



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

組織計算から塑性加工への貢献を目指して

Aiming at Contributing to Metal Forming from Microstructure Calculation

上島伸文
Nobufumi Ueshima

東北大学
大学院工学研究科
金属フロンティア工学専攻
助教

1 はじめに

筆者は2014年4月に東北大学に助教として赴任し、組織予測や塑性加工に関する研究を行っている。本協会との関連では、学生時代にはPhase-Field法を用いた研究を行っており、そのご縁で、高温プロセス部会若手フォーラムへお誘いいただき、現在その座長を拝命している。一方で、東北大学へ赴任以降は塑性加工関連の研究も行っていることから、今回は創形創質部会からのご推薦により本稿執筆の機会を頂いた。本稿では、これまで著者の研究活動の中から鉄鋼関連材料と塑性加工に関連するものを紹介する。

2 鋼中のMnS析出に及ぼすCu添加の影響に関する研究

著者が初めて関わった鉄鋼関連のテーマの一つが、鋼中のMnS析出に関する研究である。この研究ではMnS析出成長に及ぼすCu添加の効果について調べ、Cu添加によりMnSの成長が抑制され、MnS-母相界面の界面エネルギーの低下により説明できることを明らかにした¹⁾。はじめはMnSの成長をオストワルド成長の三乗則にて説明するために、析出物サイズの三乗と時間との関係を調べ直線状になったことから問題なさそうだと判断していた。しかしながら、時間と析出物サイズの関係を対数グラフに描いたところ、指数nは0.1程度のかかなり小さな値となりほぼ成長が止まっている時間領域があった。調べてみると、析出物サイズの三乗や二乗を時間に対してプロットしても、いずれの場合も変化は直線状に見えることがあり、対数グラフから判断すべきとの文献も見つけた²⁾。初期の拡散律速の成長の二乗則から、オストワルド成長の三乗則への遷移期には成長速度が下がることが様々な文献で報告されており、その現象は、析出物サイズの頻度分布を古典核生成と拡散律速の成長から計算できる

Kampmann and Wagner Numerical model (KWNモデル)により再現されていた³⁾。そこで、著者らもKWNモデルを用いてMnSサイズの時間変化を計算したところ、遷移域での平均サイズの停滞域を再現することができ、Cu添加によるMnS成長の抑制を界面エネルギーの低下で説明することができた。TEMによる界面観察の結果からはCuが偏析していることが確認され、偏析により界面エネルギーが低下したと考えられる。現在は、粒径計算の為、析出物による粒界のピン止め・ソリュートドラック効果などを考慮した、粒径の頻度分布を計算できる、粒のサイズクラスをベースに定式化された母相粒成長計算とのカップリングや、製造プロセスで問題となる、事前の熱間加工による析出への影響の調査とモデルへの導入に取り掛かっている。

3 転位密度ベースの内部変数モデルを用いた非単調負荷時の流動応力計算

著者が東北大に塑性加工の研究室の助教として着任し、関連の研究を調べたところ、少し前からサーボプレスを利用したモーション制御の活用が注目されており⁴⁾、スライド動作の加減速、一時停止、反転・再負荷などを行うことで、加工性の向上、形状精度の向上、騒音の低減、省エネ化などが報告されていた。これらのうち、材料分野の研究者として興味を持たれるのは、加工性の向上についてであった。ただ、モーション制御による成形性向上の主な要因としては、潤滑油の再流入による摩擦の低減や、加工を途中で止めることによる加工発熱の均一化が挙げられており、当初は材料屋としてはあまり貢献できる部分が無さそうだと感じていた。着任後数年経った後、学内で鉄鋼関連の研究助成に応募する機会があり、サーボプレス機関連で何か提案できないかと改めて調べてみると、応力緩和によってひずみを分散化させることで成形性が向上したとの報告⁵⁾や、スプリングバックの解

析に室温クリープモデルを導入し、実験と良い一致を得たといった報告⁶⁾もあることや、繰り返し引張により伸びが向上することがいくつか報告されており^{7,8)}、これらを材料の観点から説明できないかと考えた。

調査の為にに行った試験としてはいたって単純で、サーボプレス機のモーションを模した引張試験として、引張途中に除荷や変位保持を挟んだ試験を行い、応力-ひずみ曲線の変化や伸びの変化を調べた。その結果JSH590鋼板については、途中の変位保持時間や除荷後の保持時間が長い程、破断伸びが大きくなる傾向が得られた。また、再負荷時の応力としては、除荷後は少し除荷直前よりも小さくなり、保持後は少し保持直前よりも高くなっていた。これを説明する為に、Kozeschnikらのグループの報告⁹⁾を参考に、転位密度ベースの内部変数モデルを用いて解析を行った。変位保持時には応力緩和が生じるが、これについては、室温クリープモデル¹⁰⁾を用い、パラメータは転位密度に依存するようにした。保持後の再負荷では応力が上がっていたことから、単に現象に合うようにクリープひずみの分だけ転位が不動転位となるものとして加工硬化率を上げたところ、うまく応力ひずみ関係や均一伸びの向上を再現することができた。一方で、除荷後再負荷では除荷直前よりも応力が下がっていたことから、転位密度が保持時のクリープひずみに応じて減少するようにモデル化を行ったところ、こちらも応力-ひずみ曲線の変化や均一伸びの向上の傾向を再現することができた¹¹⁾。Fig.1に除荷後10秒保持再負荷を繰り返した場合の応力ひずみ曲線とモデル計算結果を示す。破線が単調負荷時の計算結果であり、それよりも白四角の除荷再負荷条件の実験結果の方が若干応力が小さくなっていることが分かる。黒い実線で示した計算結果は、除荷ごとに計算上の転位密度の減少分を反映して不連続となっている。実験値と比較すると単調負荷時の均一伸び量である0.12付近までは、除荷前と同程度の応力を再負荷した直後の降伏部分を除外すれば概ね一致しており、それより大きいひずみ範囲では、応力を過小評価する傾向がある。現在は、他の金属材料に関する調査や、鍛造で問題となる高ひずみ域での挙動についての検討に取り組んでいる。

4 Ni基超合金の熱間加工熱処理組織予測

ボーイング社の市場予測では今後20年で航空機の需要が2倍となることが予測されるなど、今後の航空機産業の成長が予測されていた。そのような中、2014年度から2018年度までの5年のプロジェクトとして戦略的イノベーション創造

プログラム (SIP) 革新的構造材料*が開始され、B21「大型精密鍛造シミュレータを用いた革新的新鍛造プロセス開発と材料・プロセスDB構築」、B26「高強度Ni基ディスク材料の実用的加工プロセスの開発」およびD73「構造材料開発に利用する計算熱力学に関する技術基盤構築」に東北大学及川勝成教授の研究室の助教として研究に参画した。本章では、B21において遂行したNi基超合金の加工熱処理組織予測に関する研究について述べる。

プロジェクト全体の目標は、物質・材料研究機構 (NIMS) に設置された1,500トン大型鍛造シミュレータとラボスケールの小型鍛造シミュレータによるプロセス-組織-特性関係のデータベース取得と、プロセス-組織-特性一貫予測モデルの構築であり、このデータベースおよびモデル構築により鍛造条件から組織・特性予測が可能となり鍛造プロセス設計の期間短縮や最適化が期待される。著者らはプロセス予測モデルから出力される温度・ひずみ速度などの空間分布と時間発展を受け取り、特性予測に必要な組織情報を計算し、耐力などを計算する特性予測モデルへ受け渡す部分を担当した。特性予測には母相粒径、析出物サイズの頻度分布、析出物分率などが必要となることから、粒成長、再結晶と析出の計算が必要となった。また、その空間的な分布の予測までが目標であったことから、実鍛造部材のサイズでFEM計算を行った各格子点において組織予測計算をする必要があった。5年間のプロジェクトにおいて2種の合金 (Alloy718とAlloy702Li) でこれらを行う目標であったことから、粒径予

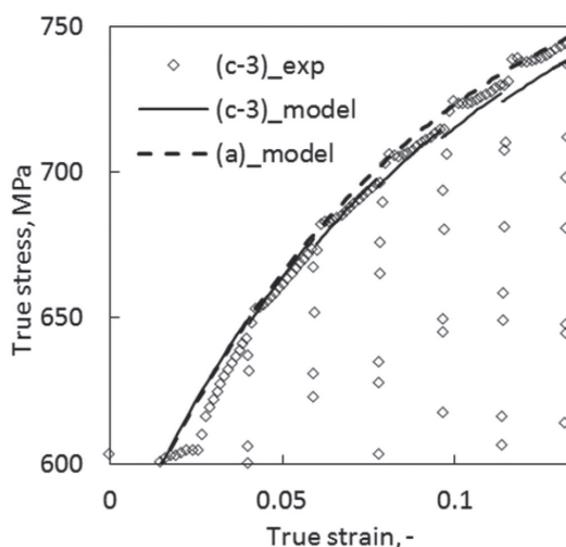


Fig.1 Comparison of calculated and experimentally obtained true stress-strain curves.

*戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 革新的構造材料ウェブページ: <https://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/index.html>

測については、基本的には既存のCAEソフトウェアに組み込まれている粒成長、動的再結晶モデルのパラメータ同定をすることとした。同定したAlloy718の粒成長パラメータについては論文として報告している¹²⁾。一方で、析出予測については、Alloy720Liについては強化相である γ' 相サイズの頻度分布、分率が特性予測の為に必要となったことから、2章で紹介したKWNモデルを γ' 相の析出へ適用し、CAEソフトウェアにユーザサブルーチンとして組み込むこととした。実装方法に関しては、名古屋大学の湯川伸樹先生にご教示頂きながらどうにかユーザサブルーチンとして組み込むことができた。ユーザサブルーチンで組み込んだ析出モジュール単体で、溶体化処理後の冷却速度を1, 10, 50, 100, 260, 6700 °C/minとしたときの、時効熱処理後の γ' 相の平均サイズを計算した結果と、実験値の比較をFig.2に示す。ここで、粒界に析出する一次の γ' 相は溶体化処理後から不変であるとして計算から除外している。図から、冷却後期に出てくる三次の γ' 相はおおよそ計算と実験で一致している。二次の γ' 相は一部ずれている部分があるが、実鍛造で使われる10~100 °C/min程度の冷却速度の範囲では高精度で予測できることが確認された。CAEソフトウェアに組み込んで行った、プロトタイプ鍛造の計算では、実験で観察された表面の冷却速度が速い部分と内部の遅い部分で析出物サイズの違いを再現することができた。

Alloy718の δ 相析出についてはプロジェクトの実施中は既存のKolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami (KJMA) modelのパラメータ同定までであったが、プロジェクト終了後、粒界析出を考慮に入れてKJMAモデルに粒径依存性を入れ、改変したモデルとパラメータを報告している¹³⁾。

研究室スケールの実験では試料サイズが小さく、空間的な

分布はあまり問題とはならないが、実スケールでは問題となることがある。今回の研究においても、研究室スケールの実験で取得した動的再結晶パラメータを用いた計算では、研究室スケールの組織予測は問題ないものの、1,500トン大型鍛造シミュレータの動的再結晶挙動とは大きく異なっていた。冷却速度の違いを考慮に入れ、動的再結晶だけでなく、準動的再結晶のパラメータも取得することにより、高精度化が達成された。

以上から、5年間でなんとかプロセスと特性をつなげる組織予測モデルを構築でき、プロジェクト全体のプロセス-組織-特性の一貫予測システムの構築に貢献できた¹⁴⁾。現在は3章で説明した、転位密度ベースの内部変数モデルをAlloy720Liに適用して、流動応力と動的再結晶の計算にも取り組んでいる¹⁵⁾。流動応力モデルに粒径や析出物の影響を考慮した計算も始めており、今後2章で述べた析出や粒成長のモデルとも組み合わせ、より組織変化を考慮した流動応力モデルにできればよいと考えている。

5 おわりに

本稿4章で紹介した成果は、SIP革新的構造材料B21の方々のご助言や議論で得られたものである。東北大の塑性加工の研究室に助教として着任してから、材料科学の観点から加工に貢献する研究ができないかと考えていた。着任後に様々な研究テーマに取り組みさせて頂きながら、始めは既存のモデルのパラメータ同定から始め、少しは組織計算から加工にもつながる研究となってきたように思う。最近では、東北大名誉教授の伊藤耿一先生、慶応大学の大家哲郎先生、琉球大学の末吉敏恭先生と定期的に議論させて頂く機会が

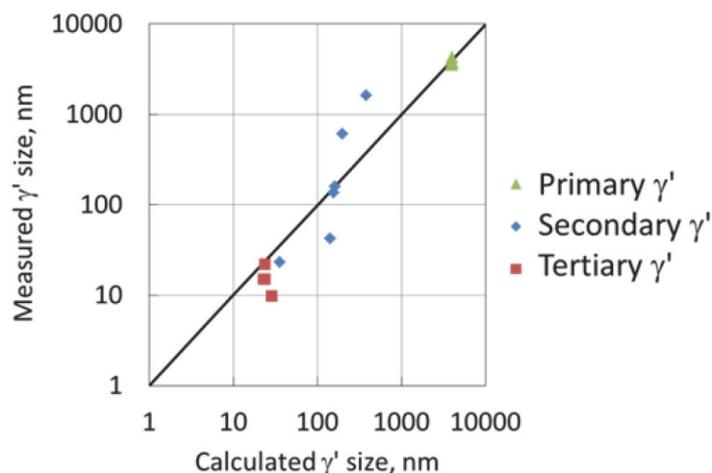


Fig.2 Comparison between measured γ' size with calculated γ' size by KWN model. (Online version in color.)

あり、材料科学の知見が必ずしも直接は塑性加工まではつなげていない部分が話題となっている。例えば、材料パラメータと呼ばれるものがあるが、物理的な背景から離れて単なる数学的なフィッティングパラメータとなっているものがないか?といったことである。このあたりを意識しながら研究を進めて、皆様との議論により、課題発見、解決につながればと考える。今後も塑性加工と材料科学の境界領域の研究に微力ながら貢献したいと考えており、皆様のご指導ご鞭撻を頂ければと思う。最後に、本稿で紹介した研究の遂行にあたり、ご指導・ご協力を賜りました東北大学 及川勝成教授をはじめ、関係各位に御礼申し上げ、本稿を締めたい。

参考文献

- 1) N.Ueshima, T.Maeda and K.Oikawa : Metall. Mater. Trans. A, 48 (2017), 3843.
- 2) D.B.Rayaprolu and D.Jaffrey : Mater. Charact., 24 (1990), 245.
- 3) M.Perez, M.Dumont and D.Acevedo-Reyes : Acta Mater., 56 (2008), 2119.
- 4) 松本良 : 塑性と加工, 58 (2017), 187.
- 5) 山下裕之, 上野宏明, 中井浩之, 檜垣貴大 : Honda R & D Tech. Rev., 24 (2012), 142.
- 6) O.Majidi, M.G.Lee and F.Barlat : Procedia Eng., 81 (2014), 987.
- 7) K.Hariharan, O.Majidi, C.Kim, M.G.Lee and F.Barlat : Mater. Des., 52 (2013), 284.
- 8) Y.Xu, S.H.Zhang, H.Song, M.Cheng and H.Zhang : Mater. Lett., 65 (2011), 1545.
- 9) P.Sherstnev, P.Lang and E.Kozeschnik : Treatment of simultaneous deformation and solid-state precipitation in thermo-kinetic calculations, ed by J.Eberhardsteiner, et al., ECCOMAS 2012 E-Book, Vienna University of Technology, Vienna, (2012), 5331.
- 10) D.McLean : Rep. Prog. Phys., 29 (1966), 1.
- 11) N.Ueshima, K.Kubota and K.Oikawa : Materialia, 8C (2019), 100464.
- 12) J.J.Ruan, N.Ueshima and K.Oikawa : J. Alloys Compd., 737 (2018), 83.
- 13) J.J.Ruan, N.Ueshima and K.Oikawa : J. Alloys Compd., 814 (2020), 152289.
- 14) N.Ueshima, C.Aoki, T.Osada, S.Horikoshi, A.Yanagida, H.Murakami, T.Ishida, Y.Yamabe-Mitarai, K.Oikawa, N.Yukawa and J.Yanagimoto : Superalloys 2020, (2020), 491.
- 15) 中村丞, 上島伸文, 及川勝成 : 2021年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2021), 179.

(2021年10月5日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 教授

宇都宮 裕

上 島伸文先生は、大阪大学工学部応用理工学科をご卒業後、同大学院工学研究科の知能・機能創成工学専攻に進学され、学位論文“Numerical Analyses of Mechanism behind Variant Selection in L1₀-Type Ferromagnetic Alloys under External Field”をまとめて、博士課程を修了されました。東北大学に助教として赴任されてからは、少し分野を変えて創形創質工学会や日本塑性加工学会でも活躍しておられます。著者は共同研究や共著論文の執筆経験はありませんが、ご活躍の様子を比較的近くで拝見してまいりましたのでエールの言葉を贈らせていただきたいと思います。材料分野の研究者は、ステンレス鋼など材料の種類、変態や析出などの現象、製鋼や圧延といったプロセス、あるいは顕微鏡などの観察・計測手法を専門として固定して、その専門分野で研究を深化させていくことが一般的です。若手研究者は自由な発想で新たな分野を切り拓くことが期待されますが、実際には就職や昇任のために短期間で業績をあげることが優先され、特定の分野に留まる傾向がさらに顕

著です。しかしながら、上島先生は材料の組織制御、加工プロセス、力学特性など材料に関わる広い分野で、優れた研究をなさっています。研究発表や執筆論文を拝見しますと、実験のみならず数値計算で考察が補強され新たなモデルが提案されていることに気づかされます。そのような研究を可能にしている背景としては、材料学以外の分野を含めて基礎学問を深く理解した上で、幅広い分野の知識を吸収し、仮説を立てて考察を進めながら実験が行われたことが推察されます。今後も一つの分野に留まることなく、従来ほとんど研究がなされていない新規分野、2つ以上の分野にまたがりアプローチが難しい境界分野を開拓していただくことを期待しています。日本鉄鋼協会では、創形創質工学会のみならず、これまでと同様に、高温プロセス部会、材料組織と特性部会など複数の学術部会で活躍されるとともに、部会間の橋渡し役を担い将来の学会部門をリードしてくださいことを期待しております。

JFEテクノリサーチ(株) 西日本ソリューション本部 専門技監

早川 康之

新 進気鋭の若手研究者のリーダー格として大いに活躍されている上島先生の興味深い記事「組織計算から塑性加工への貢献を目指して」を拝読し、鉄鋼業界の研究開発部門で約35年間勤務し、東北大学青葉山キャンパスで、お隣の研究室に3年間在籍し、先生ともお付き合いしてきた筆者がエールを送らせていただきます。

5年ほど前に、先生に初めてお会いした時の第一印象は、とても若々しいお姿で、少し失礼ですが、学生さんのような印象を持ちました。その後、本文中にも触れられている、先生にとって最初の鉄鋼研究とのかかわりとなったMnS析出研究についてのディスカッションをさせていただいたり、繰り返し引張試験に伴う興味深い応力緩和現象に関する学内外での研究発表などを拝聴したりすることで、これまで多種多様な素材について携わってこられている先生の研究の間口の広さに感心させられました。特に、実験とシミュレーションの両方とも得意である点にも驚かされました。後から先生の経歴を知ると、初めてお会いした時点で、在学中からの受賞経験もあり、カリフォルニア大学パークレー校での留学経験もあり、すでに十分な研究業績を上げられていることを知りました。東北大学着任後も戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)での活躍を始め、順調に研究生活を謳

歌しているように見受けられます。

先生が最後のほうに指摘されている「材料パラメータと呼ばれるものがあるが、物理的な背景から離れて単なる数学的なフィッティングパラメータとなっているものがないか?」という問いかけは、モンテカルロシミュレーションをかじった筆者としても同意するところであります。コンピュータによるバーチャル世界化が進み、結果予測のみでは真のブレイクスルーが生まれえない懸念があります。健全な危機意識を持ち、実験とシミュレーションの両方とも得意な先生なら、解決策を見出してくれるものと期待しております。

最後に、将来の日本を支える物造り産業、素材産業の発展のためには、多様性を重視した人材育成が必須です。先生の所属する及川勝成先生の研究室では、毎年4年生だけでも、6、7人の様々な個性を持った学生がやってきます。本当に指導スタッフの少ない中、同時に多くの学生にテーマを与え、興味を持たせて論文完成まで丁寧に指導するお姿を3年間目の当たりにしてまいりました。育て上げた人材は鉄鋼業をはじめとする材料工学の分野で活躍を始めています。これからも優秀な人材を育て上げる点にも大いに期待しております。