



私の論文

今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

その場中性子回折実験による 高強度TRIP鋼の引張変形挙動解析*

Analysis of Tensile Deformation Behavior by *in situ* Neutron Diffraction
Experiments of High-Strength TRIP Steels

土田紀之

Noriyuki Tsuchida

兵庫県立大学
大学院工学研究科
准教授

1 はじめに

今回、第83回俵論文賞を受賞させていただいた拙著「その場中性子回折実験による1GPa級高延性TRIP鋼の引張変形挙動解析」¹⁾について、論文執筆に至る経緯等を紹介する機会をいただいた。このような荣誉ある論文賞をいただけたことに対して、研究のきっかけを与えていただき、実験データについて深く議論させていただいた共同執筆者の田路勇樹様、田中孝明様をはじめ、本論文完成までにご協力いただいたすべての皆様方に心より感謝申し上げます。

本稿では、本研究の背景と概要、今後の課題について述べさせていただきます。

2 本研究に至るまで

本研究で取り上げたTRIP (Transformation-induced plasticity) 効果とは、材料に含まれる準安定オーステナイトが変形中にマルテンサイトに加工誘起変態することで、延性と強度が向上する強化機構である。1950年代の報告²⁾から現在においても、鉄鋼材料に限らずTRIP効果に関する多くの研究が展開されている。著者のTRIP効果に関する研究は、応力-ひずみ曲線の計算³⁾からスタートした。当時、マイクロメカニクス的手法であるセカント法⁴⁾を用いて、複合組織鋼の応力-ひずみ曲線の計算に関する研究を行っていた⁵⁾。セカント法では、構成組織の応力-ひずみ曲線と体積率が入力データとして必要であり、体積率の変化をひずみの関数とし

て入れることで、TRIP効果を計算に考慮した。この計算モデルを用いて、3種類のTRIP鋼の計算を行い、TRIP効果によぼすオーステナイト体積率や加工誘起変態挙動の影響等について議論した。その後、準安定オーステナイト鋼や二相ステンレス鋼、TRIP型複合組織鋼を用いて、試験温度とひずみ速度を変え引張試験を行い、機械的特性およびTRIP効果と加工誘起変態挙動の関係等について検討を行った⁶⁻⁹⁾。

セカント法の計算では、構成組織の応力-ひずみ曲線データが必要であるが、これは中性子線を利用した実験から解析が可能である。この点はその場中性子回折実験の大きな武器と言える。例えば、TRIP型複合組織鋼における残留オーステナイトの強度はフェライト相よりも大きいことなど、大変興味深い結果¹⁰⁻¹²⁾が報告されている。この時、加工誘起マルテンサイトの強度解析に課題が残されていたが、最近では、マルチピークフィッティング法や原子密度式を用いた推算等を組み合わせることにより、その解析が可能となった¹³⁻¹⁵⁾。

つまり、著者がTRIP効果の研究を始めて20年ほど経った頃には研究手法が格段に進歩し、TRIP鋼の引張変形挙動を各構成相の変形挙動から、実験と計算より、詳細に議論できる環境になった。このような時期に、高強度TRIP鋼の研究を行う好機を得た。

3 本研究の概要

本研究では、車体軽量化の観点より引張強さが1~1.5 GPa級の高強度自動車用鋼板の開発が進められていることを背

* [今回の対象論文]

土田紀之, 田中孝明, 田路勇樹: 「その場中性子回折実験による1GPa級高延性TRIP鋼の引張変形挙動解析」, 鉄と鋼, Vol.105 (2019), No.9, pp.918-926 (第83回俵論文賞受賞)

景として、残留オーステナイト (γ_R) 形状と母相組織の異なる引張強さ 1 GPa 級の 2 種類の高強度 TRIP 鋼に注目した (以降、 γ_R 形状の違いから、これらを針状 γ_R 鋼、塊状 γ_R 鋼と呼ぶこととする)。これらの引張変形挙動を比較した結果、引張強さはいずれも約 1 GPa であったにも関わらず、針状 γ_R 鋼は 10^{-3} s^{-1} 以下の低ひずみ速度域で優れた均一伸びを示した¹⁶⁾。針状 γ_R 鋼が 1 GPa 級の高強度を示しながら、優れた均一伸びを示した理由について考えると、第一にマクロな応力-ひずみ関係からは高ひずみ域においても大きな加工硬化率を維持できたことが、針状 γ_R 鋼の優れた均一伸びに繋がったと説明できる。この針状 γ_R 鋼の優れた均一伸びの理由を詳細に調査するために、中性子線による引張変形中のその場回折実験を行った。

引張変形中のその場中性子回折実験は、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。得られた実験データより、各 TRIP 鋼におけるフェライト (α)、オーステナイト (γ) と加工誘起マルテンサイト (α') 相のピーク解析を行った。ここで、 α' のピーク解析については、過去の論文を参考にマルチピークフィッティング法により解析を行った^{13,14)}。さらに、各結晶粒の格子ひずみの計算に必要な変形前の格子面間隔 (d_{hkl}^0) について、 α' は変形前のデータが存在しないため、 γ と α' の格子定数と原子密度の関係式から α' の格子定数を計算し、これより α' の d_{hkl}^0 を推算した^{13,17)}。

その場中性子回折実験の解析結果から得られた重要な点として、 γ_R の加工誘起変態挙動と構成相 (α , γ , α') の相ひずみの変化があげられる。 γ_R の加工誘起変態挙動は、針状 γ_R 鋼、塊状 γ_R 鋼ともに真応力と加工誘起 α' 体積率は直線関係で整理でき、針状 γ_R 鋼は塊状 γ_R 鋼よりも γ_R の加工安定性が高く、真応力に対する変態量が大きかった (Fig.1)。つまり、針状 γ_R 鋼は塊状 γ_R 鋼と比べて高応力域まで多くの γ_R が残っており、かつ、 α' への変態量が大きかったと言える。このような針状 γ_R 鋼の加工誘起変態挙動は、従来より言われてきた優れた TRIP 効果を示す加工誘起変態挙動の条件^{2,3,10)} と一致した。これらのことから、加工誘起変態挙動の観点より針状 γ_R 鋼の優れた均一伸びについて考えると、 γ_R の加工安定性が高く、高応力または高ひずみ域での α' への変態量が大きかったことが、針状 γ_R 鋼の TRIP 効果による均一伸びの向上には有効であったと考えられる。

また、 α , γ , α' の格子ひずみと相ひずみを比較したところ、 α' の格子ひずみと相ひずみは針状、塊状 γ_R 鋼で大きな違いはなかった。針状と塊状 γ_R 鋼に違いが見られたのは、 γ の相ひずみと γ と α の相ひずみ差の 2 点についてであった (Fig.2)。針状 γ_R 鋼の γ の相ひずみは、降伏強さ付近では塊

状 γ_R 鋼よりも値は小さかったものの、真応力が 800 MPa 以上でも大きな値を示し、増加の傾きも大きかった。 γ と α の相ひずみ差に関しても、降伏強さ付近では塊状 γ_R 鋼の方が大きかったが、真応力 800 MPa 以上では針状 γ_R 鋼が大きいといった違いが見られた。TRIP 鋼の場合、一般的に α よりも γ の相ひずみが大きく、引張変形時の相ひずみの変化は、 α の相ひずみの増加が停滞し、 γ の増加が大きくなる。これは、 α が先に塑性変形したことで応力負担が減り γ に応力が分配されることを意味する¹⁰⁻¹³⁾。このような α と γ の相ひずみ差については、塊状 γ_R 鋼の方が降伏強さにおける相ひずみ差が大きく、真応力が 600 MPa を超えると γ の相ひずみの増加が停滞した。これは、 γ が塑性変形を開始したことを示している。一方で、針状 γ_R 鋼の場合、降伏強さにおける相ひずみ差は塊状 γ_R 鋼よりも小さいが、 γ の相ひずみは約 1,200 MPa まで増加し続けた。つまり、針状 γ_R 鋼と塊状 γ_R 鋼では、 γ の相ひずみの挙動に違いが見られ、この違いが降伏直後と 800 MPa 以上での α と γ の相ひずみ差の変化にも関係していた。相ひずみ差が大きいことは加工硬化が大きいことに繋がるが、加工硬化は降伏直後から大きい必要はない。針状 γ_R 鋼の γ の相ひずみと相ひずみ差が、真応力 800 MPa 以上で大きいということは、加工硬化の大きさに加えて、その応力域での加工誘起変態が活発であることにも繋がる。これは、TRIP 効果としてはプラスに働き、Fig.1 に示すように真応力に対する変態量は針状 γ_R 鋼の方が大きかったと考えられる。つまり、加工硬化 (率) を考える上で高応力域で相ひずみ差や γ の相ひずみが大きいことは、相間の不均一度が大きくなる

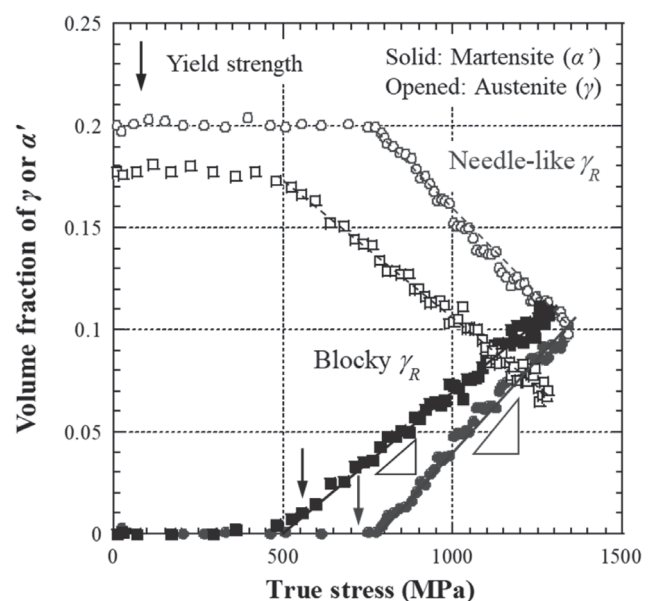


Fig.1 Volume fractions of retained austenite (γ) and deformation-induced martensite (α') as functions of true stress in the 1 GPa-grade TRIP steels with γ_R shapes.

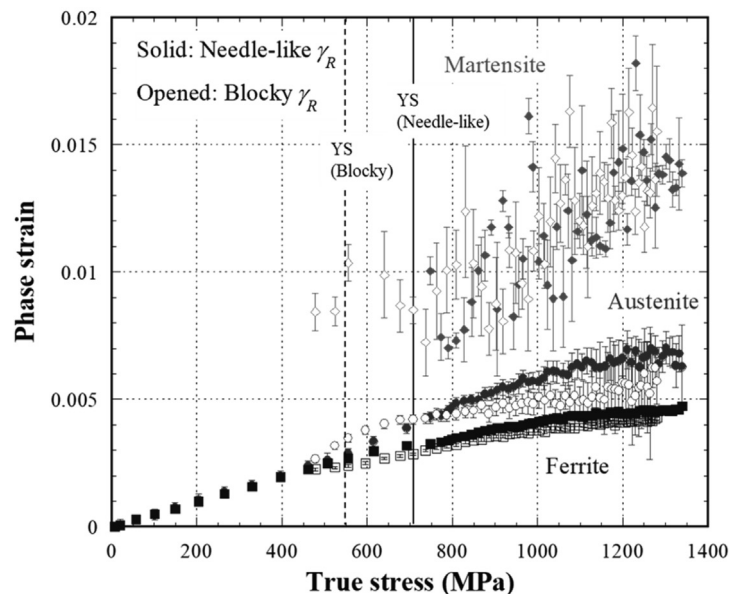


Fig.2 Phase strains for austenite, ferrite and martensite phases during tensile deformation of the 1 GPa-grade TRIP steels with γ_R shapes.

ことに加えて、加工誘起変態が起こりやすくなり、TRIP効果に有効に寄与したと考えられる。 γ_R の加工安定性を考える上で、 γ_R にかかる応力と相ひずみ差は小さい方が望ましい。 γ と α の相ひずみ差を考える上で、母相組織である α の相ひずみは重要であり、針状 γ_R 鋼の場合、母相組織が焼きなましマルテンサイトであったことは、 α の相ひずみを大きくする点において、相ひずみ差からの考えと関係する重要な要因であったと考えられる。

以上より、① γ と α の相ひずみ差は、降伏直後は小さく、変形とともに増加すること、② γ の相ひずみは、降伏後から高応力・高ひずみ域まで増加し続けること、の2点は、高強度TRIP鋼がTRIP効果により優れた延性を得るための重要な指針であるとまとめられる。

4 鉄鋼材料のTRIP効果に関する今後の展望

最後に、本研究を通じて、今後取り組むべきと考える課題について記しておきたい。まず、加工誘起変態挙動におよぼす γ_R 形状の影響についてである。当初、針状、塊状と γ_R 形状の違いが加工誘起変態挙動やTRIP効果に影響をおよぼす可能性に注目して、研究を行ったが、その解明には至らなかった。本研究で取り上げた2種類のTRIP鋼の場合、 γ_R 形状とともに母相組織(α 組織)も異なるため、 γ_R 形状の影響のみについて検討することは難しかった。このような検討を行うためには、例えばデジタル画像相関法¹⁸⁾など、組織観察も実験に取り込むなどすることが必要であると考えられる。

中性子回折実験の場合、結晶粒毎の積分強度の変化を追いかけることで、加工誘起変態挙動について議論することが可能である¹⁹⁾。針状 γ_R 鋼と塊状 γ_R 鋼では、 γ 結晶粒による加工誘起変態の起こりやすさに違いはほとんど見られず、また、過去の報告ともおよそ一致したことを確認している。このようなデータを蓄積することで、加工誘起変態そのものについての理解が深まるに違いない。

2点目として、TRIP型複合組織鋼における加工誘起マルテンサイト強度およびその変形挙動をあげる。前述したように、最近の成果として様々なTRIP鋼における加工誘起マルテンサイト強度の定量化が可能となり、TRIP効果の理解に重要な役割を果たしている^{13,15)}。TRIP型複合組織鋼の場合、炭素が γ_R の機械的安定性に重要な役割を果たしており、また加工誘起変態によるマルテンサイト強度も炭素量に支配的であることがよく知られている。これまでに中性子回折実験によって解析または推算した、TRIP型複合組織鋼における加工誘起マルテンサイトの強度や相ひずみを比較すると、その大きさは約2~2.5 GPaの値を示した。TRIP型複合組織鋼における γ_R 中の炭素量はだいたい1 mass%位なので、加工誘起マルテンサイト強度もほぼ同じと考えて良いのかもしれない。そういったことから考えると、TRIP型複合組織鋼のTRIP効果は、加工誘起マルテンサイトの強度よりも加工誘起変態挙動に支配的であるという話に行き着くことになる(かもしれない)。一方で、二相ステンレス鋼や準安定オーステナイト鋼の場合、炭素や窒素の影響により加工誘起マルテンサイト強度が増加する報告がある²⁰⁻²²⁾。加工誘起マルテンサイト強度が大きくなると、加工誘起マルテンサイト体積率

が少なくともTRIP効果により優れた機械的特性が得られることが期待できる²²⁾。加工誘起マルテンサイトの強度解析が可能になった今、加工誘起変態による γ と α' の体積率変化と相間の強度差に基づく議論によって、TRIP効果の理解と新しい発見に繋がっていくことが期待される。

3点目として、(TRIP効果とは直接関係ないかもしれないが) 複相鋼における各相の変形挙動の理解をあげる。複相鋼(複合組織鋼)の引張変形挙動を調査すると、必ずしも構成相と同じ単相(単一組織)材として引っ張った時の変形挙動と一致するわけではなさそうである。これは複相鋼の引張変形挙動における興味深い点とも言えるが、TRIP鋼の場合であればひずみとともに体積率も変化するため、その挙動はさらに複雑になると思われる。これまでの研究では、中性子回折実験による相応力と体積率からひずみ一定モデルを用いて応力を計算すると、マクロな応力の値と一致するという報告や、セカント法に基づく手法でも良い一致が見られている^{13,15,22)}。つまり、相応力がわかれば案外シンプルにマクロな応力-ひずみ関係はわかるのかもしれない。しかしながら、中性子回折実験でわかるメゾレベルよりも小さなミクロ、ナノレベルでの理解が今後必要になってくことを考えると、これらの課題については、その解明の手段など知恵を絞る必要がある。

参考文献

- 1) 土田紀之, 田中孝明, 田路勇樹: 鉄と鋼, 105 (2019), 918.
- 2) T. Angel : J. Iron Steel Inst., 177 (1954), 165.
- 3) N. Tsuchida and Y. Tomota : Mater. Sci. Eng. A, 285 (2000), 345.
- 4) G. J. Weng : J. Mech. Phys. Solids, 38 (1990), 419.
- 5) 土田紀之, 守本芳樹, 岡本尚士, 深浦健三, 原田泰典, 上
路林太郎: 日本金属学会誌, 72 (2008), 769.
- 6) N. Tsuchida, Y. Morimoto, T. Tonan, Y. Shibata,
K. Fukaura and R. Ueji : ISIJ Int., 51 (2011), 124.
- 7) N. Tsuchida, Y. Yamaguchi, Y. Morimoto, T. Tonan,
Y. Takagi and R. Ueji : ISIJ Int., 53 (2013), 1886.
- 8) 土田紀之, 尾崎溪香: 鉄と鋼, 99 (2013), 524.
- 9) 土田紀之, 荒木俊幸, 山口祐子, 深浦健三: 鉄と鋼, 98
(2012), 558.
- 10) Y. Tomota, H. Tokuda, Y. Adachi, M. Wakita, N. Minakawa,
A. Moriai and Y. Morii : Acta Mater., 52 (2004), 5737.
- 11) 成井章記, 陳世昌, 友田陽, 神山崇: 日本機械学会論文集
A, 75 (2009), 501.
- 12) K. Asoo, Y. Tomota, S. Harjo and Y. Okitsu : ISIJ Int., 51
(2011), 145.
- 13) S. Harjo, N. Tsuchida, J. Abe and W. Gong : Scientific
Reports, 7, (2017), Article number: 15149, DOI: 10.1038/
s41598-017-15252-5
- 14) 諸岡聡, 梅澤修, ステファヌス・ハルヨ, 長谷川浩平, 田
路勇樹: 鉄と鋼, 98 (2012), 311.
- 15) T. Yamashita, S. Morooka, S. Harjo, T. Kawasaki,
N. Koga and O. Umezawa : Scr. Mater., 177 (2020), 6.
- 16) 土田紀之, 大倉誠史, 田中孝明, 田路勇樹: 鉄と鋼, 103
(2017), 597.
- 17) A. A. Saleh, E. V. Pereloma, B. Clausen, D. W. Brown,
C. N. Tomé and A. A. Gazder : Acta Mater., 61 (2013),
5247.
- 18) 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.
- 19) S. Harjo, T. Kawasaki, N. Tsuchida, S. Morooka, and W.
Gong : ISIJ Int., 61 (2021), 648.
- 20) 藤澤光幸, 間内良太, 森川龍哉, 田中將己, 東田賢二: 鉄
と鋼, 100 (2014), 1140.
- 21) N. Tsuchida, T. Kawahata, E. Ishimaru and A. Takahashi:
ISIJ Int., 54 (2014), 1971.
- 22) N. Tsuchida, E. Ishimaru and M. Kawa : ISIJ Int., 61
(2021), 556.

(2021年8月30日受付)