

1. はじめに

熱処理や熱間加工中の不均一な温度分布により生じる残留応力は、製品の疲労強度の低下や後加工での精度悪化の原因となるなど負の側面を持っている。しかしこの現象を逆手に取り塑性加工中に積極的に温度勾配を付与することにより製品の残留応力を自由に制御できる技術を検討している。本助成による検討ではその第1段階として引抜き加工での残留応力制御を試みた。

一般的な引抜き加工では加工中の変形が不均一であることから棒線材の表層部に引張り、中心部に圧縮の残留応力が発生する。上述したように材料に生じた残留応力は二次加工や熱処理の際の変形の原因となるほか、表層部に生じた引張りの残留応力は疲労強度を低下させる。従って、変形抑制のためには残留応力を小さく、疲労強度向上のためには表層部に圧縮残留応力を付与することが望まれる。本検討では、引抜き加工工程のみで棒線材の残留応力を自由に制御することを目指して、棒線材の半径方向に温度勾配が生じた状態での引抜き加工を試みた。

開発した引抜き加工法(以下、開発法)の模式図を図1に示す。均一に加熱された棒材を、引抜き直前に短時間冷却することで表層部の温度が低く中心部の温度が高い状態とする。この温度分布のまま引抜き加工を行う。引抜き直後には、従来の引抜きと同じ応力分布と、引抜き直前とほぼ同じ温度分布が残った状態となる。その後、放冷されて棒材全体が常温になる過程で、まだ温度が高い中心部が大きく熱収縮して、その結果表層部が圧縮残留応力になると考えた。このとき用いる冷却装置は図2のようであり直接水冷方式である。

S45Cの丸棒(直径10mm)を用いたこれまでの検討の結果、加熱温度400℃で大きな残留応力低減効果を示し、本方法の有効性が示された¹⁾。

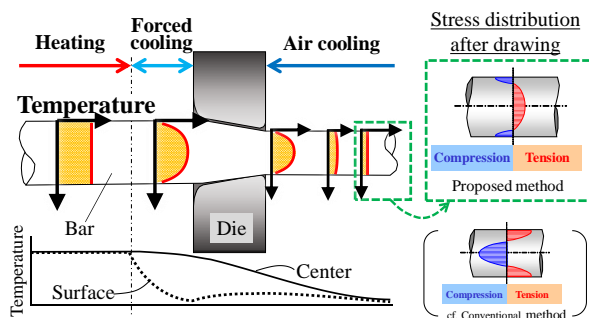


図1 温度勾配付与引抜き加工の模式図

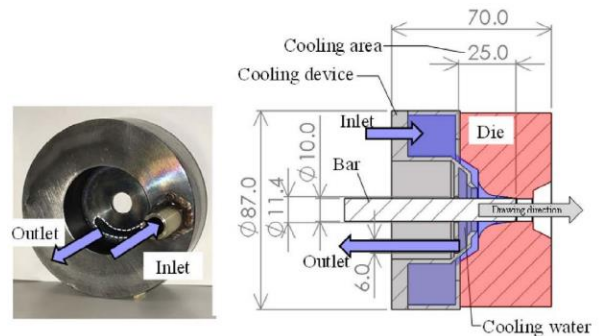


図2 開発法における水冷装置

また有限要素法(FEM)解析により残留応力低減メカニズムが検討された。¹⁾

2. 目的

本研究では以下の点について解明することを目的とする。

(1) 既報¹⁾ではFEM解析は簡易的なモデルで実行された。即ち、実際の材料(S45C)には青熱脆性と高温での流動応力の低下が生じるがこれが無視された。また、実際には冷却部における熱伝達係数は材料の表面温度によって変化するが一定値が用いられた。これらが残留応力に及ぼす影響を明確にする必要がある。

(2) 開発法では材料が加熱、短時間の冷却、引抜き加工という特殊な加工履歴を受ける。既報¹⁾では残留応力が調査されたが、このような特殊な加工を受けた後の材料の機械特性について明確にする必要がある。

(3) 水温および断面減少率の影響を明確にして、表層部の圧縮残留応力を達成可能な条件を明らかにする必要がある。

本研究では以上の明確化を目的に、流動応力と熱伝達係数の温度依存性を考慮したFEM解析を行う。さらに、従来法で加工した材料と開発法で加工した材料の硬さ試験および引張り試験を行う。また、冷却水温および断面減少率が残留応力におよぼす影響を検討する。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

機械部品、ワイヤケーブル等の疲労強度向上、後加工における変形の低減に寄与する技術である。現在は基礎研究段階にあり、今後実用化に向けた検討を進めて行く。特許出願済である²⁾。

4. 研究内容の詳細

4.1 FEM 解析による検討

開発法による残留応力低減のメカニズムの詳細を調べるため熱弾塑性 FEM による解析を行った。

解析には静的陰解法 FEM 解析ソフトウェア MSC Marc 2020 を使用し、図 3 に示すように長さ 50 mm、直径 10 mm の棒材の軸対称モデルを作成した。要素には 4 節点軸対称ソリッド要素を用いた。長手方向の要素サイズはダイス穴径の 1/30 以下とし、変形が大きい表層部の半径方向の要素サイズは長手方向と同じにした。またヤング率は 206 GPa、ポアソン比は 0.3、熱膨張率は 1.12×10^{-5} 、熱伝導率 λ は 36 W/mK、密度 ρ は 7600 kg/m³、比熱 c は 731 J/kg・K とした。棒材とダイスの間の摩擦係数は 0.05 とした。実験¹⁾と同様にダイス半角は $\alpha = 6.5^\circ$ 、ダイス穴径は 9.48 mm とした。断面減少率 R_A は 10% である。流動応力のひずみ速度依存性は無視した。また、塑性発熱と摩擦発熱も無視した。

機械的境界条件は以下の通りである。棒材の前端部の節点に強制変位を与えた(図中(b))。実験での温度履歴を再現するために本解析では、棒材を初期位置で 0.5 秒間(実験での冷却帯通過時間に相当)冷却した後、その温度を保持した状態で加工されるように短時間(0.05 秒間)で引抜きを行った。引抜き後に棒材を常温になるまで 20 秒間静止させた状態で冷却を行った。

表面の軸方向応力の評価点は図中の(c)である。

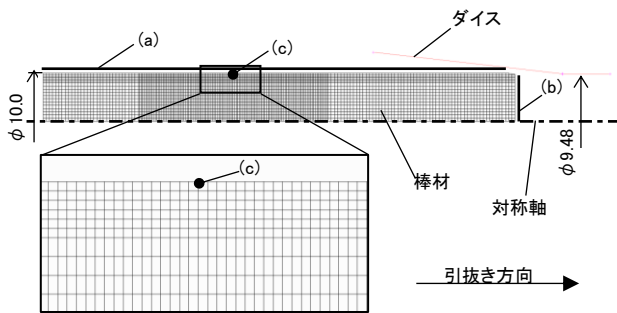


図 3 FEM 解析モデル

モデルは以下の 3 種類とした。

モデル 1: S45C の室温(図 4 の 25 °C のデータ)での流動応力曲線を用いた。棒材の外表面には対流熱伝達境界条件を適用し、冷却水温度 T_w は 25 °C、熱伝達係数 h は 10000 W/m²・K の一定値とした。

モデル 2: モデル 1 を元に以下に示す立矢ら³⁾の青熱脆性を考慮した構成式を用いて流動応力の材料温度依存性を考慮した。

$$\sigma_{st} = K(\varepsilon_p + \alpha)^n + C_1 \exp[C_2(T - T_0)^2] \varepsilon_p^{C_3} \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 T \quad (2)$$

$$K = K_0 + K_1 T \quad (3)$$

D-

$$n = n_0 + n_1 T \quad (4)$$

ここで σ_{st} は流動応力、 ε_p は塑性ひずみ、 T は温度である。また式(1)における C_1 、 C_2 、 C_3 、 T_0 は材料定数である。 α 、 K 、 n はそれぞれ式(2)、式(3)、式(4)に示すように温度の一次関数として定義される。図 4 に本式を用いて算出した流動応力の結果を示す。

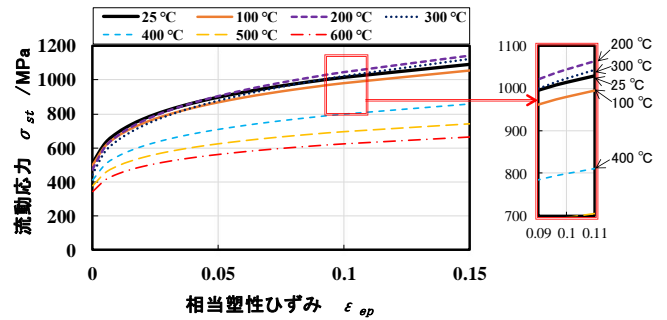


図 4 FEM 解析に用いた流動応力曲線

モデル 3: モデル 1 を元に上記の流動応力の温度依存性と、熱伝達係数の材料表面温度依存性の両者を考慮した。図 5 にモデル 3 で採用した熱伝達係数を示す。これは高橋ら⁴⁾が同定したプール沸騰における熱伝達係数である。

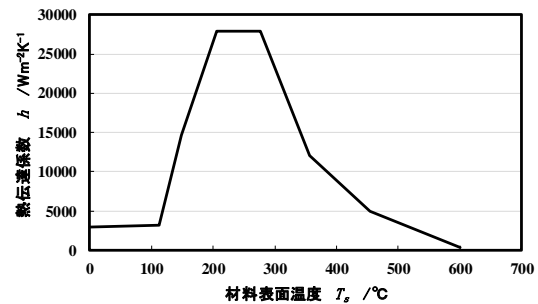


図 5 FEM 解析に用いた熱伝達係数⁴⁾

モデル 1 とモデル 2 を比較することで流動応力の温度依存性の影響を、モデル 2 とモデル 3 を比較することで熱伝達係数の材料表面温度依存性の影響を考察できる。

図 6 に実験結果と FEM 解析結果を比較する。実験結果はスリット法により得られた表面の軸方向残留応力である¹⁾。FEM 解析結果はモデル 3 における図 3 の c 点の加工後の軸方向残留応力である。

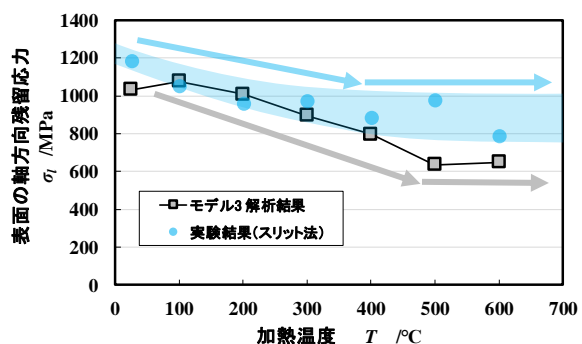


図 6 加熱温度と表面の残留応力の関係 (FEM 解析結果と実験結果の比較)

FEM 解析結果は実験結果に近い値を示した。また両者とも 400 °C から 500 °C 程度まで加熱温度を上昇させて行くと残留応力は低下して行き、加熱温度がさらに高温になると残留応力の低下が緩やかになる傾向を示した。詳細に見ると実験結果は FEM 解析結果に比べて高い残留応力を示す傾向にあった。これは、実験での残留応力測定に用いたスリット法は応力が中心から表面にかけて線形に分布することを前提としていることが一因である。このように、モデル 3 の FEM 解析は定性的に実験を表現可能であることが確認できた。

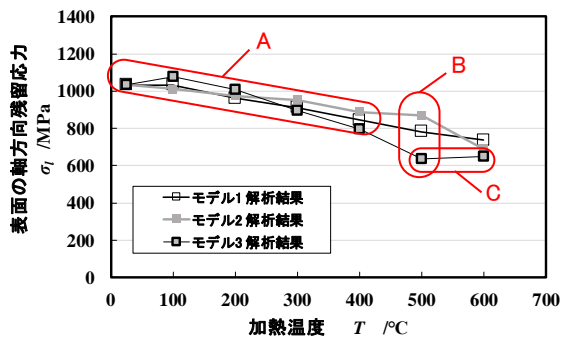


図 7 加熱温度と表面の残留応力の関係 (FEM 解析結果)

図 7 に表面 (図 3 の c 点) の加工後の軸方向残留応力の FEM 解析結果を示す。流動応力の温度依存性と熱伝達係数の温度依存性を考慮しない最も単純なモデル 1 において、加熱温度が上昇すると残留応力が低下する傾向となった。モデル 1 において考慮した熱に関する因子は熱ひずみである。即ち図 1 に示した熱ひずみによる残留応力変化メカニズムは妥当であると言える。

また、図中 A に示すように加熱温度が 400 °C 以下の場合には 3 種類のモデルの差は小さかった。図 4 の流動応力に着目すると 200 °C において最も流動応力が高くなり、300 °C から 400 °C にかけて急激に流動応力が低下する様子が見てとれる。加熱温度 400 °C の条件では、材料がダイスに到達する時点での棒材の平均温度はモデル 1 およびモデル 2 において 307 °C、モデル 3 において 261 °C である。したがって、図 4 において流動応力の温度依存性が小さい領域での加工である。これが、3 種類のモデルの間での差が小さかった一因である。

さらに詳細に見ると、加熱温度が 300 °C と 400 °C の場合にはモデル 3 の結果がモデル 2 の結果に比べて小さくなっている。これは、図 5 に示すように熱伝達係数が大きい領域で冷却されて、より半径方向の温度勾配が大きくなったためである。

図 7 中の B の領域ではモデル 3 の残留応力が他のモデルに対して小さくなっている。モデル 3 のダイス到達時の材料平均温度は 413 °C であり図 4 の流動応力低下の影響を大きく受けている。その結果残留応力も低下したものと考えられる。

図 7 中の C において、モデル 3 では加熱温度が上昇しても残留応力が低下しなかった。これは図 5 に示すように熱伝達係数が非常に小さくなり温度勾配が小さくなることと対応する。

以上の検討により、加熱温度が 400 °C 以下であれば流動応力および熱伝達係数の温度依存性の影響は小さく、これらの考慮は重要ではないことが明確になった。一方で加熱温度が 500 °C 以上の場合には流動応力および熱伝達係数により結果が大きく変わるためこれらを考慮した検討が必要である。

4. 2 従来法と開発法における材料特性の比較

ここでは、従来法と開発法で引抜き加工された棒材の機械的性質を比較する。素材として φ 10 mm の S45C 磨き棒鋼 (JIS G3123, S45C-D) を用いた。従来法ではダイス穴径 9.48 mm、ダイス半角 $\alpha = 6.5^\circ$ のダイスを用い、減面率 $R_A = 10\%$ で加工を行った。引抜き速度は 31 mm/s とした。黒鉛を含む潤滑剤をあらかじめ塗布してから引抜き加工を行った。開発法では、上述した条件を従来法と同じとしたうえで、潤滑剤を塗布した後に 15 分間で材料温度を 400 °C まで加熱した。加熱後に図 1 に示すように冷却水でダイス手前の 27 mm の部分を水冷しながら引抜き加工を行った。

スリット法で計測した従来法の残留応力は 1190 MPa であるのに対し、開発法では 1050 MPa であり 140 MPa 低減した。このときの機械的性質を以下に示す。

図 8 に素線、従来法および開発法で加工後の材料中心部のビッカース硬さ (0.1 kgf) の結果を示す。破線はそれぞれの条件における平均値である。素材に対して従来法は約 21% 硬さが上昇した。これは、室温で $R_A = 10\%$ の引抜き加工を行ったことによる加工硬化によるものである。一方、素材に対して開発法は約 44% 硬さが上昇した。開発法が従来法と異なるのは 400 °C への加熱を経て引抜き加工が行われた点である。本実験で用いた素材は、冷間引抜きで製造された磨き棒鋼である。したがって、素材にはあらかじめ転位が導入されており、開発法ではこの転位に起因した歪時効硬化が生じたと考えられる。

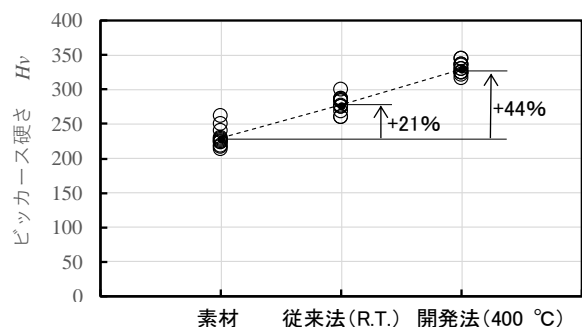


図 8 硬さ試験結果

つぎに降伏点の変化を調べるために引張り試験を実施し、結果を図9に示す。試験片はダンベル状に加工せず、引抜きままの状態で行張り試験を行った。ひずみは標点間距離 50 mm の伸び計を用いて計測した。破断は標点間だけでなく標点間外にも発生した。そのため、均一変形となる最大荷重点近傍までの応力-ひずみ曲線の評価した。本結果より 0.2%耐力は、素材、従来法、開発法の順に大きくなることが明らかになった。図 8 の硬さの結果と同様に、開発法においては加工硬化と歪時効硬化の両者生じたと考えられる。

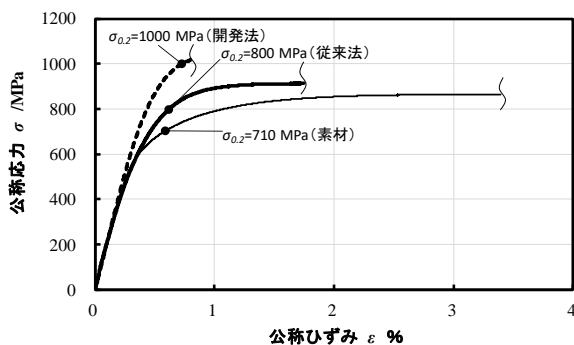


図 9 応力-ひずみ線図

図 10 に絞り値を示す。破断部は素材、従来法、開発法の全てでカップアンドコーン型となった。素材に対して従来法は絞り値がほとんど低下しなかったが、開発法は素材に対して 28%低下した。

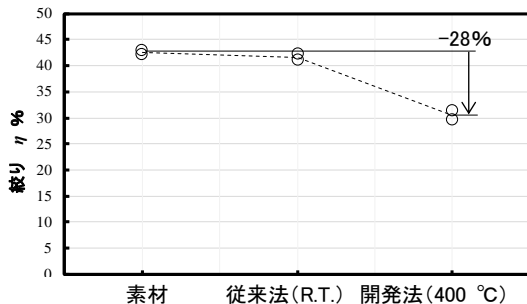


図 10 絞り値

以上のことから、S45C に開発法を適用した場合には、残留応力が低減すると同時に、高強度化、低延性化することが明らかになった。これらの結果は従来の温間引抜きや伸線温度の影響についての研究結果^{5)、6)}とも一致しており、開発法のように急速冷却が工程に入るからといって特異な機械特性の変化は生じていないことが確かめられた。

実用的には、開発法で製造した引抜きままの材料を製品に用いる場合には、残留応力の低減と降伏応力の上昇により疲労耐久性の向上が期待できる。一方で開発法により製造した材料を塑性加工する場合には延性の低下に着目する必要があると言える。なお、本実験では低出力の管状電気加熱

炉により加熱を行ったため昇温に 15 分を要した。実作業で開発法を行う場合には高周波誘導加熱を用いて短時間で加熱することも考えられ、加熱時間によって歪時効硬化量を変化させることができる可能性がある。

4.3 冷却水温の影響

冷却水温の影響を調べるために、図 11 に示す冷却水温制御装置を用いて実験を行った。素材および潤滑剤、引抜き速度は 4.2 章と同じとした。断面減少率は $R_A = 10 \%$ 、材料の加熱温度は $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ 、冷却水流量を 1.8 l/min とした。冷却水の温度は 25 $^\circ\text{C}$ 、17 $^\circ\text{C}$ 、10 $^\circ\text{C}$ の 3 水準とした。冷却水には水道水を用いた。冷却水は水冷装置と水受けの間をポンプにより循環する仕組みとなっており、冷却水が目標温度に到達するまであらかじめ循環させながら冷却した後に引抜き加工を行った。残留応力はスリット法により評価した。

図 12 に実験結果を示す。水温を 25 $^\circ\text{C}$ から、10 $^\circ\text{C}$ まで変更することで残留応力が約 100 MPa 低減した。即ち冷却水温低下による残留応力の低減効果が明らかになった。

式(5)はニュートンの冷却則であり対流熱伝達の場合の熱流束 q と熱伝達係数 h 、棒材表面温度 T_s 、水温 T_w の関係を表している。

$$q = h(T_s - T_w) \quad (5)$$

初期の材料表面温度は 400 $^\circ\text{C}$ であり、これに対して水温 T_w の変化は 15 $^\circ\text{C}$ (25 $^\circ\text{C}$ から 15 $^\circ\text{C}$) と小さいため一見すると抜熱への影響は小さいように思える。しかし、水温が低下したことにより核沸騰状態が維持されやすく(膜沸騰状態になりにくく)なり熱伝達係数が上昇した結果、熱流束が大きくなり残留応力が低減したと考えられる。

本実験結果より水温は開発法における重要な影響因子であると言える。



図 11 冷却水温度制御・循環装置外観

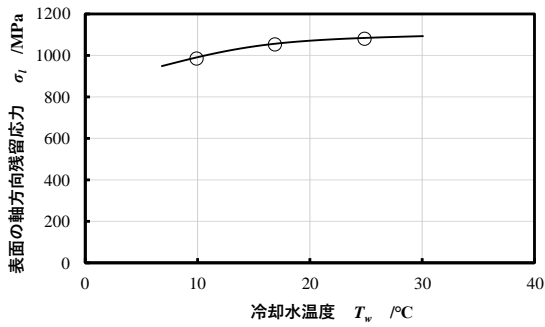


図 12 冷却水温度と残留応力の関係

4. 4 断面減少率の影響(スキンプスの適用)

以上の検討は断面減少率 $R_f=10\%$ での結果であった。ここでは断面減少率の影響を調べる。

素材としてこれまでの検討と同様に $\phi 10$ mm の S45C 磨き棒鋼(JIS G3123, S45C-D)を用いた。 $R_f=10\%$ の場合にはダイス穴径 9.48 mm、 $R_f=0.6\%$ の場合にはダイス穴径 9.97 mm のダイスを用いた。断面減少率 1%以下の引抜きはスキンプスと呼ばれ表層部のみに塑性変形が加わることが知られている⁷⁾。したがって、開発法における加工時の表層部の熱収縮(引張り応力)とスキンプスを重畳させることにより強い圧縮残留応力を生じさせることができるのではないかと考えた。断面減少率以外の条件は 4.2 章の実験と同様である。

図 13 に断面減少率 $R_f=10\%$ と $R_f=0.6\%$ のスリット法による残留応力測定結果を示す。断面減少率が 10%の場合には従来法(25 °C)に対して開発法(400 °C)は残留応力が約 300 MPa 低下した。一方で断面減少率が 0.6 %の場合には約 900 MPa 残留応力が低下し大きな効果が得られた。このとき約 -500 MPa の強い圧縮残留応力を示した。

以上のことから、表層部のみが冷却された状態で、表層部のみに塑性加工を加えることにより圧縮残留応力を表層部に付与できる可能性が示された。本原理は種々の加工に応用が可能であると考えられ今後検討して行く。

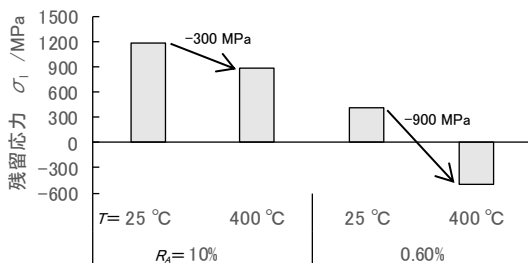


図 13 加熱温度および断面減少率と残留応力の関係

5. まとめ(結言)

残留応力を制御することを目的に均一に加熱された S45C 棒材を、引抜き直前に短時間冷却して加工を行う方法(開発法)を検討した。本加工法について実験と FEM 解析を行い以下の結論を得た。
1) 加熱温度が 400 °C 以下であれば流動応力および熱伝達係数の温度依存性の影響は小さいことが明らかになった。したがって、加熱温度が 400 °C 以下であれば FEM 解析を行う場合にこれらの考慮は重要ではない。一方で加熱温度が 500 °C 以上の場合には流動応力および熱伝達係数により結果が大きく変わるため、これらを考慮した検討が必要である。

2) S45C に開発法を適用した場合には、残留応力が低減すると同時に、高強度化、低延性化することが明らかになった。

3) 冷却水温を 25 °C から 10 °C まで変更することで残留応力が約 100 MPa 低減した。即ち冷却水温の低減は残留応力の低減に有効である。

4) 開発法へのスキンプスの適用を検討した。断面減少率が 0.6 % の場合には、開発法により約 900 MPa 残留応力が低下し大きな効果が得られた。このとき約 -500 MPa の強い圧縮残留応力を示した。

6. 参考文献等

- 1) Hiroaki KUBOTA, Yutaka AKIMOTO, Keigo SAITO, Wataru SAKURAZAWA and Kazunari YOSHIDA: Residual Stress Control in Drawn Bar and Wire by Heating-Cooling-Drawing Process, ISIJ International, vol. 61, no. 11, (2021), 2792-2797.
- 2) 窪田紘明・秋元雄天: 塑性加工方法および塑性加工装置, 特開 2022-6975, (2022).
- 3) 立矢宏・新本哲平・高木幸司・放生明廣・茶谷明義: 青熱脆性を考慮した広い温度域に適用可能な炭素鋼の構成式, 日本機械学会論文集(A 編), vol. 71, no. 703, (2005), 435-442.
- 4) 高橋孝幸・山田毅・石川孝司: 有限要素法による 7050 アルミニウム合金の熱処理残留応力の解析, 熱処理, vol. 50, no. 1, (2009), 67-72.
- 5) 白神哲夫・大鈴弘忠・三瓶哲也: 温間引抜きによる高強度 PC 鋼線の開発, 塑性と加工, vol. 31, no. 358, (1990), 1355-1360.
- 6) 西岡多三郎: 鋼線の伸線温度, 塑性と加工, vol. 8, no. 73, (1967), 95-101.
- 7) T. Kuboki, I. Kawakami, Y. Neishi, K. Kuroda and M. Akiyama: A Study on the Influence of Mechanical Properties on the Distribution of Axial Residual Stress after Cold Drawing of Metallic Bars, Mater. Sci. Res. Int., 7 (2001), No. 1, 41.