

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560116

研究課題名(和文)相変態を考慮した熱弾塑性構成モデルとそのホットプレスへの応用

研究課題名(英文) Thermo-elastoplastic constitutive modelling considering phase transformation and numerical simulation of hot stamping process

研究代表者

長岐 滋 (Nagaki, Shigeru)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30135959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：相変態を含むホットプレス過程の変形シミュレーション手法の開発を目指し、2軸応力負荷試験装置を用いて、高温から冷却される鋼について変態に伴う変形を測定した。S45C材のパーライト変態に関して、引張りと圧縮負荷では変態塑性挙動が異なることが明らかになり、提案した新たな構成式によってこの挙動を表現することができた。また急速冷却下での曲げ試験装置を製作し、変態塑性係数を測定する手法を確立し、予塑性変形が変態塑性変形に及ぼす影響を明らかにした。さらに汎用有限要素法プログラムに提案した変態塑性構成式を組み込み、高温から冷却される板材の曲げ変形のシミュレーションが可能になった。

研究成果の概要(英文)：In order to establish the simulation method for hot stamping process, the deformation behavior of steels accompanied by phase transformation were measured under bi-axial stress state. It was found that the transformation plastic deformations during pearlite transformation of S45C are different in tension and compression stress state. The proposed new constitutive equation for TRIP can predict these anisotropic deformation behavior. The bending test method to measure the TRIP coefficient was also established and the pre-plastic deformation prior to phase transformation will give the enormous effects to the TRIP deformation. Furthermore, the new constitutive equation was introduced to the commercial FE code and the bending deformation during the cooling process was simulated by proposed method.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：変態塑性 熱弾塑性構成式 マルテンサイト変態 パーライト変態 変態塑性係数 ホットプレス

1. 研究開始当初の背景

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。変形過程に相変態が生じるという意味で、ホットプレスの過程は古くから実用化されている鋼の焼入れなどの熱処理過程と共通する部分が多い。

しかしながらこのような相変態を含む過程の変形シミュレーションは未だ十分な精度で行われていない。これについては従来から、高温から室温までの広い温度範囲において力学的性質、熱的性質、組織状態に関する数多くの材料パラメータ求めなければならないなどの問題点が挙げられている。さらに本質的な問題として、多軸応力下で相変態が生じる場合の変形挙動を適切に記述する構成式が確立されていないことが挙げられる。特に変態塑性 (TRIP) 現象についてはその多軸応力依存性を調べた例はほとんど見当たらない現状である。

2. 研究の目的

本研究では多軸応力下で高温から冷却される炭素鋼について、変態膨張や変態誘起塑性変形を実験的に正確に測定し、これら相変態に起因する変形を的確に表現する弾塑性構成モデルを構築すること、さらに得られた弾塑性構成モデルを用いて、ホットプレスの変形過程の正確なシミュレーションを行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 変態誘起塑性変形が多軸応力依存性の実験的検討

引張り・ねじり二軸応力負荷・冷却条件下での温度・伸び線図、温度・せん断ひずみ線図を取得することによって、変態開始、終了温度の変化や変態誘起塑性現象を測定し、各種材料パラメータを取得する。

(2) 曲げ試験による変態塑性係数の測定と予塑性変形の影響の検討

二軸負荷試験と平行して、より簡易的に変態塑性係数を求めるための実験手法として、三点曲げ試験による方法を確立すると同時に、予塑性変形が変態塑性挙動に及ぼす影響について検討する。

(3) 新たな熱弾塑性構成式の導出

(1)(2) を通じて得られた結果をもとづいて、変態塑性現象に関する構成式を新たに構築し、全体として熱処理過程における熱弾塑性構成式を導出する。

(4) 新材料モデルによる熱弾塑性シミュレーションの実施

上述の過程で得られた材料パラメータ、材料モデルを用いて、ホットプレスを想定

した簡易的な曲げ変形過程の有限要素法解析を行う。

4. 研究成果

(1) 変態誘起塑性変形が多軸応力依存性の実験的検討

① 実験の概要

本研究では、炭素鋼 S45C の相変態時に二軸応力を負荷し、その際の試験片の標点間変位と温度の関係を測定した。用いた実験装置 (Fig.1) では任意の引張り・圧縮・ねじり荷重を負荷することが出来る。試験片は外径 12mm、内径 10mm の中空円筒状で標点間距離は 16mm とした。赤外線加熱炉を用いて試験片を 800℃ 以上に加熱した後、錘による一定応力負荷の下で任意の冷却速度で冷却する。試験片の標点間変位は、レバー式変位計の測定子を試験片標点に押しあて、支点を介して炉外に伝えその動きをレーザ寸法測定器で測定する。また温度の測定には試験片に溶着した K 熱電対を用いる。

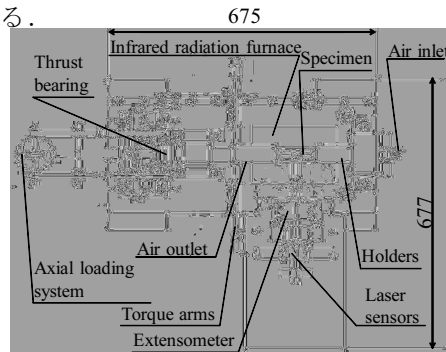


Fig.1 Top view of testing system

本実験では試験片を 5 分間で 800℃ まで加熱した後、3 分間の一定温度保持によりオーステナイト化した。その後、自然冷却によりパーライト変態させ、冷却過程の温度-ひずみ線図を取得した。Fig.2 は実験に用いた試料と成分の近い材料の CCT 線図に、実験の冷却経路を重ねたものである。

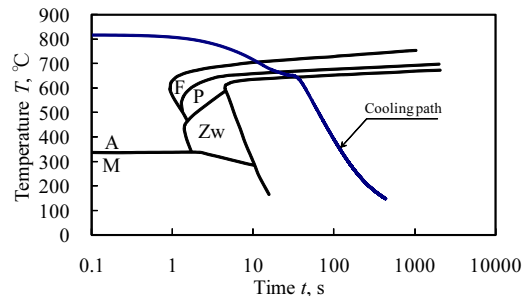


Fig.2 CCT diagram

応力負荷条件は Fig.3 に示すように、無負荷とミーゼスの相当応力 12.0MPa で応力角度 $\theta = \tan^{-1}(\sqrt{3}\tau/\sigma) = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ の 3 条件、24.0MPa で応力角度 $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 167.5^\circ, 180^\circ$ の 9 条件である。同一条件で 2 回ずつ計測した。

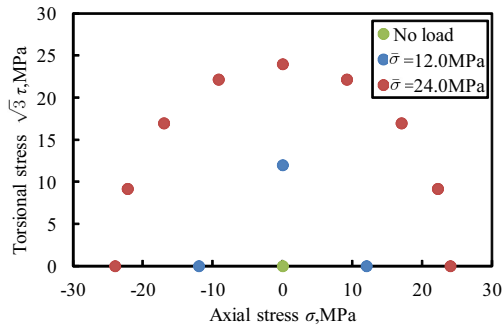


Fig.3 Stress condition

② 実験結果

冷却過程中の温度 - ひずみ線図の例を Fig.4, 5 に示す. Fig.4 は引張り・ねじり応力下, Fig.5 は圧縮・ねじり応力下の結果である. パーライト変態は 680℃ 付近で始まり, 600℃ 付近で終了している. 軸方向では冷却開始から変態開始前までは温度の低下による熱収縮でひずみは減少する. 変態が始まると変態ひずみ及び変態塑性ひずみが生じる. 変態終了後は熱収縮により再びひずみは減少していく. せん断方向では変態が開始すると変態塑性ひずみのみが生じる.

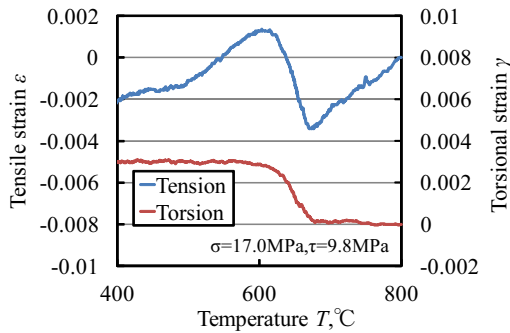


Fig.4 Temperature-Strain diagram

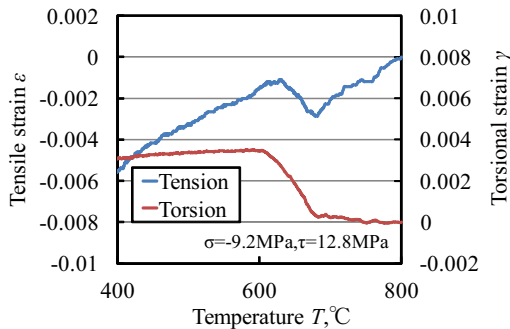


Fig.5 Temperature-Strain diagram

パーライト変態で生じたひずみから無負荷状態で生じたひずみを差し引くことで変態塑性ひずみを算出する. 単軸引張り, 単軸圧縮応力下の変態塑性係数はそれぞれ $K_{ten} = 12.7 \times 10^{-5} MPa^{-1}$, $K_{com} = 6.31 \times 10^{-5} MPa^{-1}$ となった. Mises 型の変態塑性構成式によれば, これらの値は等しくなるはずであるが, ほぼ 2 倍の差が生じている.

また Mises の相当応力 24.0MPa において軸方向とせん断方向の変態塑性ひずみの関

係をまとめたものが Fig.6 である. 実験結果には引張りと圧縮では著しい異方性が認められる. 一方, 実線は従来型の変態塑性構成式による予測結果であり, Mises 型の等方構成式ではこの変形形態を適切に記述できないことがわかる.

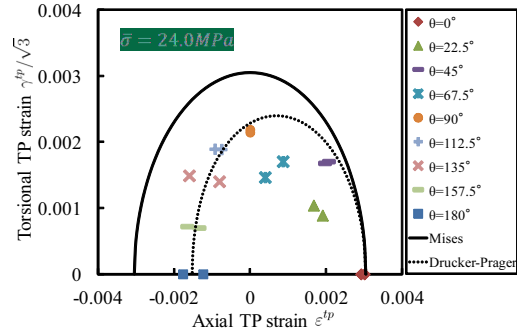


Fig.6 TP strain diagram

さらに Fig.7 はすべての実験結果について Mises の相当応力と相当変態塑性ひずみの関係をまとめたもので, 両者に良い相関があるとは言えないことは明らかである.

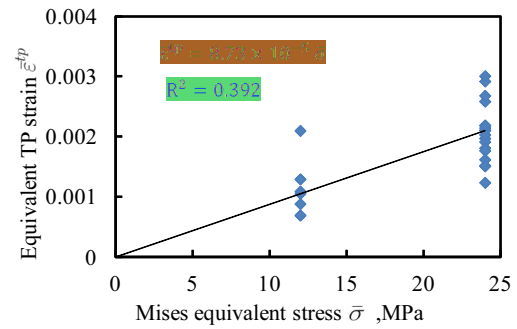


Fig.7 $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}^{tp}$ diagram

③ 実験結果のまとめ

S45C 材のパーライト変態について, 引張り・圧縮・ねじり応力下の変態塑性挙動を計測した結果, 変態塑性変形は大きな異方性を有することが確認された. 従来型の Mises 型の構成式を用いてはこのような変態塑性挙動を精度よく表現できず, 新たな構成関係の導出が必要であることが明らかになった.

(2) 曲げ試験による変態塑性係数の測定と予塑性変形の影響の検討

(1) で述べたような変態塑性係数を二軸応力状態で測定することは, 多軸構成式の確立のためには必要不可欠ではあるが, 実験は容易ではなく, より簡易的に測定するために曲げ試験による変態塑性挙動の測定を行った. また試験片がオーステナイト状態にあるとき, 予め塑性変形を加え, その塑性変形量がその後の変態塑性挙動に与える影響について実験的に検討した.

① 実験の概要

実験装置の概略図を Fig.8 に示す. 板状の試験片の片端を固定端とし, 他端を単純支

持して曲げ試験を行う。荷重棒によって曲げ荷重を負荷し、中央部の変態塑性たわみ量を測定する。

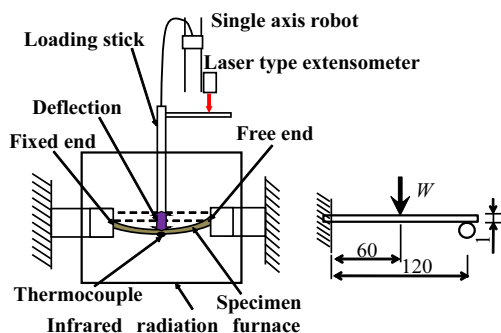


Fig.8 Schematic view of bending system

供試材としてSCM440鋼を用い、ベイナイト変態時の変態塑性係数と予塑性変形の関係について調べた。試験片寸法は $135 \times 6.0 \times 1.0 \text{ mm}^3$ とし、支点間距離は120 mmである。Fig.9は実験に用いた材料と成分の近い試料のCCT線図に実験の冷却経路を重ねたものである。

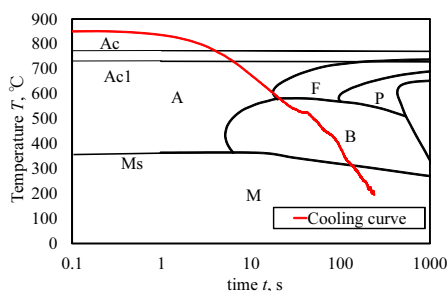


Fig.9 CCT diagram (SCM440)

試験片をオーステナイト化した後、加熱停止と同時に荷重棒を降ろし予変形を与えるための荷重をかけ、直ちに除荷をする。そして変態点前にもう一度荷重をかけ、試験片が自然冷却によってベイナイト変態する時の変態塑性たわみ量を取得する。実験時の時間と温度、応力の関係の概略図をFig.10に示す。

図10の W_1, W_2 は一回目、二回目にそれぞれに負荷する荷重である。 W_1 は Ac_1 点以下の温度で除荷をする。また、一回目の負荷は相変態前のオーステナイト状態において塑性変形が起きる条件(最大曲げ応力 $\sigma_1 > \sigma_Y$)とし、二回目の負荷は塑性変形が起きない条件とした(最大曲げ応力 $\sigma_2 < \sigma_Y$)。

負荷する曲げ応力は、 $\sigma_1 = 73.5 \text{ MPa}$, 91.9 MPa , 110.3 MPa に対して $\sigma_2 = 36.8 \text{ MPa}$ とし、それぞれ8回ずつ実験を行った。また $\sigma_1 = 73.5 \text{ MPa}$ とした場合、 $\sigma_2 = 18.4 \text{ MPa}$, 27.6 MPa となる実験を4回ずつ行った。

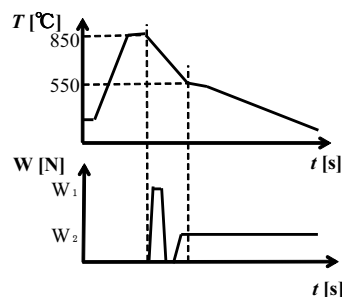


Fig.10 Schematic description of the experiment

② 実験結果と考察

冷却過程中の温度-変態塑性たわみ線図の例をFig.11に示す。ベイナイト変態は550°C付近で開始し、300°Cにはほぼ終了している。また変態前に負荷した応力 σ_1 が大きいほど、変態塑性たわみが少なくなっている。Fig.12に予塑性たわみと変態塑性たわみの関係を示す。変態前の予塑性たわみ量を増加させると、変態塑性たわみ量は減少していく。また予変形を与えても変態時に加えた応力が大きくなるほど変態塑性たわみ量が増加していることがわかる。

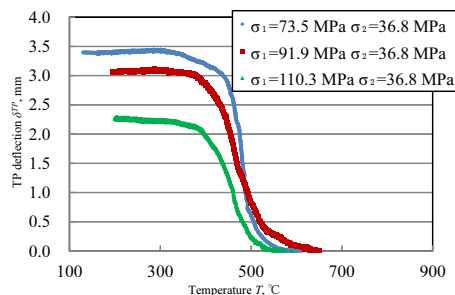


Fig.11 Temperature-TP deflection diagram

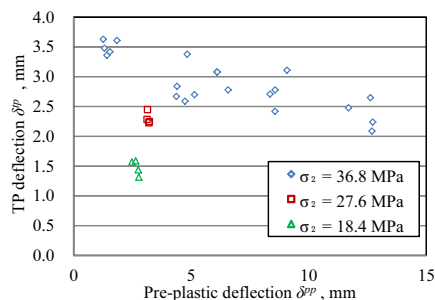


Fig.12 Pre-plastic deflection-TP deflection diagram

片端固定他端単純支持梁の曲げ試験による変態塑性係数 K と変態塑性たわみ量 δ^{tp} の関係は断面二次モーメント I 、荷重 W 、支点間距離 l とすると

$$K = \frac{768I}{7Wl^3} \delta^{tp} \quad (1)$$

となる。これより K を求め、予塑性たわみとの関係をFig.13に示す。 K の値は予塑性たわみ量が大きくなるにつれて小さくなり、ベイナイト変態においては予塑性変形は変態塑性を抑制する向きに働いていると考えられる。

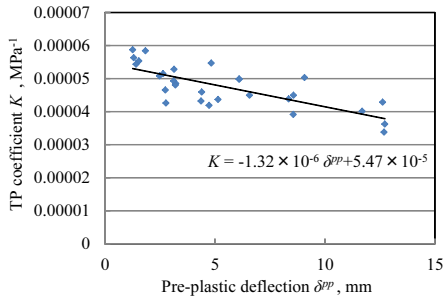


Fig.13 Pre-plastic deflection-TP coefficient diagram

③ 実験のまとめ

片端固定他端単純支持の曲げ試験装置を用いて、変態塑性係数を計測することが可能になった。さらにSCM440材のベイナイト変態では変態前のオーステナイト組織に生じた予塑性変形は変態塑性を抑制させる方向に働き、ベイナイト変態の変態塑性係数 K は予塑性たわみ量の増加に比例して減少することが明らかになった。

(3) 新たな熱弾塑性構成式の導出

相変態する材料の全ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ は

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p + \dot{\epsilon}_{ij}^T + \dot{\epsilon}_{ij}^{ph} + \dot{\epsilon}_{ij}^{tp} \quad (2)$$

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。

ここでは紙面の関係で変態塑性ひずみに関する構成則について説明する。変態塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{tp}$ は、従来 Mises 型の構成則に従うものとして取り扱われており、

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{tp} = 3K(1 - \xi)\sigma'_{ij}\dot{\xi} \quad (3)$$

と表わされる。ここで σ'_{ij} は偏差応力、 ξ は相変態の進行を表わす新相の体積分率、 K は変態塑性係数を示す。Mises の相当応力、相当変態塑性ひずみ速度をそれぞれ $\bar{\sigma}$ 、 $\dot{\bar{\epsilon}}^{tp}$ として式 (3) を整理すると

$$\dot{\bar{\epsilon}}^{tp} = 2K(1 - \xi)\bar{\sigma}\dot{\xi} \quad (4)$$

となり、負荷応力が相変態の生じる過程で一定であるとして、変態開始 $\xi = 0$ から変態終了 $\xi = 1$ まで積分すると

$$\bar{\epsilon}^{tp} = K\bar{\sigma} \quad (5)$$

の関係が得られる。これは多軸応力下であっても、生じる相当変態塑性ひずみは Mises の相当応力に比例することを示している。

しかし、上の関係式では (1) 節の二軸応力下での実験で示したように、引張りと圧縮応力下での変態塑性ひずみの違いや、ひずみ曲面における異方性の発現 (Fig.6) を説明することが出来ないし、また Fig.7 に示したように、相当応力・相当変態塑性ひずみ関係を適切に表すことができない。

そこで、本研究では引張りと圧縮応力下での変態塑性挙動の違いに着目して、巨視的な構成式として静水圧依存性を考慮した Drucker-Prager の降伏条件を用いて以下のような新たな構成式を提案した。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{tp} = 3K(\sigma_{kl})(1 - \xi)\sigma'_{ij}\dot{\xi} \quad (6)$$

$$K(\sigma_{kl}) = K_{ten}\left\{(1 - \mu) + \mu\frac{\sigma_{ii}}{\bar{\sigma}}\right\} \quad (7)$$

ここで変態塑性係数 $K(\sigma_{kl})$ は定数ではなく応力に依存する関数であると仮定している。上式の μ は静水圧依存パラメータであり、引張り応力下での変態塑性係数 K_{ten} と圧縮応力下での変態塑性係数 K_{com} を用いて以下のように与えられる。

$$\mu = \frac{K_{ten} - K_{com}}{2K_{ten}} \quad (8)$$

式 (4)~(5) と同様にして式 (6) を整理すると以下の関係式が得られる。

$$\bar{\epsilon}^{tp} = K_{ten}\bar{\sigma}^* \quad (9)$$

$$\bar{\sigma}^* = (1 - \mu)\bar{\sigma} + \mu\sigma_{ii} \quad (10)$$

ここで $\bar{\sigma}^*$ は Drucker-Prager の相当応力である。これは多軸応力下であっても、生じる相当変態塑性ひずみは Drucker-Prager の相当応力に比例することを示している。

この構成式を (1) 節に示した二軸応力下での S45C 材の変態塑性挙動に適用すると、静水圧依存パラメータ μ は 0.252 と求められ、相当変態塑性ひずみと Drucker-Prager の相当応力の関係は Fig.14 のようになり、Mises 型で整理した Fig.7 よりもはるかに良い相関が得られていることがわかる。さらに軸方向とせん断方向のひずみの関係を図示すると Fig.6 における点線となるが、Mises 型に比べて、ばらつきはあるものの実験結果をうまく表現できていることがわかる。以上のように提案した新しい変態塑性構成式の妥当性が確認された。

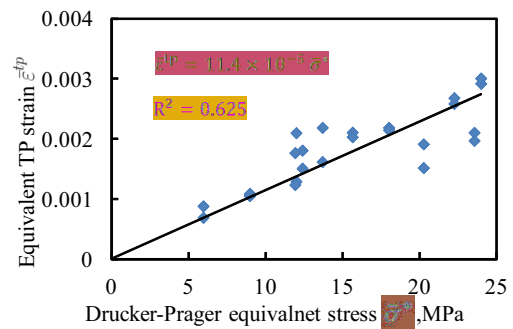


Fig.14 $\bar{\sigma}^* - \bar{\epsilon}^{tp}$ diagram

(4) 新材料モデルによる熱弾塑性シミュレーションの実施

① 解析の概要

前節で提案した変態塑性の構成式 (8)(9) を汎用有限要素法解析ソフトウェア Abaqus にユーザーサブルーチンを利用して組み込んだ。また相変態を考慮して各相の体積分

率に対する移行式を導入し、熱伝導解析に変態潜熱の影響も考慮した。手法の妥当性を確認するため、(2)節と同様な曲げ試験について解析を行い実験結果と比較した。

解析モデルを Fig.15 に示す。試験片の長さを 125mm とし、荷重棒と単純支持は、固定端からそれぞれ 60mm, 120mm の位置にある。荷重棒、支持棒は剛体として扱う。境界条件として、荷重棒を y 軸以外変位拘束、支持棒、固定端を完全固定とした。要素タイプは六面体 2 次要素、節点数、要素数はそれぞれ 50595, 10016 である。幅方向の対称性より 2 分の 1 モデルとした。また供試材は S45C とし、(1)節の実験から求めた変態塑性係数、静水圧異存パラメータを解析に用いた。

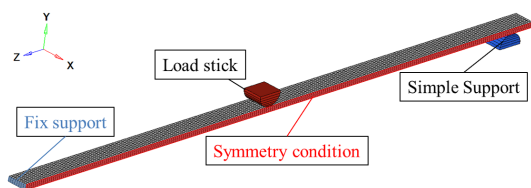


Fig.15 Analytical model

② 解析結果

試験片中央部の温度履歴について実験及び解析結果を Fig.16 に示す。実験では約 20 秒で 660℃ に到達し、パーライト変態によるものと思われる潜熱が発生していることが確認できた。Abaqus による有限要素解析の結果では同じく約 20 秒でパーライト変態を開始しているが、変態開始温度が実験より約 20℃ ずれている。これは、今回の解析では実験で使用した試験片と類似した成分の鋼材の TTT 線図からパーライトの体積分率の移行式を求めていることによるものと考えられる。

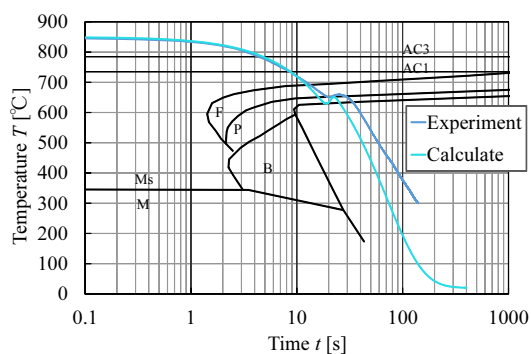


Fig.16 S45C steel CCT diagram

つぎに変態塑性たわみについて、Fig.17 に実験値と解析結果を示す。静水圧依存型の新しい構成式を用いた解析 (Case 2) では実験値より約 0.8mm たわみ量が小さくなり、このたわみから見かけの曲げの変態塑性係数 K'_{bend} は $8.82 \times 10^{-5} MPa^{-1}$ となった。この原因として、変態塑性係数を求めた引張り・圧縮の実験と曲げの実験では保持温度や冷却速条件が多少違っていることによる可能性がある。今後精度に関しては詳し

く検討する必要はあるが、Drucker-Praer 型の新たな変態塑性構成式を用いて相変態過程の曲げの有限要素解析ができることが確認された。

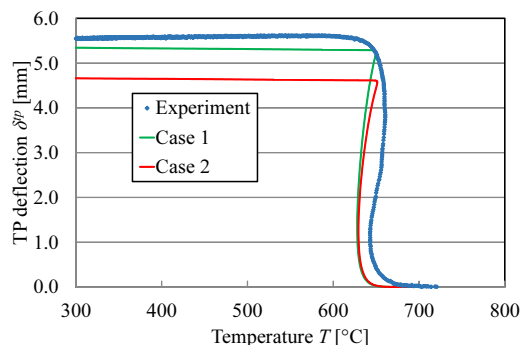


Fig.17 Temperature - TP deflection

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① HAMDAM M. Arif, NAGAKI Shigeru, OSHITA Kenichi, 曲げ-引張複合荷重下における変態塑性の評価, 日本機械学会関東支部第 20 期総会・講演会, 講演番号 20108, 2014 年 3 月 15 日, 東京農工大学
- ② 山本裕太, 引田直樹, 大下賢一, 長岐滋, 鋼の 2 軸応力下における変態塑性挙動モデリング, 日本機械学会関東支部第 20 期総会・講演会, 講演番号 20107, 2014 年 3 月 15 日, 東京農工大学
- ③ HAMDAM M. Arif, OHUE Hiroto, NAGAKI Shigeru, OSHITA Kenichi, 三点曲げ試験における変態塑性挙動に関する研究, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 講演番号 OS202, 2013 年 10 月 12 日, 岐阜大学
- ④ 引田直樹, 小室裕貴, 寒河江秀太, 長岐滋, 大下賢一, 鋼の引張・圧縮・ねじり応力下における変態塑性挙動の実験的検討, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 講演番号 OS201, 2013 年 10 月 12 日, 岐阜大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長岐 滋 (NAGAKI, Shieru)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 3 0 1 3 5 9 5 9

(2) 研究分担者

大下 賢一 (OSHITA, Kenichi)
東京農工大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 6 0 3 3 4 4 7 1