

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04067

研究課題名（和文）予塑性変形を受けた鋼の相変態挙動の実験的検討と弾塑性構成モデルの構築

研究課題名（英文）Experimental study of phase transformation behavior of steel subjected to pre-plastic deformation and construction of elastic-plastic constitutive model

研究代表者

大下 賢一（Oshita, Kenichi）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：60334471

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：鋼の相変態挙動，特にオーステナイト領域における予塑性変形がその後の変態塑性挙動に及ぼす影響について定量的評価を行うために負荷機構を一部変更し，この装置を用いてS45CおよびSCM440鋼の変態塑性挙動を測定した．さらに実験結果をもとに予応力の影響を考慮した相当塑性ひずみ依存型の変態塑性構成式を提案した．

上記構成式をもとに有限要素法による簡易的なホットプレス過程のシミュレーションを行い，従来の構成式による結果と比較して変形予測の精度が向上することを示した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

予塑性変形を受けた鋼材の多軸応力における変態塑性挙動に関する実験的な知見はこれまで単軸状態で得られるデータとそれを利用した材料モデルを再検討する観点においても重要な役割を果たすものと思われる．さらに得られた材料モデルの基づくシミュレーションにより成形不具合の予測精度が向上し，試行錯誤的なものづくりから試行錯誤レス（トライレス）への移行が促進される．

研究成果の概要（英文）：To estimate the effect of pre-plastic deformation of austenitic phase on transformation plasticity, deformation behavior of phase transformation in S45C and SCM440 steel were measured. Furthermore, the equivalent plastic strain-dependent transformation plastic constitutive equation considering the influence of pre-stress in austenitic phase was constructed based on the test results. The simple simulation of the hot-pressing process was performed using this equation. The calculated transformation plastic behavior using the proposed equation is more accurate than the ones using the conventional constitutive equation.

研究分野：固体力学

キーワード：相変態 変態塑性 構成式

## 1. 研究開始当初の背景

自動車メーカーでは、軽量化と衝突安全性を両立させる車体の技術開発が活発に行われており、鋼板をオーステナイト変態温度(約 900 )以上に加熱し、その後、加工と同時に金型で焼入れを行うことで高強度を得るホットプレス技術が車体構成部材への適用が進んでいる。このようなホットプレスにおいてダイス形状や成形工程の最適化を行うためには、変形過程のシミュレーションが重要な役割を果たすと考えられるが、応力状態下での相変態を含む変形過程のシミュレーションには多くの問題点が存在し、未だ十分な精度での解析は行えていない。

この問題の解消に向けて、国の内外において多くの実験的および理論的研究が試みられている。しかしながら、実験的に関する研究の多くは単軸荷重のもとでの相変態現象に関する研究がほとんどであり、材料モデルの妥当性の検討も一部の相変態に対して単軸応力についてのみしか行われていない。しかもこれらの研究は変態時に降伏応力よりも小さな応力を加えたときの変態塑性挙動に関するものであり、変態時の一般的な塑性や変態前に予め加えられた塑性(予塑性)ひずみが増加したときに及ぼす影響は考慮されていないことがほとんどであり、予変形が変態塑性に影響を与えるメカニズムは明確になっていない。しかしながら、熱を伴う実際の工程では冷却中にも塑性変形が加えられていると考えられる。応力が負荷された状態で変態が進行するホットプレスにおいて、変形状態と組織変化の進展状況を的確に予測するためには、特に変態開始前のオーステナイト域において塑性変形を受けた材料の変態挙動に関する多軸応力下でのデータの収集とこれに基づく熱弾塑性構成モデルの確立が重要であると考えられる。

## 2. 研究の目的

鉄鋼材料は種々の性質や形状を得るために熱間鍛造、焼き入れ、熱間圧延、ホットプレスといった工程によって加工されるが、このような熱を伴う過程では鉄鋼材料内部の組織が変化する相変態を引き起こす。このような製造工程においてダイス形状や成形工程の最適化を行うためには、変形過程のシミュレーションが重要な役割を果たすと考えられるが、応力状態下での相変態を含む変形過程のシミュレーションには多くの問題点が存在し、未だ十分な精度での解析は行えていない。変態塑性は相変態を伴う過程で生じる現象のひとつであり、応力変形解析においてその影響を考慮することの重要性が指摘されている。このため、その構成則についても多くの研究がなされている。しかしながら冷却中に塑性変形を加える工程は数多く存在するが、予変形を加えられた鋼材の変態塑性挙動についての研究は限られている。

そこで本研究では S45C および SCM440 に対してオーステナイト領域から引張圧縮、ねじりおよび曲げ荷重しながら自然冷却または強制冷却しつつ冷却中の温度およびたわみを同時測定することにより、パーライトおよび等温ベイナイト変態塑性挙動に対する新たな材料モデルを構築する。さらに S45C および SCM440 に対して変態開始前のオーステナイト相にあらかじめ塑性変形を加え、その塑性変形がパーライト変態および等温ベイナイト変態時の変態塑性挙動に与える影響について検討した。そして得られた構成式をもとに有限要素法によるホットプレス過程の変形・変態進行状況のシミュレーションを実施し、実験結果と比較検討することにより本手法の妥当性を検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 相変態試験

実験には引張圧縮 - ねじり二軸試験装置および引張 - 曲げ試験装置を用いた。まず、SCM440 の試験片を 5 分間で 850 まで加熱したのちに試験片を完全にオーステナイト化するために 3 分間保持する。その後、450 まで圧縮空気による強制冷却をしつつ、450 で等温保持させながら降伏応力以下の引張、圧縮、引張 - ねじり、曲げの各応力を与え続け完全ベイナイト変態時の変態塑性挙動の荷重方向依存性について検討した。

さらに上記において、830~800 のオーステナイト領域において予塑性変形を加えたのちに直ちに除荷し、変態開始直前において降伏応力以下の曲げ応力を与え、その塑性変形が等温ベイナイト変態時の変態塑性挙動に与える影響についても検討した。また S45C に対しても自然冷却しつつ、SCM440 と同様の応力を与え、塑性変形がパーライト変態時の変態塑性挙動に与える影響についても検討した。実験中、試験片に溶着した K 熱電対を用いることで試験片温度を、レーザー変位計測装置を用いることで試験片標点間の変位およびたわみ量を測定した。実験に先立って試験片には残留応力を除去するために 850 で 1 時間保持の焼なましを施した。

### (2) 有限要素解析

(1)で提案した構成式をもとに有限要素法によるシミュレーションを行った。相変態を考慮した解析には汎用 FEM コード Abaqus Standard 2021 を用いた。デフォルトの Abaqus の機能だけでは相変態を考慮することができないので、用意されているユーザブルーチンに変態塑性構成式を組み込んだ。

なお、本研究では相変態する材料の全ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{ij}$  は

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \dot{\varepsilon}_{ij}^T + \dot{\varepsilon}_{ij}^{ph} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{tp} \quad (1)$$

となる。ここで、上添え字  $e$  は弾性、 $p$  は塑性、 $T$  は熱膨張、 $ph$  は変態膨張、 $tp$  は変態塑性によるひずみ速度成分を示す。

解析モデルを図1に示す。解析では引張 - 曲げ試験に用いた試験片の平行部 125 mm × 4 mm × 1 mm のみをモデル化した。曲げ荷重を試験片上面の固定端から 60 mm の位置の節点に与え、試験片下面の固定端から 120 mm の位置を単純支持する。

要素タイプは6面体2次要素であり、節点数と要素数はそれぞれ 22241, 7511 である。なお、本研究では S45C についてはオーステナイト相がすべてパーライト組織、SCM440 についてはオーステナイト相がすべてベイナイト組織の単相へ変態するとした。

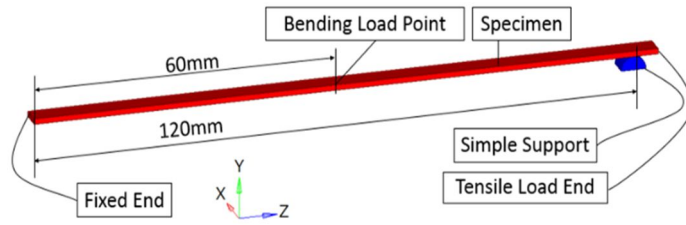


図1 解析モデル

#### 4. 研究成果

S45C および SCM440 に対して実験より得られた冷却過程中的の時間と温度の関係を本供試材料と成分が近い試料の CCT 線図に重ねた結果をそれぞれ、図2および3に示す。さらに一例として、引張 - ねじり二軸荷重下における SCM440 の冷却過程中的の軸方向ひずみ - 温度関係を図4に、温度 - ねじり方向ひずみ関係をおよび図5に示す。

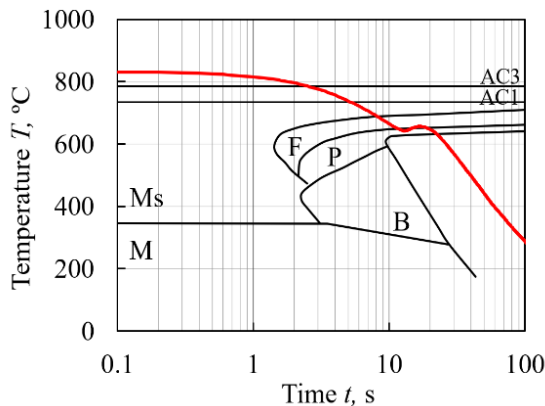


図2 冷却経路 (S45C)

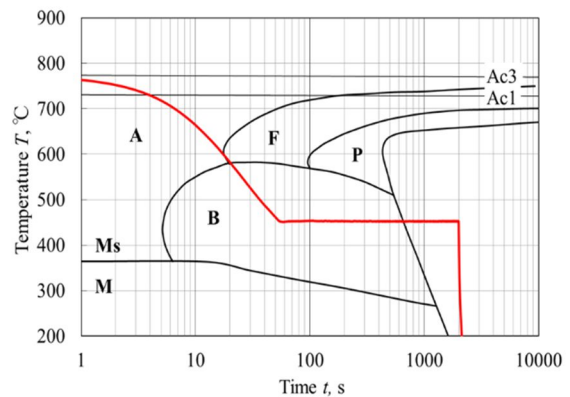


図3 冷却経路 (SCM440)

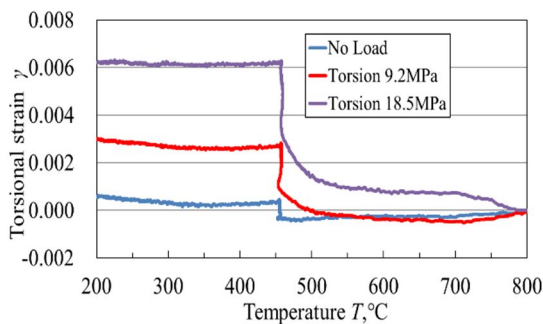


図4 冷却過程中的の軸ひずみ - 時間関係

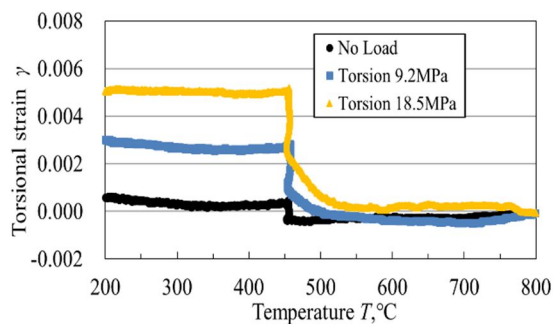


図5 冷却過程中的のねじりひずみ - 時間関係

これらによると、相変態時に応力が負荷されることによって生じる変態塑性ひずみのために軸方向およびねじり方向ともに荷重の増加とともに変態時のひずみが増加することがわかる。得られた結果をまとめると、SCM440 の変態塑性ひずみは荷重方向によって大きく異なり、Hill型の異方性構成式によって表現されることがわかった。

次にオーステナイト領域で予塑性変形を受けた鋼の変態塑性挙動について実験的に検討した。

図6および7にそれぞれ、S45Cのパーライト変態およびSCM440の等温ベイナイト変態に対する変態塑性係数と予塑性ひずみとの関係を示す。これらによると、いずれの変態においても予塑性ひずみの増加に伴い変態塑性たわみが抑制されていることがわかる。変態塑性係数 $K_{pp}$ を予塑性ひずみ $\varepsilon_{pp}$ により整理した結果、以下の関係式を得た。

$$K_{pp} = 8.40 \times 10^{-5} (1 - \varepsilon_{pp}^{0.51}) \quad \text{in S45C} \quad , \quad K_{pp} = 7.19 \times 10^{-5} (1 - \varepsilon_{pp}^{0.38}) \quad \text{in SCM440}$$

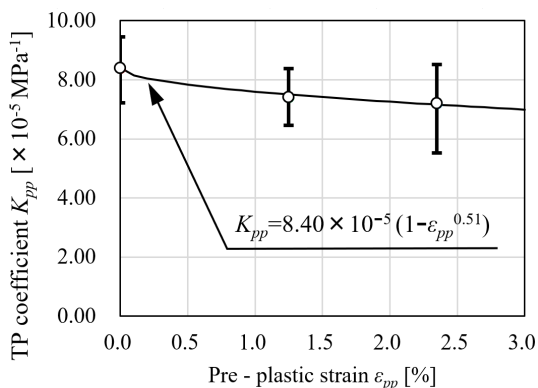


図6 変態塑性係数 - 予塑性ひずみ関係 (S45C)

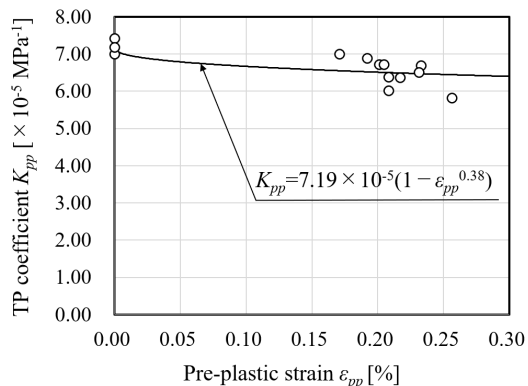


図7 変態塑性係数 - 予塑性ひずみ関係 (SCM440)

実験で得られた構成式の妥当性を検討するため、有限要素法による解析を実施した。図8および9にそれぞれ、S45CおよびSCM440に対して実験より得られた変態塑性係数 - 予塑性ひずみ関係と解析より得られたそれとを比較した結果を示す。図中、 $\blacklozenge$ 、 $\blacksquare$  および  $\bullet$  はそれぞれ、実験結果、従来型の構成式による解析結果、および本研究で提案した構成式による解析結果を示す。これらによると、いずれの材料においても従来型の構成式を用いて得られた変態塑性係数は予応力の増加とともにわずかに増加しており、実験結果を表現できていない。一方、本研究で提案した相当塑性ひずみ依存型の変態塑性構成式を用いた解析結果は実験結果を定量的に評価していることがわかる。

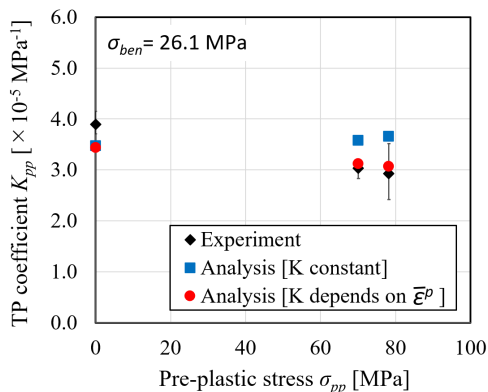


図8 実験より得られた $K_{pp} - \sigma_{pp}$ 関係と解析より得られたそれとの比較 (S45C)

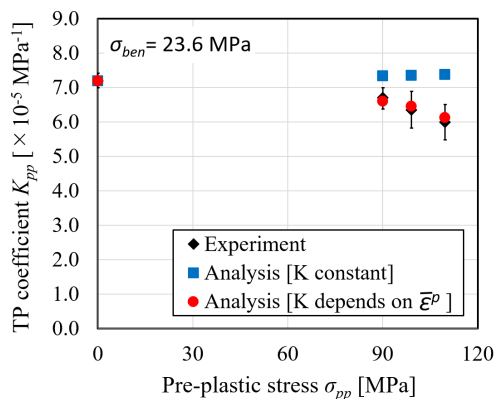


図9 実験より得られた $K_{pp} - \sigma_{pp}$ 関係と解析より得られたそれとの比較 (SCM440)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大下賢一, 長岐滋
2. 発表標題 SCM440 の引張・ねじり 2 軸応力下における相変態挙動の計測
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大下賢一, 長岐滋
2. 発表標題 SCM440のベイナイト変態における変態塑性挙動の実験的検討
3. 学会等名 第70回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大下賢一
2. 発表標題 予塑性変形を受けた鋼材の相変態解析
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2021 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大下賢一
2. 発表標題 SCM440のベイナイト変態挙動に関する有限要素解析
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2022 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------