

X線応力解析を活用した金属表面熱処理プロセスの開発支援

小川 俊文*1 南 守*1 島田 雅博*1 小野本 達郎*2

Development Support for Metal Surface Heat Treatment Process Using X-Ray Stress Analysis

Toshifumi Ogawa, Mamoru Minami, Masahiro Shimada and Tatsurou Onomoto

金属材料・製品の品質・機能に影響を及ぼす残留応力の管理や把握，制御が一層重要となってきた。調査の結果，金属熱処理業界においては，プロセス改善のための残留応力解析に関するニーズが高い。そこで本研究では，X線応力解析の活用による金属表面熱処理プロセスの改善や高機能製品の創出を目標に取り組んだ。その結果，前工程にSR処理を導入することで，焼入れ後の歪量を低減することができ，加工プロセス改善に繋がること明らかになった。また，浸炭処理の最適化条件を見出すのに，残留応力測定は有効であり，部材を高度化出来ることがわかった。更に，同一鋼材でも全硬化層深さが異なるとSR処理による残留応力変化が異なるため，省エネを図るためには製品毎に適した条件でSR処理を実施することが必須であることが明らかになった。

1 はじめに

近年，自動車等輸送用機器分野を始め金属材料が使用されるあらゆる分野では，グローバル競争の激化から，コスト競争力に加え，厳しい品質管理や製品の高性能化の要求が高まっている。そのため，金属材料・製品の品質・機能に影響を及ぼす残留応力の管理や把握，制御が一層重要となってきた。特に金属熱処理業界からは，プロセス改善のための残留応力解析に関するニーズが極めて高い。そこで本研究では，平成27～28年度で構築した最新X線応力解析技術の活用による金属表面熱処理プロセスの改善や高機能製品の創出を目的とした。

2 研究・実験方法

2-1 残留応力の測定方法

残留応力の測定は，二次元検出器を搭載したX線回折装置（D8-DISCOVER，ブルカーAXS(株)製）で行った。X線発生源は，Co管球を使用した。管電圧35 kV，管電流40 mAとした。X線の照射は，直径1 mmとした。測定条件は，Fe(211)の回折ピークについて，Phi角方向7ポジション(0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°)，Psi角方向2ポジション(15, 45°)の合計14個の回折環データを取り込んだ。残留応力の算出は，この14個の回

折環データを用いて2D法¹⁾で行った。

2-2 測定に用いた試験片と熱処理

本研究では，金属熱処理分野のニーズに基づき3つの課題に取り組んだ。①矯正加工プロセスの最適化，②熱処理による残留応力制御，③応力除去焼なまし処理(SR処理)条件の最適化である。

課題①の試験片は，機械構造用合金鋼SCM440を用いた。引抜き材から切出し・旋盤加工により，長さ300 mm，直径8, 10, 12, 14 mmの丸棒を作製した。この丸棒に対して高周波焼入れと焼戻しを行った。

課題②の試験片は，機械構造用合金鋼SCM415を用いた。形状は，長さ30 mm×直径30 mmの円柱とした。この円柱について真空浸炭と焼戻しを行った。

課題③の試験片は，機械構造用炭素鋼S45Cと機械構造用合金鋼SCM440を用いた。形状は，長さ150 mm×直径30 mmの円柱棒とした。この円柱棒について高周波焼入れと焼戻しを行った。

3 結果と考察

3-1 矯正加工プロセスの最適化について

本課題の目的は，寸法精度向上（生産性向上）である。精密工作機器の位置決め部品等に使用される軸もののワークの熱処理プロセスは，高周波焼入れ→焼き戻し→歪矯正となっている。現在1品毎に変形量測定，歪矯正を行っており，多大な時間と労力を要するた

*1 機械電子研究所

*2 福岡県商工部

め、少しでも歪矯正プロセスを削減させる必要がある。また、高周波焼入れ中、軸もののワークに反りが発生し回転軸から芯がずれると高周波加熱コイルの位置をその都度微調整する必要があるため、高周波焼入れ中のワークの反りは発生しない方が望ましい。

そこで、高周波焼入れ前に応力除去焼き鈍し処理（SR 処理）を取り入れることで、歪矯正プロセスを削減させることが可能であるかを検討した。長さ 300 mm×直径 14 mm の丸棒について、3 種類（SR 処理無し、100 °C×3 h の SR 処理有り、150 °C×3 h の SR 処理有り）の試験片を準備し、各プロセスにおける残留応力の測定結果を図 1 に示す。3 種類の試験片の残留応力の挙動は同じで、高周波焼入れ前は、引張の残留応力、高周波焼入れ後は、圧縮の残留応力であった。SR 処理が有る無しに関わらず、歪矯正後の圧縮残留応力に著しい差は見られなかった。

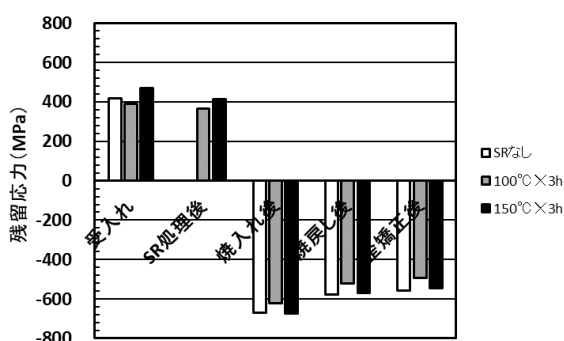


図 1 各プロセスでの残留応力

図 2 に各プロセスにおける歪量を測定した結果を示す。SR 処理無しの歪量は、焼入れ前 0.06 → 焼入れ後 0.57 に対し、100 °C×3 h の SR 処理有りの歪量は、焼入れ前 0.05 → 焼入れ後 0.29、150 °C×3 h の SR 処理有りの歪量は、焼入れ前 0.04 → 焼入れ後 0.25 であった。SR 処理の導入により歪量が、約半分になっていた。

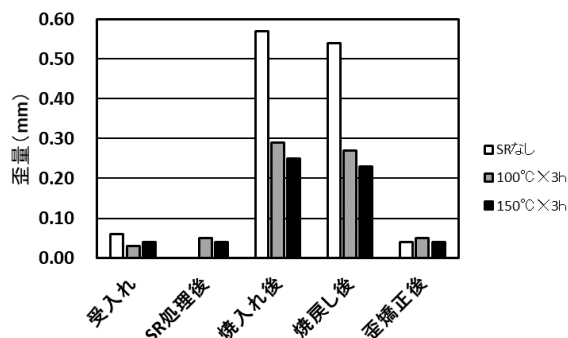


図 2 各プロセスでの歪量

以上の結果より、高周波焼入れの前段階に SR 処理を導入することで、歪矯正後の圧縮残留応力は従来と同程度を保持したまま、高周波焼入れ後の歪量を従来の半分程に削減させることが可能であることを明らかにした。このことは、歪矯正プロセスの時短化と作業者の負担軽減につながると考えられる。また、高周波焼入れ後の歪量が小さくなるということは、高周波焼入れ中におけるワークの軸ずれが小さくなると推測され、作業者の負担軽減に繋がると考えられる。これらの事が最終的には製品の仕上がり寸法精度の向上と生産性向上に繋がると推測される。

3-2 熱処理による残留応力制御について

本課題の目的は、製品の機能・機械的特性の向上である。熱処理分野における浸炭処理は、製品の機能・機械的特性を向上させる有効な手段である。通常、浸炭処理製品の品質管理は、硬さ測定、金属組織観察で行われている。そのため、硬さ測定が厳禁な単品物や硬さ測定が困難な形状製品に浸炭処理を行う場合、非破壊で浸炭処理製品の品質管理が可能な方法を必要とされている。そこで今回、浸炭処理と残留応力との相関について検討を行った。浸炭処理温度 900 °C で、処理時間を 1, 2, 4 時間の 3 条件の試験片を作製した。図 3 に、浸炭処理時間と試験片表面残留応力の相関を示す。処理時間の増加に伴い圧縮残留応力が増加していた。処理時間が長くなると、浸炭層が厚くなることから、浸炭層の厚みは、残留応力測定で把握することが可能である。

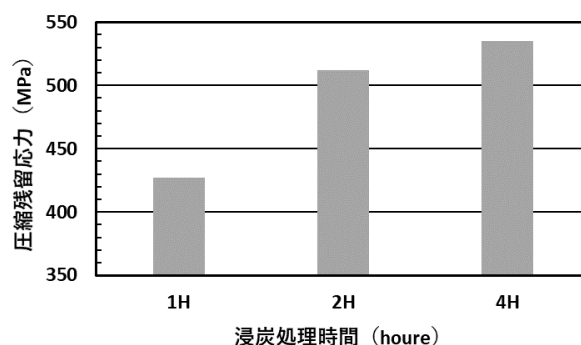


図 3 浸炭処理時間と試験片表面残留応力の相関

浸炭層の性状は、被浸炭品の浸炭処理前の状態の影響を受ける。ほとんどの被浸炭品は、機械加工を受けていることから、その表面には機械加工由来の残留応力が存在している。そこで、機械加工由来の残留応力

を除去するために、応力除去焼き鈍し処理 (SR処理) を行った後に浸炭処理を行って、浸炭層の性状に及ぼすSR処理の影響について検討を行った。SR処理は、2通りの温度 (600 °C, 670 °C) で実施した。SR処理温度と被浸炭品表面の残留応力との相関を図4に示す。SR処理を行うと被浸炭品表面の圧縮残留応力が、減少することが明らかになった。また、SR処理温度が高い程、被浸炭品表面の圧縮残留応力が、減少した。この結果から、被浸炭品に要求される機能・機械的特性を満足させるために、SR処理条件の選定には注意する必要があることが分かった。

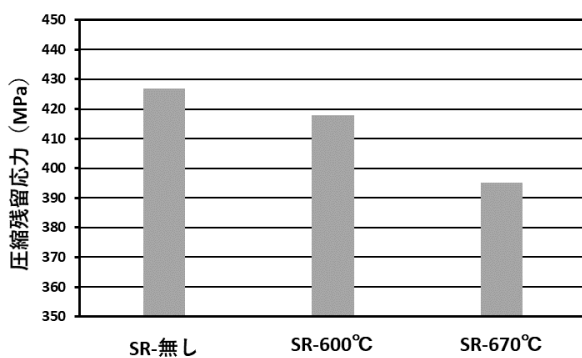


図4 SR処理温度と被浸炭品表面残留応力の相関

浸炭層の性状に及ぼすSR処理温度の影響について硬さ変化で評価可能であるかどうか検討を行った。硬さ測定は、ロックウェル硬さ試験機 (Cスケール) で行った。SR処理温度と被浸炭品表面の硬さとの相関を図5に示す。SR処理の無し有りやSR処理温度の違いに関わらず、被浸炭品表面の硬さは、いずれも58 HRCであった。この結果から、浸炭層の性状の変化は、被浸炭品表面のロックウェル硬さ変化での評価が難しいことが明らかになった。

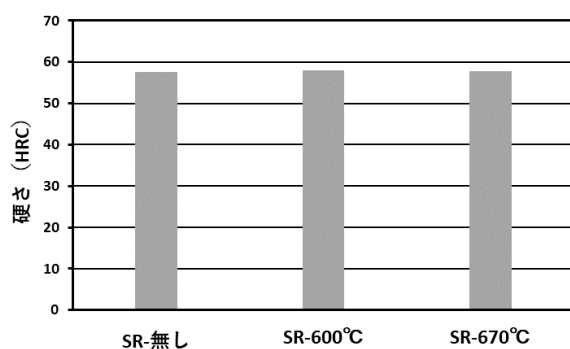


図5 焼戻し温度と試験片表面硬さの相関

3-3 応力除去焼なまし処理 (SR処理) 条件の最適化について

本課題の目的は、経験則の数値化 (生産性の向上) である。熱処理業界では、明確な数値的根拠が無くて経験則に基づいて熱処理が実施されている場合がある。その様な経験則に基づく処理条件を数値化することで、プロセスを改善出来る可能性がある。そこで今回、機械構造用炭素鋼 S45C と機械構造用合金鋼 SCM440 の試験片を用いて、高周波焼入れ後の SR 処理条件と残留応力の相関について検討を行った。2種類の鋼種に対し、全硬化層深さ3種類 (2, 4, 6 mm) の試験片を作製した。図6に、全硬化層深さと試験片表面の残留応力との相関を示す。S45C は、全硬化層深さの増加に伴い圧縮残留応力は約 160 MPa ずつ単調に減少した。一方、SCM440 は、全硬化層深さが 2 mm→4 mm に変化すると圧縮残留応力は、25 MPa 増加し、全硬化層深さが 4 mm→6 mm に変化すると圧縮残留応力は、85 MPa 減少した。この結果から、鋼種が違くと全硬化層深さの違いにより SR 処理条件を変える必要があるということがわかった。

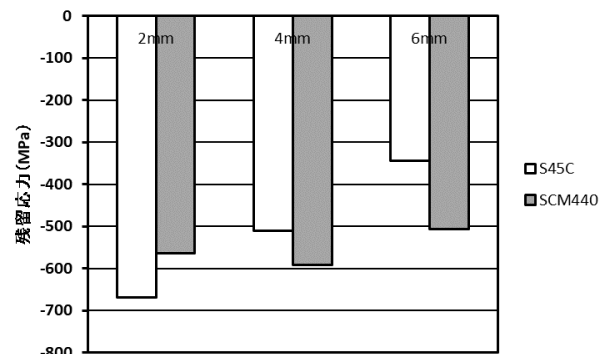


図6 全硬化層深さと試験片表面残留応力との相関

次に、S45C と SCM440 に対し、全硬化層深さが全硬化層深さ3種類 (2, 4, 6 mm) の試験片を複数本作製し、500 °C 迄の任意の温度で焼戻しを行った。焼戻しは、任意の温度で1時間保持後室温まで空冷した。焼戻しを行った試験片の中心位置において試験片表面の残留応力を測定した。図7に S45C における焼戻し温度と残留応力の相関を示す。焼戻し温度の増加に伴い試験片表面の圧縮残留応力は、短調に減少した。焼入れままの状態において、試験片表面の圧縮残留応力は、全硬化層深さの増加に伴い小さくなっていったが、その傾向は、焼戻し温度が増加しても同じであった。

図 8 に SCM440 における焼戻し温度と残留応力の相関を示す。焼き戻し温度が 300 °C 未満の範囲では、全硬化層深さが 4 mm → 2 mm → 6 mm の順に圧縮残留応力が大きい、焼き戻し温度が 300 °C 以上の範囲では、全硬化層深さが 6 mm → 4mm → 2 mm の順に圧縮残留応力が大きかった。この様に S45C と異なる傾向が見られる理由として、SCM440 は合金元素の影響で S45C よりも試験片内部深くまで焼きが入るため焼戻しによる組織変化が複雑になることが関係していると考えられる。

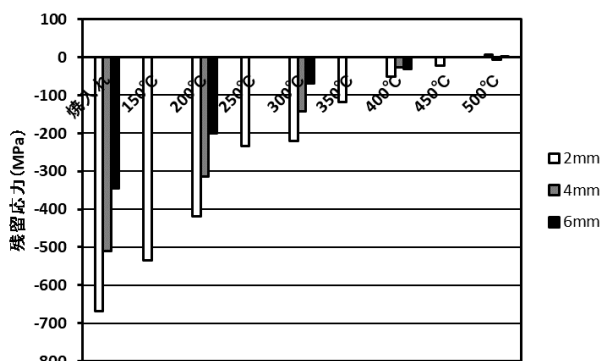


図 7 S45C における焼戻し温度と残留応力の相関

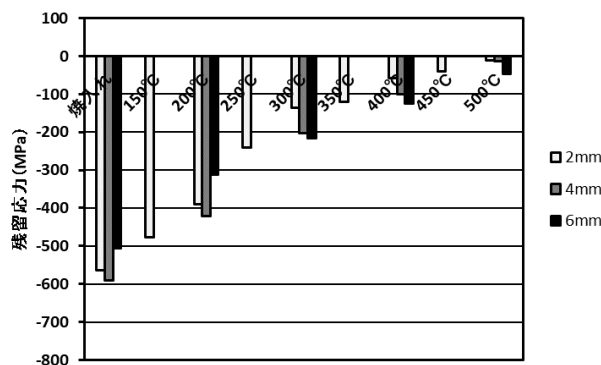


図 8 SCM440 における焼戻し温度と残留応力の相関

以上の結果より、形状が同じであっても鋼種が異なれば高周波焼入れと焼戻しにより生じる圧縮残留応力は異なること、また同一鋼材でも全硬化層深さが異なれば圧縮残留応力が異なることから、省エネを図るためには、製品毎に適した条件で SR 処理を実施することが重要であることが確認できた。

4 まとめ

残留応力測定・解析技術を用いて金属熱処理業界のニーズに基づき3つの課題に取り組んだ。その結果、

残留応力測定・解析が、矯正加工プロセスの改善に繋がり、最終的には製品の仕上がり寸法精度の向上と生産性の向上に繋がることが分かった。また、浸炭焼入れによる被浸炭品の浸炭層の厚みと浸炭処理前のSR処理温度の影響について残留応力で把握することが出来、製品の高機能化に残留応力測定は有効であることがわかった。更に、残留応力変化を把握することで、鋼種に応じた、製品の表面状態に応じたSR処理条件を見出すことが出来、省エネに繋がることが明らかになった。

以上の様に、金属表面熱処理プロセスの改善や高機能製品の創出を行う上で、残留応力測定・解析技術が有効であることを明らかにした。

謝辞

本課題を実施するにあたり、九州高周波熱錬(株)、(株)石井熱錬、第一高周波工業(株)のご協力を頂きました。誠にありがとうございました。

5 参考文献

- 1) 鈴木賢治ら：2次元検出器によるX線応力測定，pp. 41-56，養賢堂(2015)