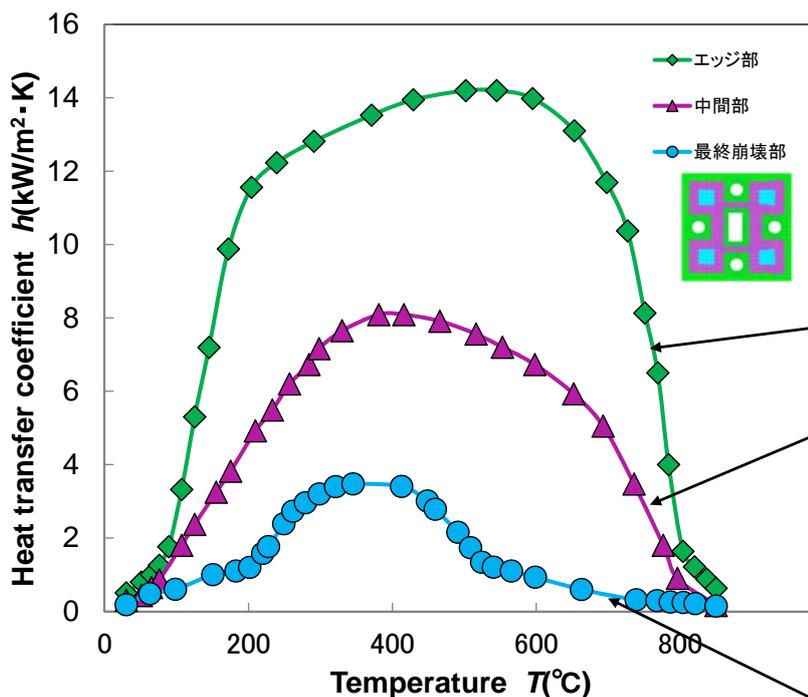


解析結果



→ 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。

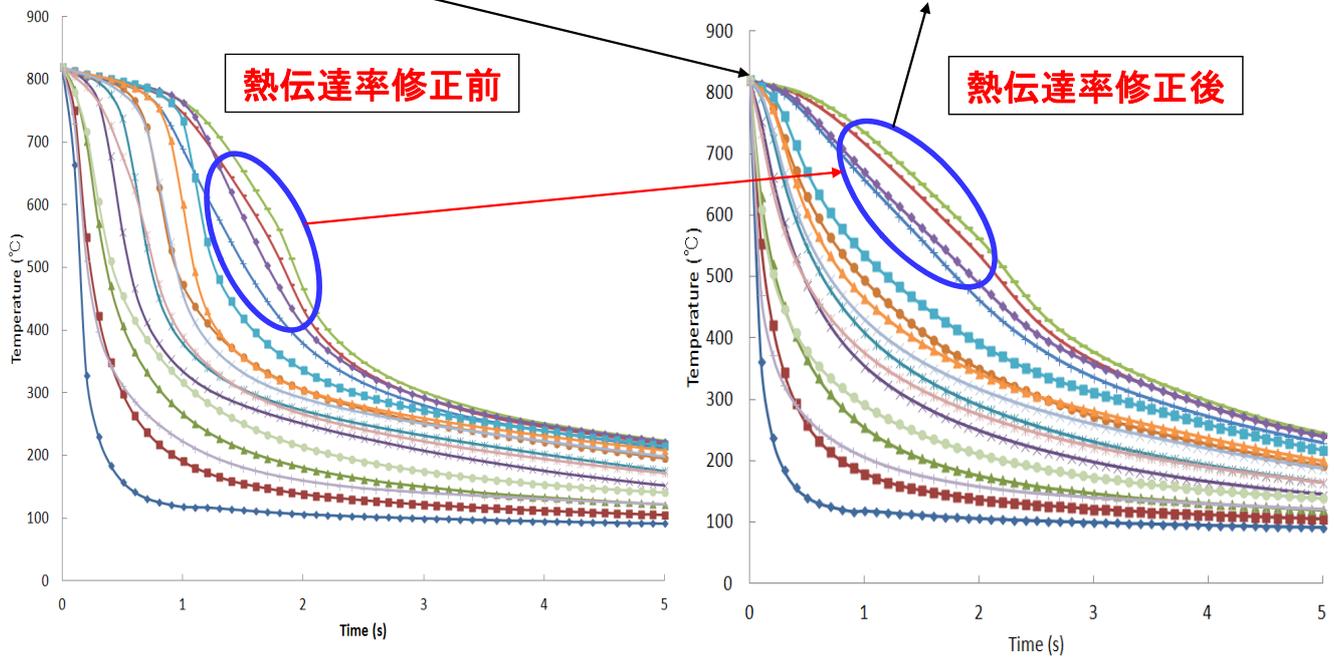
エッジ部, 最終冷却部の中間をとる値に修正。

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

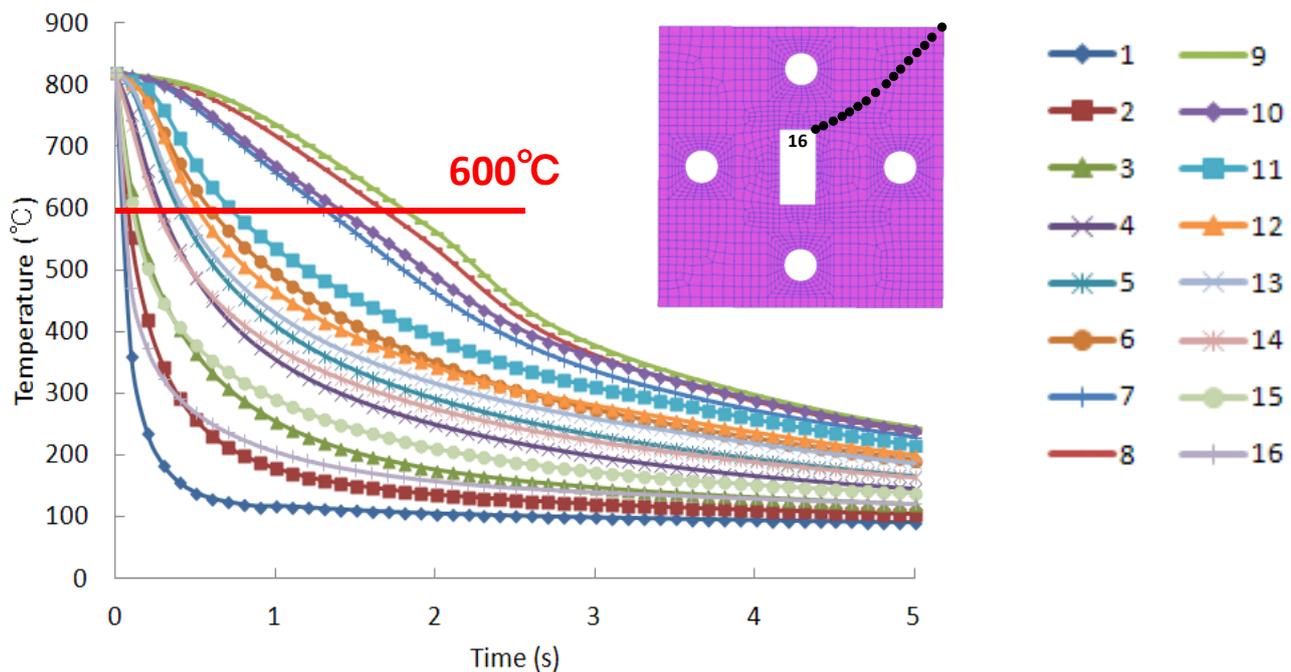
エッジ部, 中間部における蒸気膜段階が短くなった。

最終冷却部の傾きが緩やかになった。



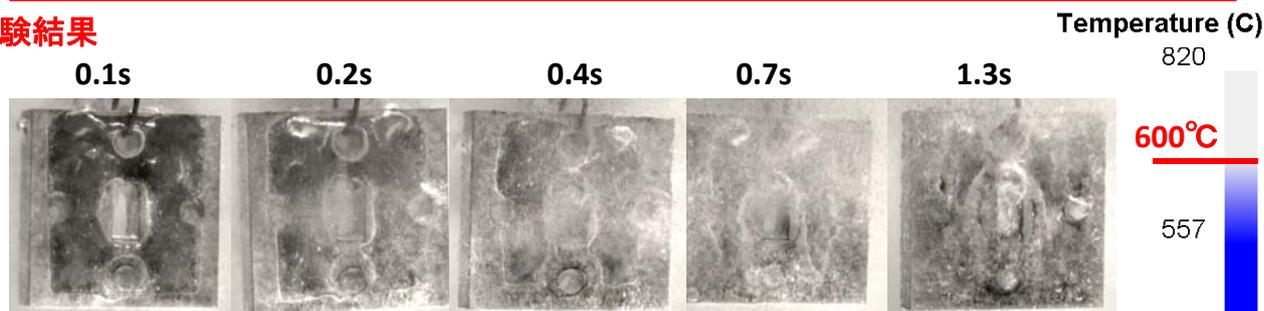
熱伝達率②修正後の冷却曲線(解析値)

1

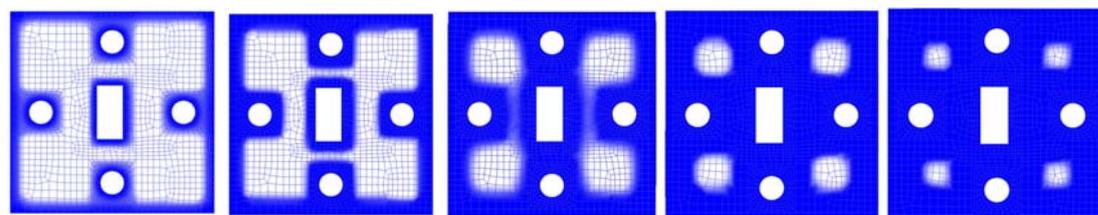


水焼入れ時の沸騰様相(実験結果)と表面温度分布(解析結果)

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。



警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要です。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。