



TRIP鋼の構成式と数値シミュレーションによる変形挙動および機械的特性評価

岩本, 剛

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2000-09-22

(Date of Publication)

2008-11-18

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2446

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002446>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【273】

氏名・(本籍) 岩本 剛 (広島県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学位記番号 博ろ第208号

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位授与の日付 平成12年9月22日

【学位論文題目】

TRIP 鋼の構成式と数値シュミレーションによる
変形挙動及び機械的特性評価

審査委員

主査 教授 富田 佳宏

教授 森田 喜保 教授 多田 幸生

変形の進行に伴って発生するひずみ誘起マルテンサイト変態により、TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼は高強度、高延性等の優れた性質を持っている。しかしながら、その優れた性質を示す加工環境は非常に限定されているため、TRIP 鋼の特性をより広範囲な加工環境において利用するため、数値シミュレーションの援用は不可欠である。

本研究では、ひずみ誘起マルテンサイト変態を伴って優れた機械的性質を示す TRIP 鋼の変形挙動及び機械的性質の予知ならびに所定の機械的性質をもたらす成形過程を設計するために必要な変態現象のモデル化と構成式の構築ならびに数値シミュレーション法の定式化を行った。

まず、第 1 章では研究の概要と背景ならびに本研究の目的を述べ、第 2 章では、TRIP 鋼の一種であり構造用材料として広範に用いられている SUS304 を対象に、種々の試験温度において等温単軸引張及び圧縮試験を行い、流動応力—塑性ひずみ曲線、巨視的なマルテンサイト相体積分率—塑性ひずみ曲線を評価した。その結果、変形初期において引張に比して圧縮の方が高い値を示していたマルテンサイト相体積分率は、変形の進行とともにその関係が逆転すること、同様な傾向が流動応力—塑性ひずみ関係にも認められること、オーステナイト、マルテンサイト相単相の流動応力—ひずみ曲線も変形様式依存性が存在することを明らかにした。この結果は、第 3, 4 章における構成式の構築に反映されている。一方、SEM 観察の結果、生成量、配向性等、局所におけるマルテンサイト相粒子の状態は、変形様式に依存しているという、新しい知見を得た。なお、この知見は変態カイネティクスモデルの構築に有益なものとなり得る。

第 3 章では、ひずみ誘起マルテンサイト変態のひずみ速度依存性を考慮するため、既存の実験事実から、せん断帯の発生を規定するパラメータを温度、ひずみ速度の関数として表現したひずみ誘起マルテンサイト変態カイネティクスモデルを提案した。次に、塑性ひずみ速度を変形によるひずみ速度成分、マルテンサイト変態に伴って発生する形状変化ひずみ速度成分と体積膨張ひずみ速度成分の和で表し、熱弾性体の構成式に導入することにより、変態ひずみを考慮したひずみ速度依存性 TRIP 鋼の多軸構成式を構築した。さらに、オーステナイト相、マルテンサイト相および TRIP 鋼の相当応力のひずみ速度依存性を、べき乗則により表現し、等価介在物理論を援用して 2 相複合体である TRIP 鋼の単軸応力—ひずみ関係を定式化した。

第 4 章では、積層欠陥エネルギーが応力状態に依存することを明らかにし、積層欠陥エネルギーの応力状態依存性を表現した変態カイネティクスモデルを構築した。また、偏差応力の第 3 不変量を導入した降伏関数を用いて、TRIP 鋼の変形様式依存性多軸構成式を導出した。さらに、オーステナイト相結晶粒径依存性を陽に表現することによるひずみ誘起マルテンサイト変態カイネティクスモデルの定式化、Hall—Petch の関係に基づくオーステナイト相の単軸応力—ひずみ関係の定式化を行った。

第 5 章では、第 2, 3 章において提案した構成式を接線係数法を用いて再構築し、エネルギー平衡方程式から、オーステナイト相、マルテンサイト相の 2 相材を対象とし、マルテンサイト変態による潜熱の発生を考慮した熱伝導方程式を導出した。次に、大変形問題に対する支配方程式と境界値問題を定式化し、これを弱形式表示した。得られた弱形式表示を有限要素により離散化し、速度場、温度場に対する有限要素方程式を定式化した。さ

らに、後続のシミュレーションにおいて用いる数値モデルを構築した。以上によりTRIP鋼の変形挙動の数値シミュレーション法を確立した。

第6章では、第5章で構築した有限要素法を用い、単軸引張変形下におけるTRIP鋼の変形挙動の数値シミュレーションを行い、温度、ひずみ速度ならびにオーステナイト相結晶粒径がTRIP鋼の変形挙動に及ぼす影響を検討した。その結果、マルテンサイト相の形成により非常に高い引張強さを示し、引張強さは環境温度に強く依存することを確認した。同様に、TRIP鋼の延性も環境温度に強く影響を受け、常温域における延性は、オーステナイト相単相材に比して改善されることを明らかにした。次いで、TRIP鋼の延性の増加は、加工硬化率を高い値に維持することによる、くびれの発生条件の遅延が主要因であることを示した。さらに、大きな延性を保持するためには、マルテンサイト相体積分率を延性改善に必要な値に到達させること、変形中終始変態を続行させ、加工硬化率の低下を抑制することの2つが重要であることを併せて示した。一方、オーステナイト相結晶粒径がひずみ誘起マルテンサイト変態およびTRIP鋼の変形挙動に及ぼす影響についても、シミュレーション結果は既存の実験結果を再現可能であることを確認した。これらの知見をもとに、温度、ひずみ速度ならびにオーステナイト相結晶粒径により、TRIP鋼の機械的性質の制御の途が開ける。

第7章では、SUS304鋼の繰返し変形挙動を数値シミュレーションにより検討した。その結果、ひずみ幅の増加に伴うマルテンサイト相体積分率の増加、繰返し数の増加に伴うマルテンサイト相体積分率の飽和、環境温度の上昇に伴うマルテンサイト相体積分率の減少と、それに起因する応力幅の減少が認められ、予ひずみの影響等についても既存の実験結果を再現可能であることを確認した。これより、第3, 4章で提案した構成式は、TRIP鋼の繰返し変形挙動の評価に対しても有効であると考えられる。また、既存の極低温における繰返し変形挙動を評価可能である簡便式が、ひずみ誘起マルテンサイト変態を伴う材料に対して適用可能であることを明らかにする一方で、繰返し変形における変態過程が予知可能である簡便式を構築し、その妥当性を示した。

第8章では、第3, 4章で構築した構成式に基づいて、せん断帯の交差領域の体積分率、マルテンサイト変態確率を用いて、微視的な領域におけるひずみ誘起マルテンサイト変態モデルを構築した。オーステナイト相の応答を支配する構成式を非局所形に一般化することにより、変態ならびに変形の特徴寸法依存性を表現可能とした。本解析モデルを用いたシミュレーション結果は、第2, 6章で表した実験およびシミュレーション結果を再現可能であることを確認した。また、マルテンサイト変態した要素の周囲の領域にはBainひずみの影響によりひずみが生じ、マルテンサイト変態が連鎖的に進展し、試料中央部で生成したマルテンサイト相領域は最大せん断応力方向に連鎖的に拡大し、小板状のマルテンサイト相領域が形成されること、非局所形構成式を用いた結果、結晶粒径に依存して異なったマルテンサイト相分布が得られることを明らかにした。

最後に、第9章において本研究の総括を述べた。

(別紙1)

論文審査の結果の要旨

氏名	岩本 剛		
論文題目	TRIP 鋼の構成式と数値シミュレーションによる変形挙動及び機械的特性評価		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	富田 佳宏
	副査	教授	森田 喜保
	副査	教授	多田 幸生
要 旨			
<p>変形の進行に伴って発生するひずみ誘起マルテンサイト変態により、TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼は、高強度、高延性、高じん性等の優れた性質を持っている。しかしながら、その優れた性質を示す加工環境は非常に限定されているので TRIP 鋼の特性をより広範囲な加工環境において利用するため、数値シミュレーションの援用は不可欠である。</p> <p>本研究では、ひずみ誘起マルテンサイト変態を伴って優れた機械的性質を示す TRIP 鋼の変形挙動及び機械的性質の予知ならびに所定の機械的性質をもたらす成型過程を設計するために、変態現象のモデル化と構成式の定式化を行い、数値シミュレーション法を確立している。</p> <p>まず、第1章では、TRIP 鋼の研究の概要と背景ならびに本研究の目的が述べられ、第2章では、TRIP 鋼の一種であり構造用材料として広範囲に用いられている SUS304 を対象に、種々の試験温度において単軸引張及び圧縮試験を行い、流動応力-塑性ひずみ関係、巨視的なマルテンサ</p>			

イト相体積分率-塑性ひずみ関係ならびに相変態の結晶粒径依存性を評価している。その結果、変形初期において引張に比して圧縮の方が高い値を示していたマルテンサイト相体積分率は変形の進行とともにその関係が逆転すること、流動応力-塑性ひずみ関係においても同様の傾向が認められること、単相の流動応力-ひずみ曲線は変形様式依存性が存在することを確認している。さらに、電子顕微鏡観察の結果、マルテンサイト生成量、配向性、粒子の大きさ等も変形様式によって変化することを明らかにしている。これらの結果は、第3,4章における変態のカイネティクスモデルの構築に反映されている。

第3章では、ひずみ誘起マルテンサイト変態のひずみ速度依存性を考慮するために、せん断帯の発生を規定するパラメータを温度、ひずみ速度の関数として表現したひずみ誘起マルテンサイト変態カイネティクスモデルを提案している。次に、塑性ひずみ速度をすべり変形によるものとマルテンサイト変態に伴って発生する形状変化ひずみ速度成分と体積膨張ひずみ速度成分の和で表し、熱弾性体の構成式に導入することにより、ひずみ速度依存性 TRIP 鋼の多軸構成式を構築している。オーステナイト相とマルテンサイト相 2 層複合材の構成式は、等価介在物理論を援用して定式化している。

第4章では、2章の実験結果をふまえて、第3章の構成式を応力状態ならびにオーステナイト相の結晶粒径依存性が表現可能な形式に一般化している。

第5章では、上記で定式化した構成式と変態による潜熱の発生を考慮したエネルギー平衡方程式の弱形式表示ならびに仮想仕事の原理式を用いて有限要素法を定式化し、後続の章における変態現象のシミュレーショ

ン法を確立している。

第 6 章では、TRIP 鋼の変形挙動の数値シミュレーションを行い、温度、ひずみ速度ならびにオーステナイト相結晶粒径が TRIP 鋼の変形挙動に及ぼす影響を検討している。その結果、マルテンサイト相の形成により、非常に高い引張強さを示すこと、また引張強さは環境温度に強く依存することを確認している。伸びについては、環境温度に強く影響を受け、常温域においてオーステナイト相単相材に比して大きく改善されることを明らかにしている。さらに、延性の増加は、マルテンサイト変態の発生によって加工硬化率が高い値に維持されることによるくびれの発生の遅延が主要因であることを示している。一方、オーステナイト相結晶粒径のマルテンサイト変態への影響についても、シミュレーション結果が既存の実験結果を再現できることを確認している。これらの知見をもとにオーステナイト相結晶粒径、ひずみ速度および温度の制御により TRIP 鋼の機械的性質の制御の途が開ける。

第 7 章では、SUS304 鋼の繰返し変形挙動をシミュレーションによって検討している。得られた応力-ひずみ関係、応力幅-累積塑性ひずみ関係、ひずみ幅の増加に伴うマルテンサイト相体積分率の増加、繰返し数の増加に伴うマルテンサイト相体積分率の飽和、環境温度の上昇に伴うマルテンサイト相体積分率の減少とそれによる応力幅の減少、予ひずみの影響などは、最近報告された実験結果を定性的に説明できることを確認している。さらに詳細な比較検討には実験に用いられた材料特性に関するデータが必要であるが、得られた結果から判断して、提案された構成式は TRIP 鋼の繰返し変形挙動の評価に対しても有効であるものと考えられる。

第 8 章では、せん断帯の交差領域の体積分率ならびにマルテンサイト変態確率を用いて、微視的な領域におけるひずみ誘起マルテンサイト変態モデルを構築している。オーステナイト相の応答を支配する構成式を非局所形に一般化することにより、変態の特徴寸法依存性を表現可能としている。シミュレーションの結果により、マルテンサイト変態した要素の周囲の領域には Bain ひずみの発生の影響により変態が連鎖的に進展し、マルテンサイト相領域は最大せん断応力方向に連鎖的に拡大し小板状の領域が形成されること、結晶粒径に依存して異なったマルテンサイト相分布ならびに体積分率が得られることを確認している。第 9 章では本研究の総括を述べている。

本研究は、工業的に重要な材料である TRIP 鋼の高強度、高延性、高靱性等の優れた特性を有効に利用するために必要な相変態現象のモデル化と構成式の構築を行い、それを用いたシミュレーションによって提案した構成式の妥当性ならびに適用性を証明している。本研究で得られた成果は、今後の各種加工過程の設計ならびに材料特性の予測のための要請に対して十分応えることができるものであり、材料工学の分野において重要な知見を得たものとして、価値ある集積であると認める。よって、学位申請者岩本剛は博士（工学）の学位を得る資格があると認める。