

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

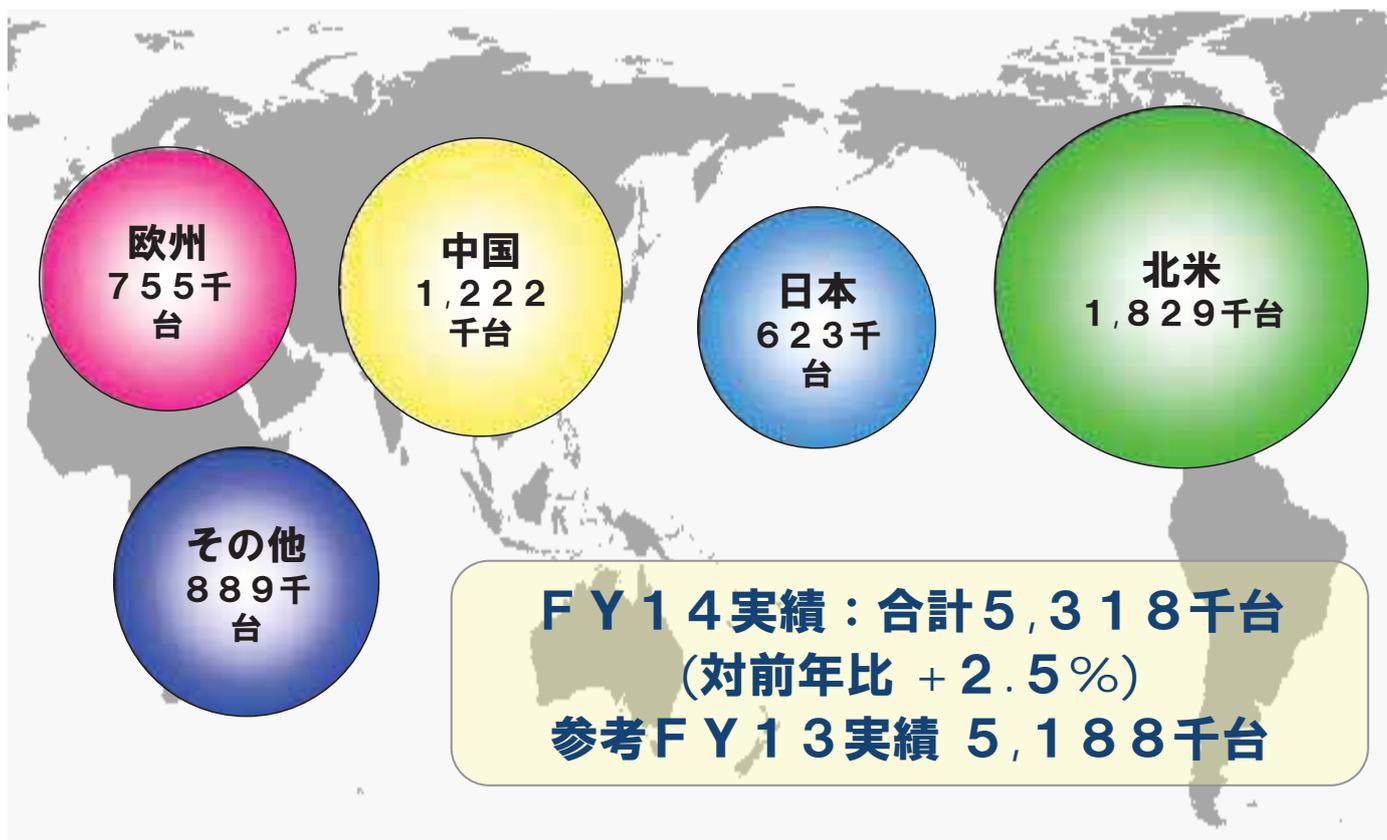


## 2014年度実績

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

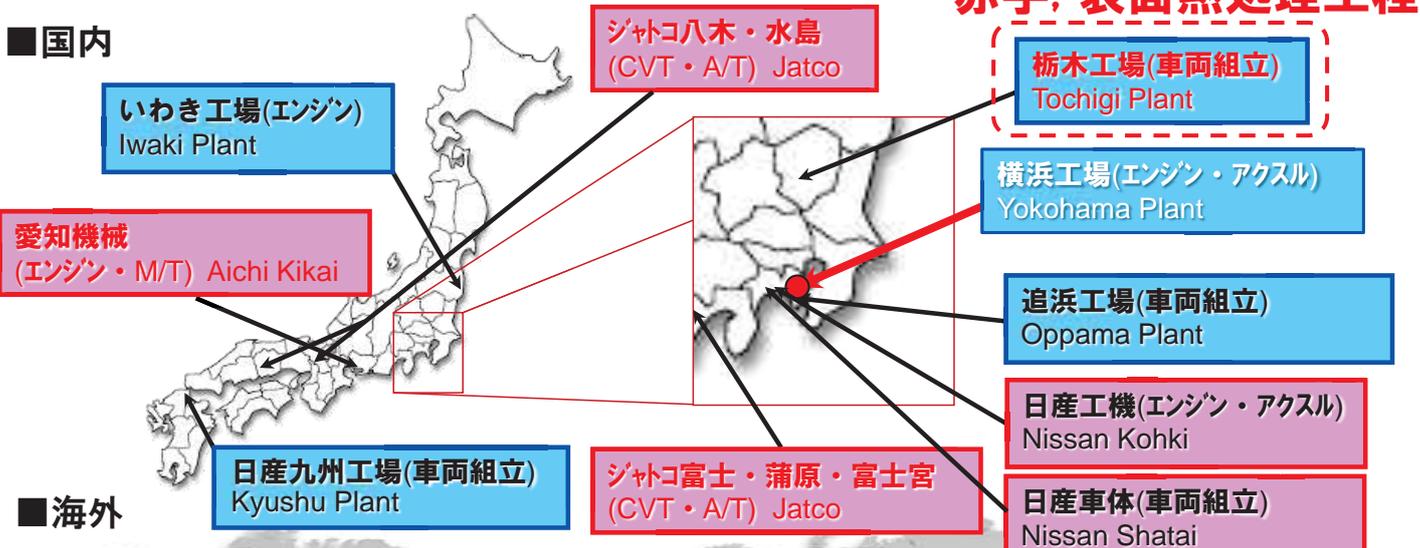
# 地域別販売実績



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

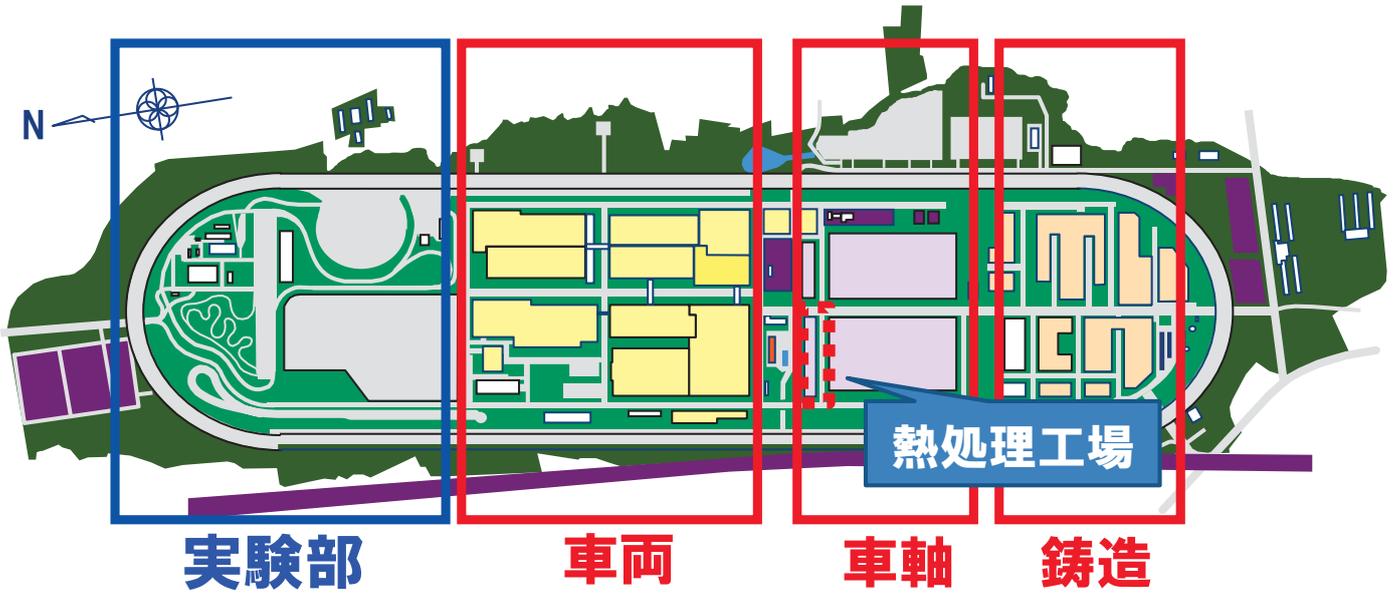
## 栃木工場の沿革

	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	<b>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</b>

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」

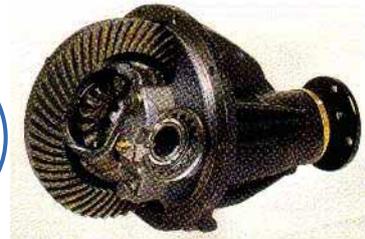
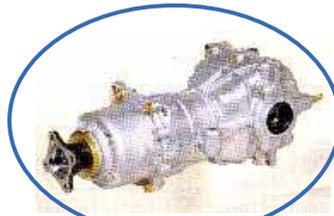


■敷地面積約 293 万㎡ (約92万坪)  
■建物面積 約 83 万㎡ (約25万坪)

NISSAN MOTOR CORPORATION

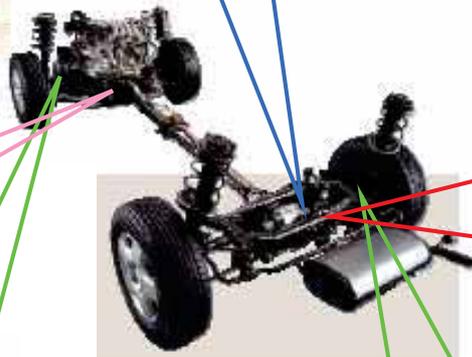
## 主な生産品目

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

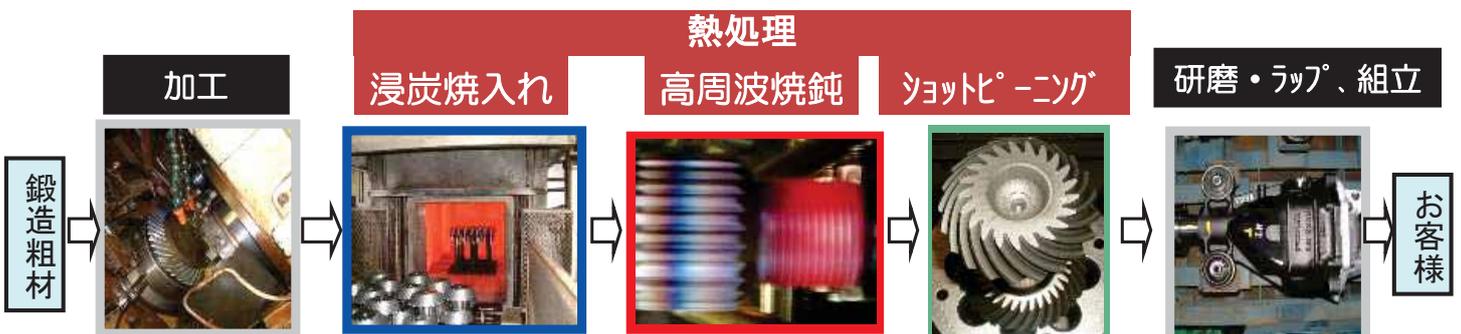
NISSAN MOTOR CORPORATION

## 熱処理部品、工順紹介

### ◆ 部品紹介

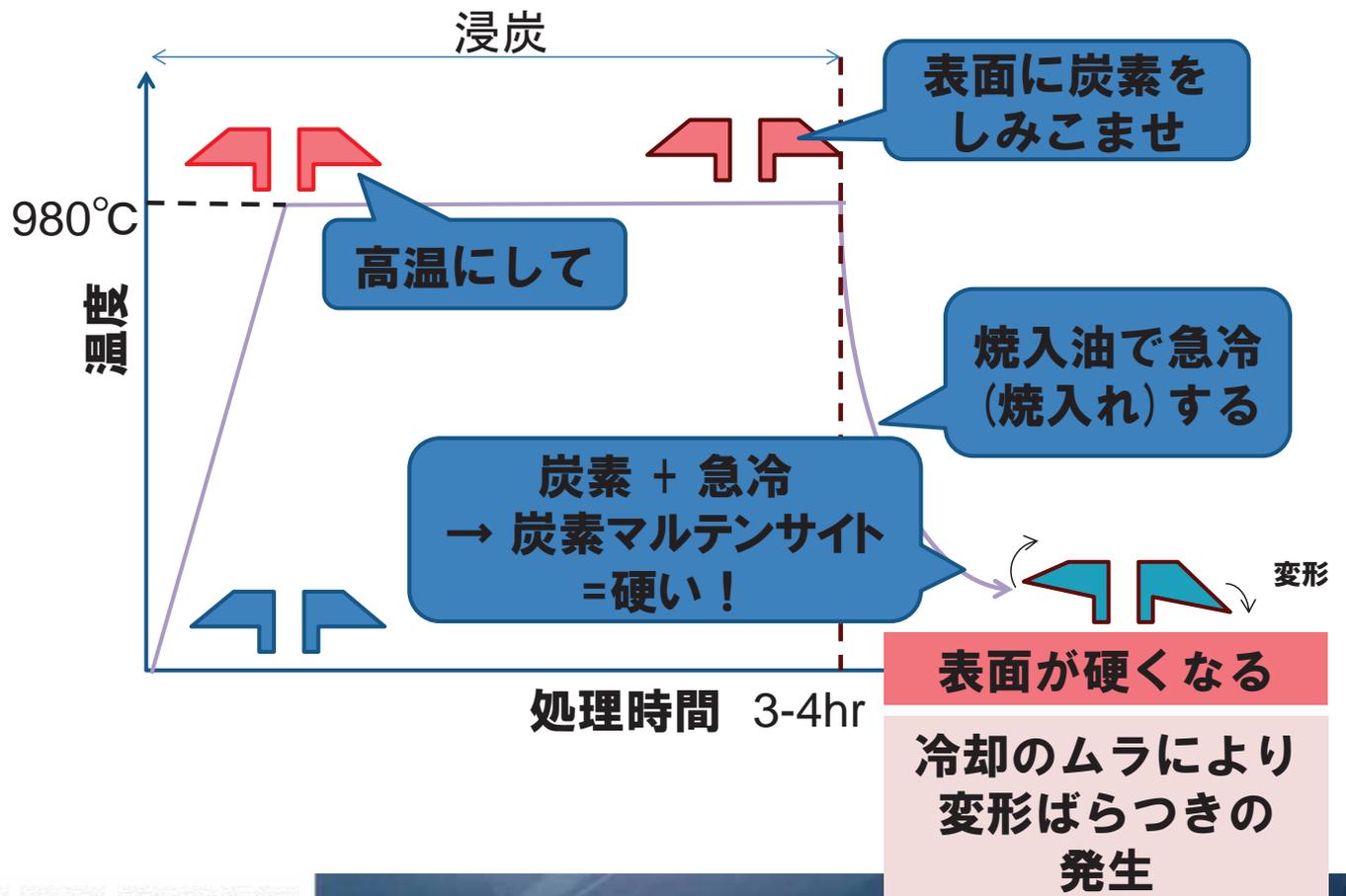


### ◆ 工順(ハイポイドピニオン)



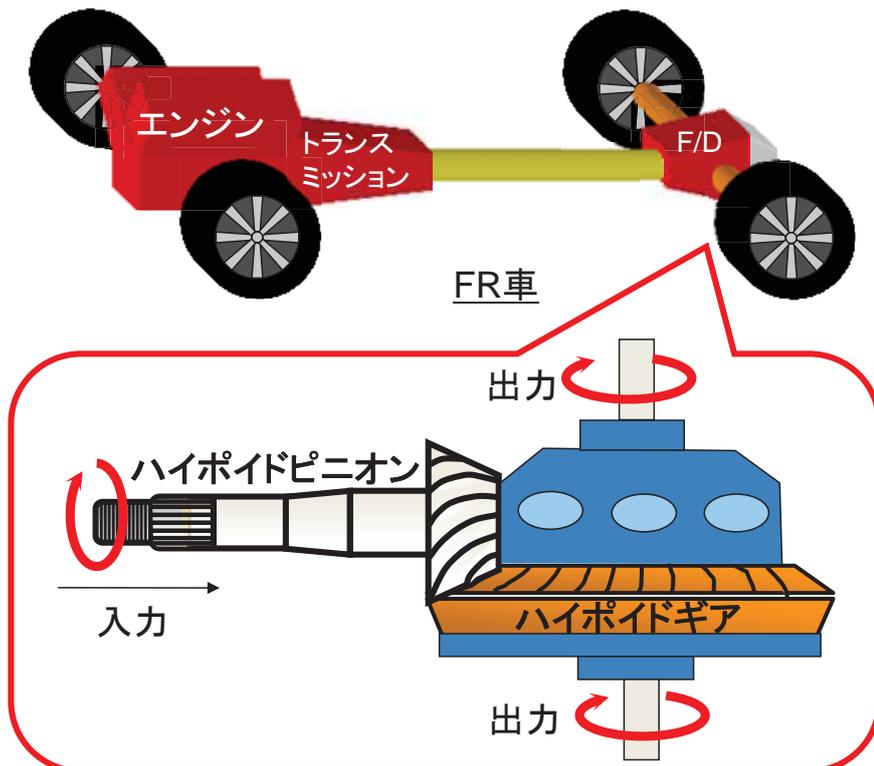
NISSAN MOTOR CORPORATION

# 浸炭熱処理とは



NISSAN MOTOR CORPORATION

# ハイポイドギアとは？



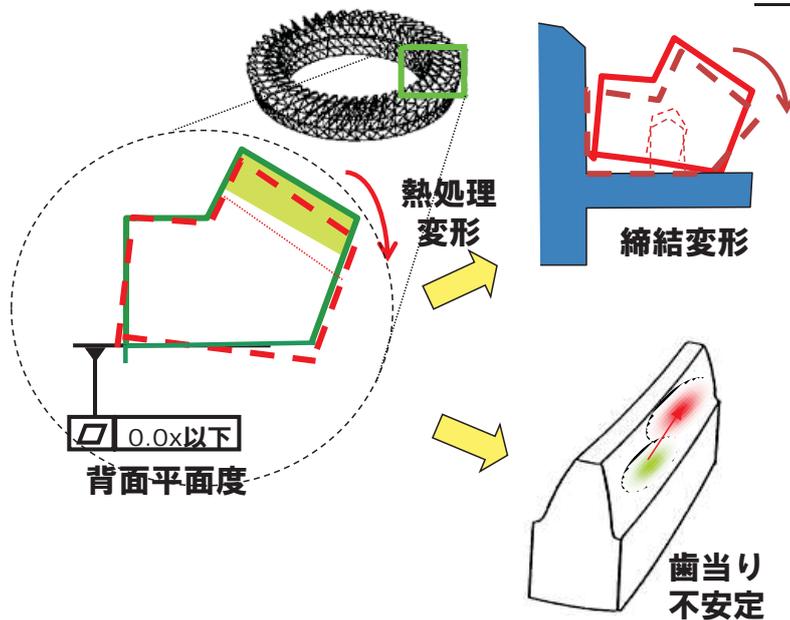
ハイポイドギアの要求特性

- 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



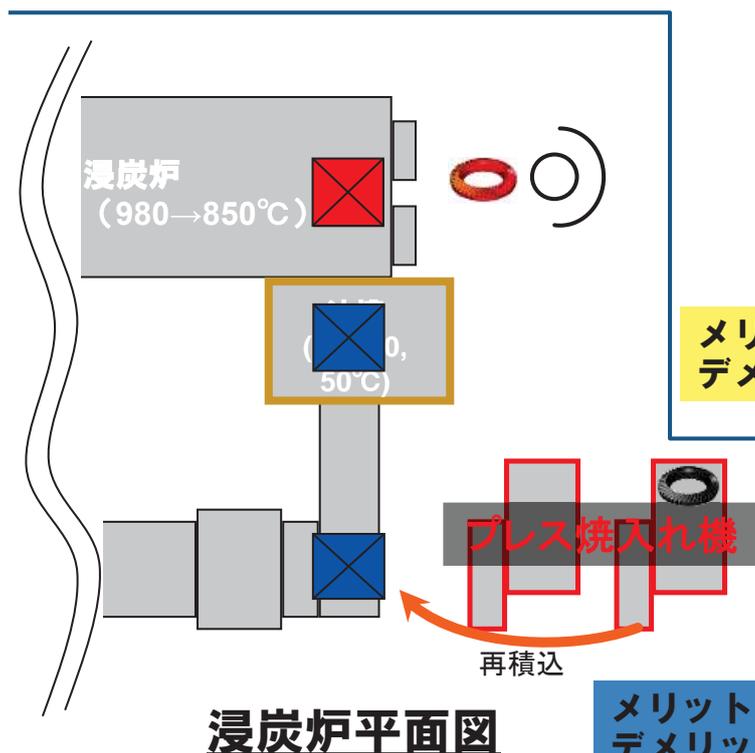
背面平面度が悪いと....

- ・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

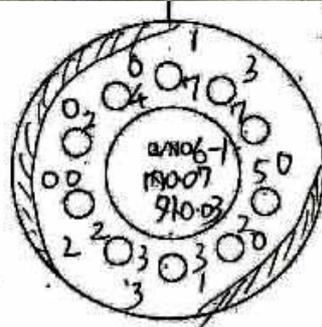
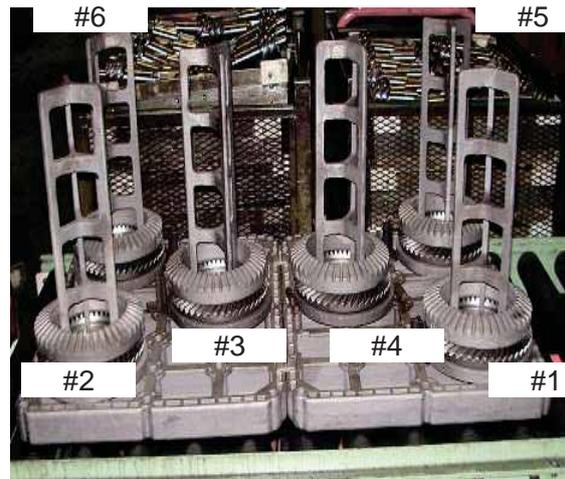
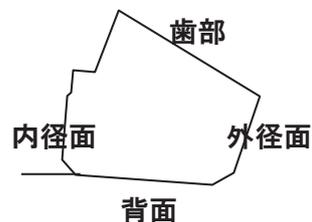
NISSAN MOTOR CORPORATION

## 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

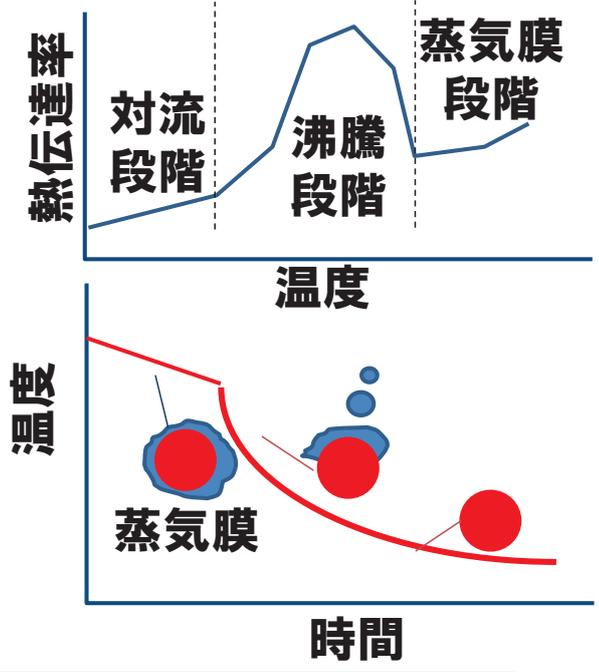


NISSAN MOTOR CORPORATION

# 焼入現象の可視化実験



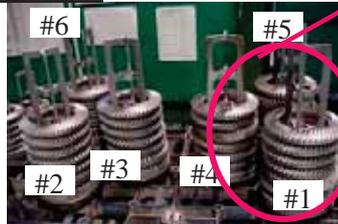
ハイポイドギアの焼入れの様子



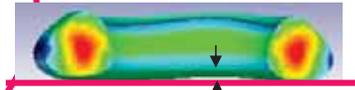
蒸気膜の崩落タイミングが円周方向でばらつく  
⇒円周方向の冷却バラツキ大

NISSAN MOTOR CORPORATION

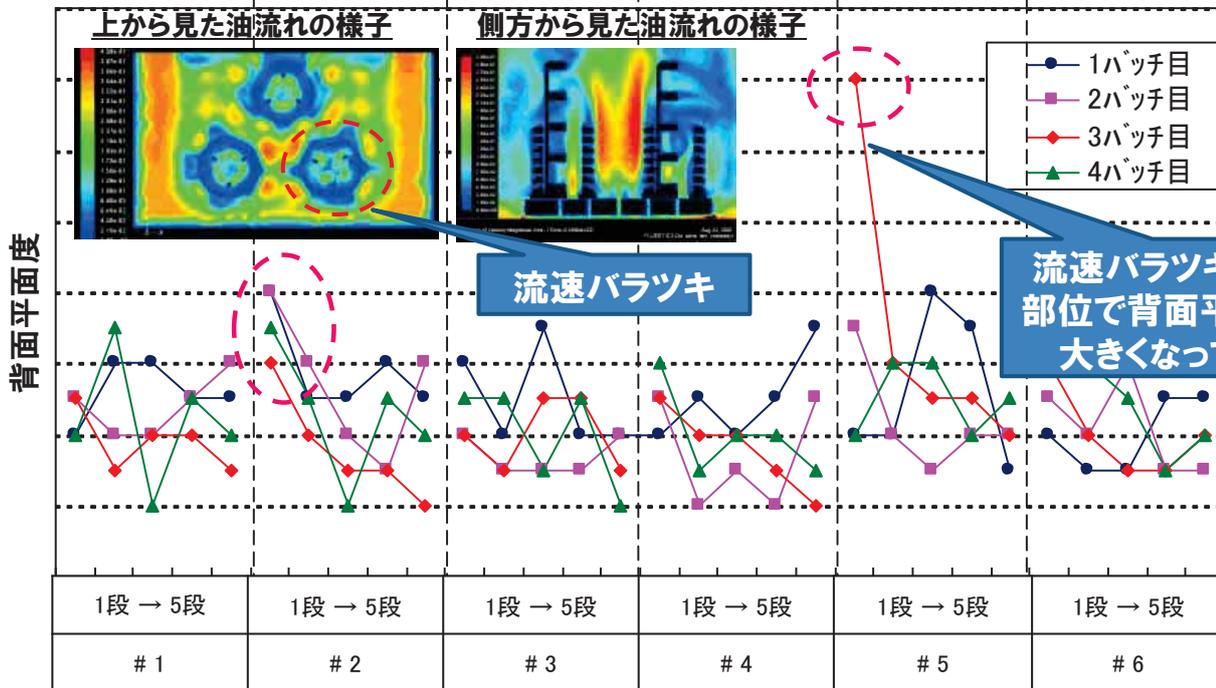
## 実荷姿での歪の様子



一般的な傘歯歯車の集団焼入れ



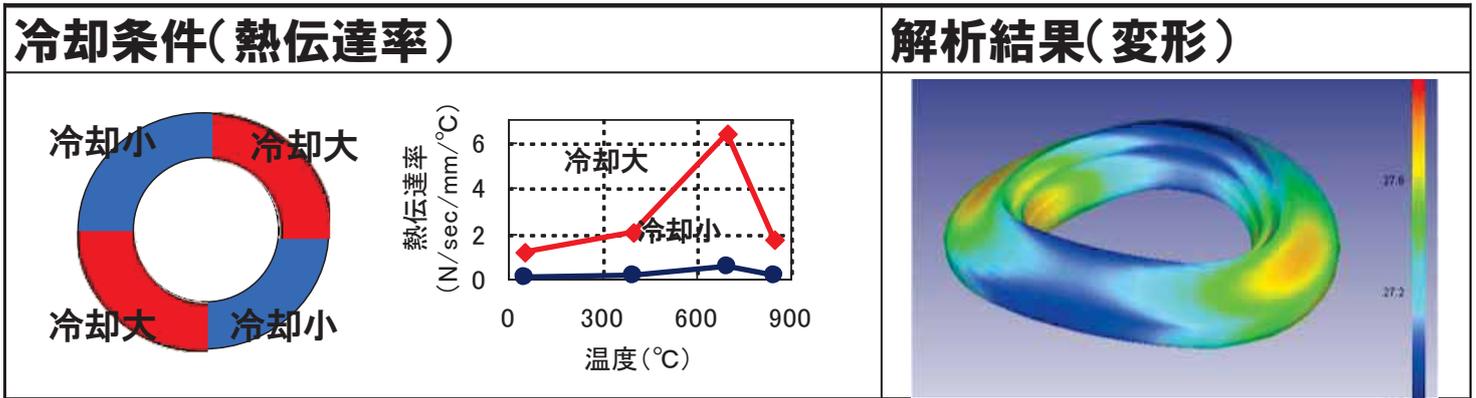
背面平面度



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



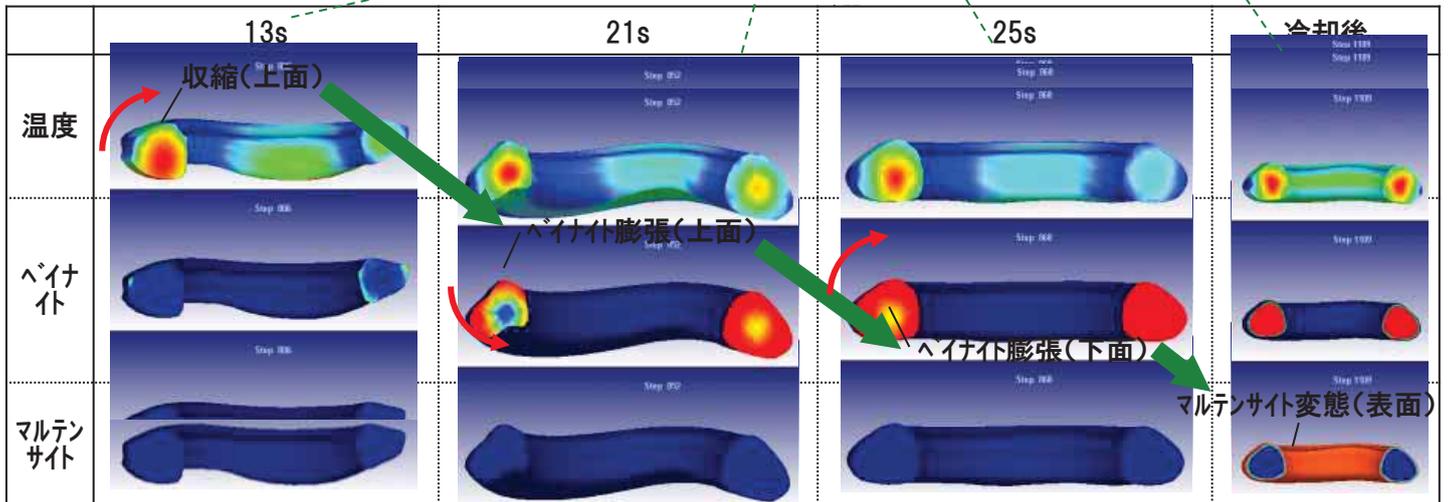
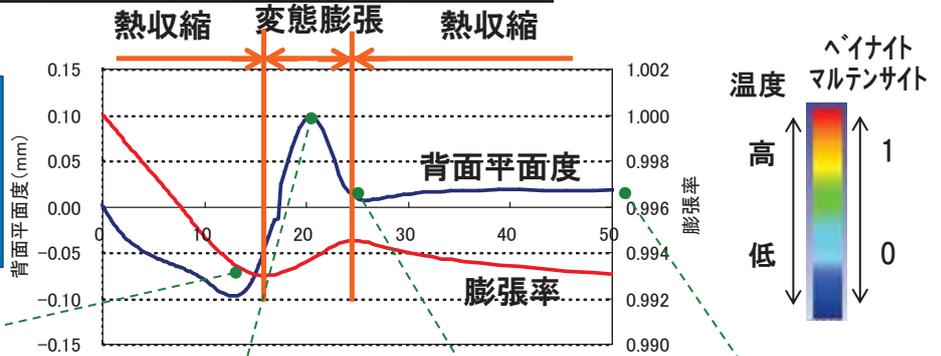
周方向蒸気膜崩落ばらつき⇒歪発生

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

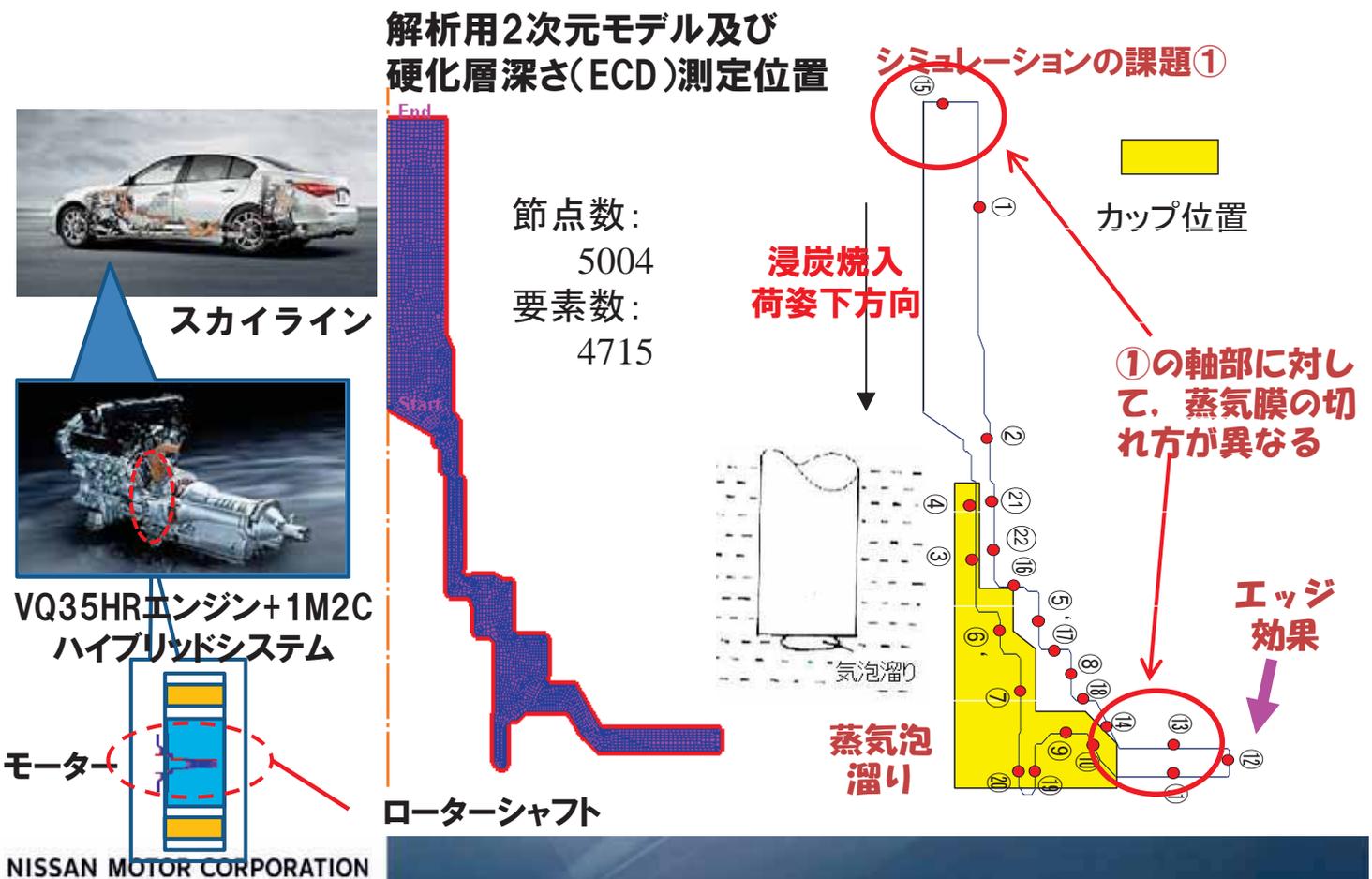
NISSAN MOTOR CORPORATION

## <Agenda>

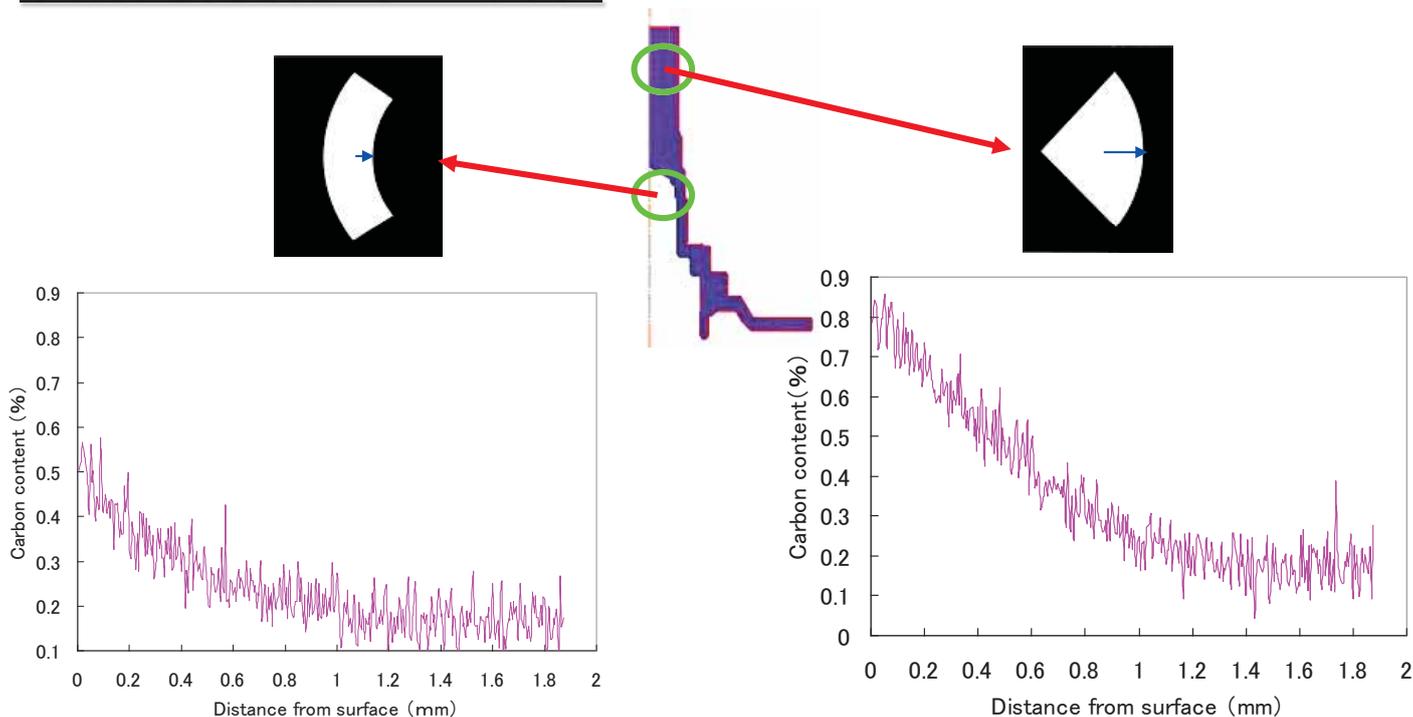
- ・日産自動車と工程のご紹介
- ・浸炭焼入れ熱処理とハイポイドギアの製造方法
- ・熱処理歪の要因調査
- ・**熱伝達率のカタログ化**
- ・熱伝達率の荷姿内バラツキに関する調査
- ・二相流解析に関する調査
- ・まとめ

NISSAN MOTOR CORPORATION

## 熱処理予測精度の向上



# 炭素濃度分布の反映



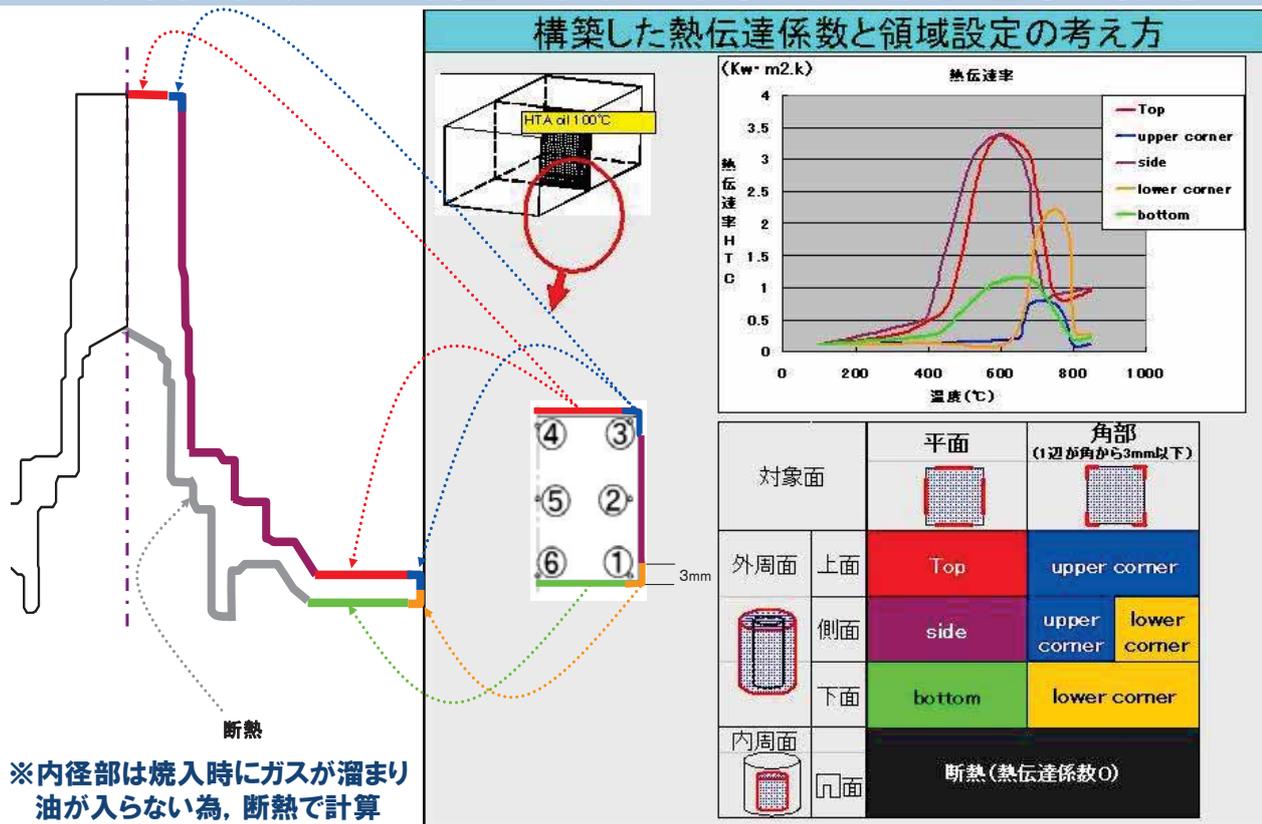
浸炭雰囲気ガス滞留による炭素濃度分布の違いの折込みを実施した

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

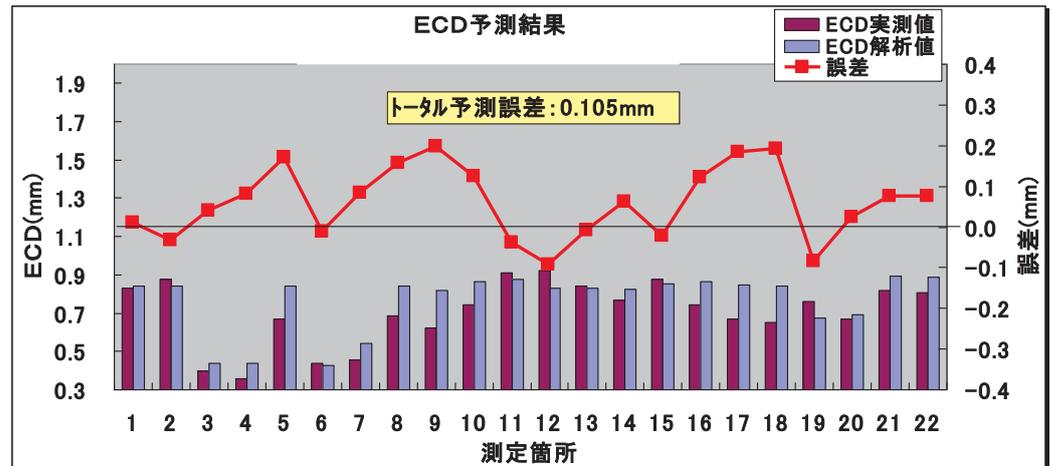
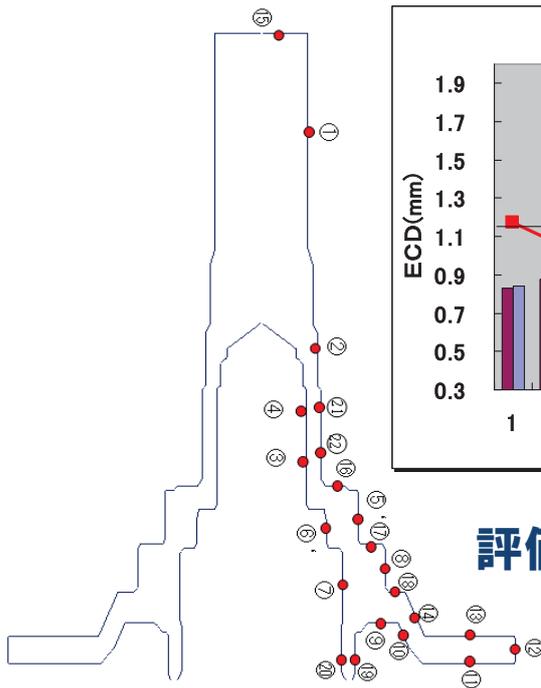
構築した熱伝達係数と領域設定の考え方



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>

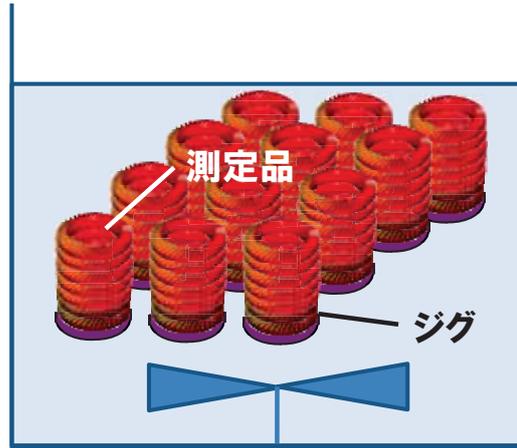
- ・日産自動車と工程のご紹介
- ・浸炭焼入れ熱処理とハイポイドギアの製造方法
- ・熱処理歪の要因調査
- ・熱伝達率のカタログ化
- ・**熱伝達率の荷姿内バラツキに関する調査**
- ・二相流解析に関する調査
- ・まとめ

# 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

部品表面での  
熱伝達率の算出

熱処理歪の実測

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

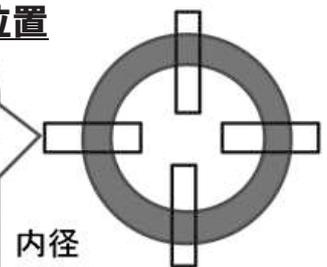
比較検証

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

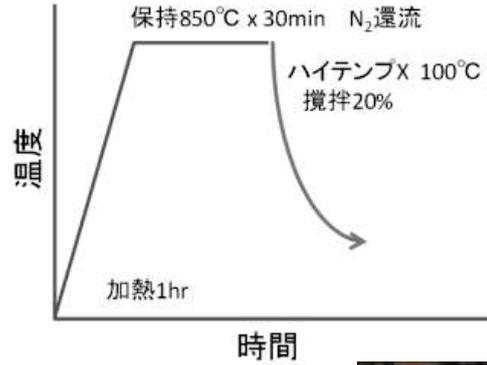
## 1) 測定品 浸炭処理



## 2) ダミー品 浸炭処理



## 3) 焼入れ



焼入荷姿



焼入実験炉



焼入実験の様子

NISSAN MOTOR CORPORATION

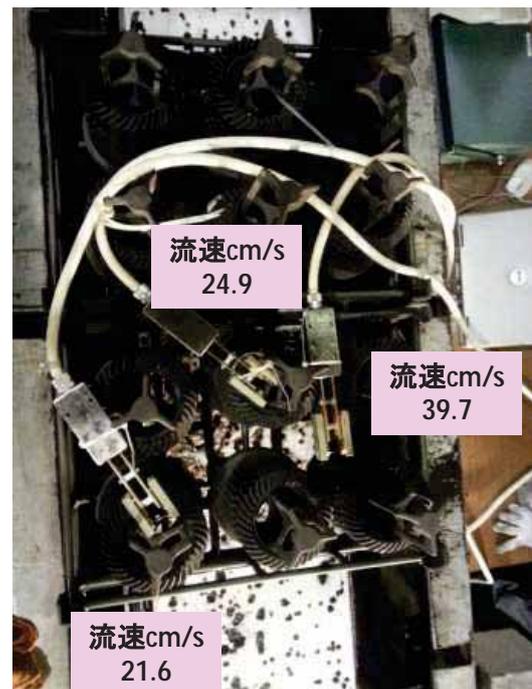
# 流速測定実測結果

## 装置外観(片袖油槽)

攪拌機



## プローブ配置:測温位置

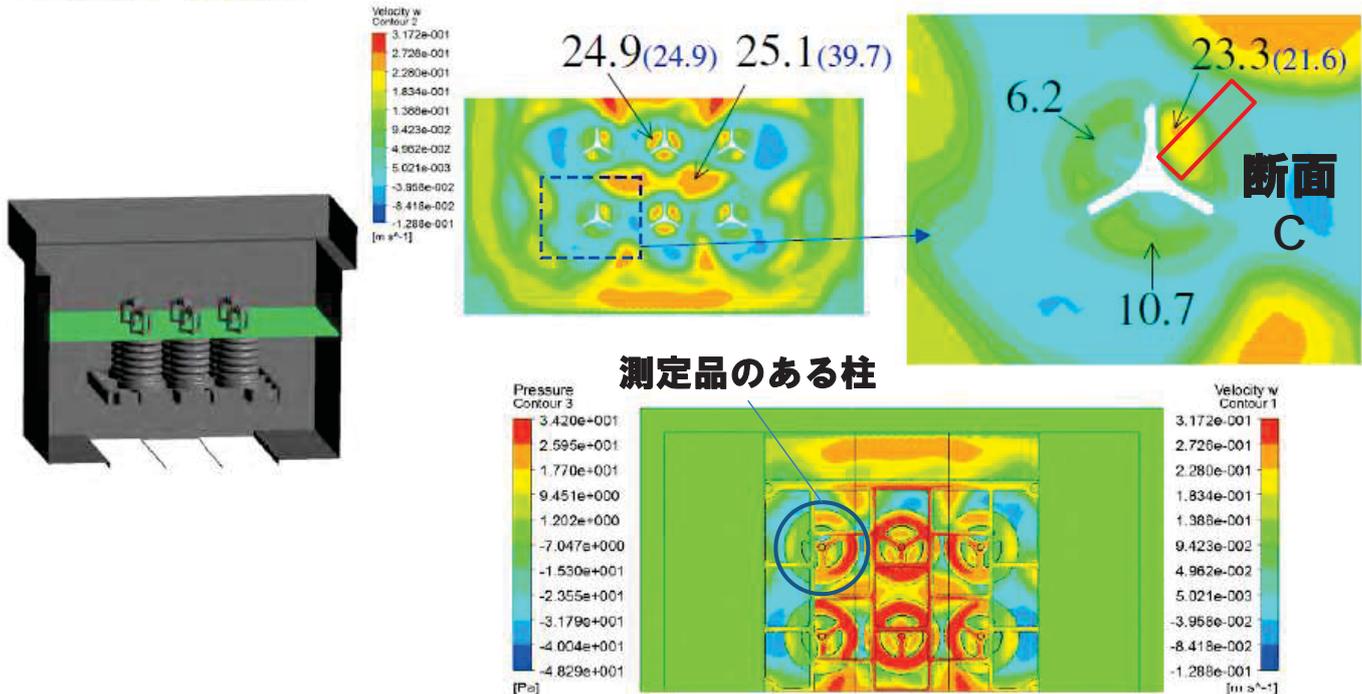


処理物の上部は流速が遅く、処理物の間は流速が速い

NISSAN MOTOR CORPORATION

# 流体解析と流速実測結果の比較

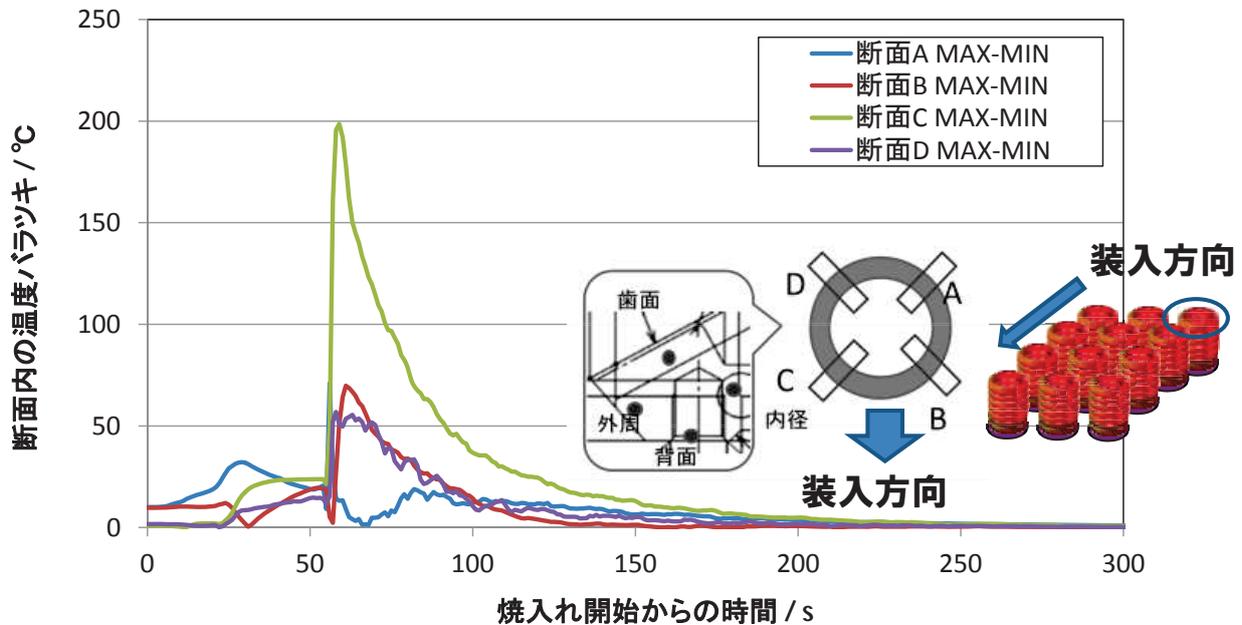
\* 解析値(実測値)



・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

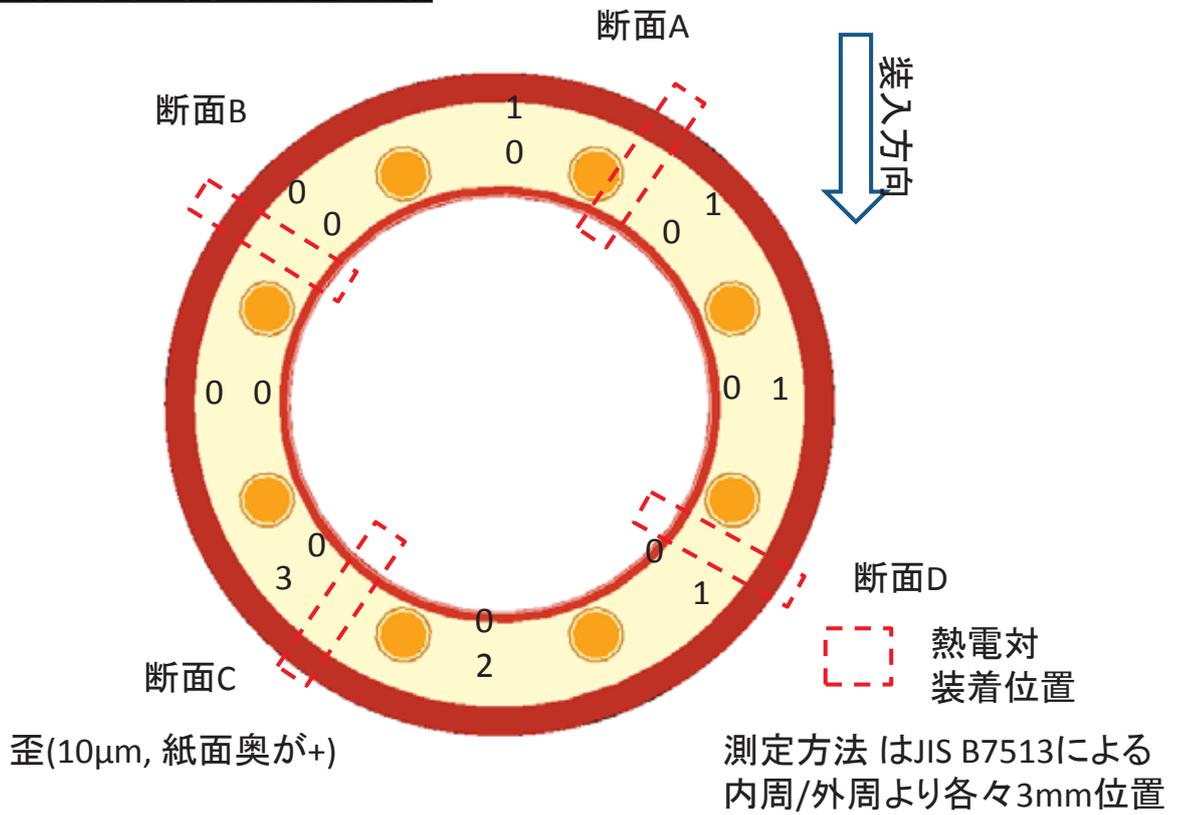
NISSAN MOTOR CORPORATION

## 焼入れ時断面内温度ばらつき



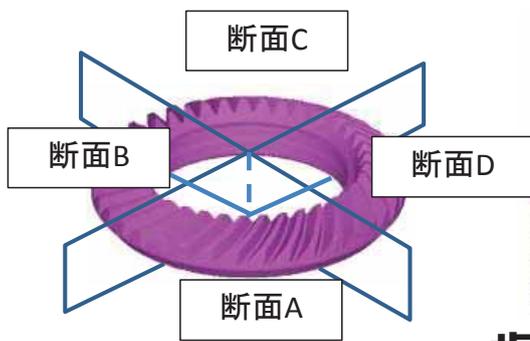
・冷却速度バラツキは断面 C>B≒D>Aとなっている  
 ・冷却速度ばらつきが最大になる時間は断面によらず60秒近傍である

# 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

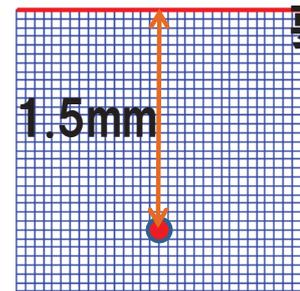
# 熱伝達率導出方法



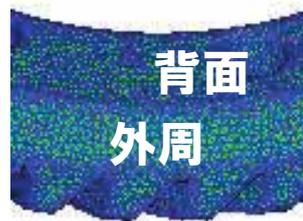
歯面熱伝達率算出モデル



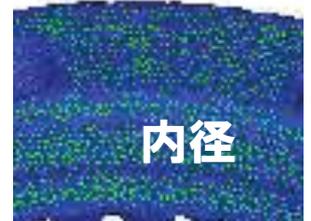
歯面



背面・外周及び内径熱伝達率算出モデル



背面・外周

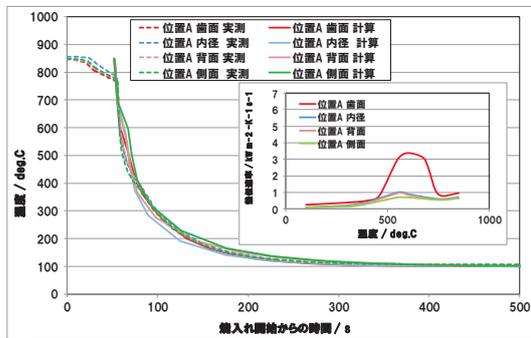
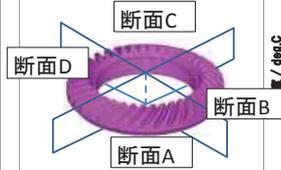
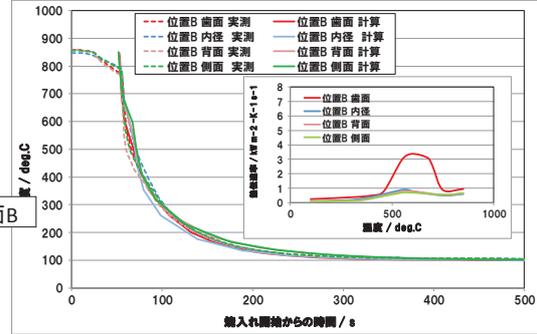
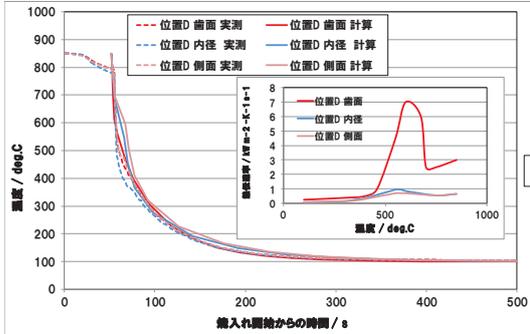
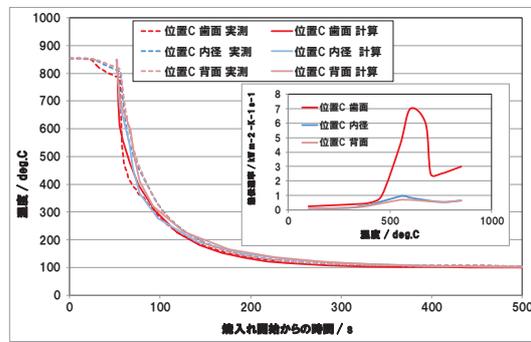


内径

節点数  
1089  
要素数  
1024

- ・表面を16分割し、各面について熱伝達率の導出を行った。
- ・20cm/s攪拌時のデータを起点に遺伝的アルゴリズムを用い、逆解析法で熱伝達率を計算した。

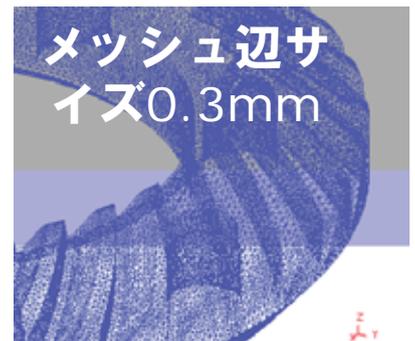
# 熱伝達率導結果



- 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

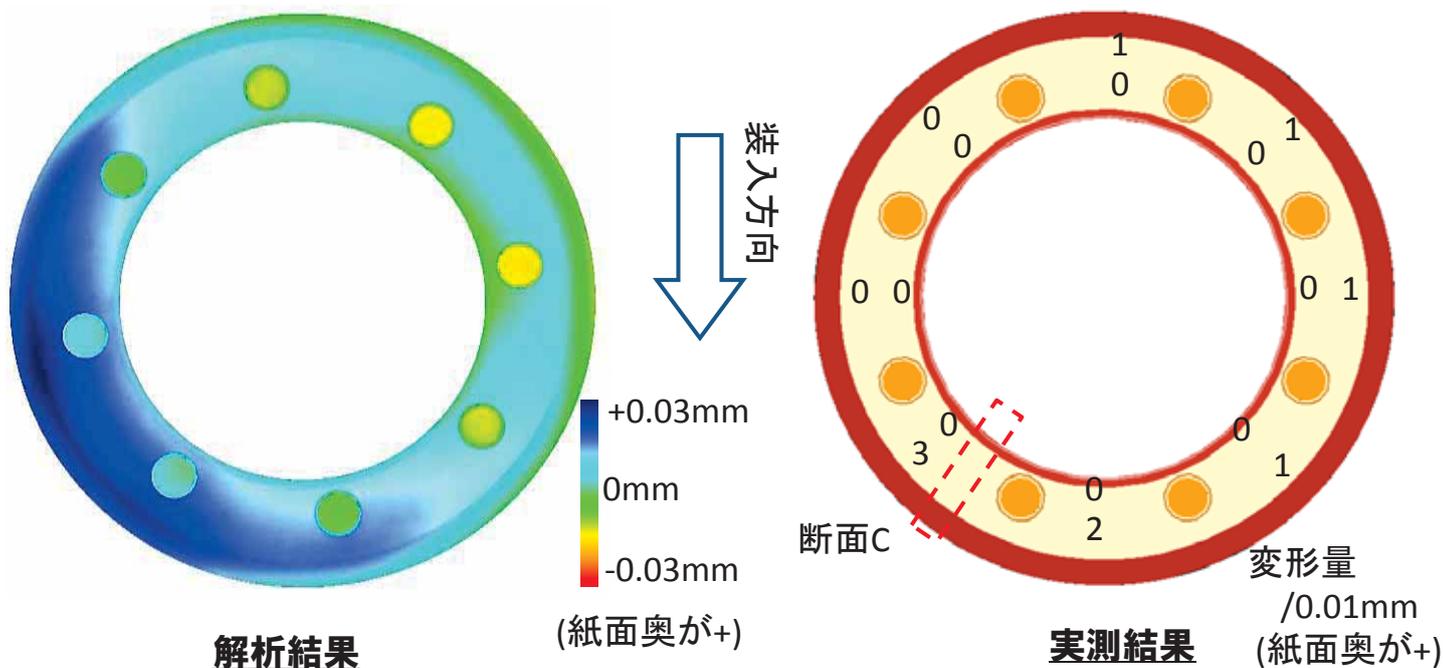
項目	内容
ソルバ	DEFORM-HT V10.2 64bit
ワークステーション	HP Z420 (Windows7)
CPU, メモリ	Inter Xeon 2.8GHz(4core), 32GB
計算時間	約480Hr(浸炭, 加熱含む)
焼入計算ステップ	0.0001s(初期), 5°Cステップに自動調整
要素数	814763
節点数	172946
メッシュ形式	テトラ, 均一メッシュ



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

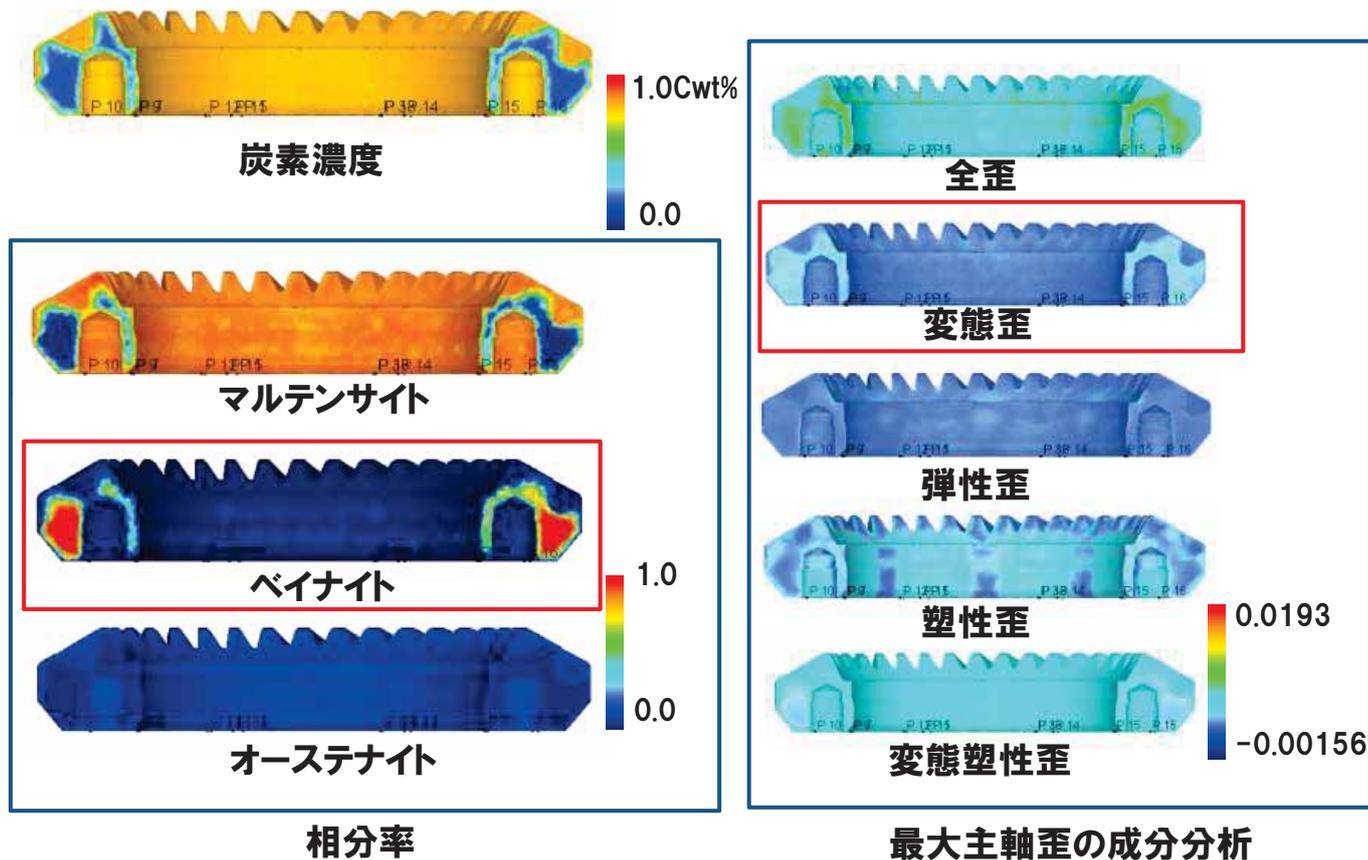
# シミュレーション結果の出力と歪要因の分析



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

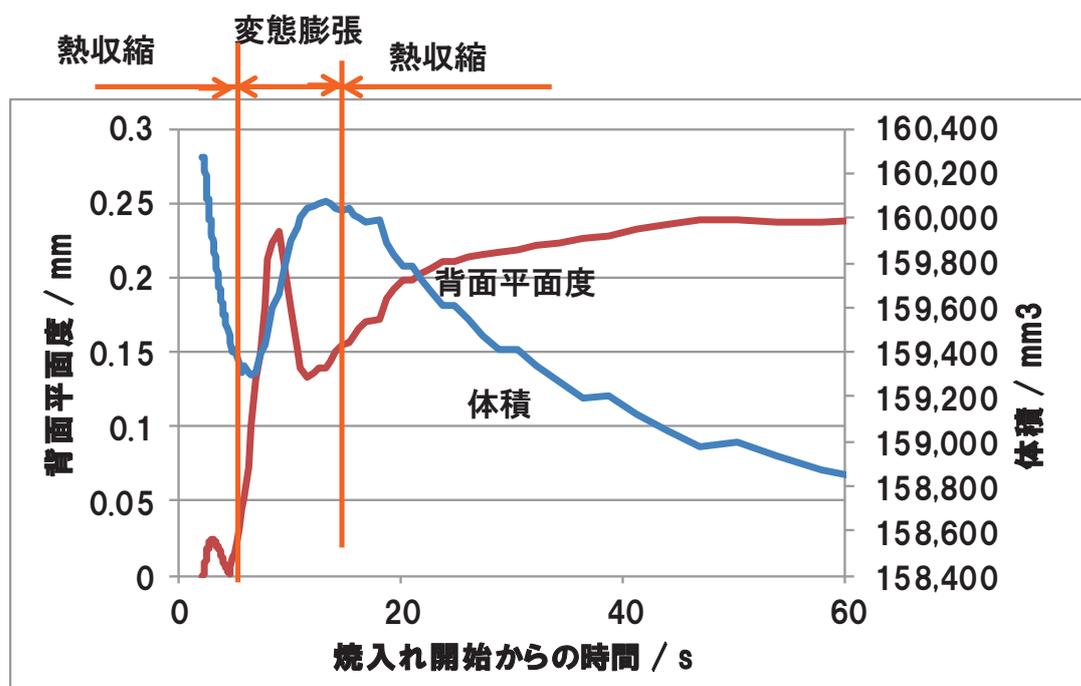
## <活用例>シミュレーション結果の出力と歪要因の分析①



- ・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<



- ・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

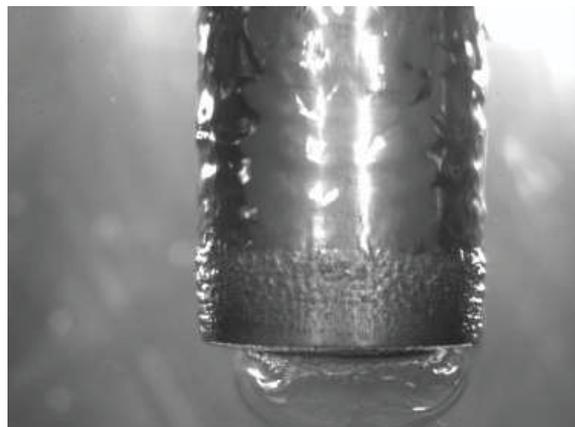
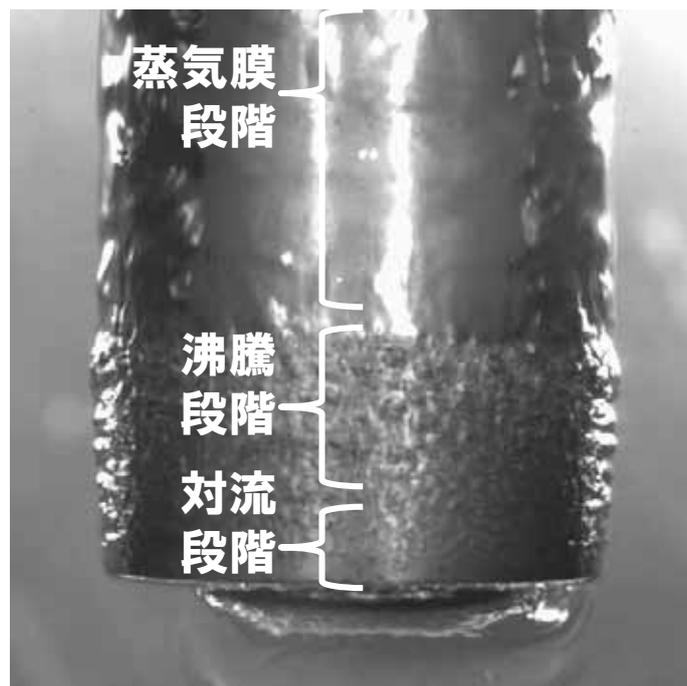
NISSAN MOTOR CORPORATION

### <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

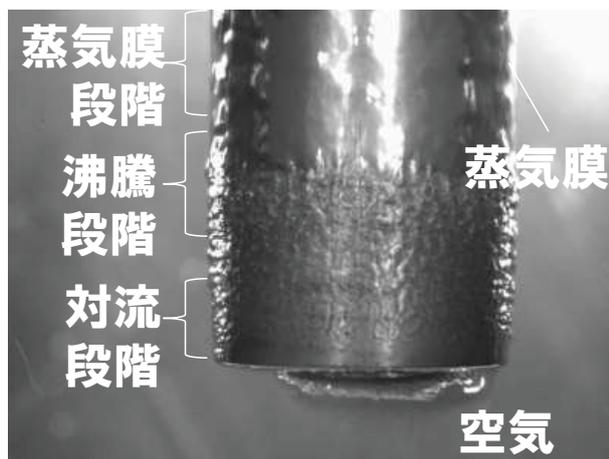
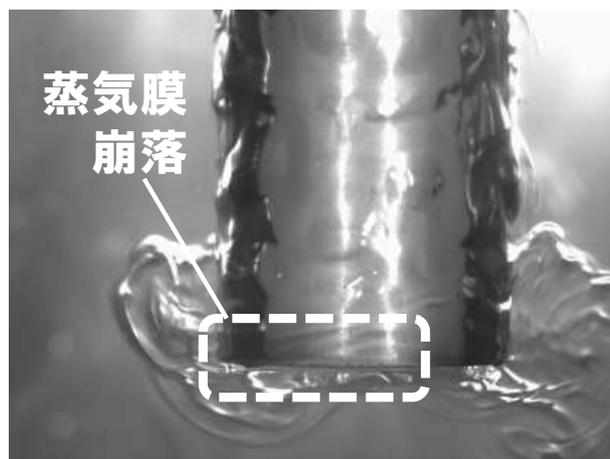
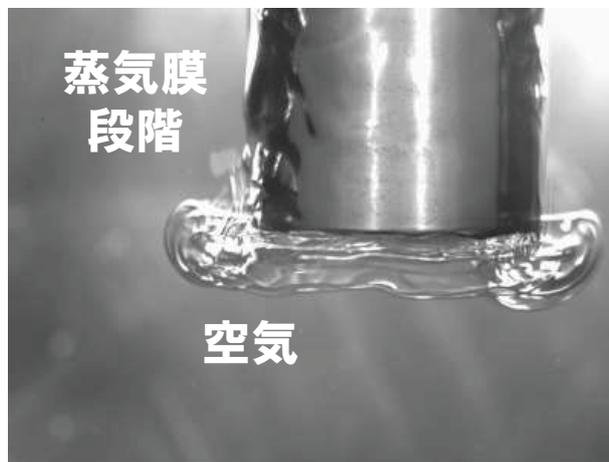
NISSAN MOTOR CORPORATION

# 二相流解析を用いて冷却状況を予測する試み



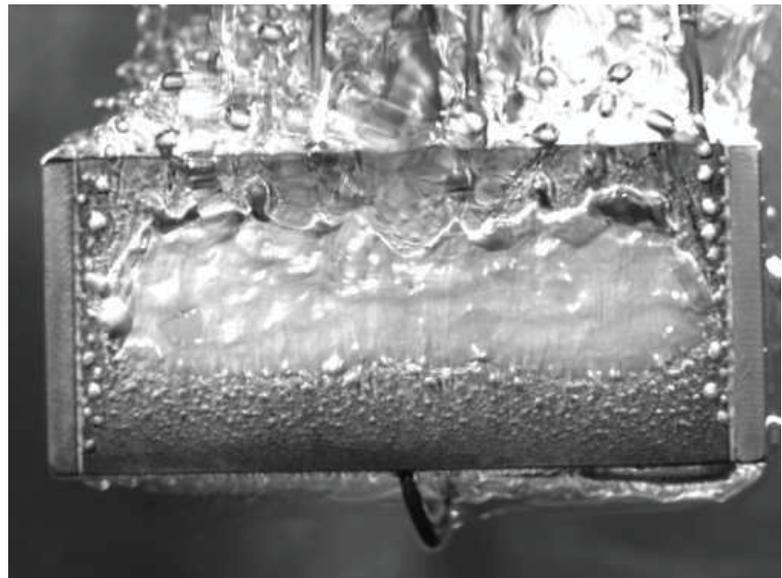
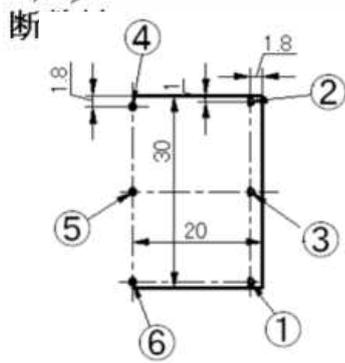
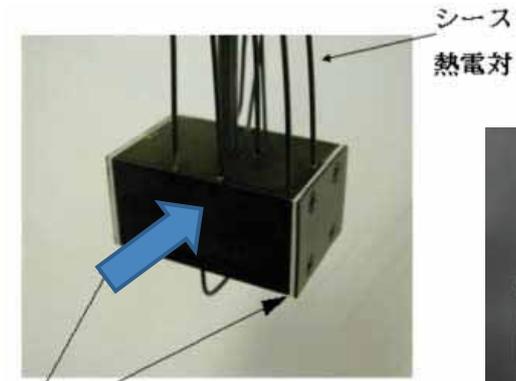
丸棒での焼入時の蒸気膜崩落の様子

NISSAN MOTOR CORPORATION



NISSAN MOTOR CORPORATION

# 計算に用いた事例

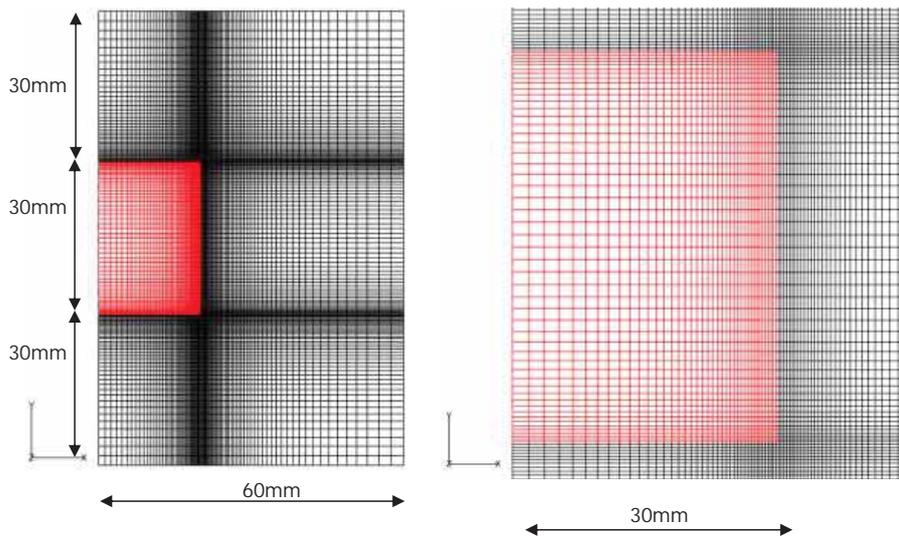


角柱での蒸気膜崩落の様子

引用元：(1) 奈良崎道治, 鋼部品の油焼入れ時冷却特性に及ぼすエッジ効果の影響  
平成23年度 MSTCアイデアファクトリー第1回会議資料(2011. 5. 17) .

NISSAN MOTOR CORPORATION

## 解析モデル



接点数：36,156点

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)

$\rho_k$  :  $k$  相の密度

$\alpha_k$  :  $k$  相の体積割合

$v_k$  :  $k$  相の速度

$\Gamma_k$  :  $k$  相の質量生成率 (沸騰と凝縮速度)

$\tau_k$  :  $k$  相のせん断応力

$F_{wk}$  : 壁面が  $k$  相に及ぼす摩擦

$F_{ik}$  : 界面摩擦力 (全体)

$F_{bk}$  : 気泡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

$\rho_s$  : 固体の密度

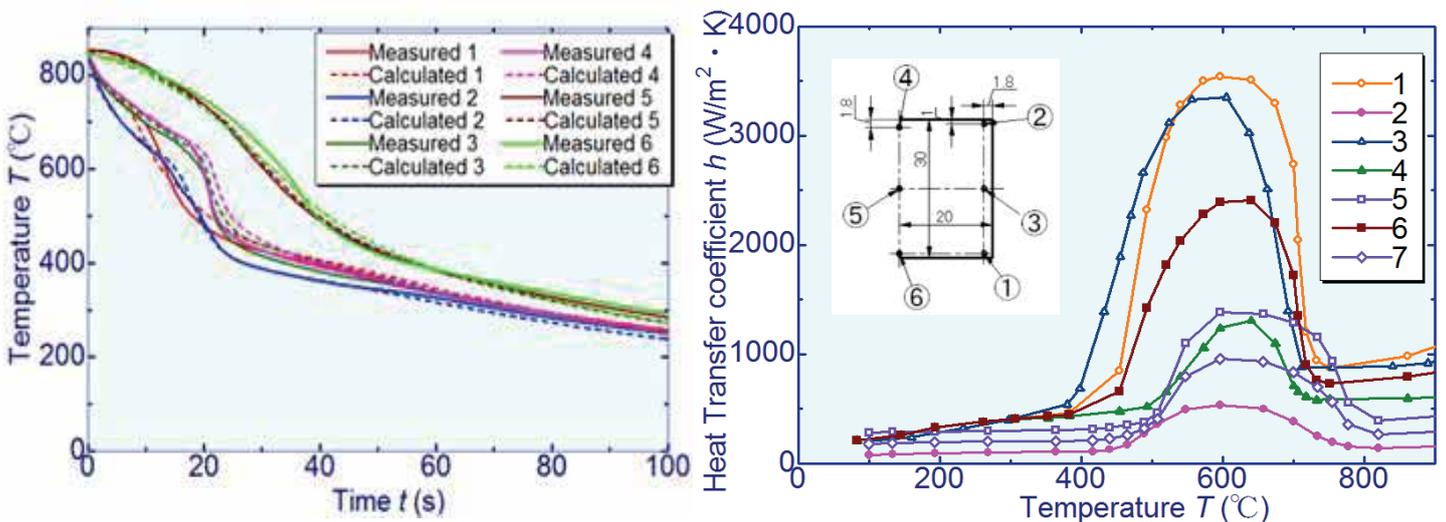
$c_s$  : 固体の比熱

$T$  : 温度

$\lambda_s$  : 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)

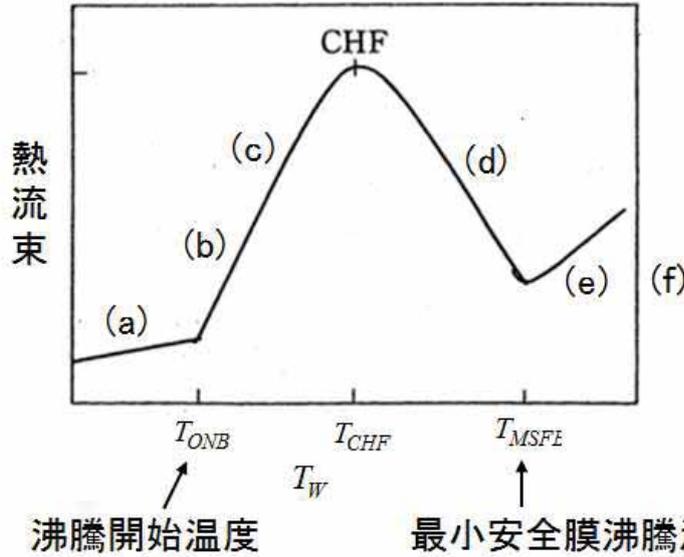
密度(kg/m <sup>3</sup> )	7920
比熱(J/kg/K)	499
熱伝導率(W/m/K)	16.0

SUS304の物性値

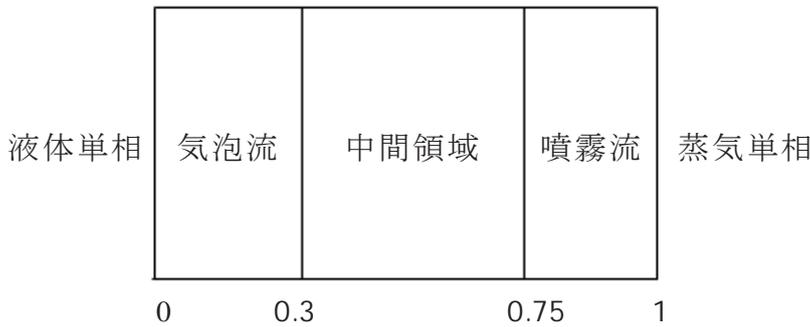
引用元:<http://materiallab.seesaa.net/article/155239503.html>

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



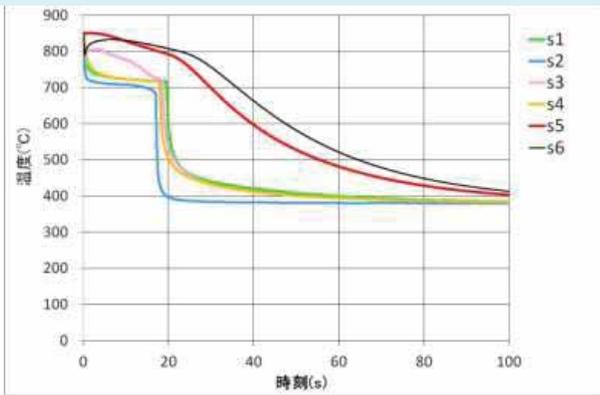
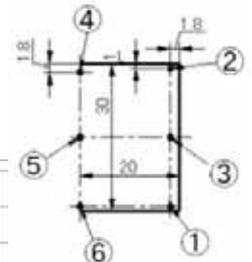
	液体	気体
密度(kg/m <sup>3</sup> )	894.2	3.960
粘性係数(Pa·s)	0.01663 (=894.2 × 18.60E-6)	2.767E-5
定圧比熱(J/kg/K)	4186	3348.8
熱伝導率(W/m/K)	0.1163	0.04651
飽和エンタルピー(J/kg)	2.734E6	2.943E6
表面張力係数(N/m)	0.300	
飽和温度(°C)	380 (図3.4より推定)	

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.

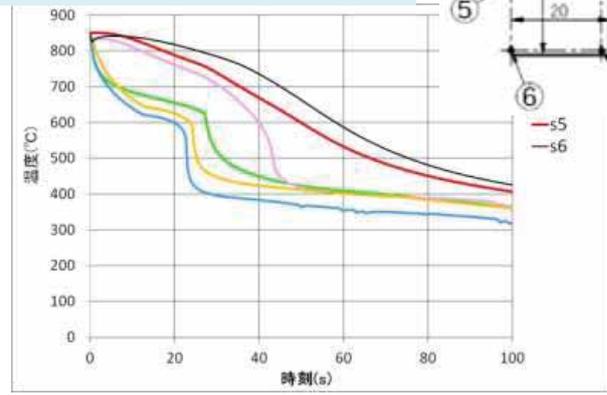
NISSAN MOTOR CORPORATION

# 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

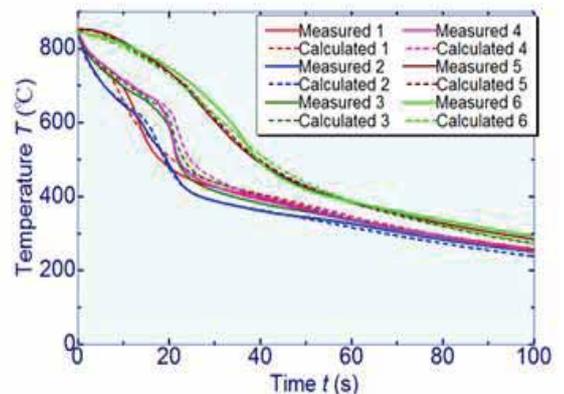


CASE1  
計算条件



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