



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

大型鍛鋼品の熱処理解析技術の構築

Development of Heat-treatment Analysis for Large Forged Steel

柳沢祐介

Yusuke Yanagisawa

日本製鋼所 M&E (株)
室蘭研究所 プロセス技術 Gr.
研究員

1 はじめに

この度、本稿を執筆する機会を頂き感謝いたします。私は(株)日本製鋼所に2006年に入社し、以来15年間に室蘭研究所で勤務してきました。入社当初は压力容器などの材料研究に従事し、その後は高圧水素用材料の信頼性評価に携わってきましたが、現在は鍛錬・圧延・熱処理プロセスに関する研究・開発を主業務としています。今回紹介させて頂く「大型鍛鋼品の熱処理解析」は、北海道大学の佐々木克彦先生にご指導頂き、社会人ドクターとして博士課程を修了させて頂いたテーマになります。

2 大型鍛鋼品の熱処理

大型鍛鋼品の一例として、胴径 ϕ 3270mmの超大型タービンロータ軸材を図1に示します¹⁾。弊社の大型鍛鋼品は、最大重量670tの鋼塊を14000tプレスで鍛錬した後、鍛錬肌の状態で行われる予備熱処理と、機械加工肌で行われる調質熱処理の二工程の熱処理を施して製造されます。予備熱処理は、粗大かつ不均一な結晶粒を整細粒化する目的で行われますが、鍛錬後は素材表面に割れの起点となり得る凹凸が存在することに加え、結晶粒が粗大であるため靱性が極めて低く、熱処理中に作用する応力は割れの要因となります。割れが生



図1 タービンロータ軸材の鍛錬打上後の外観

じた場合の損害が大きいことから、弊社ではこれまで、製造現場での経験と実績に基づいて信頼性の高い予備熱処理が行われてきました。一方、部材の大型化やニアネットシェイプ鍛造による歩留まり向上の要求に応えるため、より高度かつ効率的な予備熱処理技術が必要とされており、予備熱処理時に生じる応力を数値解析により精度良く把握することができれば、工程設計を行ううえで非常に有用と考えました。

3 変態塑性及びクリープ変形を考慮した熱処理解析

熱処理解析では、温度-組織-応力の連成関係を考慮した解析を行います²⁾。オーステナイト温度から冷却時の応力評価では、温度変化に伴う熱収縮と、相変態に伴う変態膨張に加えて、変態時に応力が負荷されることで生じる変態塑性を考慮する必要があります。さらに、大型鍛鋼品特有の事象として、空冷や炉冷を行った場合には冷却工程が数日間にわたるため、オーステナイト温度域のみならず変態温度域においてもクリープ変形(応力緩和)が生じ、応力分布に大きく影響することが考えられました。

汎用の有限要素解析ソフトの標準機能ではこのような挙動を計算することは難しく、十分な解析精度を得られないことが課題でした。そこで、変態塑性とクリープ変形の重畳効果を考慮するため、汎用ソフトに独自のプログラムをユーザーサブルーチンとして組み込みました。プログラムの詳細は紙幅の都合上割愛しますが、参考文献³⁾に詳細を載せているため、ご興味のある方はそちらをご参照下さい。

開発したプログラムの妥当性を検証するため、図2に示す段付き軸材を用いて熱処理試験を実施しました。本素材はASTM A470鋼(NiCrMoV鋼)でオーステナイト温度(850℃)から空冷するとベイナイト単相組織となります。冷却後にリングコア法により測定した部材表面の残留応力の実測値と

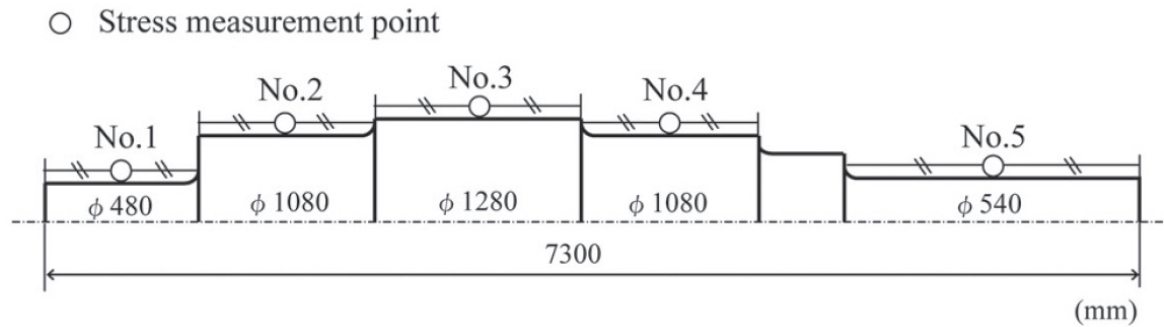


図2 大型軸材の形状及び残留応力測定箇所

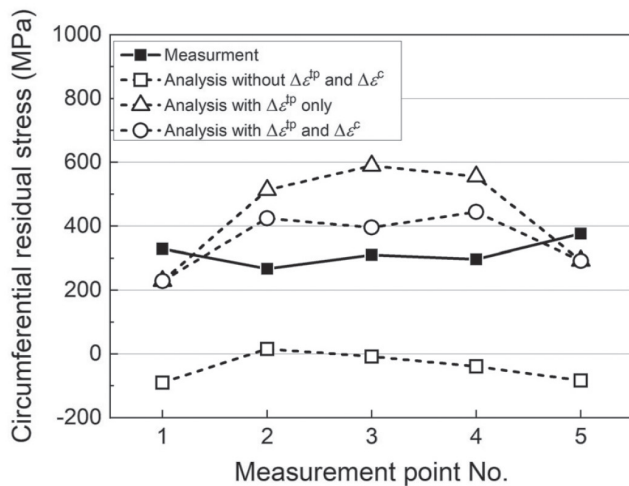
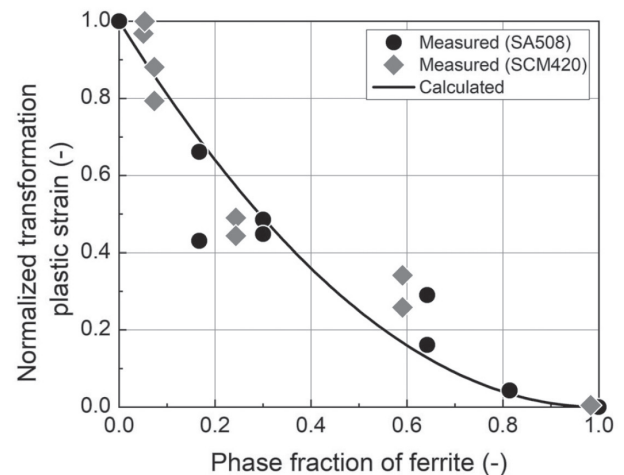


図3 残留応力の実測値と解析値の比較

図4 変態塑性ひずみの実測値と計算値の比較⁴⁾

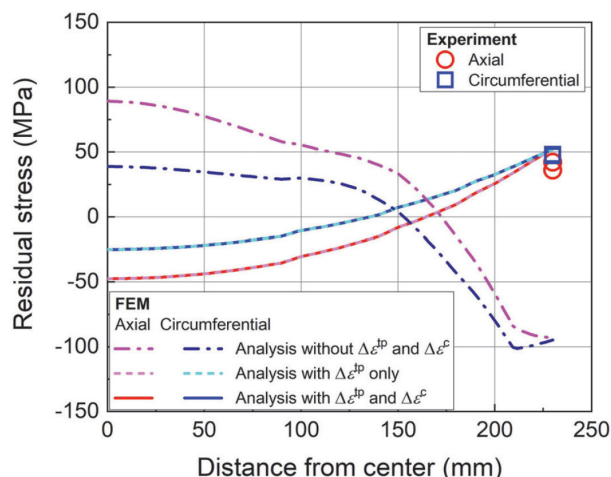
解析値の比較を図3に示します。変態塑性 ($\Delta\epsilon^p$) を考慮しない解析では、残留応力はほとんど生じないのに対し、変態塑性を考慮することで表層が引張応力となりますが、胴径が1000mm以上の箇所では引張応力を過大評価していることが判ります。さらにクリープ変形 ($\Delta\epsilon^c$) を考慮することで表層の引張応力が緩和され、実測値に近づく傾向が得られます。解析精度にはまだ課題がありますが、大型鍛鋼品では変態塑性に加えてクリープ変形を考慮することが重要と判り、従来よりも解析精度を大きく向上することができました。

4 複相組織鋼への適用

前章の検討は単相変態を対象としたものですが、複相変態にも対応できるようにプログラムの拡張を検討しました。相の増加に伴って熱処理中の変態挙動及び変形挙動は複雑になります。特に複相変態における変態塑性挙動を詳細に調べた報告は少なく、定式化が課題でした。そこで、フェライト・ベイナイト変態における変態塑性挙動の把握を目的とし、ASME SA508鋼 (MnMoNi鋼) とJIS SCM420鋼を用いて、

フェライト相分率を変化させたときのベイナイト変態における変態塑性ひずみを実験的に調査しました⁴⁾。フェライト相分率とベイナイト変態における変態塑性ひずみの関係を図4に示します。縦軸は、ベイナイト単相における変態塑性ひずみで規格化しています。同図の計算値は、変態塑性ひずみ速度の一般式⁵⁾に対して、フェライト相とベイナイト相の相互作用は無視できると仮定したのですが、両者が良く一致していることから、定式化の目途が立ちました。

解析プログラムを複相変態に拡張し、SA508鋼の大型試験材 ($\phi 460 \times 1600\text{mm}$) の炉冷材を対象に検証しました⁶⁾。熱処理後のマイクロ組織はフェライト (+パーライト) 相とベイナイト相の混合組織となっており、フェライト相分率は約34%です。熱処理後の残留応力の実測値と解析値を比較した結果を図5に示します。変態塑性 ($\Delta\epsilon^p$) を考慮した解析では表層で引張の残留応力となり、実測結果に近い値が得られます。ここで、クリープ変形 ($\Delta\epsilon^c$) の影響が小さかった理由としては、徐冷したことで部材内の作用応力が小さかったためと考えられます。本試験ではフェライト相とベイナイト相の物性値を個々に調査し、相分率に応じた混合則を用いて解析

図5 残留応力の実測値と解析値の比較⁶⁾

していますが、実測値に近い残留応力値が得られたことから概ね妥当な手法であると考えています。

以上の解析技術は大型鍛鋼品の熱処理工程の検討に活用され、工期短縮や燃料費削減の成果が得られています。また、従来実績以上の大型製品の引合いに対しても、割れリスクの検討が定量的に行えるようになったことから、迅速な対応につながっています。

5 おわりに

学生時代に室蘭製作所を訪問した際、数百トンの加熱された鋼塊が大型プレスで鍛錬されている様子を間近で見学し、ダイナミックなモノづくりに魅力されました。現場でのモノづくりに貢献したいという想いが研究開発のモチベーションになってきたと感じます。解析プログラムを構築する際に

は、材料構成則やプログラミングについて一から学ぶ必要があり、研究が中々進捗しない苦勞がありました。また、解析精度が十分でないために、変態塑性やクリープ変形などの挙動を考慮する試行錯誤を行ってきました。本技術は、佐々木先生をはじめ多くの関係者に支えられて得られたものであり、改めて感謝申し上げます。

大型鍛鋼品は多品種少量生産のため自動化が難しく、作業者の技能・経験に頼る面が大きい現場と言えますが、少子高齢化の社会情勢からも製造現場の省人化・最適化は大きな課題です。今後は物理モデルに基づくシミュレーションだけでなく、AI・IoT技術も活用しながら、製造プロセスの最適化を目指していくことが必要と考えています。これからも三現主義の精神を忘れずに日々精進して参りますので、ご指導、ご鞭撻のほどをよろしくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 山内隆史, 工藤秀尚, 岸恭弘, 上田奏, 吉田一, 木村公俊, 梶川耕司, 鈴木茂: 日本製鋼所技報, 64 (2013), 43.
- 2) T.Inoue and Z.Wang: Mater. Sci. Technol., 1 (1985), 845.
- 3) 柳沢祐介, 岸恭弘, 南谷昌弘, 齊藤数馬: 日本製鋼所技報, 69 (2018), 1.
- 4) Y.Yanagisawa, T.Hosoya, Y.Kishi and K.Sasaki: Mech. Eng. J., 4 (2017), 17-00266.
- 5) 井上達雄: 材料, 56 (2007), 352.
- 6) 柳沢祐介, 細矢隆史, 南谷昌弘, 齊藤数馬: 日本製鋼所技報, 70 (2019), 32.

(2021年3月22日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

秋田大学 大学院理工学研究科 物質科学専攻 材料理工学コース 教授

大口 健一

柳 沢さんとは、2014年の11月に北海道立総合研究機構の工業試験場で初めてお会いしました。その後は、柳沢さんが社会人ドクターとして、私の恩師でもある北海道大学の佐々木克彦先生の下で研究をされるようになったご縁もあり、学会などで一緒にさせていただきました。2016年に開催された国際会議でのご講演は、とても丁寧かつスマートなものであったことを印象深く覚えております。

佐々木先生は、「優秀な研究者は問題の本質を見抜くセンスに優れている」とよく仰います。このたび、柳沢さんの原稿を、参考文献も含めて読ませていただきました。大変興味深く、柳沢さんの研究者・技術者としてのセンスの素晴らしさを感じました。まず、大型鍛鋼品の熱処理を扱うことから、その質量効果を考慮して、クリープ構成則を導入した独自の構成則を用いて熱処理中の応力解析を行う方針を立てられています。独自の構成則を用いた応力解析を行う場合、解析ソフトを自作するケースも多いのですが、柳沢さんは汎用有限要素解析(FEA)ソフトに構成則を組み込む方法を選択されています。これは、自社で普及している解析ソフトに独自の構成則を組み込んだ方が、より多くの社員がその恩恵を受けられるとのご判断によるものでしょう。

解析ソフトに構成則を組み込むには、ソフト特有のクセを理解しながらユーザーサブルーチンプログラムを作成

する必要があります。この作業は難儀なものですが、柳沢さんはこれに加えて、応力積分を陰解法で行うためのリターンマッピングアルゴリズムを構築してプログラミングされています。クリープを考慮したFEAは計算コスト(時間)が掛かりがちですが、陰解法FEAであれば時間ステップを大きくとっても高精度の解が得られます。この方法を採用したのも、自社社員の負担軽減を考えてのことでしょう。しかし、塑性ひずみ、変態ひずみ、変態塑性ひずみ、そしてクリープひずみを考慮したコンシステント接線剛性を正確に導出するには多くのご苦労があったはずで。苦労して作成されたプログラムの改良方針にもセンスの良さを感じました。解析精度に問題がある場合、構成則中の内部状態変数を増やすケースが多いのですが、柳沢さんはそれをせず、詳細に実験データを解析して導出した簡便な関数を構成則に組込むことで対応しています。これも計算コストの低減につながっているはずです。

以上の対応は、すべて柳沢さんが大事にされている「三現主義」に基づくものと存じます。現在、私の研究室の卒業生が柳沢さんにご指導いただいています。彼も三現主義を大事にするセンスの良い技術者になるものと確信しております。今後とも、どうぞよろしくお願いいたします。

(株)神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 加工技術研究室 主任研究員

柿本 英樹

柳 沢さんとは学会等でお会いしたことがあり、論文発表等を通じて、熱処理時における複雑な冶金現象を表現する熱処理解析技術の構築に対して真摯に取り組んでいる姿勢に感銘を受けておりました。

大型鍛鋼品の中でも、超大型タービンロータ軸材は高い信頼性が求められる製品で、その製造に使用される670t鋼塊は日本だけでなく、世界の中でも類を見ない最大級の大きさです。その鋼塊を14000tプレスで鍛錬して熱処理することで、形状と内部品質を作り込む必要があるため、その工程設計には非常に高いレベルの技術が求められます。

本稿に取り上げている鋼の熱処理工程では、温度変化に加え相変態を生じることから、材料内の応力・ひずみ分布が複雑に変化します。そのため、解析には温度—組織—応力の連成関係を考慮する必要があり、これらを精緻に予測するための精度の良い、膨大な材料物性データが必要となります。また、実機データ採取に関しても、大型であるがゆえの難しさ、例えば、熱電対用穴あけ加工1つとっても材料の運搬や機械加工設備の選定など限られた制約内で実施する必要がある、大変な苦勞をされたのではないかと推察いたします。

こうした隠れた努力を積み重ねた上で、今回の内容では大型鍛鋼品特有の現象に着目し、変態塑性およびクリープ変形を考慮するとともに、単相だけでなく複相組織についても応力予測可能な技術を構築されています。特に、複層組織鋼での変態塑性挙動や構成式を詳細に調査した報告例は少なく、大変興味深く拝読しました。

熱処理工程で割れなどのトラブルは頻繁に起こるわけではありませんが、ひとたびトラブルが発生すると被害が大きくなります。そのため、失敗をさける意味で従来の条件を元にした実績重視の工程設計になりがちです。一方で、このような方法から脱却し、構築した技術を活用して、理論に立脚した信頼性の高い工程に設計することが、真のものづくり力向上に繋がると思います。本技術は、すでに実製品にも適用され、工期短縮・燃料費削減などの効果が得られていることから、構築された技術の完成度が高く、すばらしい成果に結びついていると感じました。

最後になりますが、今後の柳沢さんの益々のご活躍を祈念するとともに、本稿でも記載されていたAI/IoTを活用した製造プロセスの最適化を推進されることを期待しています。