

氏名	堀野 孝		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	甲博理工第505号		
学位授与年月日	平成27年3月24日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	高周波焼入れシミュレーションによる熱処理変形と残留応力の予測技術に関する研究		
審査会	主査	西野 創一郎	委員 友田 陽
	委員	太田 弘道	委員 鈴木 徹也
	委員	佐藤 成男	

論文内容の要旨

高周波焼入れは、誘導加熱(IH: Induction Heating)による急速加熱と、噴射冷却を主とする急速冷却を使用する表面熱処理法であり、クリーンな電気エネルギーを使用し、エネルギー効率が良く経済的で、近年では地球環境にやさしいW-EcoO R(Ecological and Economical)熱処理として注目されている。また、急速短時間加熱や部分焼入れ、表面焼入れによる高い圧縮残留応力の付与、自動インライン処理などの優れた特徴があり、耐摩耗性や耐疲労特性、強靱性の向上を目的として、自動車部品や建設・工作機械部品などに数多く適用されている。

高周波焼入れ時に生じる熱処理変形は、製品の最終品質や性能、後工程の高精度化加工コストに大きな影響を与えることから、変形量の低減が求められている。そのためには、熱処理変形の予測と熱処理条件の最適化が必要となるが、熱処理変形に影響をおよぼす要素は多く存在するため、熱処理変形の予測は歴史的に課題とされながらも難題であった。一方、近年の数値解析技術とコンピュータ性能の著しい進歩により、コンピュータによる熱処理シミュレーションを用いて熱処理変形が予測可能となりつつある。ただ、研究開発途上であり、さらに高精度に熱処理変形を予測して熱処理変形をより一層低減させるためには、加熱冷却中に発生する応力やひずみ量を精度良く予測出来る数値解析技術の確立と、シミュレーションによる熱処理変形発生メカニズムの解明が必要不可欠である。

本論文では、高周波焼入れにより生じる様々な現象の高精度な数値解析手法を検討し、高周波焼入れシミュレーションによる熱処理変形と残留応力の予測技術を確認するとともに、シミュレーションによる熱処理変形の発生メカニズム解明のために実施した研究の成果をまとめている。

最初に、高周波焼入れシミュレーションの高精度化を目的に、加熱過程および冷却過程の高精度化手法について検討した。加熱過程では、温度依存性を有するB-H曲線を考慮した磁場解析手法を開発し、部品表面の磁気飽和を考慮した高周波加熱シミュレーションにより、昇温曲線や加熱終了時の加熱温度が試験結果に近づくことを実証した。これと関連して、鉄鋼材の高温磁気特性測定手法を開発し、常温から750℃までのS45C材B-H曲線を作成した。また、加熱中のコイルギャップ変動を考慮した高周波加熱シミュレーションを実施すれば、大型部品の温度分布を高精度に予測できることを実証した。一方、冷却過程では、高周波焼入れシミュレーションの解析精度に大きく影響を及ぼす熱伝達率を、最適化支援ソフトを活用した逆解析法により冷却曲線から自動的に算出できることを示した。

次に、高周波焼入れシミュレーションにより熱処理変形および残留応力の発生メカニ

ズムが解明可能かどうかを検討し、シミュレーション結果から得られた各種ひずみ量の時間変化を詳細に分析すれば、熱処理変形の発生メカニズムを明らかにできることを示した。この分析手法は、熱処理変形への各種ひずみ量の寄与の程度を明確にできるため、熱処理変形の低減方法の検討に活用できることを確認した。また、短時間加熱で急速冷却である高周波焼入れは、塑性ひずみや変態塑性ひずみが加熱部近傍のみに発生し、特に移動焼入れは局所加熱と局部冷却であるため、定置一発焼入れとは異なる残留応力分布になることを明らかにした。

最後に、焼割現象に対して高周波焼入れシミュレーションを適用し、焼割発生と引張応力の集中との関係を明確にするとともに、焼割発生メカニズムの検討を行った。まず、焼割れを助長するため円周状のリング溝を加工したリング溝付試験片による焼割試験を対象に高周波焼入れシミュレーションを実施し、シミュレーション結果から得られた温度や応力、各種ひずみ量を時系列で分析した。その結果、焼割れの発生位置ではマルテンサイト変態後に高い引張応力が生じており、部品内部のマルテンサイト変態による体積膨張が部品表面の引張応力の集中に関与していることを明らかにした。

本研究の成果である高周波焼入れシミュレーション手法を用いて、高周波焼入れ時の熱処理変形および残留応力を高精度に予測することを可能にした。また、熱処理変形および残留応力の発生メカニズムを解明することで、高周波焼入れでの熱処理変形をより一層低減させることだけでなく、熱処理品質の向上や熱処理の新技术開発、不具合の事前回避などにも活用出来ると考える。

論文審査の結果の要旨

(1)高周波焼入れは誘導加熱による急速加熱と噴射冷却を用いる表面熱処理法である。この方法には表面圧縮残留応力の付与や自動インライン処理等の優れた特徴があり、耐摩耗性や耐疲労特性、強靱性の向上を目的として自動車部品や建設・工作機械部品などに数多く適用されている。しかし、高周波焼入れ時に生じる熱処理変形が後工程や製品の最終品質に大きな影響を与えるため、その予測と熱処理条件の最適化が望まれてきた。本研究では、この熱処理変形を低減させるために、加熱冷却中に発生する応力や塑性ひずみ等を精度良く定量的に予測できる数値解析技術とシミュレーションによる熱処理変形発生メカニズムを検討して顕著な成果をあげている。学位論文は全6章から構成されている。第1章で高周波熱処理シミュレーションの歴史を踏まえて本研究の目的を示している。第2章では、高周波焼入れの数値解析手法として、磁場と熱処理プロセスの解析手法について説明した後、磁場と熱処理の逐次相互連成解析による高周波焼入れシミュレーション・システムの構築について説明している。また、実際の適用事例として、加熱コイルの設計や熱処理条件の予測について述べている。第3章は高周波焼入れシミュレーション高精度化のために行った研究結果である。加熱過程に関しては高温磁気特性の測定方法および高温磁気特性を考慮した磁場解析法の開発、加熱中のコイルギャップ変動を考慮した磁場と熱処理の連成解析システムの開発について研究し、その結果、加熱中におけるワーク温度分布の予測精度が向上したことを示している。一方、冷却過程に関しては、熱処理解析の高精度化に必要な不可欠な冷却熱伝達率の算出方法や熱流体解析による冷却シミュレーションの検討結果を示している。第4章では高周波焼入れシミュレーションによるリング形状部品と丸棒部品における熱処理変形と残留応力の発生メカニズムを説明している。リング形状部品については、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、これからの総和である全ひずみ量の時間変化を分析することで熱処理変形メカニズムを検討し、加熱冷却によって機械部品の表面層に発生する塑性ひずみの変形量に影響を及ぼすことを明らかにしている。また、変形量の低減方法を提言している。一方、丸棒では、定置一発焼入れと移動焼入れの熱処理変形および残留応力の相違を検討している。第5章ではリング溝付部品の焼割発生メカニズムについて考察している。シミュレーション結果から得られた各種ひずみ量を分析することで、焼割れ発生メカニズムおよび焼割れ回避策を検討している。第6章は本研究成果の要約と将来展望である。

(2)本研究では、電磁場、温度、応力、弾塑性変形および相変態（組織変化）を連成問題として数値解析する手法を駆使して、工業製品の高周波焼き入れによるきわめて複雑な変形や割れ発生のメカニズムを明らかにしている。このような研究は世界的に類がなく、ドイツで開かれた国際会議における申請者の発表には大きな反響があった。オリジナリティの高い研究であり、学術上の貢献が大きい。さらに、熱処理欠陥の抑制法につながる実務的なシミュレーションを可能とし、実務上きわめて重要な成果をあげている。以上を総合して、本論文は学位論文としてのレベルを十分に満たしていると判断される。