

氏 名	ありもと きょうぞう 有 本 享 三
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3958 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	熱処理シミュレーションによる熱処理変形・残留応力発生メカニズムの 解明
論文調査委員	(主 査) 教 授 久 保 愛 三 教 授 北 條 正 樹 教 授 星 出 敏 彦

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、機械部品の熱処理変形と残留応力の発生メカニズムの解明のために熱処理シミュレーションを利用する方法を提案し、その有効性を検討する研究について述べたものである。

熱処理変形と残留応力の発生メカニズムの解明は、部品の固有形状に起因する変位の拘束条件、応力の塑性ひずみおよび変態塑性ひずみへの寄与および応力と弾性ひずみとの間の線形関係を考慮して、熱・変態、弾性、塑性、変態塑性の各種ひずみとこれらの総和である全ひずみそれぞれの分布状態が、熱処理される鋼製機械部品中において時々刻々、どの様に変化してゆくかを克明に追跡することによりなされ、円柱、リング、軸などの部品にその手法が適用されて、有効性が確認されている。また、普通焼入れ、浸炭焼入れおよび高周波焼入れについて、熱処理変形と残留応力の差異が明瞭に説明され、熱処理方法の差により機械部品の強度に大きな相異を生じると言う経験的知識の裏付けがなされている。さらに、機械部品の焼割れに対し、焼き入れ時に発生する応力の経時変化の寄与が定量的に明らかにされている。さらに、これらの結果をまとめ、機械部品の強度設計の厳密化の要望に対し、熱処理シミュレーションから予測される金属組織、残留応力、硬さなどの情報を用いる可能性についても検討している。

本論文は、緒論、結論を含めて8章からなっている。各章では、以下に示すように、熱処理変形と残留応力の発生メカニズムの解明手法およびこれを各種の部品に適用した結果が述べられている。すなわち、

第1章では、熱処理に関する研究の歴史を振り返り、熱処理シミュレーション手法の源流とその発展、さらには近年の熱処理シミュレーションシステムの概要について述べ、熱処理変形と残留応力の発生メカニズムの解明に関する本研究の背景を明らかにしている。

第2章では、熱処理変形と残留応力の発生メカニズム解明という観点から、熱処理シミュレーションシステムの構成要素である、相変態、拡散、熱伝導、応力・ひずみなどの現象に対する数学モデルについて概説し、混合相の材料特性データを見積もるための複合則の仮説を立てて、これらから熱処理シミュレーションシステムを構築する状況について述べている。

第3章では、最も単純な機械部品形状である円柱の水焼入れによる変形と残留応力の発生メカニズムを明らかにしている。熱処理前後における円柱の直径と長さの変化率や中央部での残留応力分布の発生理由が、熱処理シミュレーションから得られた熱・変態、弾性、塑性、変態塑性の各種ひずみとこれらの総和である全ひずみの分布の時間変化を分析することによって、純鉄、Fe-Ni 合金、実用鋼の円柱の順に説明されている。純鉄円柱における現象の分析によって、相変態が生じない場合の応力と変形の挙動が明らかにされている。Fe-Ni 合金については、残留応力分布に変態塑性現象が寄与する過程が解明されている。さらに、実用鋼として炭素濃度の異なる低Cr鋼円柱と直径の異なる炭素鋼円柱が取上げられ、それぞれの条件の差異による残留応力分布と変形の発生挙動が説明されている。低Cr鋼円柱の場合には、炭素濃度の差異が塑性ひずみと変態塑性ひずみの発生挙動に影響を及ぼし、これらが残留応力分布と変形における差をもたらしていることが明らかにされている。炭素鋼に関しては直径の大なるものでは中心部がマルテンサイト化されず不完全焼入れとなるが、この結果として完全焼入れとは異なる応力分布および変形がもたらされるメカニズムについての説明がなされている。

第4章では、リング形状の部品の熱処理変形と残留応力の発生メカニズムを解明している。リング形状の部品においては、普通焼入れ、浸炭焼入れおよび高周波焼入れなどの熱処理方法の違いによって、固有の熱処理変形と残留応力分布が生じるが、円柱の場合と同様にこれらの現象の発生メカニズムを明らかにしている。浸炭焼入れに関しては、炭素濃度の高い浸炭層の存在が表面の圧縮残留応力の発生に寄与しており、さらに、浸炭層が変態塑性ひずみの発生に影響を及ぼすことにより、浸炭焼入れ特有の熱処理変形が生じることが説明されている。高周波焼入れに関しては、表面部の加熱・冷却によって発生する塑性ひずみが残留応力分布および変形に対して影響を及ぼしていることが明らかにされている。そして、これら焼入れの際におこる変態塑性現象が、残留応力の絶対量の低減に大きく関与していることが解明されている。さらに、高周波焼入れ後の焼もどしにおける残留応力および変形の挙動についても、そのメカニズムに関する考察がなされている。

第5章では、長尺部品の焼曲り現象に対してシミュレーションを適用し、その発生メカニズムを解明している。キー溝付き円柱試験片では冷却が断面で不均一となり、このために軸方向の塑性ひずみ分布が一様ではなくなることが、この場合の焼曲りの主たる原因であることが明らかにされて、冷却剤の違いによる冷却特性の差が現象に及ぼす効果に関しても、考察がなされている。

第6章では、機械部品の焼入れ時に発生することのある焼割れ現象の発生要因をシミュレーション結果に基づいて考察している。円柱、段付き円柱および偏心穴付き円板に対する熱処理シミュレーションにより、予測された応力状態が、焼割れの発生に関係していることが明らかにされている。すなわち、段付き円柱および偏心穴付き円板に関しては、冷却の途中において焼割れ発生に対応する応力分布が特定箇所が生じることが明らかにされ、特に偏心穴付き円板では、実験で観測された焼割れ発生時刻とシミュレーションから得られた結果が良好に一致することが確認されている。

第7章では、機械部品の設計に対して熱処理シミュレーションが寄与できる可能性について述べている。熱処理シミュレーションから予測される金属組織、残留応力、硬さなどの情報を用いれば、設計における強度評価がさらに厳密化されることについて検討している。

第8章は、これら結果をまとめ、熱処理変形と残留応力の発生メカニズムの解明手法および各章に記述した研究成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、機械部品の熱処理変形と残留応力の発生メカニズムをシミュレーションにより解明せんとする研究について述べたものであり、得られた成果は次のとおりである。

1. 熱処理変形と残留応力の発生メカニズムを、熱処理シミュレーションから得られる、熱・変態、弾性、塑性、変態塑性の各種ひずみとこれらの総和である全ひずみの経時変化に基づき、解明する手法を提案した。
2. 本手法を円柱、リング、軸などの鋼製機械部品の熱処理に適用し、発生した変形と残留応力の状態を検討して、その有効性を明らかにし、信頼性を確認した。
3. 表面硬度が同じ程度になるように焼入れをした鋼製機械部品の強度的信頼性は焼入れ方法により大きく異なることが実験的に知られているが、その理由は未だ明確ではない。本研究は、普通焼入れ、浸炭焼入れおよび高周波焼入れで、生じる熱処理変形と残留応力に差異が生じるメカニズムを明らかにし、工業上有用な知見を与えた。
4. 機械部品の焼入れ時に生じる焼割れ現象に対して熱処理シミュレーションを適用し、発生する応力の経時変化が焼割れに対してどのような支配的役割を演じるかを明らかにした。
5. 熱処理シミュレーションから予測される金属組織、残留応力、硬さなどの情報を、機械部品の設計時に、部品強度・品質をより厳密に評価するためのツールとして利用する可能性について検討した。

以上要するに、本論文は、熱処理シミュレーションが、単なる数値実験ツールとしての役割の他に、機械部品の熱処理変形と残留応力の本質を厳密に理解するために利用できることを多くの例によって明らかにしたものである。提案されたこの熱処理シミュレーションの利用手法は、より複雑な形状の部品にも適用可能であり、それらに発生する熱処理ひずみや残留応力の正しい推定法の開発を可能にし、これら機械部品の設計の高精度化、製造の効率化に大きく寄与するものである。すなわち本研究は、基礎のみならず、応用の面からも多くの知見を与えるものであり、学術上、工業上に寄与するところが少

なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年1月31日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。