



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

探究心

諸岡 聡

Satoshi Morooka

 横浜国立大学 大学院工学研究院
 機能の創生部門
 研究教員

1 はじめに

筆者が所属する金属物理研究室は、金属組織制御と特性に関する研究を通じ、循環型社会システムの構築に資する材料とプロセスの創造を目指しています。金属材料の変形や破壊実験、加工熱処理による組織制御実験、最新分析技術を駆使した解析実験、変形組織のモデリングなどの基礎的な研究を行っており、機能や姿に「美しさ」を見出せるような自らの力で事象の本質にせまる姿勢を身につけることを基本方針としています。特に、筆者が力を注いでいる分野は、金属材料を対象とした変形や破壊実験と最新分析技術を駆使した解析実験のハイブリット分析技術の確立です。ここに、研究の一端を紹介します。

材料のマイクロ組織を定量化し機械的特性との関係を議論する際、材料試験で用いる試験片と同サイズの試料を対象にして定量測定することが望ましく、中性子回折法を利用することでそれが実現できます。実用鋼材の多くは複合組織を呈するため、不均一変形により結晶粒間および構成相間には塑性変位の不整合が生じ、内部応力（荷重除荷時は残留応力）が与えられます。多結晶材料中の内部応力は、その存在する領域の大きさによって3種類の応力に分類されます^{1,2)}。第1種応力はマクロ応力と称される工業的な応力で、多くの結晶粒の平均応力（複合材料の場合、すべての構成相にわたる平均応力）です。次に、1結晶粒程度の領域での変動成分を第2種応力と称されます。この応力は、結晶粒程度の組織の不均一から生じる応力であり、結晶方位あるいは弾性定数などの不均一により生じます。第3種応力は、結晶粒内のさらに小さな領域での変動成分であり、転位などの格子欠陥などに起因する応力です。以上の第2種応力と第3種応力はマイクロ応力と称されます。中性子線は、電荷がなく、核外の電子と静電的相互作用をせずに原子核との核力によって核散乱し、線吸収係数（単位体積当たりの全断面積）が充分小さいため、高

い透過率が得られます。この特性を利用することで、変形中のマイクロ応力をその場測定によって取得可能です。

近年、J-PARC（日本原子力研究開発機構・日本）やSNS（オークリッジ国立研究所・米国）に大強度陽子加速器施設が建設され、従来ISIS（ラザフォード・アプルトン研究所・英国）の約10倍のビーム強度を有する核破碎型パルス中性子源が使用できるようになりました。このビーム強度の上昇が、今まで見ていた世界を一変させる力があると考えています。本稿では、J-PARCの工学回折装置「匠」³⁾を使用し、200kW運転（最終到達予定：1MW）で得られた結果を紹介します。

2 2相鋼の加工硬化挙動に及ぼす内部応力の影響

DP鋼の高強度化には様々な手法があるが、鋼板の成形に必要な延性や加工性との両立を図ることが必要です^{4,5)}。軟質なフェライトと硬質なマルテンサイトからなるDual-phase鋼（以下DP鋼）はその加工硬化能が大きく、高強度と高延性を両立した代表的な複合組織鋼です。DP鋼における加工硬化挙動の理解は、複合組織鋼における高強度化と加工硬化特性との関係を明らかにする上で重要です。本研究では、パルス中性子線を用いてDP鋼の引張変形挙動を定量的に解析します。特に、フェライトとマルテンサイト間の塑性変位の不整合によって生じる軟質相内の平均内部応力（逆応力）に注目し、加工硬化挙動との関係を以下に議論します。低炭素鋼を供試材として、平衡状態でのマルテンサイト相分率がそれぞれ25%、75%としたとき、マルテンサイト中の炭素濃度が約0.3mass%となるように成分を調整し、それぞれ25-DP、75-DPと称します。図1はそれぞれ25-DP、75-DPについて真応力－真ひずみ曲線と加工硬化率（ $d\sigma/d\varepsilon$ ）の関係を示します。引張強度は25-DP < 75-DPの関係となります。その一

方で、均一伸びは25-DP>75-DPの関係となります。すなわち、塑性不安定領域が高ひずみ領域に存在することを意味しています。初期の加工硬化率（真ひずみ $\epsilon_t=2.0\%$ 前後）は、マルテンサイト相分率が高い程、大きい。すなわち、25-DP<75-DPの関係となります。高ひずみ領域に移行するに従い（ $\epsilon_t=5.0\%$ 前後）、マルテンサイト相分率が低い程、加工硬化率は大きくなります。すなわち、25-DP>75-DPの関係となります。つまり、マルテンサイト相分率の違いは、均一変形過程の加工硬化挙動に影響します。図2は、それぞれ25-DP、75-DPにおける引張軸方向に対して垂直な面のフェライトとマルテンサイトの相ひずみの変化について示します。相ひずみとは、変形前・後の平均格子定数の差分を変形前の平均格子定数で除算した値であり、弾性ひずみ成分です。図中のP1、P2はそれぞれ軟質相の塑性変形開始、硬質相の塑性変形開始を示します。両鋼種ともに先にフェライトの相ひずみの外力に対する傾きが変化し、相ひずみの増加率が小さくなることから、フェライトから塑性変形を開始することが分かります。ここで、フェライトの降伏応力は、25-DP<75-DPの関係となります。これは、マルテンサイト相分率の増加にともなうフェライトの結晶粒微細化効果により、マルテンサイト相分率が高い75-DPのフェライトの降伏応力が大きくなったと考えられます。これは、篠崎ら⁹⁾の報告している共析パーライト鋼のラメラ間隔とフェライトの降伏強度の関係と良い傾向の一致を示します。その結果、降伏応力の上昇には、母相であるフェライトの結晶粒微細化つまり、軟質相内のすべり距離を小さくすることが条件となります。その後、マルテンサイトの拘束によるフェライトの変形抑制が生じるため、

フェライトの強度は25-DP<75-DPの関係のまま維持されます。一方、マルテンサイトにおける相ひずみはP1以降、加速的に増加します。この場合、フェライトが軟質相、マルテンサイトが硬質相となり、それらの間にミスフィットひずみが生じ、内部応力を与えられます（相応力）。その後、マルテンサイトの降伏応力に達し、塑性変形が開始します。ここで、マルテンサイトの降伏応力は、25-DP<75-DPの関係となります。これらより、DP鋼における高い加工硬化の要因は、マルテンサイトの拘束によるフェライトの変形抑制とマルテンサイト自身が高応力側まで塑性変形せず、弾性変形の状態を維持することだと理解できます。特に、図2で示したフェライトーマルテンサイト間で生じる内部応力場が転位運動の抵抗となり、変形を律速することで、大きな加工硬化を生み出す要因となります。

次に、25-DP、75-DPについて、巨視的ひずみと引張変形後の残留相ひずみの関係を図3に示します。この残留相ひずみは、変形中のミスフィットひずみによって生じる内部応力に対応します。両鋼種ともに、フェライトの残留相ひずみは、圧縮であり、マルテンサイトは、引張です。これはフェライト内の塑性変形を担った運動転位は、すべて相界面に衝突すると堆積して、大きな逆応力を与えられるため圧縮の残留応力が形成され、一方、均一変形の場合フェライトに逆応力が働くと、巨視的応力をバランスするためそれと反作用の応力がマルテンサイトに働き、引張の残留応力が形成されたと考えられます。特にマルテンサイトが降伏するまでの範囲で、

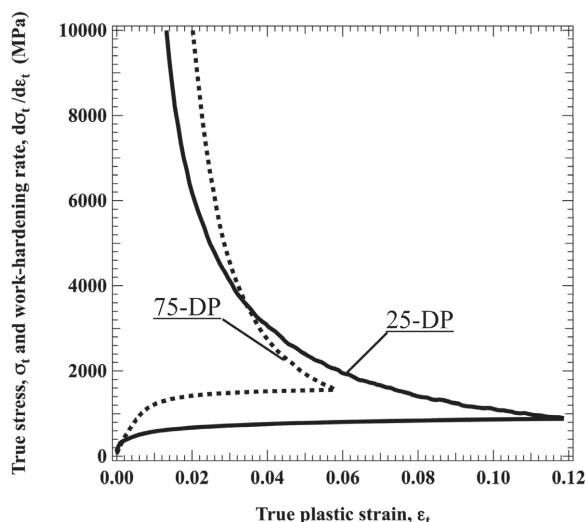


図1 加工硬化率 ($d\sigma/d\epsilon$) 真応力-真ひずみ曲線との関係。初期の加工硬化率は、マルテンサイト相分率が高い程、大である。高ひずみ領域に移行するに従い、マルテンサイト相分率が低い程加工硬化率は大きくなる。

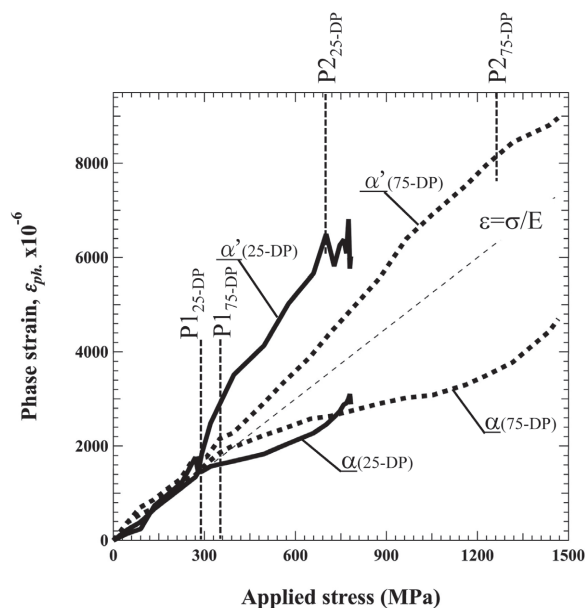


図2 フェライト・マルテンサイト相ひずみと外力の関係。この場合フェライトが軟質相、マルテンサイトが硬質相となり、それらの間にミスフィットひずみが生じ、内部応力を与える（相応力）。この内部応力場が転位運動の抵抗となり、変形を律速することで、大きな加工硬化を生み出す要因となる。

この内部応力によって変形は律速され、加工硬化率は増大します。これは、マルテンサイト相分率が高い75-DPが塑性ひずみの小さい範囲で高い加工硬化挙動を示す要因です。内部応力の緩和はマルテンサイトの塑性変形開始に対応し、内部応力によって供給されていたマルテンサイトの引張応力の増加率は減少します。その結果、フェライトへの応力分配の割合が再び高まると推察でき、高応力で加工硬化率の維持は、フェライト自身の加工硬化に強く依存するようになります。これは、フェライト相分率が高い25-DPが高ひずみ領域で最も高い加工硬化率を示す要因です。したがって、塑性ひずみの小さい領域では、硬質相の弾性変形が応力を上昇する駆動力となり、その後応力分配の変化は、両相の加工硬化の大きさにより増減が決定すると考えれば、応力の上昇の駆動力は両相の振る舞いであり、転位強化の付与も加工硬化に影響することとなり、従来の説に集中できると考えられます。

3 研究活動を通じて

筆者は、茨城大学・友田陽教授の元で博士課程を修了いたしました。学生の身分でありながら、学協会の研究会・フォーラムへの参加や海外の大型施設での実験など、研究者としての歩み方を学ばさせていただきました。特に、博士課程2年6ヶ月の期間、物質・材料研究機構に所属させていただき、足立吉隆博士（現鹿児島大学教授）や大沼正人博士をはじめ、多くの方々に「研究の魅力」について学ぶ機会を与えていた

できました。特別な環境で研究活動ができたことが、自信へと繋がり、筆者にとって人生の岐路を選択する上でのターニングポイントになったと思っています。

その後、2008年に横浜国立大学で教員となり、梅澤修教授の元で精力的に研究を行っております。若手ながら日本鉄鋼協会の各種研究会・フォーラムに積極的に参加させていただけている環境が、今日の成果であると自覚しております。特に、「加工硬化特性と組織」研究会（主査：九州大学東田賢二教授）では、フェライト・マルテンサイト型DP鋼の相応力解析への挑戦する機会を与えていただき、大きな成果^{7,8)}を得ることができました。また、鉄鋼研究振興助成⁹⁾をはじめ、JST産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」において「高強度鋼板の塑性変形に伴う軟質分散粒子のヘテロ→ホモ構造変化の有用性評価（代表：九大 土山聡宏准教授）」という課題で研究分担者として支援をいただいております。今後、国内の中性子線のビーム強度は1MWまで上昇することから、観察できる世界が大きく広がるとともに、今まで観察が不可能であった時分割現象をその場観察できることを期待しております。筆者は「探究心」を忘れず鉄鋼研究に挑んでいきたいと思っていますので、今後ともご指導・ご支援の程、よろしくお願いいたします。

参考文献

- 1) P.J.Withers and H.K.D.H.Bhadeshia : Mater. Sci. Technol., 17 (2001) , 355.
- 2) 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明：残留応力のX線評価－基礎と応用－, 養賢堂, (2006) , 187.
- 3) S.Harjo, K.Aizawa, T.Ito, H.Arima, J.Abe, A.Moriai, K.Sakasai, T.Nakamura, T.Nakatani, T.Iwahashi and T.Kamiyama : Mater. Sci. Forum, 652 (2010) , 99.
- 4) K.Hasegawa, K.Kawamura, T.Urabe and Y.Hosoya : ISIJ Int., 44 (2004) , 603.
- 5) 川田裕之, 吉永直樹 : CAMP-ISIJ, 23 (2010) , 449.
- 6) T.Shinozaki, S.Morooka, T.Suzuki, Y.Tomota and T.Kamiyama : Proc. of ICASS 2006, (2006) , 349.
- 7) 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.
- 8) 諸岡聡, 川田裕之, ステファヌス・ハルヨ, 梅澤修 : CAMP-ISIJ, 25 (2012) 6, 1151.
- 9) 鉄鋼研究振興助成および石原・浅田研究助成第20回受給研究テーマ

(2012年8月20日受付)

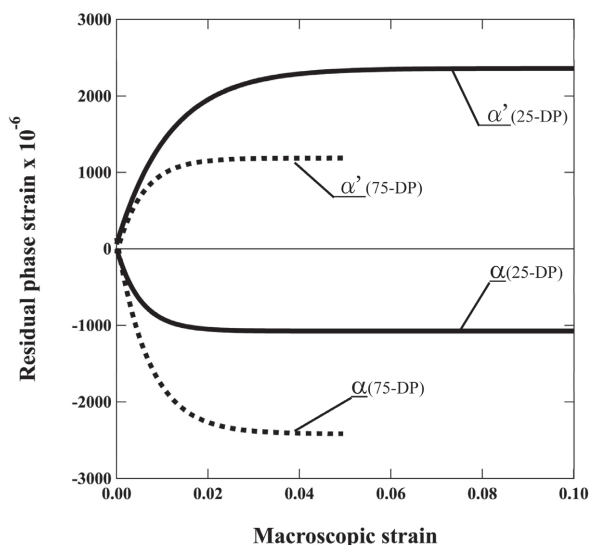


図3 フェライト・マルテンサイトの残留相ひずみと巨視的ひずみの関係。フェライトの残留応力は、運動転位が相界面に衝突し堆積すると、大きな逆応力が与えられるため圧縮の残留応力が形成され、一方、フェライトに逆応力が働くと反作用の応力がマルテンサイトに働き、引張の残留応力が形成される。特にマルテンサイトが降伏するまでの範囲で、この内部応力によって変形は律速され、加工硬化率は増大する。

先輩研究者・技術者からのエール

鹿児島大学 大学院理工学研究科機械工学専攻 材料組織学研究室 教授

足立 吉隆

諸 岡先生からコメントの依頼を受けたので、諸岡さんの「強み」について私が日ごろから思っていることを率直に述べたいと思います。諸岡さんが博士課程の学生の時に、私が以前所属した独立行政法人 物質・材料研究機構に研修生ということで滞在され、ドイツ、スペイン、オーストラリアからの研究者や国内の他大学からの研修生とともに、研究を一緒にしました。諸岡さんは中性子線を用いた材料組織・応力解析に取り組まれていた友田陽先生の研究室に所属されていて、物質・材料研究機構では同じく中性子線を使われていた大沼正人氏と、マイクロ組織の3D4D解析研究に取り組んでいた私の研究室の間を右往左往しながら、マルテンサイト鋼およびパーライト鋼の階層的な変形挙動の解明に取り組まれました。中性子線回折と鉄鋼材料の組み合わせは当時国内では珍しく、賛同者も決して多くはありませんでしたが、これはマイクロ組織によって材料特性の主要なところは決まっており、応力や転位密度あるいは結晶サイズの平均値しか求められない中性子線回折はX線回折と同様に組織の概要しかわからないといった認識が大半であったからのように思います。私自身も、マイクロ組織をマイクロサイズあるいはナノサイズで観察してその情報を定量化し統計情報を取るといった「ボトムアップ」式アプローチのみに

が大切だとも思っていました。ところが昨今の中性子、放射光研究が示しているように、信頼できる組織の平均情報を得ることができるこれらの量子ビームを用いた解析は、原子や転位あるいは結晶粒の一つ一つを追うことに加えて、原子群、転位群、結晶粒群としてももう少し大きな領域での振る舞いをとらえたほうが、機械的特性や組織の発現機構の理解に役に立つ場合があることを示しています。よい例かどうかは分かりませんが、森の特徴を理解するためには、それを構成する木々の種類の一つ一つ同定して回りその統計情報を得ることも重要であるし、空中から針葉樹と広葉樹の割合を把握することも大切だと思います。諸岡さんは少し大きなスケールの眼で材料組織を見ることが数少ない若者の研究者だと思います。

今後、平均情報の中に含まれる局所情報を可能な限り抽出して、一方局所情報の統計値から平均情報を得るという両方の測定クロッシングがとても有益な情報をもたらすと私は思っており、このようなハイブリッド測定を一人あるいは仲間と組んでグループで出されると更なる発展があるように思います。同時に、既存の手法に満足することなく、新しい唯一無二の装置の開発、解析手法の開発を進めていただいて、息の長い「中性子材料学」に取り組み続けていただくことを願っています。

新日鐵住金（株）フェロー 薄板材料研究部長

高橋 学

若 手の中核研究者である諸岡先生の記事に対するコメントをさせていただくことは大変ありがたいことでは有りますが、同時に自分の年齢を強く感じることもありました。

今回の記事「探究心」は、鉄鋼におけるマイクロ組織・特性の制御技術が今まさに多次元化の道を歩き出していることを感じさせてくれました。

私自身が鉄鋼材料に関わってきたこの30年の間に学んだことはとても多かったように感じつつ、実は非常に基本的な事実、即ち、鉄鋼材料の最終的な特性はその鉄鋼材料が経験してきた全ての履歴の具現化であるマイクロ組織情報によって決まると言う単純なルールだけではなかったかと思っています。但し、マイクロ組織やそのでき方もなかなか理解できず、外部からの刺激に対するマイクロ組織の応答もあまりにも複雑で、結果的にはほとんど理解できないまま現在に至っています。そもそも3次元空間で逐次変化している鋼材のマイクロ組織や応答を2次元でスライスして見ようとしていること自体が理解を複雑にしているのではないかと、最近ふと思う事もあります。

諸岡先生を中心とした新しい研究者の方々は、最初から3次元で現象を理解する方法を身に付け、より正確に、直接的に鉄

鋼材料の中で起こっている様々な現象を理解できるのであろうと思います。先人が脈々と行ってきた方法論に従うだけでなく、今まさに利用可能となってきた新しい手法である中性子線利用技術やその解析技術等を導入し、新たな視点でマイクロ組織や応力応答を解析することは、多くの困難を伴うものとは思いますが、「探究心」があれば、きっと楽しいアプローチであろうと想像します。鉄鋼材料学が離散的な階段を一段登ろうとしているこのタイミングには、様々な新しい提案がなされ、多くの失敗が繰り返されるのではないかと思います。しかしながら、これらの不断的な努力が最終的なステップアップに繋がるのだと確信します。失敗を恐れず、新しい概念の提案を続けて頂き、一日も早く鉄鋼材料学の新しいステージを周囲に見せて頂きたいと念じています。もちろん、ローマは一日にしてならず。諸岡先生がこのページでコメントを書く頃、きっと次に登るべき階段が見えてきているのではないのでしょうか。我慢強く「探究心」を持ち続けて鉄鋼材料学を牽引されんことを心から期待しています。

鉄鋼は紛れもなくものづくり日本を支える産業の一つであると思います。この重要な分野で諸岡先生が継続的に活躍されることを強く期待しております。