

オーステナイト系ステンレス鋼板の加工誘起マルテンサイト変態を考慮した材料モデルの開発

中部大学 機械工学科

准教授 濱崎 洋

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021028-B3)

キーワード：オーステナイト系ステンレス鋼，マルテンサイト変態，二軸変形

1. 研究の目的と背景

準安定オーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 はステンレスの特徴である耐食性に加え意匠性が高く，さらには高強度，高延性といった優れた機械的性質を有し，家庭用品，構造部材など様々な分野で使用されている．SUS304 は塑性ひずみを付与することでオーステナイトがマルテンサイトへと変化する加工誘起マルテンサイト変態^{1,2)}を生じることが知られている．このような現象は TRIP(Transformation induced plasticity)現象としてまとめられることが多く，TRIP 現象を示す鋼を TRIP 鋼³⁾と呼ぶ．TRIP 鋼はその優れた性質から自動車部品としても適用が拡大されているが，加工時に生成されるマルテンサイト相が硬質であるため，他鋼種に比べて加工硬化が大きく，スプリングバックや時効割れといった成形不良⁴⁾を起こしやすい．

一方，ステンレス製品の多くは意匠性に重点が置かれており，鋼板のプレス成形時に成形不良を生じると製品としての美感を損なうため，高品質な金型が求められる．金型設計の現場では，有限要素法(FEM)による高精度シミュレーション⁵⁾の活用が一般的になり，これにより成形時のスプリングバック，割れ，しわの予測が高い信頼性で実施できるようになってきたが，加工誘起変態を伴う材料では未だ計算精度に問題が残るため実機による試行と修正が主流である⁶⁾．よって，オーステナイト系ステンレス鋼の高精度プレス成形数値シミュレーションが可能となれば，金型設計段階で実機による試行錯誤を数値シミュレーションに置き換えることができ，コスト削減とリードタイムの短縮が可能となる．また，ステンレス鋼の適用をためらわれていた製品でもその適用可能性を簡便に検討できる．

これを達成するためには加工誘起変態，マルテンサイトの増加による加工硬化の正確な表現を可能とする応力 - ひずみ構成則が不可欠である．先行研究では加工誘起マルテンサイト変態及び TRIP 鋼の変形挙動は広く調査されており，その温度，ひずみ速度，変形様式，静水圧の依存性が報告され⁷⁾，それらを考慮した構成式も提案されている⁸⁾．しかし，実際には，式が煩雑であり決定すべき材料パラメータが多い単軸変形での材料特性を中心に議論したため，二軸変形への適用可能性が検討されていないといった問題が残る．本研究の先行研究において，Hamasaki ら⁹⁾は SUS304 の砂時計型試験片を用い，室温および温間で

の単軸引張と応力反転負荷試験を実施して，繰返し塑性変形時の応力 - ひずみ曲線とマルテンサイト体積分率を調査した．その結果，マルテンサイト体積分率は母相であるオーステナイトの最大応力で整理できることを示した．また，これをもとに構成則を提案し，繰返し塑性変形において既存モデルよりも高精度に応力 - ひずみ曲線とマルテンサイト体積分率を予測できることを示した．

しかし，上記の結果は繰返し変形に対応しただけであり，プレス成形で想定される多軸変形時へ展開する必要がある．ここで，対象を板材成形とした場合，一般に二軸変形特性の調査には十字型試験片を用いた二軸引張試験が活用される．しかし，SUS304 は大ひずみ変形が付与できることが大きな特徴であり，二軸引張試験では高々6%程度で腕部から破断するため試験方法として適切ではない．一方，桑原¹⁰⁾らは，円筒材に軸力と油圧による内圧を同時に付与できる二軸バルジ試験装置を考案し，これにより任意の二軸引張変形下にて板材の破断限界直前までの応力 - ひずみ曲線を計測できることを示した．

しかしながら，先行研究で得られた構成則の適用可能性を検討するには，オーステナイト単相の異方性および加工硬化特性の観察が必要となるため，マルテンサイト変態の発生しない温度域での温間二軸バルジ試験を行う必要がある．さらに，常温付近でのマルテンサイト生成量は温度に敏感であり，精度の高い温度制御が必要となる．

そこで本研究では，まず室温から加工誘起マルテンサイト変態の起こらない温度までの二軸バルジ試験を目的とし，温度制御装置を二軸バルジ試験装置に組み込んだ．さらに，288 および 333K において SUS304 の二軸バルジ試験を実施し，応力 - ひずみ曲線とマルテンサイト体積分率を取得した．また，先行研究の知見同様に，二軸変形におけるマルテンサイト体積分率が相当応力で整理できるかを検討した．

2. 二軸バルジ試験

2・1 供試材および試験片形状

供試材はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 であり，機械加工により図1の形状に加工することで軸方向が全長 170mm，平行部 50mm，外径 22.7mm，内径 20mm，厚さ 1.35mm の二軸バルジ試験片とした．また，試験片両端に M30×1.5 のねじ切り加工を施してあり，これにより

治具を介して試験機に取り付ける。また、本試験片には後述するデジタル相関法(DIC)によるひずみ量取得のため図2のようなランダムパターンを施した。

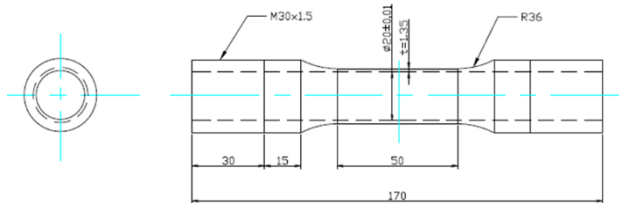


図1 二軸バルジ試験片形状



図2 ランダムパターンを付与した二軸バルジ試験片

2・2 二軸バルジ試験概要

図3に二軸バルジ試験機の概略図を示す。二軸バルジ試験は、前述した試験片に軸力と内部から油圧を付与することで試験片側面に二軸応力状態を再現する試験方法である。この試験機は試験機中央に試験片を取り付ける治具、引張荷重を測定するロードセル、内圧を測定する油圧センサ、変位計測用のダイヤルゲージ、またそれらを駆動させる油圧アクチュエータから構成されている。引張軸力は定格荷重で 100kN であり、内圧は油圧による 100MPa の定格荷重となっている。なお、軸力と内圧はそれぞれ独立したフィードバック回路を有しており、これにより任意の応力比で変形を付与することが出来るため、試験条件に応じて制御方法の切り替えが可能である。

加工誘起マルテンサイト変態は温度に敏感であるため、本試験では熱風発生器により試験片温度を 288~333K の間で保持しており、また、試験片表面の温度分布は±1K 以内で制御した。

ひずみは先述の通り DIC により測定した。また、試験片長手方向中央部に曲率計を取り付け、変形中の曲率を計測した。

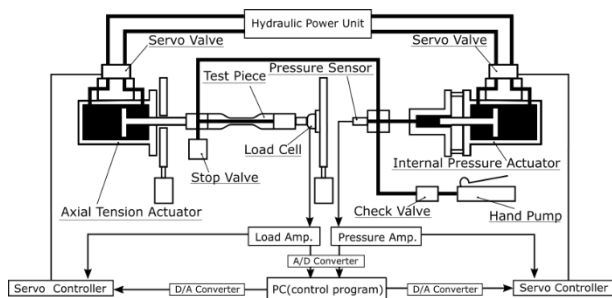


図3 二軸バルジ試験装置の概略図

二軸バルジ試験における長手方向応力および円周方向応力はそれぞれ次式により算出した。

$$\sigma_z = \frac{P\pi\left(\rho_\theta - \frac{t}{2}\right)^2 + T}{2t(D-t)} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P(D-2t)(R_z-t)}{(2R_z-t)t} - \frac{D-t}{2R_z-t}\sigma_z \quad (2)$$

ここで、 P は内圧、 T は軸力 ρ_θ は円周方向曲率半径、 t は板厚、 D は試験片中央の円周方向断面の半径、 R_z は軸方向曲率半径である。

試験中には塑性変形で生じたマルテンサイト体積分率の測定にフェライトスコープを使用した。しかし、本試験片のように板厚の薄い材料ではフェライトスコープの測定精度が問題となる。そこで、SUS304 板材で種々のマルテンサイト体積分率を有するサンプルを用意し、X 線回折とフェライトスコープによるマルテンサイト体積分率測定を実施し、補正曲線を求めた。二軸バルジ試験ではフェライトスコープの測定結果をこの補正曲線で補正することで体積分率を算出した。

試験条件は応力比($\sigma_z : \sigma_\theta$)=1:0, 2:1, 1:1, 3:5, 0:1 とし、試験中の応力 - ひずみ曲線および等塑性仕事面を観察した。

3. 二軸バルジ試験結果

3・1 二軸バルジ試験の妥当性

図4, 5にそれぞれ、相当塑性ひずみ 0.05 および 0.32 における軸方向ひずみと円周方向ひずみの分布を示す。なお、試験温度は 288K である。本結果より、いずれの条件においても試験片中央で均一なひずみが得られており、特に曲率を計測する範囲(試験片中心部から左右に 7.5mm ずつ)ではおおむねひずみ量が一樣であることが確認された。また、333K、相当塑性ひずみ 0.32 (図4.19)における応力比 3:5 では、試験片前面に円周方向ひずみの局所化が見られた。これは本相当塑性ひずみ量において、この条件では破断直前であり不均一変形が始まっているためである。よって、二軸バルジ試験では試験片のひずみ分布を観察することで、データの信頼性が確保される時点を調査可能であることが分かった。なお、先行研究と本研究の 1:1 試験については、この結果を元に本研究の結果がより妥当なものであると考えられる。

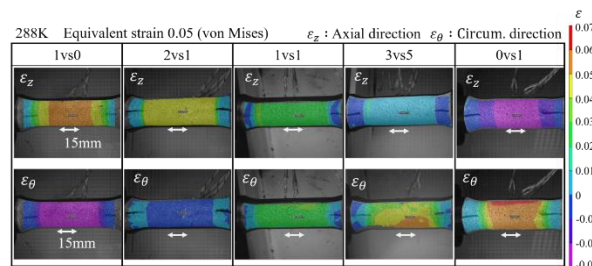


図4 相当塑性ひずみ 0.05 におけるひずみ分布

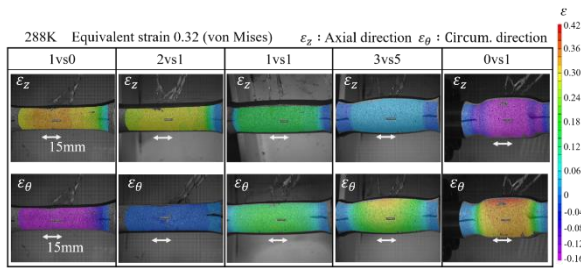


図5 相当塑性ひずみ 0.32 におけるひずみ分布

3・2 SUS304 の等塑性仕事面

図6, 7にそれぞれ288および333Kの二軸バルジ試験から得られたSUS304の正規化等塑性仕事面を示す。ここで各点の応力は応力比1:0の単軸引張試験で得られた引張方向応力で無次元化したものである。また、図中の赤の実線はvon Mises, 青の破線は次式に示すHill48降伏関数, 黒の実線は6次多項式降伏関数¹¹⁾により計算される降伏曲面である。ここでせん断応力が発生しないこと, および, 本試験状態が平面応力であることを仮定すれば, Hill48モデルは次式で表される。

$$f = A_1\sigma_z^2 - A_2\sigma_z\sigma_\theta + A_3\sigma_\theta^2 = \sigma_0^2 \quad (3)$$

ここで f は降伏関数, σ_0 は応力比1:0の単軸引張試験から得られる z 方向応力である。また, $A_1 \sim A_3$ は材料パラメータであり, これらパラメータの決定に応力比1:0, 1:1, 0:1の結果を用いれば $A_1 \sim A_3$ 値は表1に示すとおりである。

表1 Hill48モデルの材料パラメータ

温度(K)	A_1	A_2	A_3
288	1.00	0.88	0.93
333	1.00	0.87	0.94

同様に, 平面応力状態における6次多項式降伏関数は次式で与えられる。

$$f = C_1\sigma_z^6 + 3C_2\sigma_z^5\sigma_\theta + 6C_3\sigma_z^4\sigma_\theta^2 - 7C_4\sigma_z^3\sigma_\theta^3 + 6C_5\sigma_z^2\sigma_\theta^4 - 3C_6\sigma_z\sigma_\theta^5 + C_7\sigma_\theta^6 = \sigma_0^6 \quad (4)$$

ここで $C_1 \sim C_7$ は表2に示す値を取る材料パラメータである。

表2 6次多項式降伏関数の材料パラメータ

温度(K)	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
288	1.00	0.99	1.42	1.63	1.24	0.75	0.80
333	1.00	0.99	1.49	1.65	1.18	0.71	0.83

この結果より, 提案した二軸バルジ試験によりSUS304の等塑性仕事面が得られることを確認した。本結果を見ると, いずれの温度でも等塑性仕事面の形状に大差はない。また, 応力比0:1の円周方向応力 σ_θ は, 応力比1:0の応力よりもわずかに上昇していることが分かる。また, 応力比

(σ_z : σ_θ) が2:1, 1:1, 3:5の実験点はvon Misesの降伏曲面に対して大きく内側に入り込む結果となった。一方で, 異方性降伏関数であるHill48モデルとの比較ではパラメータ決定に使用した応力比1:0, 1:1, 0:1では実験と計算が一致するものの, 平面ひずみ付近である2:1および3:5ではvon Misesの降伏関数の場合と同様に, 実験結果が内側に入る結果となった。したがって, 等方性を評価するvon Misesの降伏関数や, 単純な異方性降伏関数であるHill48モデルではSUS304の面内異方性を表現するには不十分であることが明らかとなった。

一方, 6次多項式降伏関数との比較では, いずれの応力点においても実験結果と計算結果は良い一致を示しており, これによりSUS304は等塑性仕事面形状においては顕著な面内異方性を有していること, およびその表現には高精度な6次異方性降伏関数が適していることが確認された。

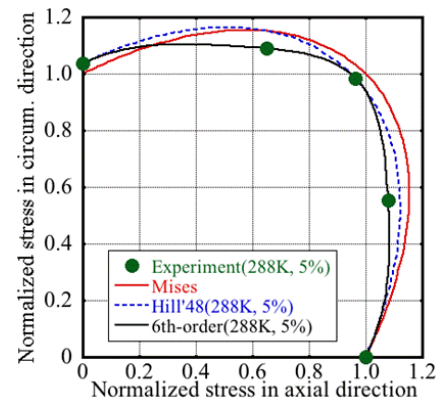


図6 288Kの二軸バルジ試験から得られたSUS304の等塑性仕事面とvon MisesおよびHill48モデルとの比較

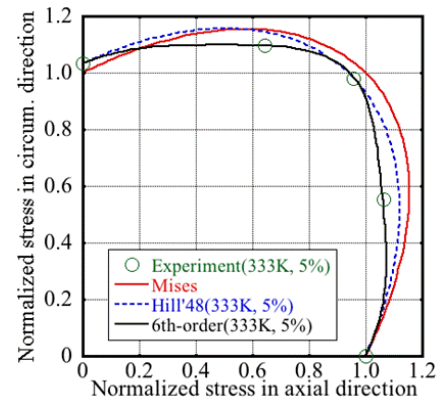


図7 333Kの二軸バルジ試験から得られたSUS304の等塑性仕事面とvon MisesおよびHill48モデルとの比較

3・3 相当応力とマルテンサイト体積分率の関係

先行研究においてHamasakiら⁹⁾は, 単軸引張圧縮状態でのマルテンサイト体積分率は引張応力と相関性があることを報告している。マルテンサイト変態をモデル化して体積分率を予測するためには, 加工誘起マルテンサイト変

態が相当塑性ひずみと相当応力のいずれに支配されているかを明確にする必要がある。そこで、288Kでの二軸バルジ試験による各種応力でのマルテンサイト体積分率を von Mises の相当塑性ひずみで整理した結果を図8に示す。いずれの応力比においても相当塑性ひずみ 0.25 程度までは相当塑性ひずみが増加するにもかかわらずマルテンサイトはほとんど生成しておらず、それ以降の塑性変形において急激に加工誘起マルテンサイト変態が生じていることが確認できる。また、応力比ごとの比較では、1:1 および 3:5 でもっと変態が促進されており、一方で 1:0 および 2:1 では他の応力比に比べて同一塑性ひずみにおけるマルテンサイト体積分率が少ない。加工誘起マルテンサイト変態の理論では、変態に要する自由エネルギーに加えて、変態による体積膨張を許容するために周囲のオーステナイト相の塑性変形に消費されるエネルギーが必要であるとされ、そのため、静水圧が高いほど変態が促進されると言われている。しかし、同一塑性ひずみにおいて単軸引張よりも単軸圧縮時に多くのマルテンサイトが生成するなど、これに反する実験データも数多く報告されておりその傾向は一貫していない。これと同様に本実験結果からも、二軸変形における加工誘起マルテンサイト変態は相当塑性ひずみ量と静水圧応力のみでは説明できず、体積分率を予測できないことが確認された。

続いて、288Kの二軸バルジ試験から得られたマルテンサイト体積分率と von Mises の相当応力の関係を図9に示す。なお、本来は横軸にオーステナイト相の相当応力を用いるべきであるが、本研究の実験結果からはその値を求めることができないため、マルテンサイト+オーステナイト二相材の巨視的応力にて整理している。しかし、応力比 1:0 以外はマルテンサイト体積分率が 0.2 以下と小さく、母材であるオーステナイトの相当応力と大きな違いはないものと考えている。この結果より、図8の相当塑性ひずみで整理した場合と比較して、応力で整理することで全ての応力比の結果が近づいている。これにより、単軸の引張圧縮試験結果と同じく加工誘起マルテンサイト変態は応力誘起であることが推察される。しかし、応力比 2:1, 1:1, 3:5 では単軸の 1:0, 0:1 に比べて低い応力でマルテンサイトがより多く生成している。

次に、6次多項式降伏関数の相当応力でマルテンサイト体積分率を整理した結果を図9に示す。本結果では、全ての実験点がほぼ1つの曲線で表現できる結果となった。ここで、2つの降伏関数でばらつきに差が生じた理由を考える。図6および7で見られるように応力比 2:1, 1:1, 3:5 では von Mises の降伏曲面は実験結果の外側を通過しており、二軸バルジ試験においてこれらの応力点では von Mises の相当応力が過小評価される。一方で、6次多項式降伏関数では von Mises に比べて相当応力の計算がより正確になっている。相当応力の計算精度が向上するにしたがいマルテンサイト体積分率が相当応力に対してより一義的関数に近づいているため、引張圧縮で発現するバウシinger効果

を含んだ変形時と同様に、二軸変形においても加工誘起マルテンサイト変態は母相であるオーステナイト相に生じた相当応力誘起であると考えられる。しかし、6次多項式降伏関数を用いた相当応力でマルテンサイト体積分率が予測できる理由は明らかでない。ここでは可能性として一つの仮説を以下に示す。まず、先述した通り SUS304 の加工誘起変態では、変態に要する自由エネルギーを付与するだけでは不十分であり、それに加えて体積膨張を許容するのに十分なオーステナイト相の塑性変形が必要となる。

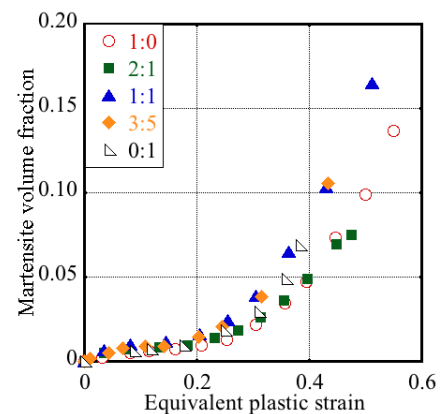


図8 二軸バルジ試験で得られたマルテンサイト体積分率と相当塑性ひずみの関係

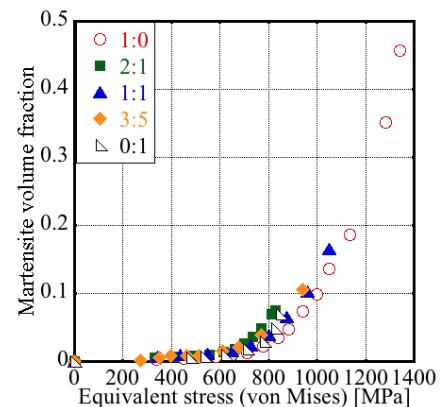


図9 二軸バルジ試験で得られたマルテンサイト体積分率と von Mises の相当応力の関係

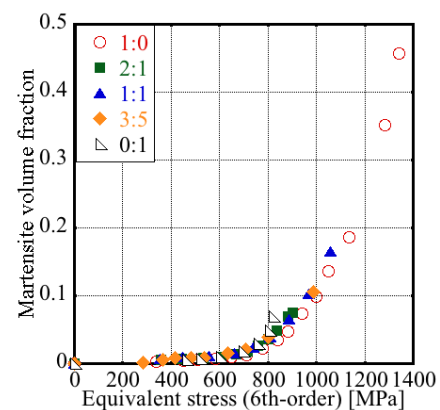


図10 二軸バルジ試験で得られたマルテンサイト体積分率と6次多項式降伏関数の相当応力の関係

ここで、仮に変態に必要なエネルギーよりもオーステナイトの塑性変形に要するエネルギーが大きいとすると、巨視的には変態に必要な応力よりもオーステナイトの塑性変形に要する応力が大きいと置き換えることができる。すなわち、6次多項式降伏関数から求まる相当応力によりオーステナイトの塑性ひずみ量が決まるため、応力比に依存せず相当応力とマルテンサイトが良い相関性を示したと考えられる。なお、本二軸バルジ試験では応力が比例経路であるため、6次多項式降伏関数と塑性仕事のつり合いから求まる相当塑性ひずみでも同様の結果が得られる。しかし、先行研究では応力反転時のバウシinger効果が生じる領域では、塑性ひずみが進行しても低応力の区間ではマルテンサイトが生成しないという結果が得られており、そのため、経路変化を考えればマルテンサイト発展則を相当塑性ひずみの関数とすることは適切でない。

続いて、図 11 に 333K の二軸バルジ試験から得られたマルテンサイト体積分率と 6 次多項式降伏関数で計算された相当応力の関係を示す。なお、本温度はマルテンサイト変態の生じない温度と想定しており、これらの結果からその目標が達成できていることが確認された。よって、333K での試験結果はオーステナイト単相の特性であると言える。ここで、SUS304 の応力 - ひずみ構成則を使用するにあたり、その材料パラメータを決定する材料試験の選定で重要な知見が得られる。すなわち、SUS304 については、①室温で二軸試験を実施して等塑性仕事面形状を観察 ②マルテンサイト変態を生じない温度（本供試材では 333K）で単軸引張試験を実施して加工硬化特性を観察 ③室温からマルテンサイト変態を生じない温度の間のいくつかの温度で単軸引張試験を実施し、応力とマルテンサイト量の関係およびその温度依存性を観察。これにより、SUS304 の加工硬化およびマルテンサイト体積分率の応力と温度依存性が網羅できることになる。特に、温間での単軸引張試験は容易であるが、二軸試験では試験片が大きくなり温度制御が困難である。また、温間試験は常温試験に比べて手間や時間がかかるため、温間二軸試験を排除できるとの知見は実用上大変有意義である。

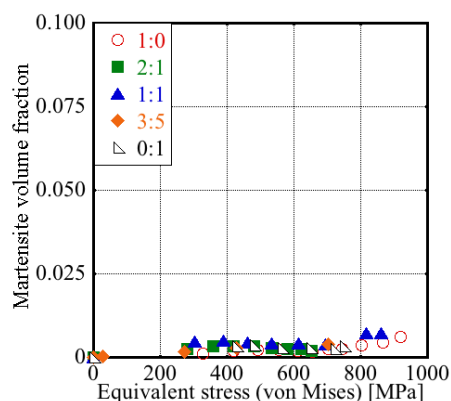


図 11 333K の試験で得られたマルテンサイト体積分率と 6 次多項式降伏関数の相当応力の関係

4. まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼の薄板の二軸変形における加工硬化特性およびマルテンサイト体積分率の測定を目的とし、管材を試験片とした二軸バルジ試験を実施した。本実験により得られた知見を以下に示す。

- ・ 軸力を付与した二軸バルジ試験においてひずみ測定部では均一変形していることを確認した。
- ・ SUS304 材はその等塑性仕事面形状に顕著な面内異方性を示すことが明らかとなった。また、その形状は von Mises および Hill48 降伏関数では予測できず、6次降伏関数のような高精度降伏関数が必要であることを示した。
- ・ 二軸変形中のマルテンサイト体積分率は相当塑性ひずみと静水圧応力では予測不可能なことを示した。一方で、6次多項式区副関数の相当応力とは良い相関性を示しており、これにより、加工誘起マルテンサイト変態は相当応力にて表現できることを示した。
- ・ 293 および 333K の等塑性仕事面形状はほぼ一致しており、これにより小さなひずみ域では室温の二軸バルジ試験でオーステナイト相の等塑性仕事面と異方性降伏関数の材料パラメータ同定が可能であることを示した。この結果はパラメータ決定に必要な材料試験から、面倒な温間二軸試験を排除できることを示している。

謝 辞

本研究の遂行にあたり公益財団法人天田財団 2021 年度一般研究開発助成 (AF-2021028-B3)を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田村今男：鉄と鋼，56-7（1970），429.
- 2) 野原清彦・小野寛・大橋延夫：塑性と加工，18-202（1977），938.
- 3) 富田佳宏・原田陽雄・岩本剛：日本機械学会論文集，60（1994），166.
- 4) 鈴木聡：塑性と加工，46-530（2005），200.
- 5) 杉山隆司：塑性と加工，51-598（2010），1033.
- 6) 吉田総仁：弾塑性力学の基礎，（1997），共立出版.
- 7) 萩原巖・酒井昌宏・富岡由夫：北海道大学工学部研究報告，（1968）.
- 8) R.G. Stringfellow, D.M. Parks, G.B. Olson: Acta Metall. Mater., 40（1992），1703.
- 9) H. Hamasaki, T. Ohno, T. Nakano, E. Ishimaru: Int. J. Mech. Sci., 146-147（2018），536.
- 10) 桑原利彦：天田金属加工機械技術振興財団研究概要報告書，16（2004），106.
- 11) F. Yoshida, H. Hamasaki, T. Uemori: Int. J. Plast., 45（2013），119.