



Title	機械構造用合金鋼の熱処理変形予測の高精度化に関する研究
Author(s)	渡邊, 啓介
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/101657">https://doi.org/10.18910/101657</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 渡 邊 啓 介 )

論文題名 機械構造用合金鋼の熱処理変形予測の高精度化に関する研究

## 論文内容の要旨

自動車のパワートレインを構成するシャフトやギヤは、機械構造用合金鋼が素材として用いられ、疲労強度ならびに靱性向上を目的として、浸炭焼入れ焼もどしによる熱処理が実施される。熱処理時に生じる変形が寸法精度低下を招くため、焼もどし後に仕上げ加工が実施されることもあるが、仕上げ加工は生産リードタイムの長期化や製造コスト増大の原因となっているため、その省略が望まれている。その方策の一つとして、熱処理変形を正確に予測し、その変形を見込んで熱処理前形状を決定することが考えられ、熱処理変形を予測する手段として、温度、組織、応力の連成関係を考慮した有限要素法を用いた熱処理シミュレーションがある。熱処理工程の中でも特に、焼入れにおいては熱応力や変態応力が作用することにより、大きな塑性変形が生じる。さらに、新相の変態膨張に伴いその周囲の未変態の母相に応力が付加的に作用することにより塑性変形が生じ、母相の変形抵抗が見かけ上低下する。この現象は変態塑性と呼ばれており、焼入れ変形に与える影響が大きいので、その変形を高精度に予測するためには、変態塑性の影響の大小を表す変態塑性係数を正確に求める必要がある。変態塑性係数はこれまでに、引張試験などにより同定されてきた。その場合には、オーステナイト化した試験片を冷却しつつ一定の応力を負荷し、変態時の伸びが測定される。応力を変えて実験を行い、変態塑性ひずみを負荷応力に対してプロットし、それらの線形回帰式の傾きから変態塑性係数が同定される。その一方で、鋼材に高い応力が作用する場合は、変態塑性ひずみと応力は非線形となることが報告されているため、この方法で同定された変態塑性係数は、高い応力が鋼材に作用する焼入れには適さないと考えられる。本研究では、焼入れ変形の予測精度向上を目的として、変態塑性係数の同定方法を検討し、その有効性を示した。各章毎に得られた結果を以下に要約する。

第1章では、本研究の工業的な位置づけや意義を説明するとともに、先行知見を整理した。

第2章では、変態塑性係数の同定と検証に用いた熱処理シミュレーションの概要について述べた。

第3章では、平板の油焼入れ実験と熱処理シミュレーションにより、マルテンサイト変態の変態塑性係数を同定する方法を検討した。この方法では、平板の冷却曲線と反りが測定され、冷却曲線から得た熱伝達係数をシミュレーションに用いて反りが予測され、反りの実測値と合致する変態塑性係数が同定される。この方法を用いて、Cr-Mo鋼のマルテンサイト変態の変態塑性係数は $21 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ と同定された。さらに、熱処理油を変更した実験も行い異なる冷却条件における反りを予測した結果、反り量の誤差6%とほぼ一致した。以上のことより、本章の方法がマルテンサイト変態を伴う焼入れ変形の予測精度向上に対して有効であることが示された。

第4章では、機械構造用合金鋼の焼入れにおいては、マルテンサイト変態に加えてベイナイト変態が生じることを踏まえ、両変態の係数を同定する方法を検討した。この方法では、板厚の異なる平板を焼入れることで、薄い板にマルテンサイト変態、厚い板にベイナイト変態とマルテンサイト変態を生じさせる。そして、前章の方法で薄い板の反りからマルテンサイト変態の変態塑性係数が同定され、その係数を用いて厚い板の反りからベイナイト変態の変態塑性係数が同定される。この方法でCr-Mo鋼のベイナイト変態の変態塑性係数は $11 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ と同定された。さらに、熱処理油を変更した実験も行い異なる冷却条件における反りを予測した結果、誤差 $2 \mu\text{m}$ とほぼ一致した。以上のことより、本章の方法がベイナイト変態とマルテンサイト変態を伴う焼入れ変形の予測精度向上に対して有効であることが示された。

第5章では、本論文の方法における変態塑性係数の同定結果に及ぼす影響因子を評価した。その結果、同定結果に及ぼす計算上のメッシュ分割や冷却条件の影響は小さいと考えられた。また、本論文の方法に丸棒を用いて変態塑性を同定することにより、平板を試験片に用いることが妥当であることが示された。次に、本論文で得られた係数について考察した結果、高応力域においてマルテンサイト変態の変態塑性係数は相当応力と比例関係にあると考えられ、この知見を基に応力依存性を考慮した変態塑性係数式を提案した。

第6章では、各章結果の要約、本論文で得られた成果ならびに今後の課題について述べた。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 渡 邊 啓 介 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	宇都宮 裕
	副 査	教授	荒木 秀樹
	副 査	教授	安田 弘行
	副 査	准教授	松本 良
	副 査	特任教授	岡村 一男 (日本製鉄材料基礎協働研究所)

## 論文審査の結果の要旨

自動車のパワートレインを構成するシャフトやギヤは、機械構造用合金鋼が素材として用いられ、疲労強度ならびに靱性向上を目的として、焼入れ焼もどし処理後に使用される。熱処理時に変形を生じるため、寸法精度が低下し、仕上げ加工を要する場合があることは工業的な問題である。熱処理時に生じる変形を正確に予測することができれば、その変形を見込んで熱処理前形状を決定することができ仕上げ加工の省略が可能となる。熱処理変形を予測する手段としては、温度、組織、応力の連成関係を考慮した有限要素法に基づく熱処理数値シミュレーション法が提案されている。しかし、焼入れにおいては熱応力や変態応力が作用することに加えて、未変態母相に応力が付加的に作用することで大きな塑性変形（変態塑性）が生じるために、高精度予測が困難である。高精度予測のためには、高応力が負荷された条件下の変態塑性係数を把握する必要があるが、これまでの測定方法は、オーステナイト化した試験片を冷却しつつ一定の応力を引張試験機で負荷し、伸びを測定するもので、高応力を負荷することはできない。本論文は、焼入れ時に鋼材の冷却曲線と反り量を測定し、熱処理数値シミュレーション法の援用の下に、反り量が合致するように変態塑性係数を決定する新たな方法を提案し、以下の結果を得ている。

第 1 章では、本研究の工業的な位置づけや意義を説明するとともに、先行知見を整理している。

第 2 章では、変態塑性係数の決定と検証に用いた熱処理数値シミュレーション法の概要について述べている。

第 3 章では、平板の油焼入れ実験と熱処理数値シミュレーションにより、マルテンサイト変態の変態塑性係数を決定する方法を提案している。この方法では、平板の冷却曲線と反りを測定し、冷却曲線から得た熱伝達係数をシミュレーションを用いて反りを予測し、反り実測値と合致するように変態塑性係数を決定するものである。Cr-Mo 鋼の焼入れに適用し、マルテンサイト変態の変態塑性係数として  $21 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  を得ている。さらに、異なる熱処理油を用いた実験によって反りの予測精度の検証を行い、反り量の誤差が 6%以内であることを確認している。

第 4 章では、機械構造用合金鋼の焼入れでは、マルテンサイト変態に加えてベイナイト変態が生じることを踏まえ、両変態の係数を決定する方法を提案している。厚さの異なる 2 枚の平板の焼入れを行って、薄板にマルテンサイト変態のみを、厚板にベイナイト変態とマルテンサイト変態を生じさせ、薄板の反りからマルテンサイト変態の変態塑性係数を決定した後に、その係数を用いて厚板の反りからベイナイト変態の変態塑性係数を決定する手法を提案している。そして Cr-Mo 鋼のベイナイト変態の変態塑性係数を  $11 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  と求めている。さらに、熱処理油を変更した実験によって反り量の予測精度を検証し、誤差  $2 \mu\text{m}$  以内であることを確認している。

第 5 章では、変態塑性係数の影響因子を考察している。まず計算上の要素分割や冷却条件の影響は小さいこと、焼入れる試験片形状としては、平板の方が丸棒よりも好ましいことを示している。さらに、得られた係数について考察を行い、マルテンサイト変態の変態塑性係数は相当応力と比例関係にあると推測し、応力依存性を考慮した変態塑性係数式を提案している。

第 6 章では、各章結果の要約、本論文で得られた成果ならびに今後の課題についてまとめている。

以上のように、本論文は機械構造用鋼の熱処理変形の高精度予測を実現する実験的な変態塑性係数の新たな決定手法を提案するとともに、変態塑性係数の支配因子を考察したもので、工業的な寄与が大きい。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。