



Title	変態塑性及びクリープ変形を考慮した大型鍛鋼品の熱処理解析に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	柳沢, 祐介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13207号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/69939
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yusuke_Yanagisawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 柳沢 祐介

学 位 論 文 題 名

変態塑性及びクリープ変形を考慮した大型鍛鋼品の熱処理解析に関する研究

(Study on a heat-treatment analysis considering transformation plasticity and creep deformation for large forged)

発電用の蒸気タービンロータ軸や発電機軸などに使用される大型軸材は、効率化を目的とする発電設備の大型化に対応するため、近年ますます大型化の傾向を示し、現在では直径が 3m に達する軸材も製造されている。部材の大型化により熱処理時に作用する応力が増加し、割れや変形などの要因となることが懸念されることから、より適切な熱処理が望まれる。これまで、大型鍛鋼品の製造現場では、経験と実績に基づいて熱処理工程が決められてきたが、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である。

数値シミュレーションを用いた熱処理解析は 70 年代から試みられており、80 年代には、温度-組織-応力の連成関係を考慮した解析手法が提案されている。この手法を用いて、種々の製品の焼入れ過程を解析した結果が報告されているが、これらの研究は比較的小型の部材を対象としている。大型鍛鋼品に空冷や炉冷を行った場合には、その質量効果から冷却工程が数日間にわたる場合もある。このような場合には、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が生じ、応力分布に大きく影響することが考えられる。熱処理過程におけるクリープ変形を考慮した解析としては、焼戻し過程を対象としたものが報告されている。これらの解析では、クリープ構成則を用いて熱処理中のクリープ変形を計算し、焼入れにより生じた残留応力が緩和する挙動を計算している。しかしながら、大型鍛鋼品の冷却過程において、変態挙動とクリープ変形を同時に考慮し、その影響を定量的に評価した研究はみられない。

本研究では、大型鍛鋼品の熱処理時に作用する応力を精度良く推定するための、数値解析手法を構築することを目的とした。特に、その質量効果によって加熱・冷却工程が長時間になることに着目し、変態挙動に加えてクリープ変形を同時に考慮することで、解析精度の向上を目指した。本論文は全 7 章から成り、各章の内容および得られた結果は以下のように要約される。

第 1 章では、大型鍛鋼品の熱処理工程と現状の課題について述べ、これまで行われてきた熱処理解析手法を示した。また、大型鍛鋼品における解析手法が十分に確立されていないことを確認し、本研究における目的及び実施内容を示した。

第 2 章では、タービンロータ軸材に用いられている ASTM A470M 鋼の試験材及び大型軸材を用いた熱処理試験を実施し、大型鍛鋼品の冷却挙動を精度良く推定するための手法について検討した。マルテンサイト変態及びベイナイト変態における相分率の温度変化を測定し、温度と相分率に応じた熱物性値を解析に適用した。さらに、逆解析手法を用いて熱伝達率及び変態潜熱の最適値を導出することで、各試験材において冷却曲線の実測値と解析値が良く一致することを示した。また、得られた解析条件を用いることで、実機ロータ部材の温度履歴を精度良く推定できることを示した。

第 3 章では、変態塑性とクリープ変形を同時に考慮する弾塑性応力解析プログラムを構築し、汎用有限解析ソフト ANSYS Ver.15.0 のサブルーチンとして組み込んだ。本プログラムでは、従来の非

線形有限要素法の解法を土台として、リターンマッピングの手法を用いた。仮想弾性計算を実施して降伏判定を行い、降伏の有無に応じて、塑性ひずみ、変態塑性ひずみ、クリープひずみをニュートン・ラプソン法により求めている。また、サブルーチンが安定した収束性を確保するために、弾性計算及び弾塑性計算におけるコンシステント接線係数をそれぞれ導出した。簡単な計算モデルを用いて、本プログラムと汎用の構成則（弾塑性クリープ）の結果を比較することで、出力結果と収束性に問題のないことを示した。

第4章では、第2章で用いた試験材及び大型軸材を対象に、本解析プログラムを用いた熱処理解析を行い、残留応力の測定結果との比較から、解析手法の妥当性を検証した。残留応力測定の結果、水冷を施した試験材Aでは熱応力型の分布を示し、空冷を施した試験材B及び大型軸材では変態応力型の分布となることを確認した。いずれの試験材においても、実験的に求めた変態塑性挙動を考慮した解析を行うことで、残留応力分布の傾向が実測結果と一致した。特に大型軸材では、変態塑性に加えてクリープ変形を考慮することで、大径部における引張応力が緩和され、解析精度が向上することを示した。また、変態挙動の応力依存性を考慮することで、相変態がより短時間で進行するために変態塑性及びクリープ変形の影響が大きくなり、大型軸材の解析精度がさらに向上することが判った。

第5章では、フェライト・ベイナイト変態を生じるASME SA508鋼及びJIS SCM420鋼を用いて、種々の冷却条件において変態塑性挙動を実測し、変態塑性ひずみに及ぼすフェライト相分率の影響を評価した。フェライト相とベイナイト相の相分率は、結晶方位差の違いから定量的に評価することができ、両鋼種とも、ベイナイト変態時の変態塑性ひずみは、フェライト量の増加に伴い減少した。このとき、フェライト相分率とベイナイト変態塑性ひずみの関係は、複相組織における変態塑性ひずみ増分の一般式で整理できることが確認された。このことから、ベイナイト単相変態とフェライト・ベイナイト変態において、ベイナイト変態時の変態塑性挙動に大きな違いがないことが判った。

第6章では、第5章で用いたSA508鋼に対して、2通りの冷却条件で熱処理試験を実施し、残留応力に及ぼす冷却条件の影響を評価した。その結果、フェライト変態温度域で保持した場合に、表層の引張残留応力が僅かに大きくなる傾向が得られた。また、連続冷却と等温保持におけるフェライト・ベイナイト変態挙動を測定し、得られた結果からフェライト相とベイナイト相の変態速度式におけるパラメータを同定した。さらに、各相の応力-ひずみ曲線、変態塑性挙動、クリープ変形をそれぞれ実験的に測定して定式化した。以上の結果を用いて、フェライト・ベイナイト変態における熱処理解析を実施し、相分率及び残留応力の実測値と比較した。残留応力の解析では、定量評価にまだ課題があるものの、両試験材とも表層で引張残留応力となる傾向は実測値と一致した。

第7章では、全体の総括と本研究より得られた結論について述べた。