



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

徐々にミクロへ

Toward a More Microscopic Approach

大塚貴之

Takayuki Otsuka

新日鐵住金(株) 技術開発本部
プロセス研究所 鋼圧一貫研究部
主幹研究員

筆者は2003年に当時新日本製鐵(株)一現新日鐵住金(株)に入社した後、圧延プロセス開発担当となり、当初は新型式知能圧延機に関する開発の下命を受けた¹⁾。本開発は大型厚板工場において厚板矯正機 Oita Plate Leveller (OPL) として実機適用され^{2,5)}、厚板という非常に大きなサイズの板の圧延・冷却形状と格闘することになった。板幅が広く板厚が薄い場合には、小さな伸びひずみ差で板形状が変化するため、板幅が大きくなればなるほど、逆に形状制御にはより精緻な精度が要求される。このように、小さな温度分布や材質分布が影響して大きな板形状変化に帰結してしまう現実を実感し、焼入れ時の応力変化や形状変化に与える変態塑性の影響を調査した学生時代の記憶が呼び起こされた。

1 変態塑性現象の実験的考察

変態塑性現象とは、金属材料が相変態をうけるときの、応力が負荷された場合に、その応力が降伏応力以下であっても大きな塑性変形を起こす現象をいい、熱処理変形や残留応力に大きな影響を及ぼすことが分かっている⁶⁻¹⁰⁾。このため、変態塑性データの実験的な同定が行われ^{11,12)} データベースの構築がなされてきた^{13,14)}。筆者が初めて変態塑性に出会ったのは京都大学の卒業研究で、当時担当教官の井上達雄先生(現 埼玉工業大学特任教授、京都大学名誉教授)の元で変態塑性ひずみの実験的同定とモデル化を行った。井上研究室に配属された際は、将来鉄鋼の世界に進むとは思ってもよらなかったが、複数のテーマがある中で(じゃんけんにより)日本刀の焼入れ変形・残留応力に及ぼす変態塑性の影響というテーマを与えられたのは、現在の自分の鉄鋼プロセス研究の原点であるように思う。修士課程進学後も引き続き井上研究室での研究を続け、変態塑性ひずみ測定の実験では、堤らの実験¹⁰⁾を参考に、4点曲げによる測定を行い、熱ひずみや変態ひずみのような応力依存の無いひずみと分離する手法を用い、炭素鋼の変

態塑性ひずみ同定に成功した^{15,16)}。本実験結果を用いて、多相間の変態を考慮した変態塑性ひずみの定式化を行い¹⁷⁾、熱処理シミュレーションに用いてきた。この間、京都大学近くの材料学会での会合に参加させて頂き、専門家の方々から多くのご助言を頂いたことは非常によい経験となった。しかし、当時は鉄鋼材料に関する知識も薄く、変態塑性のメカニズムに関して、拡散変態は Greenwood-Johnson の効果¹⁸⁾、無拡散変態は Magee の効果¹⁹⁾と念仏のように唱えるだけで、深く考察することは無かった。

2 変態塑性メカニズム解明に関する研究

入社後は研究所や製鉄所での開発業務に追われていたが、冷却時の鋼板形状変化を見る度に、変態塑性研究の必要性を感じた。しかし、抜本的にプロセスを変革するためには、現象を正確に理解し、制御することが必要であり、これまでの実験によるデータ取得だけでなく、メカニズムに踏み込む必要がある。ここから、変態塑性のメカニズムについて深く考えるようになった。まずは、変態時の体積変化により周囲の相にひずみの accommodation が生じ、塑性変形を起こすという Greenwood-Johnson の効果について、実験的に確認すると共に、マルテンサイト変態時に変態膨張を起こさないインバー合金を用いて実験を行い、変態膨張が小さい場合には変態塑性ひずみも小さくなることを確認し、図1に示すようにこれが無拡散変態にも適用可能であることを示した²⁰⁾。しかし同時に、フェライト変態やパーライト変態では、Greenwood-Johnson の効果を定式化した Leblond のモデル²¹⁾から計算される変態塑性係数とは絶対値が合わず、この原因が不明なままであった。

ここで、2011年から2013年の2年間、会社の制度を利用してパリ13大学の博士課程に入学する機会を得た。この機

会を利用して、Greenwood-Johnsonの効果を直接数値計算によって解き、実験とモデルとの乖離が説明できないか考えた。幸い、入社後に業務の合間を見つけて有限要素法 (FEM) による熱処理解析プログラムを作成していたので、これを使用する積りであった。一方で、研究室では高速フーリエ変換 (FFT) を用いた演算手法を用いており²²⁾、非常に効率がよく力学計算が可能であるため、FEMでは無くFFTを用いることになった。

ここでの計算は、これまでFEMを用いて行ってきたバルクの計算とは異なり、周期境界を持つ参照体積要素の計算となるため、よりミクロな視点に踏み込むことになる。ポロノイ多面体分割された多結晶体について、新相が核生成成長していく過程を解くが、このとき新相の体積が旧相よりも大きい場合、このひずみの不整合を無くすような応力／ひずみが発生する。ここに外部から (マクロな) 応力を与えると、塑性ひずみが助長されるが、この関係を、結晶塑性高速フーリエ変換 (CPFET) を用いて解くことになる。図2は外部から与える応力を変化させた場合の、変態塑性ひずみの計算例である。図2に示すように、変態の進行によって変態塑性ひずみが負荷応力に応じて発生している様子が分かる。変態終了時の変態塑性ひずみと負荷応力との関係をプロットし図3を

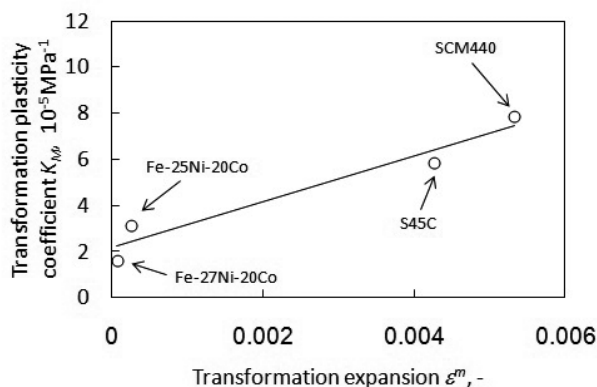


図1 マルテンサイト変態における変態塑性ひずみの変態膨張依存性

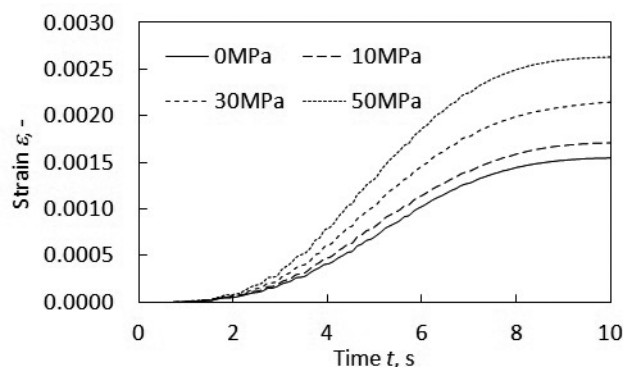


図2 等温変態中の変態塑性ひずみの変化

得る。負荷応力が比較的小さい場合には、負荷応力に対し変態塑性ひずみが線形となっており、この傾きが変態塑性係数である。一方、負荷応力が大きいと変態塑性ひずみが非線形的に大きくなる様子が計算によって再現された。従って、この現象は一般的な弾塑性論で説明することが可能で、変態相周りの塑性変形に対し、負荷応力が小さい場合には変態膨張による影響が支配的であるが、負荷応力が大きいと変態膨張による影響に加えて外部応力による影響が加わるため非線形となることが分かった。このように、今まで実験だけでは説明されなかった変態塑性ひずみの非線形メカニズムが解明された²³⁾。

さらに、数値試行を繰り返すと、無負荷状態でも変態塑性ひずみが発生するという面白い現象が計算によって示された^{24,25)}。この現象が起こるのは、変態前の材料に異方性がある場合で、この異方性は例えば前加工や集合組織によって与えられる。すなわち、前加工で圧縮のひずみが付与されている場合、引張りの変態塑性ひずみが助長され、前加工で引張りのひずみが付与されている場合、逆に圧縮の変態塑性ひずみが助長されるが、この変態塑性ひずみは変態中に無負荷であっても発生する。この現象はTalebら²⁶⁾によって実験的に示されていたが、初めて計算によって確認され、そのメカニズムは以下のように説明される。予加工によって導入された背応力は、変態膨張に伴う応力によって異方性を持ったひずみを生じ、結果的に異方性を伴う変態塑性ひずみを生じる。この他にも、変態塑性に与える結晶粒径の影響や、バンド組織 (ミクロ偏析) の影響など多くの現象が数値計算結果から解明された²⁷⁾。この成果によって博士号を取得することができた。パリで行われた公聴会の数ヵ月後にフランス大使館で博士号が授与されたのはよい思い出である (図4)。

このように変態塑性現象をよりミクロな単位から考察することにより、多くの現象をより理解することができるようになった。ところが、残念なことに本モデルを用いて計算した

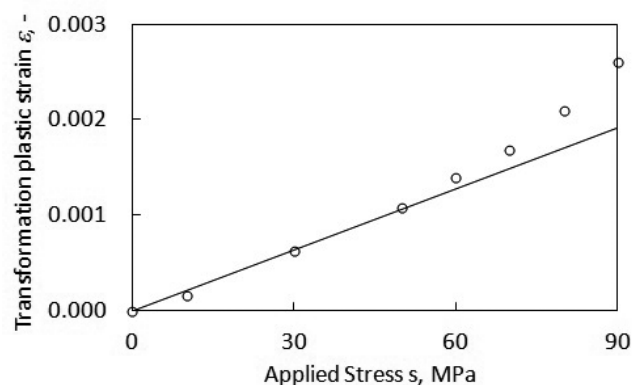


図3 負荷荷重と変態塑性ひずみとの関係

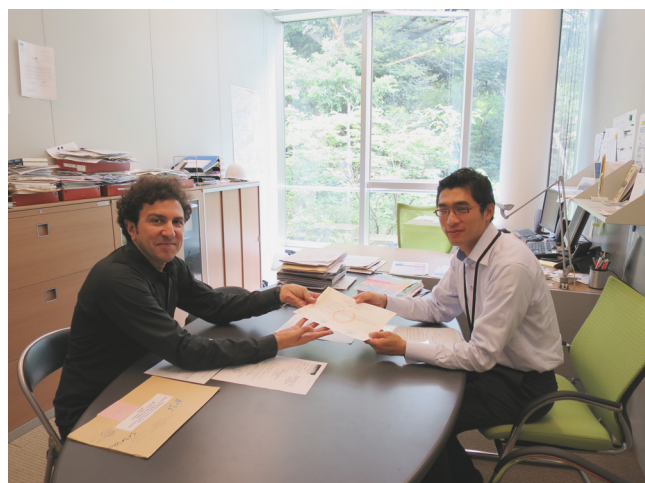


図4 東京南麻布のフランス大使館科学技術部にて

場合、Leblondのモデルとほぼ同等の変態塑性ひずみを予測し、フェライト変態やパーライト変態における変態塑性ひずみの実験値よりも小さな値となってしまうことが判明した。そこで次のステップとして、拡散界面と応力との関係性について、分子動力学法などを用いてさらにミクロな視点から追及したいと考えている。

このように変態塑性という一現象だけでも不明な点が多く残されており、鉄鋼プロセス研究にはまだまだ課題が山積みである。今後のプロセス研究として、よりミクロな視点を取り入れて行くことで、新たな研究開発に努めて行きたいと考えており、今後とも皆様のご指導・ご支援を賜りたい。

参考文献

- 1) 小川茂, 山田健二, 大塚貴之, 井上剛, 若月邦彦, 空尾謙嗣, 竹下幸一郎, 池田佳士郎, 中川大輔: 鉄と鋼, 100 (2014) 12, 1490.
- 2) 白石利幸, 小川茂, 東田康宏, 左田野豊, 若月邦彦, 池本祐二: 材料とプロセス, 22 (2009) 1, CD-ROM.
- 3) 大塚貴之, 小川茂, 山田健二, 井上剛, 若月邦彦, 中川大輔: 材料とプロセス, 22 (2009) 2, CD-ROM.
- 4) 大塚貴之, 小川茂, 山田健二, 井上剛, 若月邦彦, 中川大輔: 材料とプロセス, 23 (2010) 2, CD-ROM.
- 5) T.Otsuka, S.Ogawa, K.Yamada, T.Shiraishi, Y.Higashida, Y.Sadano, K.Kobayashi, N.Shiomi, K.Hayashi, A.Sako, H.Matsuda, Y.Ikemoto and H.Furumoto: Proc. of South East Asia Iron and Steel Industry Conf., (2009)
- 6) T.Inoue, T.Uehara and T.Ohtsuka: Proc. of the Fifth World Congr. on Comput. Mech. (WCCM-V), (2002)
- 7) 宮尾光介, 王志剛, 井上達雄: 材料, 35 (1986) 399, 1352.
- 8) 福本学, 吉崎正敏, 今高秀樹, 岡村一男, 山本憲司: 材料, 50 (2001) 6, 598.
- 9) 堤一之, 仲山公規, 中川知和, 森本禎夫, 山内学, 大江憲一: 材料とプロセス, 13 (2000), 1051.
- 10) 堤一之, 仲山公規, 中川知和, 森本禎夫, 山内学, 大江憲一: 材料とプロセス, 13 (2000), 1052.
- 11) 堤一之, 中川知和, 仲山公規: 日本機械学会2004年度年次大会講演論文集, 1 (2004), 445.
- 12) 長岐滋, 朝岡真一, 両角克之, 大下賢一: 日本機械学会論文編集A編, 69 (2003) 684, 1230.
- 13) T.Inoue and K.Okamura: Proc. of 5th Int. Symp. on Quenching and Distortion Control, ASM, St.Louis, October (2000), 753.
- 14) 岡村一男: 材料, 55 (2006) 5, 529.
- 15) 大塚貴之, 井上達雄: 材料, 52 (2003) 10, 1198.
- 16) T.Otsuka and T.Inoue: Proc. of the 1st ASM Int. Surface Eng. and the 13th IFHTSE Congr., ASM Int., (2003), 201.
- 17) T.Otsuka and T.Inoue: Int. J. Mater. and Prod. Technol., 24 (2005) 1-4, 292.
- 18) G.W.Greenwood and R.H.Johnson: Proc. Roy. Soc., 283A (1965), 403.
- 19) C.L.Magee: Ph.D. Thesis of Carnegie Institute of Technology, (1966)
- 20) T.Otsuka, A.Akashi, S.Ogawa, T.Imai and A.Egami: J. Soc., Mater. Sci. Jpn., 60 (2011) 10, 937.
- 21) J.C.Leblood, J.Devaux and J.C.Devaux: Intl. J. Plasticity, 5 (1989), 551.
- 22) H.Moulinec and P.Suquet: Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 157 (1998), 69.
- 23) T.Otsuka, R.Brenner and B.Bacroix: Proc. of 4th Intl. Conf. of Thermomechanical Processing, (2012)
- 24) T.Otsuka, R.Brenner and B.Bacroix: Proc. of Intl. Conf. of Rolling 2012, (2012), 148.
- 25) T.Otsuka, R.Brenner and B.Bacroix: Key Eng. Mater., 622-623 (2014), 687.
- 26) L.Taleb and S.Petit: Int. J. of Plast., 22 (2006), 110.
- 27) T.Otsuka: PhD thesis of Université Paris, 13 (2014)

(2017年1月24日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

京都大学 名誉教授 埼玉工業大学 特任教授

井上 達雄

大塚氏の本文で、「日本刀」、「変態塑性」が取り上げられています。前者については拙著書を参照して頂くとして、後者については相変態をうける過程の変態・熱・力学に馴染んだ方でも、十二分に認識しておられない向きがあるので、改めてのべておきましょう。

力学場の解析に出てくるひずみは、応力の存在による弾性ひずみ、塑性（一般には非弾性）ひずみ、温度変化と場所による分布に起因する熱ひずみ、変態が進行して別組織に変わるとき（フェライト→パーライト変態、オーステナイト→マルテンサイト変態など）の体積変化による変態ひずみ、それに変態塑性ひずみがあります。この変態塑性ひずみは変態ひずみとは別のものです。前者は応力の存在に直接かわりませんが、後者は変態過程で応力が生じる時にだけ大きな塑性変形が出ることで、変態超塑性とも言われます。例えば50MPaで0.05%にもなりますから、これを考慮するかしないかは計算結果におおきな影響が出てきます。

この変態塑性のメカニズムと実験を大塚氏は大学院時

代にやってくれました。直径3mm、長さ300mmの棒を800度に加熱して両端を支持して荷重をかけますと、空中で冷却するとき、初めは材料力学のはりのたわみでもとめられる小さなたわみが出ますが、変態開始点にまで冷却が進むと急に数十mmの変態塑性たわみができたのには感激したものです。これを基盤にして変態塑性のメカニズムを考えてくれました。さらにそれを私が一般化する動機を作ってくれたり、会社では特別な試験装置を作ったり、フランス留学でフーリエ変換法を多結晶体に適用してメカニズムを明らかにして（2年足らずで）学位をもらっています。

弟子というにはおこがましいのですが、私の研究室にいた中で、まさにトップクラスの最愛の弟子で、幅広い分野に果敢に取り組む優秀さと、人間的な爽やかさが好きです。できれば、発言のときにもう少し声を大きくしてくれたら、年老いて聞きづらくなった私にはありがたいし、男の職場で将来益するところがおおきいと思います。

(株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 構造強度研究室 室長

堤 一之

大塚さんと初めてお会いしたのは、井上達雄先生の指導を受けられていた2002年ですので、15年近い付き合いとなります。その彼からの依頼があり、僭越ながらコメントをお引き受けしました。

2002年当時、私どもが検討中だった曲げ試験による変態塑性係数の同定手法について、井上研究室でお話する機会をいただき、そのとき居られた学生が大塚さんでした。以来、変態塑性に関わる技術を中心に、学会活動などでご一緒させていただいております。これまでの付き合いで、彼は企業研究者のお手本となるかたと思いますので、はじめに人となりを紹介させていただきます。

私感ですが、企業研究者には、研究力と人間力のふたつが大事だと考えております。研究力とは、研究課題を解決する力と適応力で成り立ちます。前者についての彼の優秀さについては、会社に海外留学を認められたことや、研究論文の数々で知ることができます。一方後者は、本文でも触れられているように、多様な業務に追われつつも自分の興味を失わず、気付くとそれぞれの課題と自分の興味を結びつける粘り度でわかります。企業人として、同じテーマを続けていくことは稀であり、この自分に引き付ける力、適応力は大事です。

一方、人間力が大事であることは、開発の過程のみならず、その成果を実際のプロセスや製品に適用する段階で多くの協力者を必要とすることから明らかです。その

点大塚さんは、人を惹き付ける力も持ったかたと思っています。学会の懇親会などでは、技術レベルも年齢も異なる方々とお話することになりますが、どのような人にも打ち解けておられ、技術の深い話から世間話まで楽しそうに話されています。

次に、大塚さんの研究成果について、交流のきっかけとなった変態塑性係数の曲げ試験による同定の問題で紹介したいと思います。一般的には、一定荷重（主に引張）下で試験片を冷却することで変態時のひずみを求める試験を行います。異なる荷重ごとに同様の試験を行い本文の図3を得るため、複数の試験が必要です。曲げ試験法を用いると、それが1回の試験ですむのではないかと、というのが当時の提案でした。しかし、彼が本文で述べているように、変態塑性のメカニズムを明確にしないと、引張と圧縮、曲げでそれぞれ図3の勾配が異なる事実が説明できません。彼の研究は、その解決を大きく前進させるものです。曲げ試験で言えば、応力誘起されることで板厚方向の変態開始タイミングが変化するという弱点もわかっています。この点については、今後とも議論していけたらと考えています。

最後になりますが、上からは頼りにされ、下からは目標にされる存在となっておられる大塚さんが、これからも企業研究者の手本として活躍され続けることを祈念します。