

令和元年6月6日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05714

研究課題名(和文) 多軸応力依存性を考慮した鋼のTRIP挙動のモデル化と熱間プレス成形解析への適用

研究課題名(英文) Modeling of TRIP behavior of steel considering multi-axial stress dependence and its application to hot stamping process analysis

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：鋼の相変態挙動の測定精度を向上させるために冷却・負荷機構を変更し、この装置を用いて多軸応力下における変態塑性挙動を測定した。また、曲げ・引張応力を自動負荷できるように装置の改良を行い、試験片中立面の移動が変態塑性挙動に与える影響について実験的検討を行った。さらに、実験結果を基に鋼の変態塑性構成式を新たに提案した。冷却状態で板材に引張・曲げ負荷するホットプレス過程を模擬した実験結果に対して、上記構成式を用いることにより十分な精度で表現することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼板を約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を高精度にシミュレーションするためには鋼の変態塑性挙動の予塑性ひずみ依存性を考慮した熱・弾塑性構成式の構築が欠かせない。このようにして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)：In order to improve the measurement accuracy in the phase transformation behavior of steel, the cooling and loading system were changed, and the transformation plastic behavior under multi-axial stress was measured using this device. Moreover, the equipment was improved so that the bending and tensile stress could be applied automatically, and the effect of the movement of the specimen's neutral surface on the transformation plasticity was experimentally examined. In addition, we proposed a new constitutive equation for the transformation plastic deformation of steel to be dependent on hydrostatic stress. The above constitutive equation can be expressed with sufficient accuracy for the experimental results that simulate the hot stamping process for tensile-bending on the plate under cooling condition.

研究分野：固体力学

キーワード：相変態 変態塑性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

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っていない。

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、フェライト変態やパーライト変態など比較的、低冷却速度にて実現可能な相変態現象に関する研究このため、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。

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、特に急速冷却下におけ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っていない。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。特に近年は曲げ試験による変態塑性挙動の検討が行われており、引張試験に比べて変形量が大きく、変態塑性たわみ量を直接計測できるため、精度よく変態塑性挙動の検討を行うことができるという特徴がある。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・曲げ負荷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、パーライトおよびマルテンサ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) 供試材料および試験片

供試材料には S45C および SCM440 を用いた。図 1~3 にそれぞれ、本研究で用いた試験機、一端固定他端単純支持曲げ試験の概略図および試験片の形状を示す。実験は棒状平板の試験片の片端を固定端とし、他端を単純支持とする曲げ試験機を用いて実施された。曲げ荷重点および引張荷重用重錘の移動にはステッピングモータを利用した電動アクチュエータを用いた。曲げ荷重点は試験片の支点間の中央の位置とし、たわみ量はレーザ変位計を用いて曲げ荷重点棒に設置した反射板の変位を測定した。一方、引張ひずみは引張荷重用重錘の移動量、および実験終了後の試験片標点間距離を計測することで求めた。試験片温度の測定には試験片支点間の中央下部に溶着した K 熱電対を用いた。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。

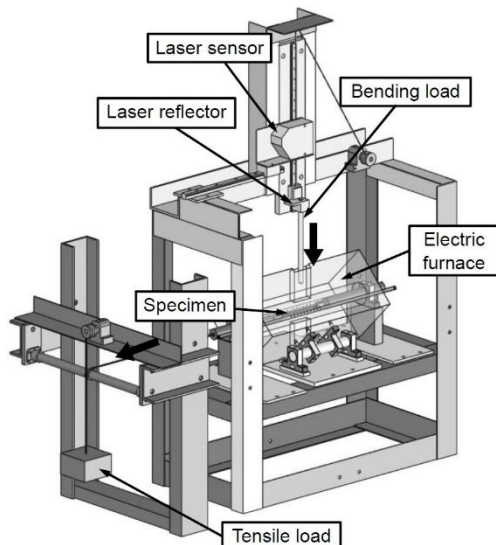


図 1 試験装置

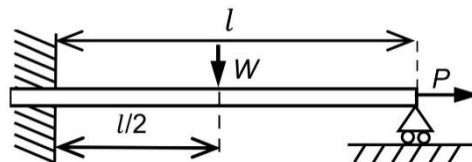


図 2 三点曲げ負荷システム



図 3 試験片の形状および寸法

(2) 実験方法

冷却過程中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 線図に重ねたものを図 4 および 5 に示す。まず、試験片を 5 分間で 830 °C まで加熱した後に、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、炉の電源を落とし、S45C に対しては自然冷却、SCM440 に対しては圧縮空気による強制冷却をさせる。変態開始点直前で曲げ荷重棒を操作することにより試験片に引張 - 曲げ荷重を与え、S45C のフェライト - パーライト相および SCM440 のマルテンサイト相での変態塑性たわみを測定する。さらに S45C に対する実験においては上記に加え、自然冷却開始直後に重錘を操作してオーステナイト相に対して引張荷重を 2 秒間負荷し、その後除荷することで予塑性変形が相変態時の曲げ変態塑性挙動についても検討した。荷重条件は引張予応力が負荷温度 800 °C での降伏応力 53 MPa 以上となるように 70.1 MPa、78.2 MPa および 0 MPa の 3 種類、一方、最大曲げ応力が降伏応力以下となるように設定した。実験は各条件に対してそれぞれ 3 回ずつ行った。なお、支点間距離は 120 mm とした。

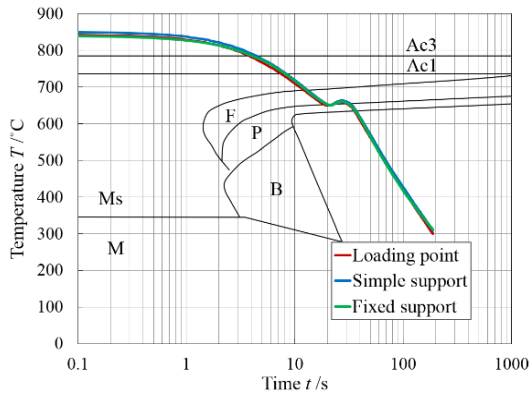


図 4 冷却線図 (S45C 自然冷却)

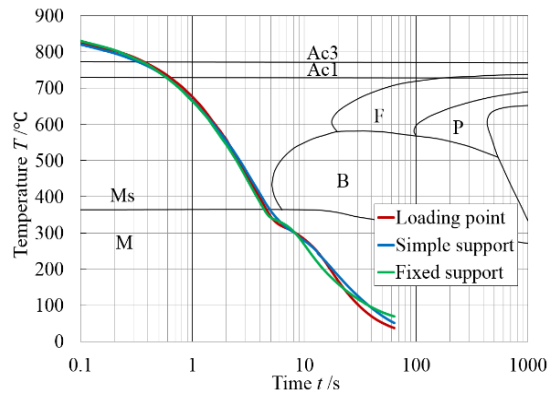


図 5 冷却線図 (SCM440 強制冷却)

(3) 解析方法

相変態を考慮した材料の全ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は

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

で表現される。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成分を示す。

本研究では変態塑性構成式として次式で表現される従来型の Mises 型構成式

$$\dot{\epsilon}^{tp} = 3K(1 - \xi)\dot{\xi}s \quad (2)$$

に加えて代表者が提案した静水圧依存型構成式

$$\dot{\epsilon}^{tp} = K_{ten}\{(1 + \mu) + \mu\sigma_{ii}\bar{\sigma}^{-1}\}(1 - \xi)\dot{\xi}s \quad (3)$$

の妥当性について検討した。さらに K が相当塑性ひずみに依存するとして以下の構成式についても検討した。

$$\dot{\epsilon}^{tp} = 3K\{1 - (\bar{\epsilon}^p)^a\}(1 - \xi)\dot{\xi}s \quad (4)$$

ここで K は変態塑性係数、 ξ は相変態の進行を表す新相の体積分率、 s は偏差応力、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $\bar{\epsilon}$ は相当塑性ひずみを示す。また、 μ は

$$\mu = (K_{ten} - K_{com})/2K_{ten} \quad (5)$$

で表現されるパラメータである。なお、 K_{ten} および K_{com} はそれぞれ、引張方向成分および圧縮方向成分の変態塑性係数を示す。

上記の 3 つの構成式を基に汎用 FE コード Abaqus Standard による有限要素解析を実施し、構成式の妥当性を検討した。なお、S45C の自然冷却過程ではオーステナイト相からフェライト、パーライトの 2 相への変態を生じるが、今回はオーステナイト相がすべてパーライト組織に変態するとした。

4. 研究成果

一例として、S45C に対して引張 - 曲げ複合負荷のもとで実験より得られた冷却過程中的変態塑性たわみ曲線を示す。図 6 および 7 の実線はそれぞれ、曲げ荷重 $W = 2.11 \text{ N}$ のもと、引張荷重 $P = 0.0 \text{ N}$ 、および $P = 80.0 \text{ N}$ ($\sigma = 10.0 \text{ MPa}$) の条件下で得られた実験結果である。さらに同図中、青一点鎖線および赤点線にそれぞれ、従来型の構成式(2)、および新たに提案した構成式(3)を用いて有限要素解析より得られたたわみ曲線を示す。なお、解析には小規模降伏理論を用いた。

これらによると、実験より得られた変態塑性たわみは引張荷重の増加とともに減少しており、引張荷重は変態塑性ひずみを抑制する方向に作用することがわかる。本研究で提案した構成式(3)より得られた変態塑性たわみは $P = 0.0 \text{ N}$ において実験結果を良好に表現するが、引張荷重を負荷した場合には実験結果と差が生じている。従来型の構成式(2)を用いた場合は引張荷重の

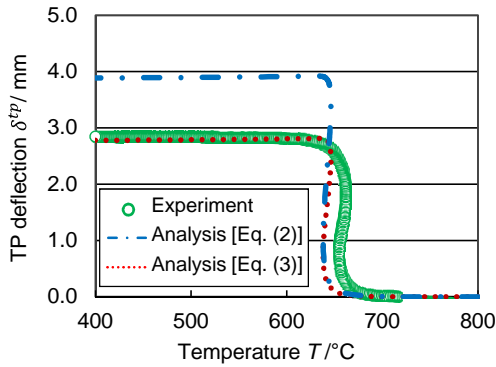


図6 冷却過程中的たわみ曲線
(S45C, W = 2.11 N, 引張荷重なし)

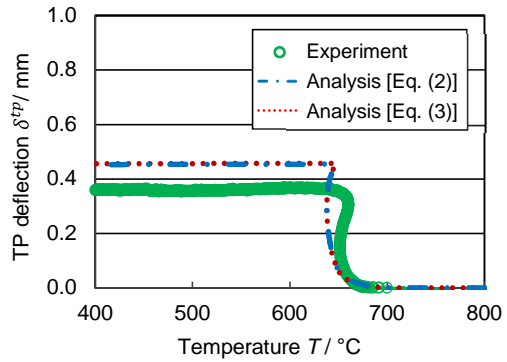


図7 冷却過程中的たわみ曲線
(S45C, W = 2.11 N, 引張荷重あり)

有無によらず実験結果との間に差が生じている．このような傾向は他の試験条件においても同様であった．

この原因についてさらに詳細に検討した．図8および9はそれぞれ，小規模降伏理論および大変形理論に基づいて解析より得られた引張応力 - 変態塑性たわみ関係を実験結果とともに示したものである．一方，大変形理論に基づく解析結果は，いずれの構成式を用いた場合でも変態塑性たわみは引張応力の増加とともに減少しており，特に静水圧依存型構成式(3)による解析結果は実験結果と定量的にもほぼ一致していることがわかる．これは大変形解析においては，引張応力による負の曲げモーメントの発生により試験片全体の曲げモーメントが減少することから，結果として変態塑性たわみが抑制されるためである．

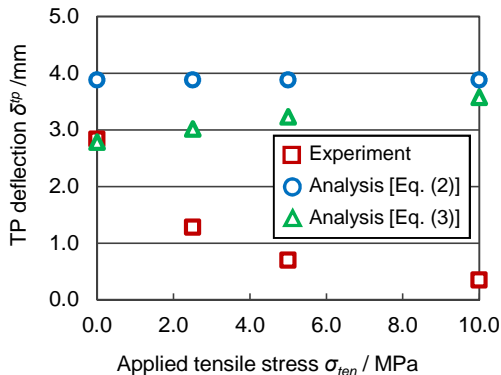


図8 変態塑性たわみ - 引張応力関係
(小規模降伏理論)

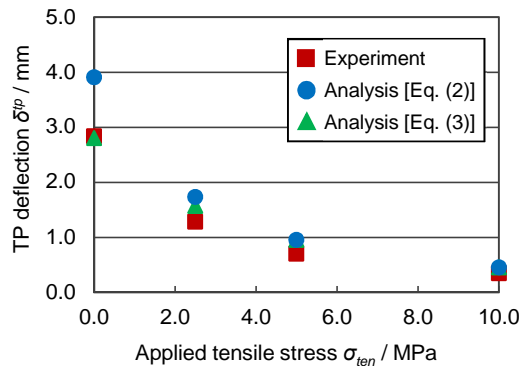


図9 変態塑性たわみ - 引張応力関係
(大変形理論)

つぎに予塑性変形がパーライト変態時の曲げ変態塑性挙動に及ぼす影響について検討した．図10にS45Cの自然冷却過程において各荷重条件下で得られた変態塑性たわみと引張予塑性ひずみの関係を示す．なお，予負荷は引張荷重として与えているため，予負荷によるたわみの発生はない．これによると，変態塑性たわみは曲げ荷重の増加とともに増加し，予塑性ひずみの増加とともに減少することがわかる．

曲げ荷重が支点間中央部に位置する場合の一端固定他端単純支持試験の場合， K は断面モーメントを I とすると以下の式で求められる．

$$K = (768I/7Wl^3)\delta^{tp} \quad (6)$$

図11に K と予塑性ひずみとの関係を示す．これによると変態塑性係数は予塑性変形により小さくなることがわかる．すなわち，S45Cのフェライト - パーライト変態において予塑性変形は変態塑性変形を抑制する向きに作用すると考えられる．

このように変態塑性変形が予塑性ひずみの増加とともに減少する一因として，次の点が考えられる．一般に硬い新相が生成することによって柔らかい母相に応力が生じ，やがて母相が降伏

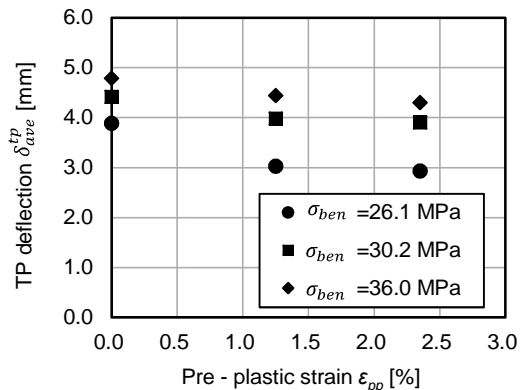


図10 変態塑性たわみ - 予塑性ひずみ関係

応力に達することにより塑性変形が誘起されて変態塑性現象が発生すると考えられている。S45Cのパーライト変態過程において、予塑性変形により母相(オーステナイト相)が加工硬化したことにより母相の降伏応力が上昇し、結果として変態塑性変形が抑えられた可能性がある。図10より、本研究ではS45Cのパーライト変態において、式(4)中のパラメータ $a=0.511$ を得た。

式(4)を構成式として有限要素法による解析を行った。図12に一例として最大曲げ応力36.0 MPaのもとで、解析より得られた冷却過程中的温度-変態塑性たわみ線図を示す。これによると、予応力が大きくなるにつれて変態塑性たわみは減少しており、実際の現象と同様な傾向を示した。

そこで、これについてさらに検討するため、図13に最大曲げ応力30.1 MPaの条件下で実験より得られた変態塑性たわみ-予応力関係と解析より得られたそれとを比較した結果を示す。これらによると、変態塑性係数が予塑性ひずみに依存しないとする従来型の変態塑性構成式(2)を用いて得られた変態塑性たわみは予応力の増加とともにわずかに増加している。これは予引張荷重による試験片の伸びにより断面積が減少し、断面二次モーメントが減少したためである。一方、変態塑性係数が相当塑性ひずみ依存型の構成式(4)を用いて得られた変態塑性たわみは実験結果とほぼ定量的に一致することがわかる。

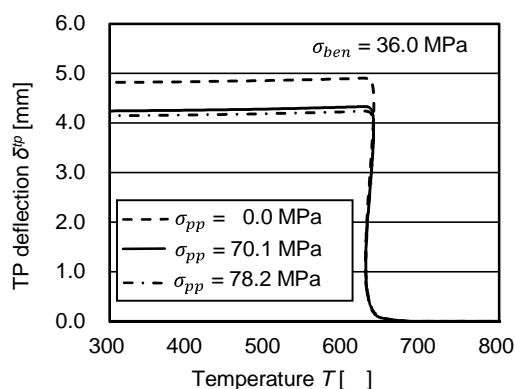


図12 解析より得られた冷却過程中的の変態塑性たわみ - 温度関係

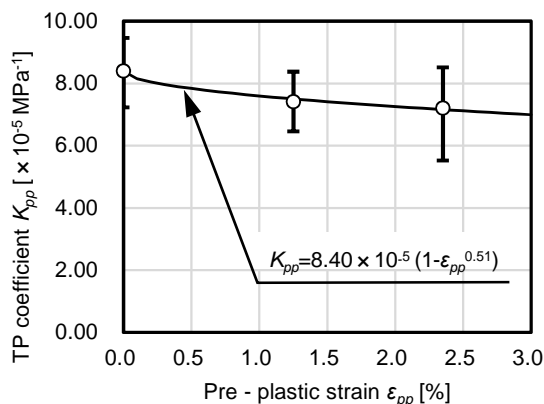


図11 変態塑性係数 - 予塑性ひずみ関係

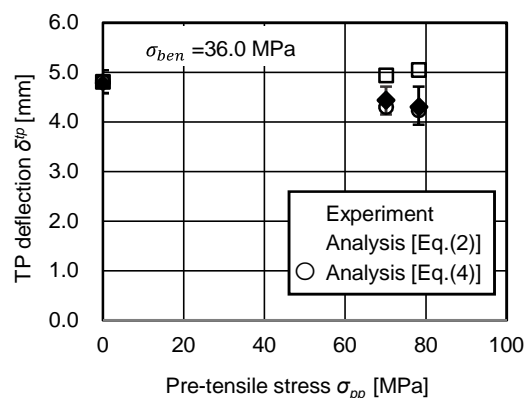


図13 実験より得られた変態塑性たわみ - 予塑性応力関係と解析より得られたそれとの比較

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

大下賢一, 長岐滋, 板倉周平, 野本駿一, 予塑性変形を受けたS45Cの曲げ変態塑性挙動の評価, 査読有, 材料, 68-6, 2019

M.A. Hamdam, K. Takahashi, H. Tateoka, K. Oshita and S. Nagaki, Thermo-Elasto-Plastic Analysis of Pearlitic Transformation Plasticity under Combined Bending-Tensile Loading, 査読有, Key Engineering Materials, 725, 2017, pp.328-333

M.A. Hamdam, S. Nagaki, K. Oshita and S. Hanamura, Experimental and Numerical Studies of Pearlitic Transformation Plasticity in S45C Steel Subjected to Bending Loading System, 査読有, 材料, 65-7, 2016, pp.532-537

[学会発表](計5件)

大下賢一, 板倉周平, 長岐滋, 引張予塑性変形を受けたS45Cの曲げ変態塑性挙動, 日本機械学会講演論文集, No.17-5, 2017, pp.1675-1677

M.A. Hamdam, K. Takahashi, H. Tateoka, K. Oshita and S. Nagaki, Thermo-Elasto-Plastic Analysis of Pearlitic Transformation Plasticity under Combined Bending-Tensile Loading, Proceedings of AEPA2016, 2016

M.A. Hamdam , S. Nagaki and K. Oshita, Effect of Tensile Stress on Transformation Plastic Deflection under Combined Bending-Tensile Loading System, Proceedings of ISEM'15, 2015

M.A. Hamdam , R. Miyamoto , S. Nagaki and K. Oshita, Effect of plastic pre-deformation on transformation plasticity coefficient in a three-point bending system, Proceedings of Asia Steel International Conference, 2015, pp.518-519

M.A. Hamdam, S. Nagaki and K. Oshita, Influence of Austenitization Conditions on Martensitic Transformation Plasticity of SCM440 Steel, 日本材料学会第 64 期講演論文集, 2015, pp.278-279

〔その他〕

ホームページ等

<http://web.tuat.ac.jp/~nagaki/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：長岐 滋

ローマ字氏名：(NAGAKI SHIGERU)

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：大学院工学研究院

職名：名誉教授

研究者番号 (8 桁) : 30135959

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。