

## 技術論文

## 熱処理データベースの構築とシミュレーション技術の向上

### Construction of Heat Treatment Database and Enhancement of Simulation Technique

七野 勇人  
Hayato Shichino

熱処理部品の開発および製造条件の最適化を図るため、熱処理データベースの開発を行い、浸炭および高周波焼入れ歯車に関するデータの投入を行い、データベースの構築を行った。一方で、これまで開発を行ってきた熱処理品質を予測するコンピュータシミュレーションにおいて、解析速度の大幅な向上などの改良を行うことにより、パソコンでギヤ全体形状などの大規模モデルでの解析を実現した。また、シミュレーションの解析精度の評価として、現在産学共同で進められているベンチマークシミュレーションを実施し、評価検討を行った。さらに建設機械の浸炭歯車における量産時の硬さの変動幅をデータベースとシミュレーションを用いて評価を行った。

A heat treatment database was developed to optimize the development of heat treatment parts and manufacturing conditions. Data related to carburized and induction hardened gears was input to construct the database. The analysis speed of computer simulation of heat treatment quality has been dramatically increased, allowing analysis of large scale models such as entire shapes of gears using a personal computer. Benchmark simulation currently undertaken as an industry-academia joint project was carried out and the accuracy of simulation analysis was evaluated. The fluctuation range of hardness of carburized gears of construction equipment manufactured in full-scale production was estimated using the database and simulation.

*Key Words:* Heat Treatment Database, Heat Treatment Simulation, Heat Treatment, Carburizing, Hardness, Residual Stress, Distortion, Gear

## 1. 緒言

熱処理部品の開発および製造条件の最適化を図るための重要なツールとして、実際の熱処理に関するデータベースの構築および仮想的に熱処理過程を再現できるコンピュータシミュレーションの開発を進めている。また、これらのデータベースおよびコンピュータシミュレーションは、各々独立したものではなく、それぞれの特徴を生かしながら、組み合わせることで、より正確な検討を効率的に行うことができ、その結果として新規部品の開発や製造条件の最適化を図ることができるものと期待されている。

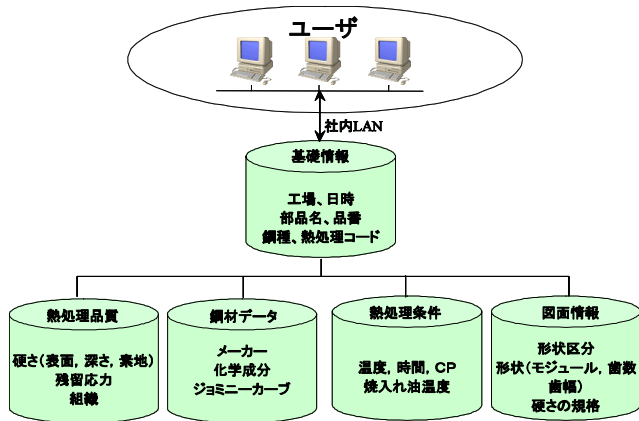
現在、熱処理シミュレーションの解析精度の向上および適用拡大をねらいとして、国際的にも産官学でまとまった活動がなされている。国内においては、(社)日本材料学会「材料データベース研究分科会」および(社)日本熱処理技術協会「焼入れとシミュレーション研究部会」で、鋼材の物性データのデータベース化<sup>1)</sup>や熱処理シミュレーションのベンチマーク<sup>2)</sup>等が進められている。また、(財)製造科学技術センター(IMS = Intelligent Manufacturing System)のVHT(Virtual heat treatment tool for monitoring and optimising HT process)プロジェクトでは、シミュレーションやデータベースおよびAIなどを用いて、

最適化を図る技術開発が行われ<sup>3)</sup>、弊社も本プロジェクトに参加し技術の向上を図ってきた。

本研究では、まず代表的な熱処理部品である歯車に関する熱処理データベースを開発し、データの投入を行った。次に熱処理シミュレーション技術として、解析技術の向上およびシミュレーションの解析精度の評価のためのベンチマークシミュレーションを行った。最後にこのデータベースとシミュレーションを用いて、製造時の熱処理品質の変動の検討を行った事例について報告する。

## 2. 熱処理データベースの構築

熱処理部品に関するデータベースとしては、必要な要件を満たす市販されているデータベースシステム JCaP<sup>4)</sup>を用いることにした。これまでの研究において、図1に示す構造をもつデータベースを開発し、浸炭および高周波焼入れ歯車に関して各生産工場の6,300件を越えるデータの投入を行った。作成されたデータベースは社内LANを用いて関連部門に公開されており、熱処理品質の予想、図面規格の検討、鋼材の選択、熱処理条件の設定、量産時の熱処理品質の変動の評価などに利用されている。



(a) 熱処理データベースの構造

(b) データベースの入力シートの例

図1 開発した熱処理データベース

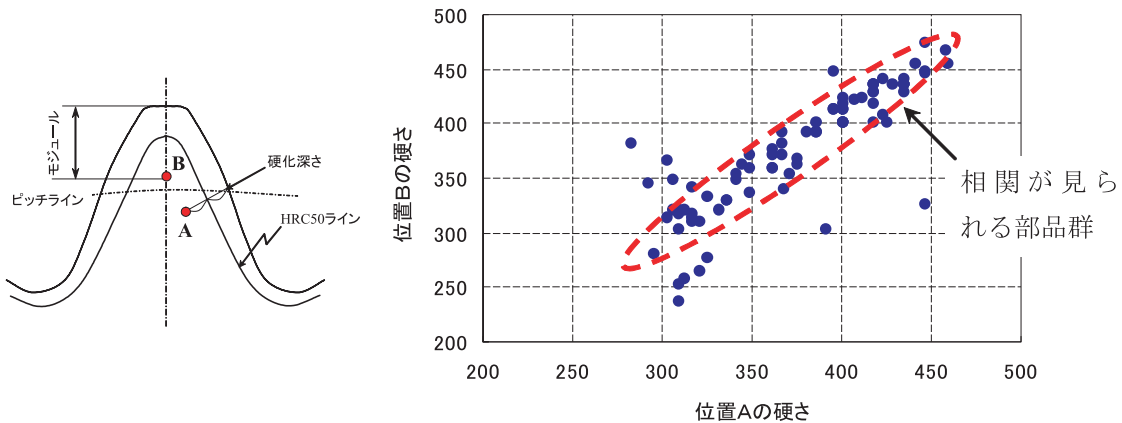


図2 浸炭歯車における異なる位置での素地部の硬さの関係

データベースの利用例として、モジュールの異なる複数の歯車において、素地部（未浸炭部）の異なる2つの位置（位置A、B）での硬さの関係を評価した結果を図2に示す。この結果より、位置Aと位置Bの硬さには強い相関関係が見られるものの、部品によっては相関関係からはずれているものがあることがわかり、その事例を確認することができる。このようにデータベース上で量産時の品質を簡単に評価することができる。

### 3. 熱処理シミュレーション技術の向上

#### 3.1 解析機能の向上

現在、熱処理シミュレーションは、熱処理ひずみを評価するために、部品のより詳細な部分モデルでの解析と、全体モデルでの解析が必要とされている。例えば、浸炭歯車の場合には、歯車精度を評価するためには、1歯の形状を微細なメッシュに分割する必要がある。周期境界条件を用いた解析が必要とされる。また、部品全体の曲がりやねじれなどの変形のためには部品全体のモデルを作

成する必要があるため、大規模なモデルとなってしまう。

そのため、これまで開発を行ってきた熱処理シミュレーション (GRANTAS)<sup>5),6)</sup>に、周期境界条件での解析機能の開発を行った。さらに解析速度の大幅な向上のために、弾塑性解析においては静的陰解法および高速マトリックスソルバー (ICCG 法等) を採用することで、従来の約90倍の解析速度を達成した。これにより従来では不可能であった大規模モデル (例えば、節点数約40,000) の解析をパソコンでも1日で行うことができ、熱処理シミュレーションではトップクラスの解析速度を達成している。

#### 3.2 ベンチマークシミュレーション

シミュレーションの解析精度を評価するためのベンチマークシミュレーションでは、できるだけ不明確な要因を避け解析結果を的確に評価できるように、鋼材物性データの収集、実験による焼入れ時の熱伝達率の同定および熱処理品質の測定を共同ワークとして実施した。ここでは解析結果と実測値との比較検討を行った。

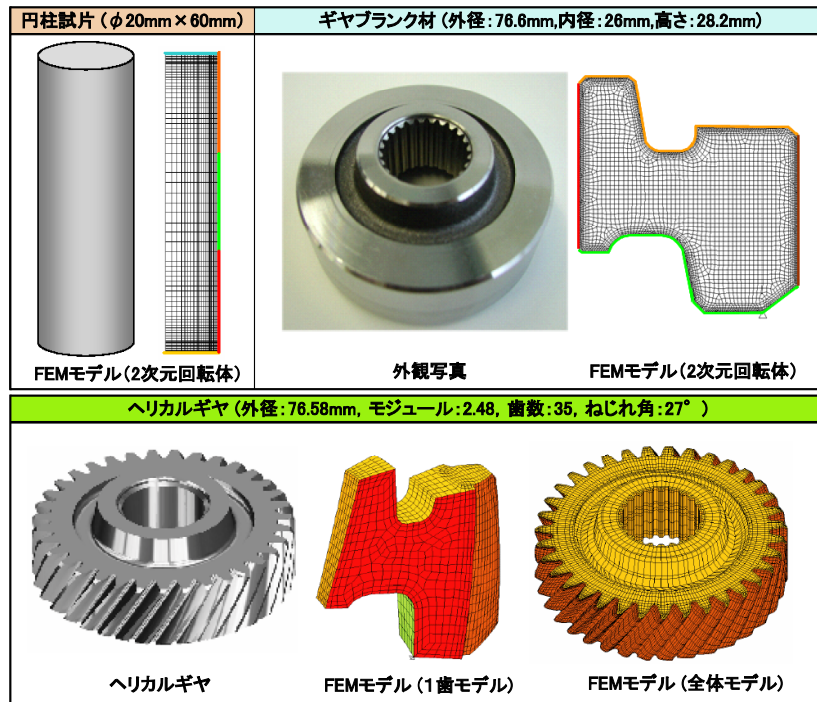


図3 試験片および解析モデル

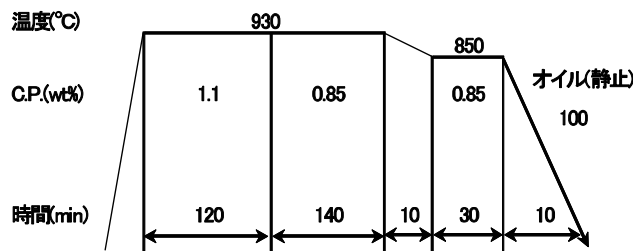


図4 ガス浸炭焼入れ条件

### 3.2.1 実験および解析方法

本研究では、形状の影響を評価するために円柱試験片、歯切りを行っていないギヤブランク材およびヘリカルギヤにおいて、熱処理実験および図3に示す解析モデルによりシミュレーションを行い、実測値と計算値を比較検討した。熱処理実験として、鋼材は自動車用歯車によく用いられている低合金鋼（JIS SCr420）を用い、図4に示す条件でガス浸炭を行い静止した油中に焼入れを行った。焼入れ時の荷姿については、円柱試験片は縦置きで行い、ギヤブランク材およびヘリカルギヤは横置きで行った。ここで円柱試験片およびギヤブランク材の解析における焼入れ過程の熱伝達率は、それぞれ実測された冷却曲線を基に部品の領域ごとに設定を行った値を用いた。また、ヘリカルギヤの解析においてもブランク材と同じ熱伝達率を用いることとした。

### 3.2.2 実験および解析結果

#### (1) 円柱試験片

焼入れ時の熱伝導解析に用いる表面熱伝達率の同定は、銀円柱試験片の冷却曲線から集中熱容量法を用いて熱伝達率の近似値を算出した。これらを初期の表面境界条件として、SCr420 鋼円柱の焼入れ過程の解析を行い、冷却曲線の計算値が実測値に近づくように熱伝達率の修正を繰り返すことによって得られた値<sup>7)</sup>を用いた。図5に円柱試験片の解析モデルおよび得られた熱伝達率を示す。この熱伝達率を用いた解析により得られた浸炭焼入れ後の変形後の形状（図では変形量を100倍で表示）および半径方向の変形量を図6示す。実測値に比べて解析で得られた計算値は、変形量および全体的な形状がほぼ一致した良好な結果が得られている。

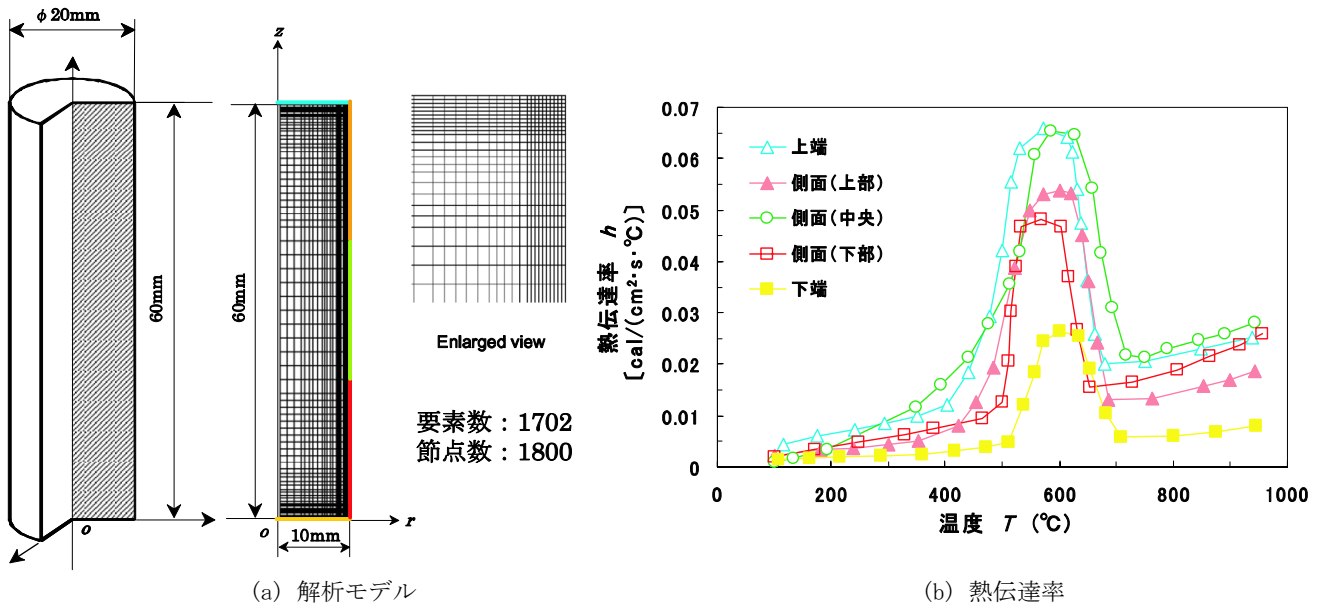


図5 円柱試片の解析モデルおよび熱伝達率

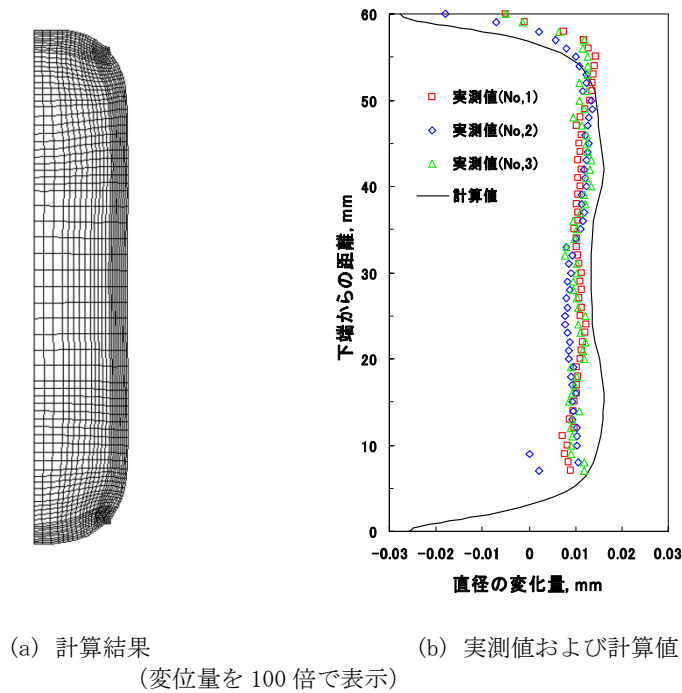


図6 円柱試験片の浸炭焼入れ後の変形量

(2) ヘリカルギヤブランク材

ヘリカルギヤのブランク材の解析においては、焼入れ時の熱伝達率以外はすべて円柱試片と同じデータを用いて解析を行った。ここで焼入れ時の熱伝導解析に用いる表面熱伝達率の同定は、円柱試片の場合と同様な方法で行った。図7にギヤブランク材の解析モデルおよび得られた熱伝達率を示す。図8にギヤブランク材の浸炭焼入れ後の硬度分布を示す。

計算値はほぼ実測値に近い硬度分布を示しており、位置による硬度差も評価できていることがわかる。しかし表面近傍の硬さに関しては、実測値に比べて計算値が若干高い。今回の実験のように特に油温が高い場合には、焼入れ時の残留オーステナイトの安定化によって、高炭素濃度域における残留オーステナイト量が増加するが、それによる硬度の低下をシミュレーションで考慮する必要がある。

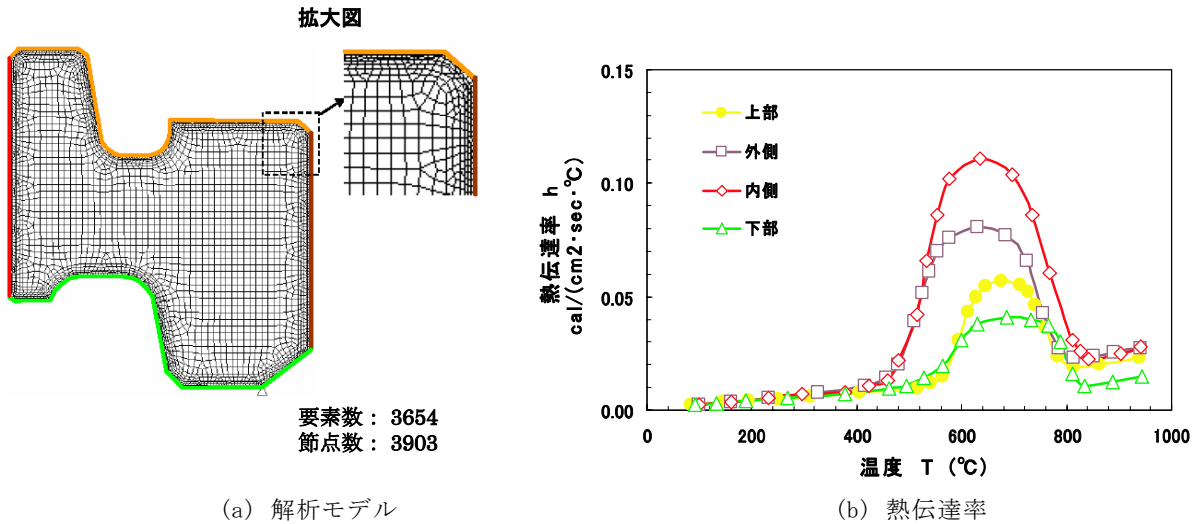


図7 ギャブランケ材の解析モデルおよび熱伝達率

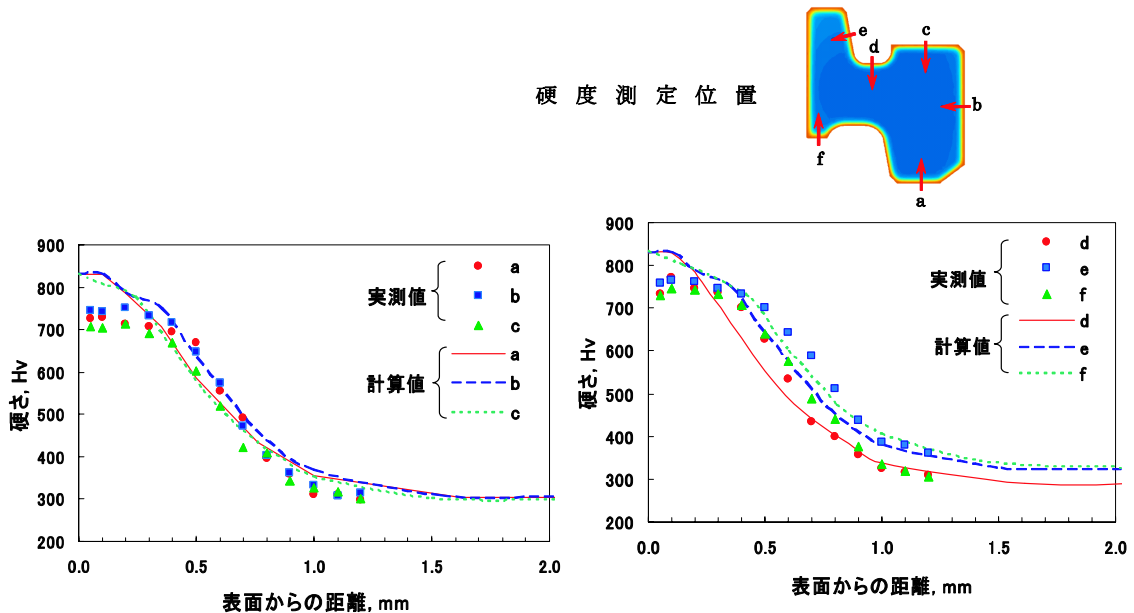


図8 ギャブランケ材の浸炭焼入れ後の硬度分布

図9に浸炭焼入れ前後の形状を示す。ここでは、変形の傾向をわかりやすくするために、変形量を100倍にして形状後の形状を現している。実測値において、半径方向の変形は外径が収縮し、下端側ほど収縮量が大きくなっている。計算値においても同様に収縮し、形状も類似した結果を示している。しかし変形量は、実測値に比べて計算値は約1/2程度になっている。この原因として、内外径でマスの異なる部品を焼入れする場合には、冷却性のバランスや鋼材の焼入れ性などの影響により、相変態のタイミングに差が生じやすく、実際とシミュレーションのずれが生じやすいものと考えられる。また、下端を基準とした場合の上端の高さ方向の変形量は、実測値と

計算値がほぼ一致した結果が得られている。さらに、上端側の外周側の面においては、実測値がほぼ平坦なのに対して、計算値は外径側に倒れており、変形後の形状が一致していない。しかし、その他の面における変形後の形状は、実測値と計算値で比較的類似した傾向を示しており、全体的な変形はシミュレーションで再現できると考えられる。

また、図10に浸炭焼入れ前後での外径および内径の変化量を示す。実測値においては、外径が膨張し内径が収縮する変形を示している。これに対して計算値は、外径および内径とも収縮しており、外径の変化量に実測値との差異が見られる。



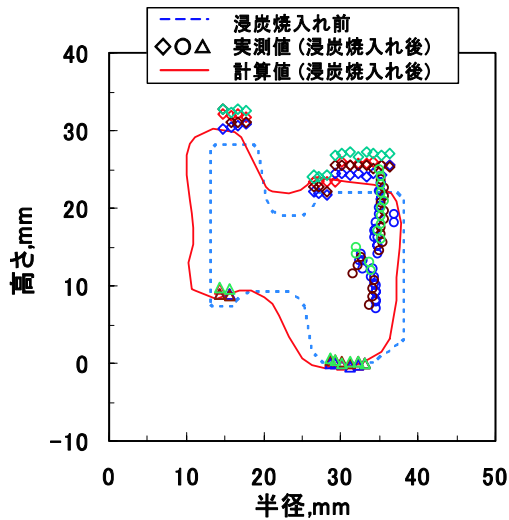


図9 浸炭焼入れ後のひずみ (変位量を100倍で表示)

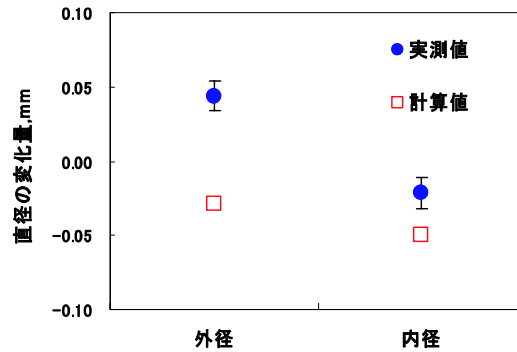


図10 浸炭焼入れによる径の変化量

(3) ヘリカルギヤ

ヘリカルギヤの解析においては、ギヤ全体の変形を評価するために全体モデルが必要とされるが、コンピュータ(パソコン)の処理能力から細かなメッシュ分割(大規模モデル)には限界がある。ここでは、図11に示すように細かなメッシュ分割を行った1歯のモデル、およびややメッシュ分割が粗い全体モデルを作成し解析を行った。また、ヘリカルギヤの解析においては、ギヤブランク材と同じ熱伝達率を用いた。

浸炭焼入れ後の歯部の硬度分布の実測値と1歯モデルでの計算値の比較を図12に示すが、解析精度は良好である。さらに、図13に1歯モデルおよび全体モデルでの浸炭焼入れ後の変形を50倍で表示した計算結果を示す。正面から見た歯筋変形の傾向としては、歯の両端部の歯筋が立つ、つまりヘリカル角度が少なくなる変形を示している。また歯の変形は、1歯モデルおよび全体モデルでほぼ同じ傾向を示している。

図14にブランク材およびヘリカルギヤにおける浸炭焼入れ前後での内径の変化量を示す。1歯モデルと全体モデルの差異はあまり大きくなく、ややメッシュの粗い全体モデルでもひずみの評価を行えるものと考えられる。また、実測値においては、ブランク材に比べてヘリカルギヤの内径スプラインは大きく収縮している。これに対して計算値では、ブランク材に比べてヘリカルギヤの内径スプラインの収縮は若干小さく、実測値と逆の傾向を示しており、変形量の値も実測値と大きく異なる結果を示している。これは主に熱伝達率の影響が考えられるため、今後はヘリカルギヤの冷却曲線を再現できる熱伝達率を設定し、内外径での冷却の影響による径の変化の検討を行う必要がある。

また、図15に1歯モデルおよび全体モデルでの浸炭焼入れ後の残留応力の計算結果を示す。軸方向応力では歯底に大きな圧縮の残留応力があり、1歯モデルおよび全体モデルでほぼ同じ値を示している。

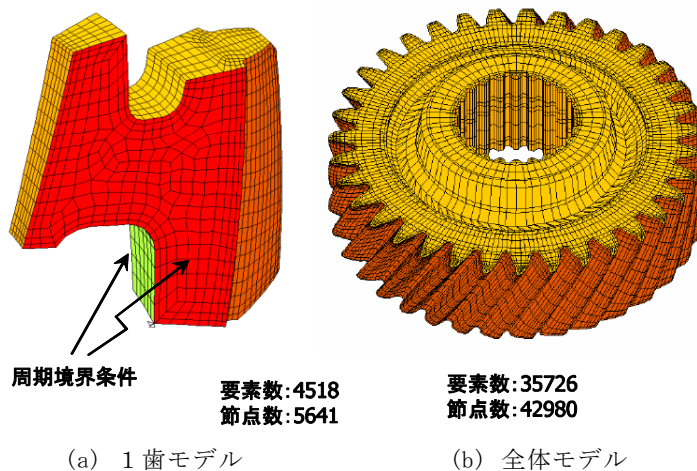


図11 ヘリカルギヤの解析モデル

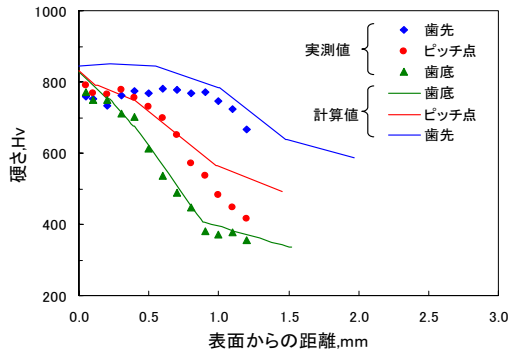


図 12 ヘリカルギヤの浸炭焼入れ後の硬度分布

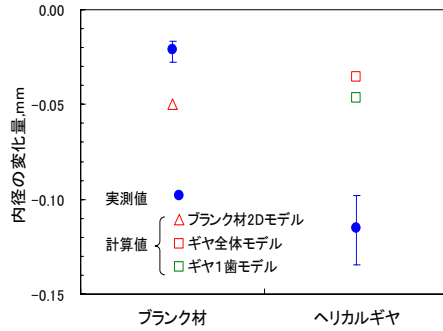


図 14 ブランク材およびヘリカルギヤの内径スプライン径の変化量

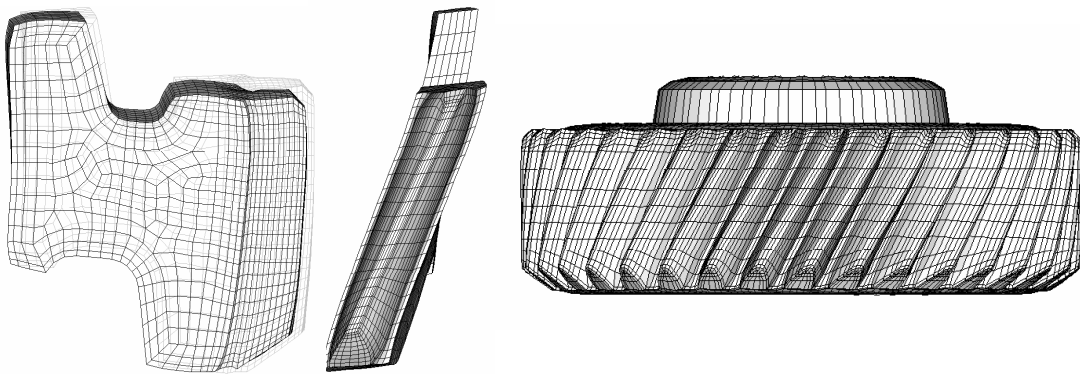


図 13 ヘリカルギヤの浸炭焼入れ後のひずみの解析結果 (変位量を 50 倍で表示)

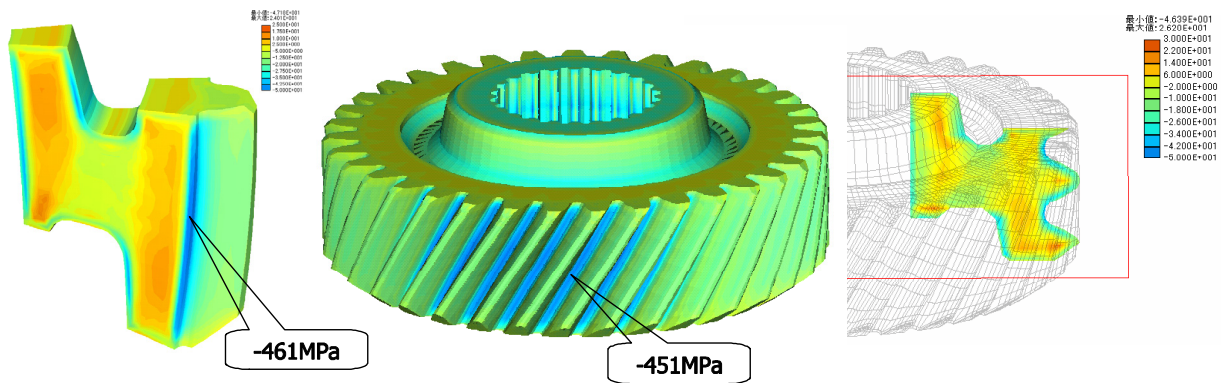


図 15 ヘリカルギヤの浸炭焼入れ後の残留応力の解析結果

#### 4. データベースとシミュレーションの適用事例

熱処理部品の重要な品質として硬度分布がある。歯車においては疲労強度を確保する点から、量産時における硬さの変動幅が重要な管理項目であり、新規開発部品においても事前に量産時の硬さの変動幅を予測することが必要とされる。そこで硬さの変動幅を定量的に評価するために、硬さに及ぼす因子をデータベースとシミュレ

ーションを組み合わせることで評価を行った。ここでは、量産されている浸炭歯車における歯部の硬化深さおよび素地硬さの評価を行った事例を以下に紹介する。

モジュール 3.25 の平歯車で SCM418H を用いてガス浸炭焼入れを行った。ここで歯車の硬さに影響を及ぼす因子としては、鋼材の焼入れ性、熱処理条件の変動による評価を行った。まず、データベースに入力されている実績データから、歯車 31 個の硬さの実測値、および実際に

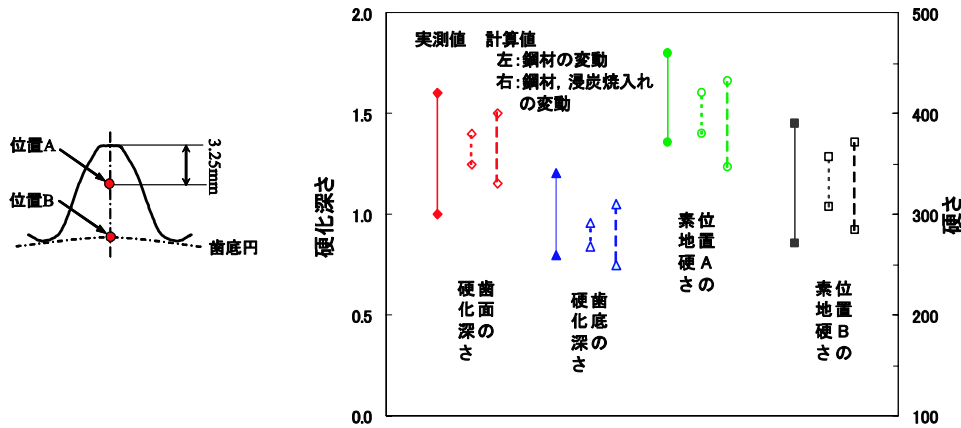


図 16 鋼材と熱処理条件の変動を考慮した歯車の硬度変動 (実測値および計算値)

使用されている鋼材の 32 チャージの化学成分およびその焼入れ性（ジョミニカーブ）のデータを抽出した。最初に鋼材の化学成分の変動による影響を評価するために、ここでのシミュレーションは、鋼材の実績値としてジョミニカーブの上・下限およびその化学成分を用いて行い、その他の条件は一定とした。

次に、浸炭焼入れ過程の変動として、浸炭条件（浸炭温度、カーボンポテンシャル）および焼入れ時の熱伝達率の変動を考慮したシミュレーションを行った。ここで浸炭条件の変動幅は、実際の操業条件の結果をもとに設定を行い、焼入れ時の熱伝達率は素地硬さの変動幅が再現できる値を用いることとした。硬さに関する実績のデータおよびシミュレーションの結果を合わせて図 16 に示す。図中に示す計算値は、左側が鋼材の化学組成の変動による硬さの変動幅を、右側が鋼材の化学組成の変動および熱処理条件の変動による硬さの変動幅を示している。結果として、硬化深さに関してはシミュレーションで予想された範囲に 84%以上の歯車が含まれ、素地硬さにおいては熱伝達率の変動幅を約 30%と想定した場合において、同じく 84%以上の歯車が予想範囲に含まれる結果が得られた。この結果より、硬さに関してはほぼ実際の変動幅がシミュレーションにより評価できることが確認できた。

5. 結 言

歯車に関する熱処理データベースを開発し、浸炭および高周波焼入れ歯車の量産時の実績データの入力を行った。またシミュレーション技術の向上として、周期境界条件を用いた解析機能の開発、および解析速度の向上のための大幅な改良を行い、ベンチマークシミュレーションを行った。本研究の結論として以下のものが得られた。

(1) 歯車に関する熱処理データベースとして、基礎情報、熱処理品質、鋼材データ、熱処理条件および図面情

報から構成されるデータベースを開発し、6,300 件を越えるデータを入力した。

- (2) 構築されたデータベースは、社内 LAN を用いて関連部門に公開され利用され始めた。
- (3) シミュレーション技術の向上として、周期境界条件での解析機能を開発した。また弾塑性解析においては静的陰解法および高速マトリックスソルバー（ICCG 法等）を採用することで、従来の約 90 倍の解析速度を実現し、トップクラスの解析速度を達成した。
- (4) ベンチマークシミュレーションとして、SCr420 鋼を用いた円柱試験、ギャブランク材およびヘリカルギヤの浸炭焼入れ過程のシミュレーションを行った。その結果、硬さおよび形状の全体的な変形傾向は、実測値と比較的良好な一致が得られた。しかし、ヘリカルギヤの内径変化量などのひずみ量に関しては実測値との差異が見られ、今後継続して検討を行う必要がある。
- (5) 熱処理データベースとシミュレーションを用いて、浸炭歯車の量産時の硬度変動の予測を行った結果、実際の変動幅がシミュレーションにより評価できることが確認できた。

参考文献

- 1) 塑性工学部門委員会材料データベース研究分科会（委員 23 名），材料, Vol.51, No.3 (2002) 350-355.
- 2) 例えば、渡辺陽一，第 60 回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集 (2005) , 51-52.
- 3) 七野勇人，渡辺陽一，杉本剛，迫道大，平成 17 年度 IMS 研究成果講演論文集 (2005.7.20~29) 65-68.
- 4) 長坂悦敬，木佐貫新，経営情報学会誌, Vol. 9, No.1 (2000.6) 35-55.
- 5) 中社芳博，村上俊彦，素形材, Vol.44, No.11 (2003) 43-46.



- 6) 七野勇人, 小松技報, Vol. 44, No.1 (1998) 52-60.  
 7) 奈良崎道治, 日本熱処理技術協会「焼入れとシミュレーション研究部会」日本材料学会「塑性工学部門委員会材料データベース研究部会」研究成果合同発表会資料集 (2004, 7月) A-3.

## 謝 辞

本研究の一部は, IMS センターを通じて経済産業省の助成を得たことを記し, これに参加, 協力をいただいた日産自動車(株), 住友金属工業(株), 福山大学井上先生, 宇都宮大学奈良崎先生, 埼玉工業大学巨先生, 出光興産(株),

(社) 日本熱処理技術協会「焼入れとシミュレーション研究部会」および(社) 日本材料学会「塑性工学部門委員会材料データベース研究部会」の委員各位にご協力を賜った。ここに記して謝意を表する。

## 筆 者 紹 介



Hayato Shichino

しちの はやと  
**七野 勇人** 1987年, コマツ入社。  
 現在, 開発本部 材料技術センター所属。

## 【著者からのひと言】

以前にも増して, 固有技術の伝承が困難となり身近に迫った問題となってきた。特に建設機械部品は, さまざまな形状および材質の部品があり, しかもサイズが大きい。そのため形状と鋼材およびマス効果の影響を強く受ける熱処理においては, 一層固有技術の伝承を困難にしている。これからは, 人を育てるだけでは難しい点があり, データベースなどの過去の技術情報の蓄積と有効利用に加えて, シミュレーションなどで理論的に検討できる技術が不可欠と考えている。また今後は, 材料に関する分野にも技術のすそ野を広げ, 疲労強度のシミュレーションへと展開させていきたい。