

階層的検討による高強度鋼板の成形性向上条件の定量化

兵庫県立大学大学院 工学研究科 材料・放射光工学専攻
准教授 土田 紀之

(2018年度 一般研究開発助成 AF-2018031-B3)

キーワード：TRIP 鋼, r 値, 中性子回折実験

1. 研究の目的と背景

製品の高性能化, 高寿命化のために, 高強度鋼を用いることは鉄鋼材料開発における重要課題である. 自動車等に用いられる高強度鋼板に関して言えば, 高強度に加えて優れた成形性が求められるが, 一般には高強度になると成形性は低下する. このため, これまでに高強度鋼板の成形性向上に関する様々な研究が行われてきた¹⁾.

成形性評価としては, 穴広げ試験や引張試験といったマクロな観点からの機械的試験結果とミクロな組織観察結果との関係を結びつける研究が多い. 機械的試験結果に関しては, 例えば, 穴広げ率と全伸び(いずれも機械的特性)は必ずしも相関があるとは言えず, 成形性に関する理解を深めるためには, マクロとミクロの中間のメゾオーダーでの実験データが重要な役割を果たす^{2,3)}.

以上より, 本研究では高強度と優れた成形性の実現に関する課題克服のための手段として, 成形性評価の階層的検討を目指した. 材料として, 高強度鋼板である TRIP 型複合組織鋼 (TRIP 鋼) に注目し, 引張試験から機械的特性とランクフォード値 (r 値) の異方性を調査し, 伸びフランジ性を評価する穴広げ試験を行った. また, マクロとミクロの中間であるメゾオーダーのデータとして, 中性子線利用による引張変形中や成形加工時の残留応力測定を行い, 構成相や結晶粒単位の変形挙動と加工誘起変態挙動の解析を行った. これらのデータより, TRIP 鋼の r 値や穴広げ率について検討を行った. また, 組織解析を利用した成形性評価の試みとして, DIC (デジタル画像相関) 法⁴⁾を用いて, 引張変形を加えた試料におけるミクロレベルでのひずみ分布解析を行い, r 値の評価を行った.

2. 実験方法

2・1 引張試験および穴広げ試験

本研究では, 0.2%C 鋼より作製した TRIP 鋼 (0.2C TRIP 鋼) を用いた^{3,5)}. フェライト, バイナイト, 残留オーステナイトからなる複合組織鋼である. これまでに, 引張変形中に加工誘起変態した加工誘起マルテンサイト (α') 相の強度解析^{3,5)}を明らかにしている. 最近では, 本課題と平行して, 引張変形中に試験温度を変化させることで均一伸びの向上を目指し, その時の加工誘起変態挙動と各構成相の変形挙動を明らかにした研究成果³⁾を報告している.

この 0.2C TRIP 鋼より, 圧延方向に対して 0, 45, 90° 方向に引張試験片を作製した. 試験片形状は, 平行部幅 5 mm, 平行部長さ 25 mm の平板試験片である. この試験片を用

いて, ギア駆動式引張試験機により, 296 K, ひずみ速度 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の条件で引張試験を行った. また, ひずみ 15%を加えた後, 引張試験を中断し, 試験片の幅と伸びの変化から r 値を測定した.

さらに, 穴広げ試験は, 90 mm × 90 mm の試験片を準備し, 中央部に穴径 10 mm の打ち抜き穴をクリアランス = 12.5% の条件で開けた. 試験片はダイとしわ押えの間に荷重 50 kN で固定した. 次に打ち抜きパンチと同じ方向から頂角 60 度の円錐パンチを押し込み, 端面上のき裂が板厚方向に貫通したことを目視で確認した時の穴径拡大率を測定し, 穴広げ率とした. 穴広げ率は $N=5$ の平均値とした. 穴広げ試験後の割れは, デジタルマイクロスコープと SEM を用いて観察を行った.

2・2 中性子回折実験

中性子回折実験は, 日本原子力研究開発機構の大強度陽子加速器施設 (J-PARC), 物質・生命科学施設 (MLF) にある, 工学材料回折装置 TAKUMI を使用した^{3,5)}. 本装置は, 白色パルス中性子を用いた飛行時間型中性子回折装置である. 引張試験中のその場中性子回折実験では, 平行部幅 4 mm, 平行部長さ 25 mm, 厚さ 1.8 mm の引張試験片を準備し, 弾性変形領域ではひずみ速度 $6.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 塑性変形域では $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ にて引張試験を行った. TAKUMI には一対の 90 度散乱検出器バンクを完備しており, 入射ビームに対して 45 度方向を引張軸にすることで, 引張方向に垂直な面と平行な面の面間隔を同時に測定した.

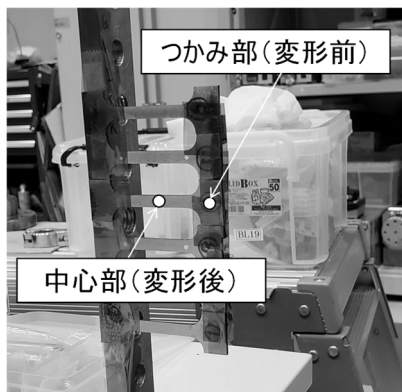
各ピークの解析結果より, 格子ひずみ (ϵ_{hkl}) は以下の式を用いて計算した.

$$\epsilon_{hkl} = (d_{hkl} - d_{hkl}^0) / d_{hkl}^0 \quad (1)$$

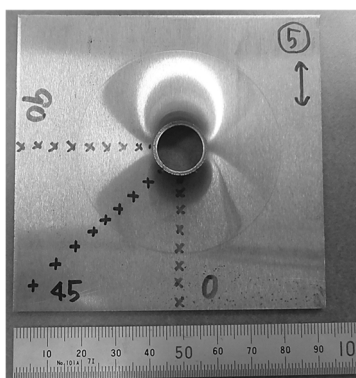
ここで, d_{hkl} は引張変形中の回折パターンから得られた格子面間隔, d_{hkl}^0 は変形前の格子面間隔である. オーステナイト (γ) とフェライト (α) 相の d_{hkl}^0 は, 変形前のそれぞれの格子面間隔を用いた. また, α' については, 格子定数と原子密度の関係式から求めるやり方^{5,6)}や, 各相の体積率と相応力との関係式から求める方法⁷⁾を用いることで, α' の格子ひずみや相ひずみの計算を行った.

中性子回折実験は, 引張試験中のその場回折実験に加えて, r 値測定後のひずみ 15%を加えた試験片についても行った. ここでは, 試験片のつかみ部と平行部中心に中性子線を当て (図 1 (a)), つかみ部のデータを変形前のデータとして扱った. それぞれのピーク解析結果から, 引張方向,

幅方向と厚さ方向について各相の残留相ひずみを算出した。さらに、穴広げ試験後の試験片についても実験を行った。ここでは、図1(b)に示すように、穴広げ試験後の試験片を用いて、試験片の穴縁から圧延方向に対して0, 45, 90°方向に中性子線を当て、各場所におけるプロファイルを測定した。試験片の一番端のデータを変形前として扱うことで、各相の残留応力や α' 体積率を計算した。ここでも圧延方向に対する軸方向、幅方向と厚さ方向についてのデータを解析した。



(a) r 値測定試料



(b) 穴広げ試験

図1 中性子回折実験の説明：(a) r 値測定後の試験片を用いた実験、(b) 穴広げ試験後の試験片を用いた実験

2・3 DIC法によるひずみ解析とr値測定

r 値をマイクロ観察結果から測定するため、DIC (Digital Image Correlation; デジタル画像相関法) 法⁴⁾を用いた。DIC法とは、物体表面に描かれた変形前後のランダムパターンをデジタル画像として取得し、これを比較することで観察箇所の各所における変位やひずみを測定する手法である。本実験では、まず単一の組織からなる単相材にて実施することが好ましいと考え、市販の冷間圧延鋼板を用いた。2・1と同じく圧延方向に対して0, 45, 90°方向に引張試験片を作製し、試験片表面を機械研磨、バフ研磨後にナイターでエッチングし、圧痕を打った。この圧痕を目印とし、引張試験前とひずみ10%を加えた後に除荷した状態について、同じ箇所を光学顕微鏡で撮影した。引張変形前後の

同一視野の顕微鏡写真と、DIC法解析用ソフトウェアを用いて、引張方向と幅方向のひずみを解析した。各方向のひずみは、任意に選んだ30点以上の平均値を用いることで、r 値を算出した。

3. 結果と考察

3・1 引張変形とr値の異方性

表1に、引張試験で得られた機械的特性を示す。引張強さが約800 MPaの高強度鋼板であり、機械的特性の異方性は小さく、強度差は約20 MPa、伸びの差は2~3%であった。また、r 値は45°方向の値が最も小さく、0, 90°方向はほぼ同じ値を示した。各方向のr 値より求めた板厚異方性は0.826、面内異方性は0.254であった。

表1 機械的特性の異方性

	YS (MPa)	TS (MPa)	U.El (%)	T.El (%)	r 値
0°	411	762	24.7	32.7	0.946
45°	453	751	22.6	30.0	0.699
90°	420	740	24.0	32.6	0.959

YS: 降伏強さ, TS: 引張強さ, U.El: 均一伸び, T.El: 全伸び

図2に、その場中性子回折実験で得られた、圧延方向に0, 45°方向から引っ張った時の α , γ , α' 相の相ひずみを示す。図3には、この時の真ひずみに対する α' 体積率(加工誘起変態挙動)を整理した。相ひずみは α' , γ , α 相の順に大きく、 α' の相ひずみに引張方向による違いが見られた。また、図3の加工誘起変態挙動も引張方向による違いが明確であり、ひずみ15%までは90°方向の α' 体積率が多く、45°方向は最も α' 体積率が少なかった。表1に示したr 値の異方性を α' 体積率から考えると、r 値を求めたひずみ15%での α' 体積率は0, 90°方向はほぼ同じであったのに対して、45°方向の α' 体積率は少ないことがわかった。よって、r 値の大きさに α' 体積率が影響していると考えられ、 γ から α' への加工誘起変態量が多いほど優れたr 値が得られると推察される。

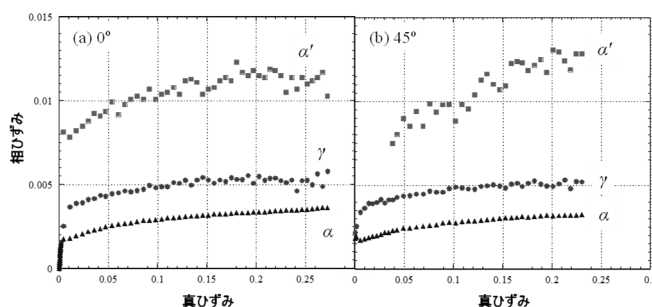


図2 引張変形中のその場中性子回折実験で得られた、真ひずみに対する α , γ , α' 相の相ひずみ((a)0°, (b)45°)。

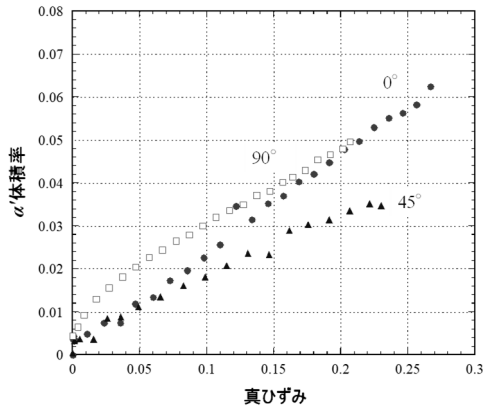


図3 圧延方向に対して0, 45, 90°方向から引張試験した時の真ひずみに対する α' 体積率

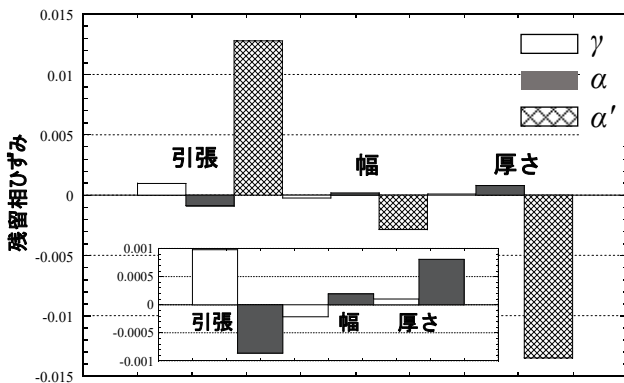


図4 ひずみ15%加えた試験片の残留相ひずみ(0°方向). 図下には、 γ と α の結果のみを拡大して示した.

図4には、圧延方向に対して0°方向に加工した試験片を用いて、 r 値を求めるためにひずみを15%加えてから除荷した際の各相の残留相ひずみを示す。引張方向は γ と α' が引張で α は圧縮の残留相ひずみを示し、幅方向は反対に γ と α' が圧縮で α が引張、厚さ方向は γ と α が引張で α' のみが圧縮の残留相ひずみを示した。これは、45, 90°方向の試験片についても同様の結果であった。またこの時、プロフィール解析結果から引張、幅、厚さ方向の加工誘起変態による α' 体積率を求めた。その結果、引張、幅、厚さ方向で α' 体積率には違いが見られた。 r 値と関係する幅方向と厚さ方向のひずみと α' 体積率の関係を調査したところ、 α' 体積率が多いとひずみ量は大きい、という傾向が示された。例えば、 r 値が一番小さかった45°方向の結果では、引張、幅、厚さ方向に対する α' 体積率に差があり、厚さ方向よりも幅方向の α' 体積率が小さかった。よって、厚さ方向のひずみが幅方向のそれよりも大きく、 r 値が小さいという結果に繋がったと考えられる。以上のことから、TRIP鋼の機械的特性の異方性を考える時も、加工変態挙動が重要であることがわかった。つまり、 γ が α' に変態することでその方向に対する変形量(ひずみ量)は大きくなることが推察され、各方向の加工誘起変態挙動と変形挙動のバランスによって機械的特性の異方性が決まると考えられる。

3・2 TRIP鋼の穴広げ試験

本研究で用いた0.2C TRIP鋼の穴広げ率は37%であった。様々な鉄鋼材料の強度と穴広げ率の関係^{8,9)}から考えると、0.2C TRIP鋼の穴広げ率はその強度に対して妥当な値であることを確認した。図5には、穴広げ試験後の試験片写真を示す。写真の上下方向が圧延方向と一致するが、今回5回行ったすべての試験において、圧延方向に対して45°の穴縁に割れが発生した(図における矢印)。また、割れが観察された場所の厚さは、他よりも薄いことも確認した。表1に示したように、均一伸びの一番小さい45°方向で割れが発生したことは、穴広げ率と加工硬化指数(n 値)に比較的良好な相関があるという結果^{8,9)}と一致する。図6には、図5(b)に示した割れの箇所をSEMで観察した写真である。図5よりも高倍で観察したところ、厚さ方向に貫通した割れの周辺に細かなクラックがジグザグに進展していた⁹⁾。

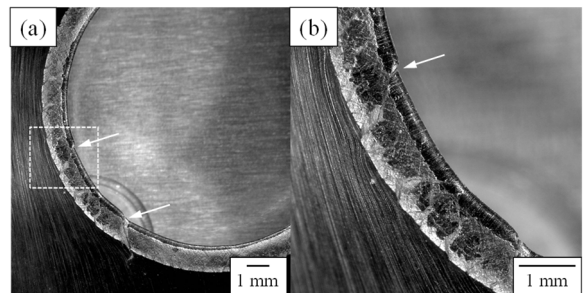


図5 穴広げ試験後の低倍写真(矢印は割れ)

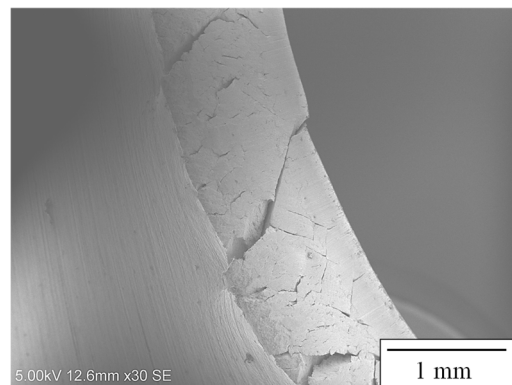


図6 穴広げ試験後のSEM写真(図5(b)と同じ箇所を拡大)

図7には穴広げ試験後の試験片を用いて、圧延方向に対して0, 45°方向に中性子線を照射し、軸方向、幅方向、厚さ方向の γ と α の残留応力を穴縁からの距離に対して整理した。各位置における α' 体積率を計算したところ、穴縁以外ではほぼ加工誘起変態していないことがわかった。軸方向と幅方向の γ と α の残留応力はいずれも圧縮であり、一方で、厚さ方向の残留応力は引張であった。この時、軸方向と幅方向の圧縮残留応力と厚さ方向の引張残留応力は0°方向の方が大きかった。図5, 6で示したように、穴広げ試験では圧延方向に対して45°方向の穴縁に割れ

が観察されたことを考えると、特に厚さ方向の残留応力の大きさと厚さの変化に関係性があることが推察される。

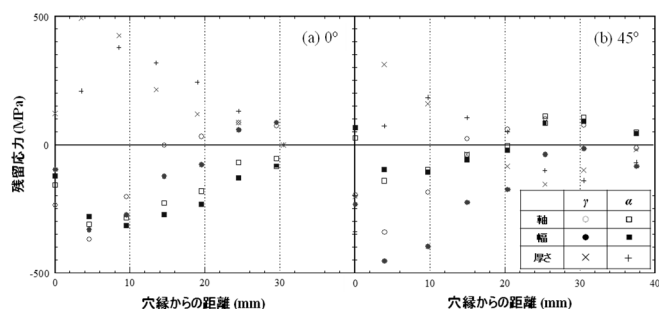


図7 穴広げ試験後の穴縁からの距離に対する γ と α 相の残留応力 ((a)0°, (b)45°)

3・3 DIC法を利用した冷間圧延鋼板のr値測定

図8にひずみ10%を加えた試験片表面の光学顕微鏡写真とDICによるひずみ分布解析結果を示す。(図は白黒なのでわかりにくい)フェライト単一組織であっても、場所によってひずみの大きさが異なることがわかった。例えば、引張方向のひずみの場合、与えたひずみが10%に対して、最大ひずみは13%、最小値は7.6%と、5%近い差が見られた。また、ひずみの値が大きな場所は、すべり帯や粒界付近が多く、ひずみの小さかった領域は微細な結晶粒が多いことなどがわかった。図8のひずみ解析結果からは、任意の場所におけるひずみ量を示すことができる。よって、解析結果からランダムに選んだ30点以上のひずみ量を平均して、引張方向(ϵ_l)と幅方向(ϵ_w)のひずみを算出し、以下の式を用いてr値を求めた。

$$r = \epsilon_w / -(\epsilon_w + \epsilon_l) \quad (2)$$

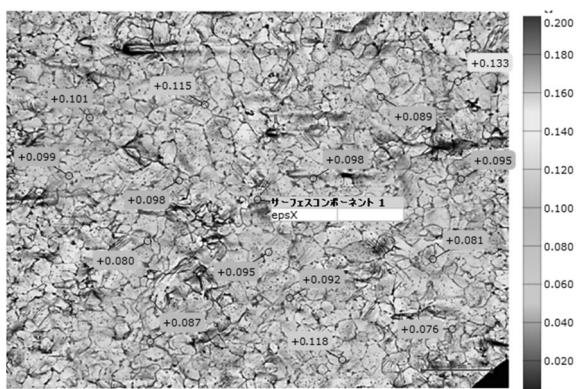


図8 DIC法によるひずみ解析結果(図中の値は ϵ_l)

表2 冷間圧延鋼板のr値

引張方向	r (引張試験)	r (DIC法)
0°	1.61	1.66
45°	1.17	1.12
90°	1.65	1.66

表2には、引張試験とDIC法から求めたr値を比較した。各引張方向に対するr値はどちらの結果もほぼ同じ値を

示したことから、DIC法はr値の算出においても有効であることがわかった。引張試験片に与えるひずみ量が10%以上になると、表面の凹凸が激しくなることで、ひずみ解析が困難になる⁴⁾。よって、今回のようなひずみ10%を加えた試験片のr値解析にはDIC法は利用可能だと言える。

4. まとめ

本研究では、0.2C鋼より作製したTRIP鋼を用いて、機械的特性の異方性を調査し、穴広げ試験を行った。これらは、構成相の変形挙動と γ の加工誘起変態挙動の観点より考察を行った。得られた主な結論は、以下の通りである。

- 1) 機械的特性の異方性を調査した結果、45°方向の伸びとr値が他よりも小さい値を示した。これは加工誘起変態による α' 体積率が影響していることがわかった。
- 2) 0.2C TRIP鋼の穴広げ率は37%であり、穴縁周辺以外では加工誘起変態していないことがわかった。 γ と α の残留応力を計算したところ、厚さ方向の残留応力の大きさと厚さの変化に関係性があることが示された。
- 3) ひずみ10%を加えた冷間圧延鋼板の光学顕微鏡写真を用いて、DIC法によりr値を求めた。得られた結果は、引張試験から求めたr値と一致した。DIC法では、変形した組織とひずみ量の間関係を把握できる利点があり、r値の解析方法として有効であることがわかった。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団の2018年度一般研究開発助成(AF-2018031-B3)を受けて行ったものである。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) K. Hasegawa, K. Kawamura, T. Urabe and Y. Hosoya: *ISIJ Int.*, 44 (2004), 603.
- 2) 鈴木裕士: 表面と真空, 53 (2010), 713.
- 3) N. Tsuchida and S. Harjo: *Metals*, 11 (2021), 2053.
- 4) 中田伸生・西山真郷・古賀紀光・土山聡宏・高木節雄: 鉄と鋼, 100 (2014), 1238.
- 5) S. Harjo, N. Tsuchida, J. Abe and W. Gong: *Sci. Rep.*, 7 (2017), 15149.
- 6) H.N. Han and D.-W. Suh: *Acta Mater.* 51 (2003), 4907.
- 7) T. Yamashita, S. Morooka, S. Harjo, T. Kawasaki, N. Koga, O. Umezawa: *Scripta Mater.*, 117 (2020), 6.
- 8) 船川義正: 特殊鋼, 66-3 (2017), 9.
- 9) X. Chena, H. Jianga, Z. Cuia, C. Liana, C. Lu: *Proc. Eng.*, 81 (2014), 718.
- 10) C. Chiriac and D.P. Hoydick: *AIST Conference Proceedings*, (2013), 55.
- 11) B.M. Hance and T.M. Link: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 651 (2019), 012061.
- 12) P. Larour, J. Freudenthaler, M. Kerschbaum, D. Dolzer: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 967 (2020), 012080