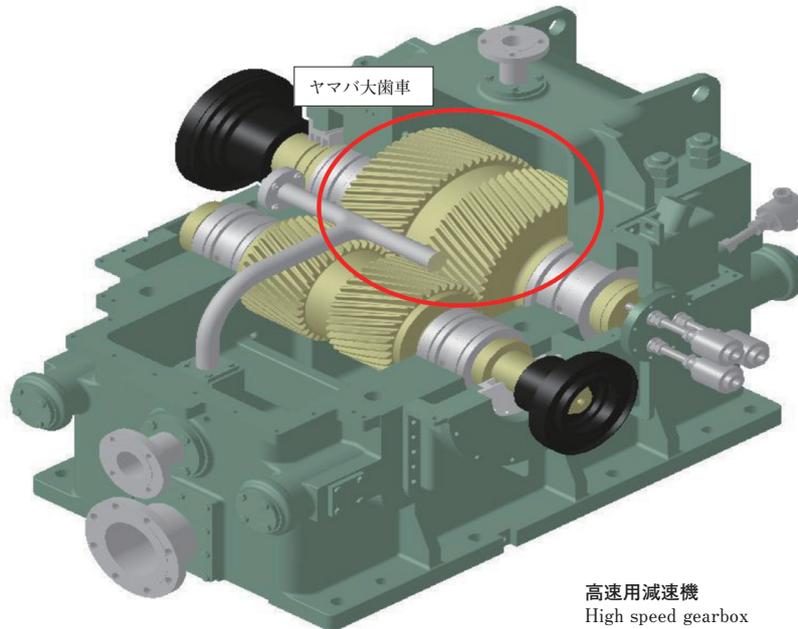


大型歯車の熱処理ひずみ課題克服

Deformation Problem of Large Gear Caused by Heat Treatment

●今村 哲平* 赤塚 寛之**
 Tepei IMAMURA Hiroyuki AKATSUKA



浸炭焼入れでは、一般的に処理前後の浸炭箇所(主に歯部)の想定外な寸法変化が問題となる。歯車を製作する場合、仕上げ代(浸炭焼入れ後の仕上げ加工による取り代)を見積もるため、特に歯先径の寸法変化を正確に予測したうえで製作に臨むことが重要である。しかし、当社ではその事前予測については従来より社外熱処理メーカーに依存していたので、稀に予測が外れてしまったときには、原因究明が困難であった。重要工程でありながら、自社で寸法変化の予測ができないことは問題であり、その解決が第1の課題であった。その後、浸炭焼入れ前後の歯先径変化率データを約3年間蓄積し、等価直径の指標を適用した結果、歯先径変化率と等価直径の間に一定の相関関係を見出すことができた。これにより自社での寸法変化の予測手段を確立した。しかし、この手段により予測される寸法変化率のばらつきは大きかった。そこで、予測精度をさらに向上させるべく、ばらつきそのものを低減させることが第2の課題となった。第2の課題の解決を目的として、ばらつきの要因を調査し熱処理シミュレーション、要素試験によるメカニズム検証および熱処理メーカーでの各種試験などを重ねた。その結果、浸炭空冷再加熱焼入れ方式における空冷プロセスの再加熱開始温度の適正化によりばらつきの低減を達成し、寸法変化の予測精度のさらなる向上につなげることができたので紹介する。

Carburizing and quenching of gears may lead to unexpected dimensional changes, and it is important to be able to accurately predict these changes prior to manufacturing in order to estimate the finishing allowance. Without the capability to predict dimensional changes in-house, we have mostly relied on heat-treating companies to predict the dimensional changes. Occasionally, however, the actual deformation results differed from the prediction, and the need for a more accurate prediction method was recognized. After three years of collecting in-house data on tooth tip diameter changes in gears before and after carburizing and quenching processes, and applying the equivalent diameter index, we were able to establish a correlation between the tooth tip diameter changes and the equivalent diameter. This provided the basis for predicting the dimensional changes in-house. However, the actual deviation from the predicted the dimensional changes with the current method was large and needed to be minimized to further improve the prediction accuracy. In this paper, we investigated the factors influencing the deviation, verified the deviation mechanism by heat treatment simulations. By optimizing the intermediate air cooling process prior to quenching, a reduction in the deviation of the dimensional changes was achieved, leading to a further improvement in the dimensional change prediction accuracy.

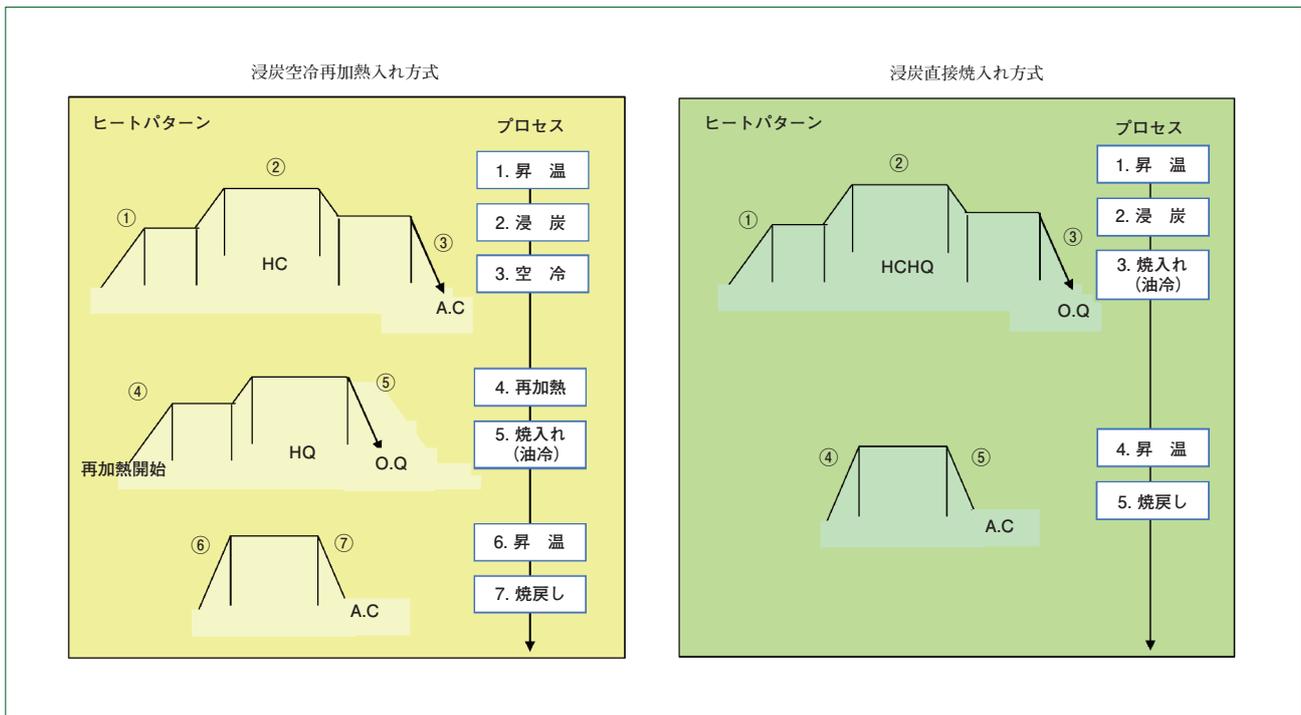


図1 浸炭焼入れ処理方式およびそれぞれのプロセス
Carburizing and quenching treatment methods and their respective processes

1 まえがき

高速増減速機は、ほかの産業用の増減速機と異なり高減速比設計である。このことから、大歯車の歯のモジュールは小さく、歯数が多い設計となっており、全般的に小モジュールで大型径である。同じ歯先径でモジュールが異なる浸炭歯車同士で比較した場合、浸炭焼入れ後の歯先径の寸法変化量が同じであっても、小モジュールである方が歯型が受ける寸法変化の影響度は大きい。つまり、高速増減速機用の小モジュールの大歯車の場合、もし寸法変化の予測外れが起きてしまったときには、歯先径は最終寸法までの仕上げ代により仕上げることができたととしても、歯面および歯底はその寸法変化量によっては正規歯型に仕上がらなくなるリスクが高いことを意味している。また、仕上げ代過多により歯面、歯元、歯底などの研削仕上げ後に必要とされる浸炭深さが不足してしまうというリスクもある。これらのリスク回避にはその寸法変化を精度良く予測して適切な仕上げ代をあらかじめ見積もる必要がある。

そこで当社がまず取り組んだのは、高速増減速機用歯車のなかで製作機会の多いヤマバ大歯車を対象に、自社による寸法変化の予測手段を確立することである。なお、歯車の寸法変化としては、主に歯先径、マタギ歯厚、歯底径などを考慮する必要があるが、歯先径の寸法変化率によりマタギ歯厚や歯底径の寸法変化率を計算で類推できることもあり、この取り組みでは歯先径変化率のみを寸法変化の指標として扱った。

本報における歯先径変化率は、浸炭焼入れ後に同一箇所測定した歯先径の寸法差を、処理前の歯先径で除した値を指す。

2 歯先径変化率の予測手法

2013年から、データによる歯先径変化率の予測手段を確立することを目的としてデータ蓄積を開始した。約1年間、データを蓄積した後に分析を行ったが、寸法変化に影響すると考えられる因子が多く、製作されるヤマバ大歯車形状も一品一様であることから、蓄積したデータに対して重回帰分析を繰り返しても寄与率の高い相関関係は得られなかった。ただ「質量効果の影響を受けていそうである」というおおまかな傾向は見ていたことから、データの蓄積を継続しつつ一品一様の歯車の形状および寸法を規格化する方法がないか調査を進めるなかで、2016年頃にイギリスの規格BSI 5046: March1974に等価直径という指標があることを確認した。歯車は、その歯先径、内径、厚みの寸法から表面積および重量を算出することができる。等価直径は、これらの算出値を直径換算した指標である。歯先径変化率の蓄積データへ等価直径を適用することにより、歯先径変化率と等価直径の間に相関関係を見出すことができた。

次の①～⑥のステップにより、自社での歯先径変化率の予測が可能となった。

- ① 製作する歯車に用いる鋼材のミルシートの確認
化学成分、結晶粒度より理想臨界直径を算出する。
- ② 処理する熱処理メーカーの確認
熱処理メーカーの設備能力、焼入れ能の違いを考慮する。
- ③ 浸炭焼入れ処理方式の確認
浸炭空冷再加熱焼入れ方式(図1左)、浸炭直接焼入れ方式(図1右)の2種のうちどちらの方式で処理されるか

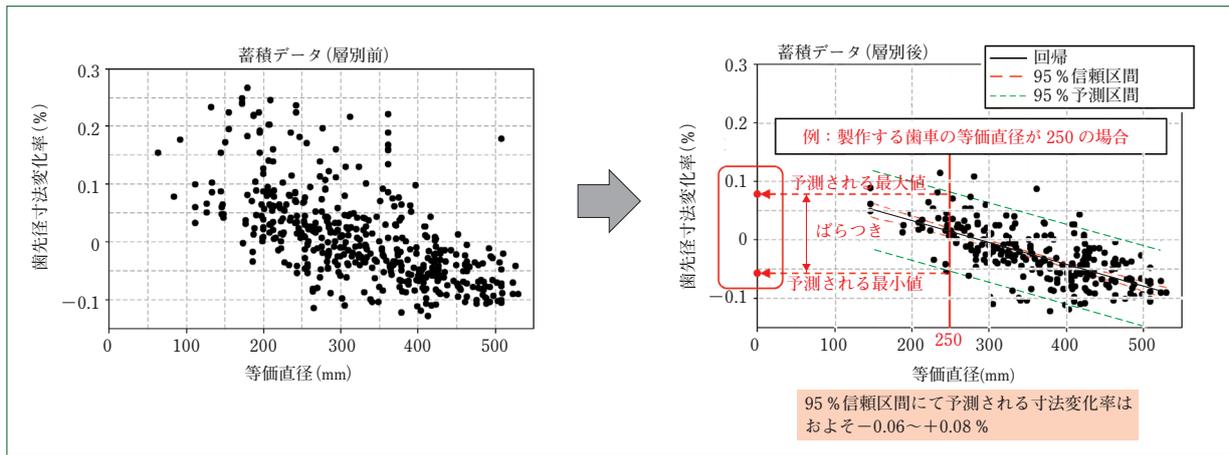


図2 歯先径寸法変化率と等価直径の関係
Relationship between dimensional changes of tooth tip diameter and equivalent diameter

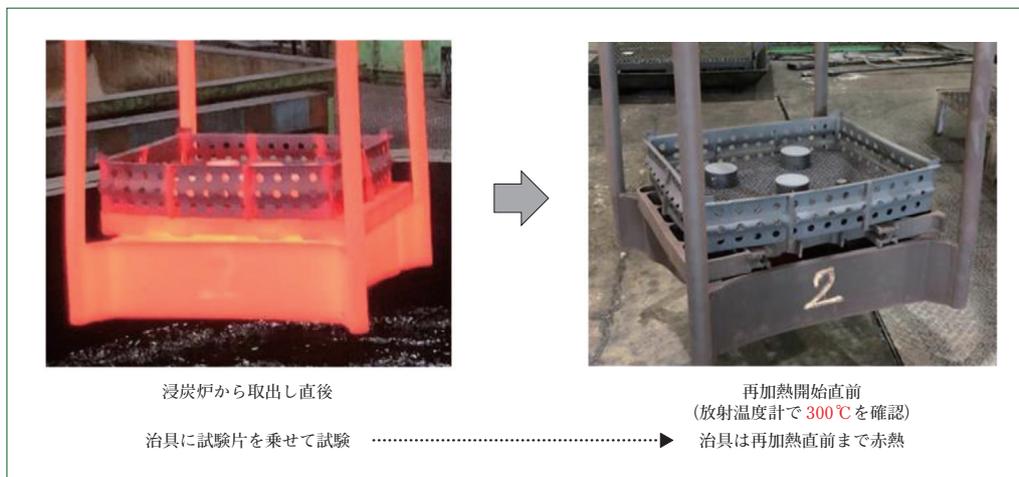


図3 空冷プロセス中の試験片および治具の様子
Specimen and fixture during air cooling process

を確認する。

- ④ ①～③の手順により、歯先径変化率の蓄積データを層別
- ⑤ BSI 5046 : March1974の記載内容に従って、製作する歯車の等価直径を算出
- ⑥ 層別された歯先径変化率の蓄積データを等価直径と照合

図2に、ヤマバ大歯車の歯先径変化率と等価直径の関係の一例を示す。なお、ここでは蓄積データを層別する過程については省略する。浸炭焼入れしようとする歯車について、過去に浸炭焼入れされた複数の同等形状歯車における歯先径寸法変化率のデータとの照合を可能にすることで、浸炭焼入れ後の歯先径変化率を推定することが可能となった。ひとまず第1の課題であった自社での寸法変化率の予測はできるようになったが、予測結果として示される複数の歯先径変化率のデータのうち、最小値と最大値の差は発生しうる寸法変化のばらつきを表しており、その値の大きさは予測精度が高くないことを示すものであった。あらかじめ浸炭焼入れ後の寸法変化率のばらつきを大きく想定して製作に臨むことは、想定

される寸法変化率の大きさに応じた仕上げ代を必要とし、併せて浸炭深さも仕上げ代分多く付して処理しておく必要があり、品質の確保のためとはいえ、製作上のムダも抱えることになっていた。このことから歯先径変化率のばらつき低減が次の課題となった。

3 歯先径変化率のばらつき低減の実施内容

ヤマバ大歯車の浸炭焼入れ処理方式としては、結晶粒度粗大化リスクを低減させることを目的として、主に浸炭空冷再加熱焼入れ方式が採用されている。この方式のプロセスのなかで歯先径変化率のばらつき発生の要因を探るべく、各種検証を実施した。

3.1 変形メカニズム

熱処理による寸法変化が生じる原因として、熱膨張・熱収縮で生じる熱ひずみと相変態で生じる変態ひずみの影響が挙げられる。これらのひずみは直接的に寸法変化に影響を及ぼす。一方でひずみの分布により熱応力と変態応力が発生すると、さらなるひずみが生じる。こうした現象は温度が変化することで生じることから、対象とするワークの温度管理が重

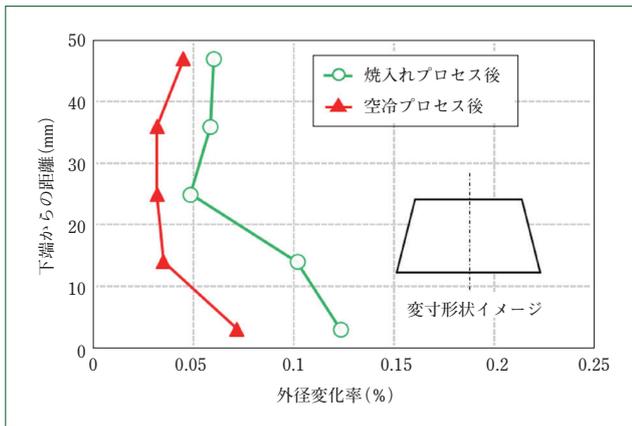


図4 焼入れプロセス後および空冷プロセス後の試験片の外径寸法変化率
Dimensional changes of specimens after quenching and air cooling processes

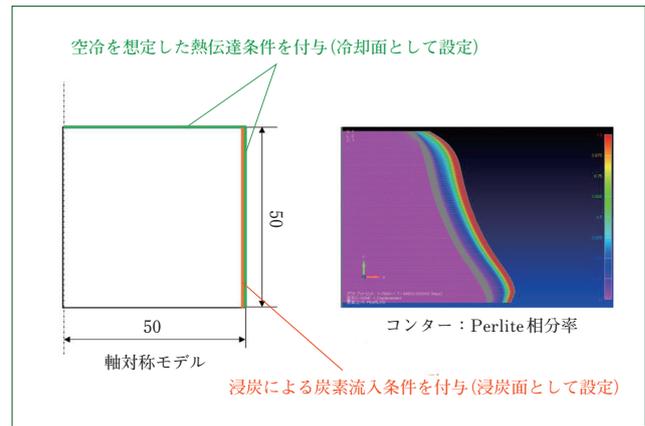


図5 解析のモデル化方法および空冷プロセス後の寸法変化予測結果
Model for numerical analysis and results of predicting dimensional changes after air cooling process

要となる。

3.2 ヤマバ大歯車の浸炭焼入れプロセス

ヤマバ大歯車の製作において同一形状品を複数個製作することがあり、歯先径が1mを超えるような大型サイズの場合は処理ロットを分けて浸炭焼入れされる。そのとき処理ロット間で歯先径変化率のばらつきが大きい場合がある。寸法変化のばらつきへの対策を検討する場合、特に熱処理ロット間の冷却速度差に着目する必要がある。これは熱ひずみ、変態ひずみ、熱応力、変態応力の大きさや生じるタイミングが冷却速度の影響を受けることによる。浸炭空冷再加熱焼入れ方式においては冷却速度の管理が難しいプロセスとして浸炭後の空冷および焼入れ中の油冷が挙げられるが、我々は歯先径変化率のばらつき低減を狙うに当たり、浸炭後の空冷プロセスに注目した。空冷プロセスを含まない浸炭直接焼入れ方式による寸法変化率データと比較すると、浸炭空冷再加熱焼入れ方式のばらつきの方が明らかに大きいことがその理由である。空冷プロセスでは、焼入れプロセスへの移行基準となる再加熱開始温度の確認を目的として、放射温度計による温度測定を適宜行う。ところが、ヤマバ大歯車の形状は一品一様で、歯車各部位の温度履歴は歯車形状ごとに一様ではないことから、歯車のどの部位で再加熱開始温度を決定すべきか判断が難しい。また、生産性の観点から、重量の大きい歯車全体の温度を外気温に下げきる前に再加熱したいので、歯車内に温度勾配がある状態で焼入れプロセスへ移行される。こうした状況から冷却速度の管理が難しく、これが理由でヤマバ大歯車の歯先径変化率のばらつきが大きくなっているものと考えた。

3.3 空冷プロセスにおける寸法変化メカニズム

簡易的な実験で浸炭空冷再加熱焼入れ方式における空冷プロセスの寸法変化メカニズムを検証した結果を説明する。図3に、空冷プロセス中の試験片の様子を示す。試験片を積載した治具を炉から搬出した直後の赤熱した状態(左)と、試験片温度が300℃に下がった状態(右)である。試験片の側面温度が300℃に下がったことを確認した後に再加熱されるが、治具の一部の温度が下がっておらず、治具と接している試験片の下端面近傍と外気にさらされている上端面近傍では温度

差があることが推測される。図4に、ヤマバ大歯車と同様の浸炭空冷再加熱焼入れ方式で処理した円柱試験片(φ100×L50)の外径寸法測定結果から算出した外径変化率を示す。グラフは浸炭空冷再加熱焼入れにおける焼入れプロセス後および空冷プロセス後の結果である。この結果から、焼入れプロセス後の方が外径変化率は大きいことが分かる。一方で軸方向に対する寸法変化の傾向はどちらも同様であり、上端面近傍の外径よりも下端面近傍の方がより膨張した形状となっている。焼入れ後の寸法変化の傾向が空冷プロセス後と同様であることから、空冷プロセス後、つまり再加熱開始時の外径寸法は浸炭空冷再加熱焼入れの最終外径寸法に影響を及ぼしているものと考えられる。空冷プロセスを含まない浸炭直接焼入れにおいても同様の試験を行ったが、浸炭焼入れ後にこのような変化は認められなかった。したがって、外径寸法の変化は空冷プロセスを経ることで生じているものと考えられる。

3.4 熱処理シミュレーションによる検証

図5に、浸炭空冷再加熱焼入れ方式における空冷までのプロセスを模擬した熱処理シミュレーションソフト(FINAS/STAR TPS Edition)⁽¹⁾によるモデル化方法および解析結果を示す。モデルは軸対称とし、熱伝達条件(熱伝達率)は空冷の冷却曲線から算出したものを上端面および側面に与えた⁽²⁾。下端面には熱伝達率を与えず、接する治具の熱影響により冷却されにくい空冷プロセスの状況を簡易的に再現した。また、上下端面は実際のプロセスを模擬し、ヤマバ大歯車の浸炭処理時と同様に試験片には防炭剤を塗布しており、解析でも上下端面からの炭素流入はないものとした。これらの条件下で解析した結果、実験結果と同様の寸法変化が示された。解析結果の外径寸法において、上端面近傍と下端面近傍に膨張量の差が認められるが、この差は熱伝達率の与え方からも明らかのように、試験片内の冷却速度差に起因しているものと考えられる。

熱処理シミュレーション結果から、冷却速度差が寸法変化に及ぼす影響を分析した。図6に、空冷プロセス途中の温度分布および各相の相分率の解析結果を示す。この結果から、冷却速度差により試験片内の温度および相分率に分布が認め

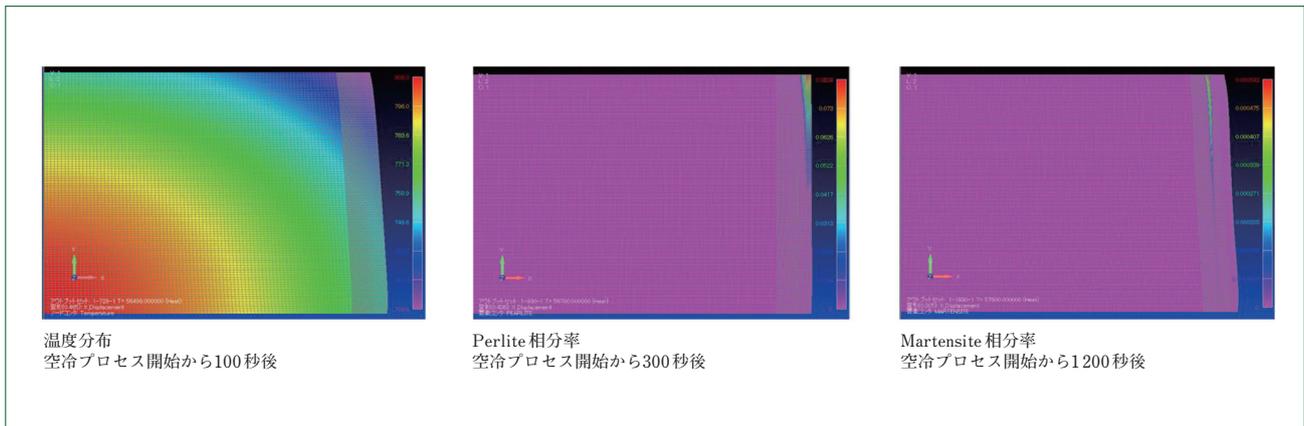


図6 熱処理シミュレーションによる解析結果
Results of heat treatment simulation

られ、熱応力と変態応力が発生することで寸法変化が生じている。なお、相分率においてマルテンサイト変態が最表面よりも内部に生じるのは、浸炭による炭素濃度分布により深さ方向に相変態挙動の差があること、そして空冷による深さ方向の冷却速度差があることに起因している。ヤマバ大歯車においても、治具や歯車形状の影響により温度および相分率の分布が生じているものと推察され、比較的冷却速度の遅い空冷プロセスにおいても、熱応力と変態応力による寸法変化が生じているものと考えられる。また、実験結果と同様に空冷プロセス後の外径寸法が次プロセスである焼入れプロセス後の外径寸法に影響を及ぼしているものと推察される。一方で、ヤマバ大歯車の歯先径変化率のばらつき低減においては、前述した空冷プロセス後の再加熱温度と相分率の温度分布による寸法変化率を熱処理ロット間でそろえるといった対策が必要となる。

3.5 空冷プロセスの再加熱開始温度の最適化

浸炭空冷再加熱焼入れ方式における再過熱開始温度の最適化に関する取組みでは、ヤマバ大歯車が一品一様で形状を統一できないこと、また、現場での厳密な冷却速度の管理が困難であることを制約条件に、再加熱開始温度の低温化を対策として挙げ、検証を試みた。再加熱開始温度低温化の狙いとして、再加熱開始時の歯車内の温度勾配を小さくすることと相変態を進行させることが挙げられる。これにより、熱ひずみおよび変態ひずみの発生による寸法変化過程の複雑な現象を、ある程度収束させた状態で次プロセスである焼入れに移行できる。つまり、空冷プロセスから焼入れプロセスへ移行する再加熱開始時の寸法変化率をある程度そろえることが可能となる。

また、寸法変化に大きな影響を与えるマルテンサイト変態の観点からも再加熱開始温度を選定する必要があると考える。現状では再加熱開始温度は300℃が基準となっており、この温度は浸炭層のマルテンサイト変態開始点に相当する。ヤマバ大歯車の歯のモジュールは比較的小さく、マルテンサイト変態が多少生じるとした場合、マルテンサイト変態の有無で変態ひずみ、ひいては変態応力に大きな差が生じる。したがって、浸炭層のマルテンサイト変態開始点を考慮した再加熱

開始温度の選定が必要であると考えられる。具体的には、再加熱開始温度を浸炭層で考え得るマルテンサイト変態開始点以下とし、マルテンサイト変態の開始を促すよう検討した。

空冷プロセスにおける歯車温度の下限は外気温であり、理想としては歯車全体の温度を均一に外気温まで下げた後、焼入れプロセスに移行したい。しかし、3.2で述べたように、生産性を考慮すると歯車温度を外気温まで下げる前に再加熱を開始することが望ましい。したがって、本取組みでは、再加熱開始温度と歯先径変化率の関係を調査し、生産性を考慮したうえで再加熱開始温度の適正化を試みた。検証は、再加熱開始温度3水準(現状の再加熱開始温度である300℃、下限である外気温(約20℃)、その中間であり浸炭層のマルテンサイト変態開始点よりも低いと推察される150℃⁽³⁾)に対するヤマバ大歯車の浸炭空冷再加熱焼入れ前後の歯先径変化率のばらつきを評価した。300℃のデータに関しては、これまでの生産データ40件を引用した。150℃および外気温のデータに関しては、それぞれ5件ずつ試験を実施しデータを取得した。なお、本検証では、生産プロセス同様に、いずれかの歯部の表面温度が再加熱開始温度まで下がった時点で次プロセスへ移行したので、再加熱開始温度を外気温とした結果については歯車全体が外気温となっているわけではない。

図7に、再加熱開始温度に対する歯先径変化率をボックスプロットで示す。現状の仕様である再加熱開始温度の300℃に対して、150℃および外気温では歯先径変化率ばらつきが1/3以下に低減されることを確認した。また、この結果から再加熱開始温度が低いほど歯先径変化率の平均値が大きいことが分かる。マルテンサイト変態は温度低下とともに進行することから、これは各再加熱開始温度によるマルテンサイト変態率の差を反映しているという可能性がある。また、空冷プロセス中の歯車温度に対する歯車内の温度勾配を調査した。図8に、歯車温度300℃および150℃のときの歯車内温度測定結果をボックスプロットで示す。本データはヤマバ大歯車2個に対して、各温度でそれぞれ12カ所を測定した結果である。測定箇所は歯部である。このデータから歯車温度により歯車内の温度勾配の差が認められ、150℃の方が温度勾配は小さいことが確認された。

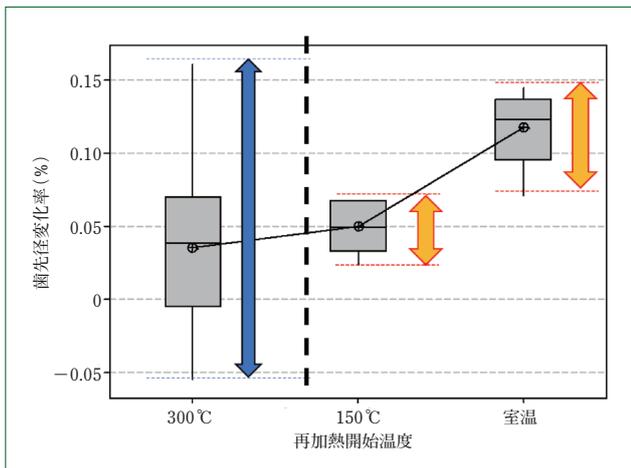


図7 歯先径変化率に及ぼす再加熱開始温度の影響
Effect of reheat start temperature on dimensional changes of tooth tip diameter

これらの結果から、浸炭空冷再加熱焼入れされるヤマバ大歯車に対して、歯車内の温度および相変態の分布の観点から、再加熱開始温度を150℃以下にすることで歯先径変化率ばらつきの低減が図れると結論付けた。再加熱開始温度を150℃に限定すれば、さらに歯先径変化率のばらつき低減が図れるが、150℃以下でも十分な生産性改善が見込まれることが示され、現場での温度管理状況や作業効率も考慮して再加熱開始温度に範囲を設けることとした。なお、本報では紹介しなかったが、歯先径変化率のばらつきの因子として、焼入れ時のワーク姿勢や治具による油流れの影響も挙げられる。この影響については、寸法変化率の平均値問題として扱い、本取組みでも利用した熱処理シミュレーションを活用し、寸法変化メカニズムを分析中である。

4 むすび

本報では、蓄積した歯先径変化率のデータに等価直径の指標を適用することにより、自社で確立した浸炭焼入れ後の寸法変化率の予測手段について解説した。また、浸炭空冷再加熱焼入れ方式における空冷プロセスの再加熱開始温度の適正化により歯先径変化率のばらつき低減を実現したことで、寸法変化のさらなる予測精度向上を実現した事例をそれぞれ紹介した。

- (1) これまでに蓄積した歯先径変化率データに等価直径を適用し、相関関係を確認した。このことにより、自社で歯先径変化率の予測ができるようになった。
- (2) 歯先径変化率が予測できたことにより、自社でマタギ歯厚、歯底径など含めた寸法変化率を予測することも可能になった。
- (3) 浸炭空冷再加熱焼入れ方式の熱処理プロセスにおいて各種実験を重ね、浸炭空冷再加熱開始温度管理の適正化による浸炭焼入れ後の歯先径変化率のばらつき低減効果を確認した。
- (4) 歯先径寸法変化率のばらつき低減により、歯先径寸法変化率と等価直径の相関関係の寄与率が高くなる方に作用し、その結果、さらなる寸法変化率の予測精度向上に

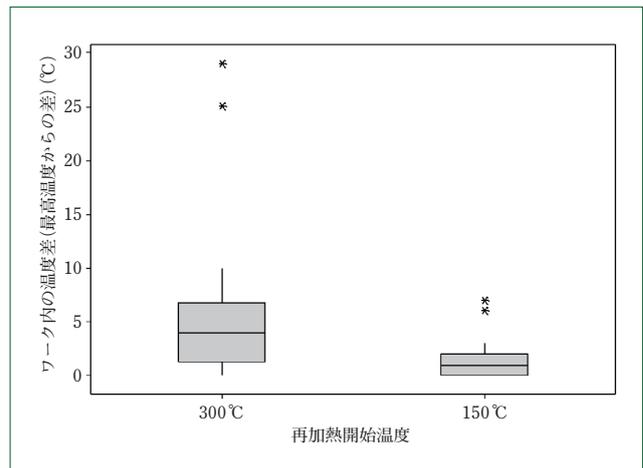


図8 空冷プロセス中の歯車内の温度ばらつき
Temperature variation in gears during air cooling process

つなげることができた。

- (5) 今後は、空冷プロセスの新たな再加熱開始温度管理基準による運用や、運用後のデータの再構築と予測式の再計算を行い、さらなる寸法変化率の予測精度向上につなげていく所存である。

(参考文献)

- (1) 渡邊陽一, 熱処理シミュレーション利用の現状と将来動向, SOKEIZAI, Vol.55, No2 (2014), p.42-49.
- (2) 赤塚寛之, 筑後了治, 奈良崎道治, 浸炭したジョミニ試験片を用いた浸炭焼入れ品の硬さ予測データ取得方法, 熱処理, 58巻, 2004号, (2018), p.164-168.
- (3) 牧正志, 鉄鋼の相変態 マルテンサイト変態編 I, まてりあ, 第54巻, 第11号 (2015), p.557-563.

※「FINAS」は、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社の登録商標または商標です。