



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

塑性力学の発展と工業界への貢献

Theory of Plasticity and Its Industrial Application

濱崎 洋

広島大学大学院
工学研究院 助教

Hiroshi Hamasaki

ふえらむ記事「躍動」の依頼を頂戴した際に、どのような内容にしようかと随分と考えた。筆者の研究分野は塑性力学、とりわけ応力-ひずみ関係を記述する構成則とその塑性加工数値解析への適用と、塑性力学、塑性加工工程設計への数値最適化手法の適用である。これらの研究は筆者のかつての指導教員でもあり現在の上司でもある広島大学の吉田総仁教授との仕事である。広島大学の助教に着任してはや5年を迎えようとしているが、これらの仕事を通して企業や海外の大学の研究者と共同研究をする多くの機会を頂いた。それらの出会いは今後の研究活動における大きな財産であることは疑いないが、同時に大学の、とりわけ工学部機械系での研究のあり方を常に考えさせられるものであった。

そこで、ここでは筆者の研究内容、大学での活動を交えながら、今後の大学での研究活動および学生指導について個人的な考えを述べたいと思う。

1 高精度構成則の提案、最適化手法とその塑性加工への応用

筆者が博士課程後期に携わったテーマはマイクロインデンテーションによる材料パラメータ同定手法の構築で、これは硬さ試験に似た三角錐や円錐の圧子を材料表面に押し込み、押し込み荷重と圧子変位を逐次記録することで機械的特性を得る試験である。所属していた研究室のRoman Nowak助教授が薄膜の力学特性に興味を持っており、当時はNowak先生の実験補助的な立場から研究がスタートした。修士課程修了後は幸運にも当時英国のBradford大学に所属していたVassili Toropov教授（現在は英国Leeds大学教授）と共同で仕事をさせて頂く機会をもらい、ここで数値最適化手法を学んだことがきっかけとなり、マイクロインデンテーションと最適化手法を組合せた応力-ひずみ構成則の材料パラメータ同定手法^{1,2)}を提案して博士論文をまとめるに至った。その後、広島大学工学部の助教に就任してから現在までは、主に塑性力学

を中心とした研究、とりわけ応力-ひずみ構成モデルの構築で仕事をしており、その一部を紹介させて頂く。

1.1 オーステナイト系ステンレス鋼の繰返し変形特性³⁾

SUS304のバルク試験片に圧縮・引張変形を繰返し付与し、大ひずみでの繰返し応力-ひずみ特性と変形中のマルテンサイト体積分率を測定した。その結果を図1に示す。この図より、圧縮のみの単調負荷ではマルテンサイト体積分率が塑性ひずみの増加に伴い単調増加するのに対し、負荷方向を反転させた場合には、再降伏直後にマルテンサイト変態が抑制され、ステンレス鋼の加工誘起変態カイネティクスとしてよく使用されるStringfellowのモデル⁴⁾では繰返し変形に対応できないことを確認した。さらにこのような応力-ひずみ曲線を再現できる構成モデルとして吉田・上森モデル (YU)⁵⁾をベースとした移動硬化モデルを提案し、マルテンサイト量が予測可能であれば実験結果を高精度に再現できることを示した。現在は応力反転時のマルテンサイト変態の停滞の理由を調査するとともに、そのカイネティクスの構築に取りかかっている。

1.2 β チタン合金板の高温変形特性^{6,7)}

β チタン合金板は冷間での延性に優れるが、プレス成形時のスプリングバックが問題であるため熱間で成形することも多く、このような熱間成形のCAE解析には温度・ひずみ速度を考慮した材料モデルが不可欠となる。この研究ではそのような材料モデルの構築を目的とし、まずは β 変態点以上である800℃での高温引張試験を実施して応力-ひずみ曲線を取得した。その結果、温度とひずみ速度の影響が強く、降伏直後に降伏点現象を示し、その後なだらかに加工軟化するような応力-ひずみ曲線が得られた。試験後に組織を凍結させた試料のEBSD観察により、変形初期にKAM (Kernel Average Misorientation) が急増しており、降伏点現象はJohnston-Girmanの理論⁸⁾により説明できることを示した。また、可動転位密度を考慮した温度・ひずみ速度依存の構成

モデルを提案し、図2のように実験結果を高精度に再現できることを示した。

1.3 成形条件と材料のばらつきを考慮したテンションレベリング加工条件最適化^{9,10)}

高精度なCAE解析が実現可能となれば、次の段階としてその有効的な活用法を考える必要がある。数値最適化手法を使用した加工条件決定は、従来の技術者の経験や、力学的な知見を取り入れつつ、最適条件をCAE上で自動決定するものである。特に大量生産においては材料や加工条件は常に一定ではなくある程度の範囲でばらつきを持つものと考えられるため、確率論にてそれらのばらつきを取り扱い、テンションレベリングの工程設計を行った。決定すべき条件は付与張力、ロールインターメッシュであり、また、ヤング率、初期降伏応力、初期板厚を設計者が自由に変更できないが板毎にばらつきを有する変数として取り扱った。最適化問題は矯正後のそりに着目し、残留曲率があらかじめ定義した許容値以上になったものを不良品と考え、不良品の発生率を最小化するような成形条件を決定した。その結果、ヤング率、初期降

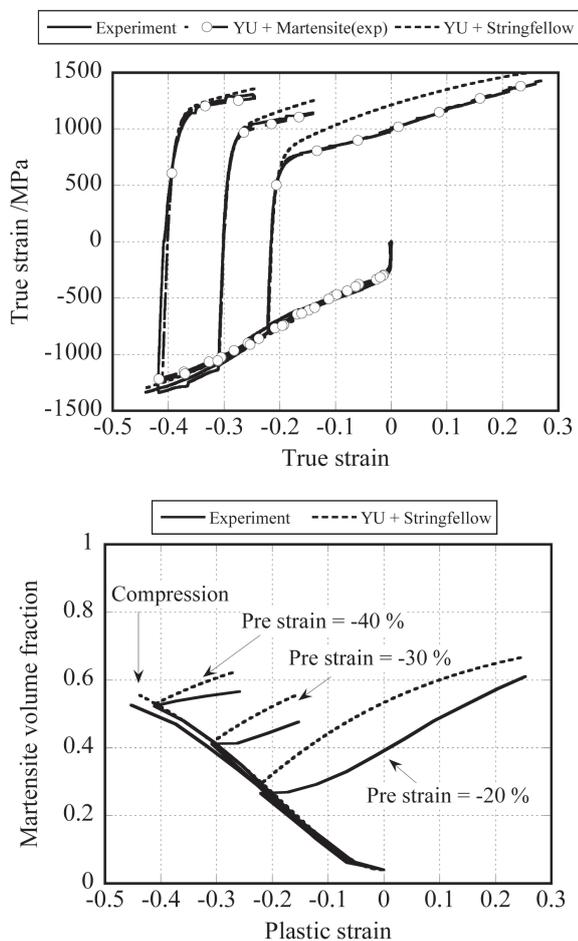


図1 実験および計算から得られたSUS304の応力-ひずみ曲線(上)とマルテンサイト体積分率-塑性ひずみ曲線(下)

伏応力は残留曲率に大きく影響することが分かり、それらが常に一定値を取ると想定した場合の最適化手法では不良品の発生率が大きくなることを示した。このような塑性加工の最適化問題は理論の枠組上はほぼ完成したものであるが、計算コストが大きく、そのため製造現場で使えるようなものとはなっていない。計算機能力のさらなる飛躍を待つばかりでなく、特にこのような応用化研究は現場の観点に立って問題点を把握し解決していく必要があると感じている。

1.4 逆問題による材料パラメータ同定ソフトウェアの開発¹¹⁾

材料の応力-ひずみ構成モデルや異方性降伏関数をCAE解析で使用するためには取り扱う材料毎に式中の材料パラメータを決定する必要がある。単純なモデルであればパラメータ同定も比較的簡易であるが、モデルが複雑になるに従ってパラメータ数は増大し、また、それらを決定するための材料試験の数も増えてくる。ここでは繰返し塑性変形時のハウシंगाー効果を精度良く表現でき、特に高張力鋼板のスプリングバック予測に定評のある吉田・上森モデル(YU)に着目し、式中の8つの材料パラメータの値を逆問題で求める手法を提案した。ここでの逆問題とは実験で得られる繰返し応力-ひずみ曲線になるべく近い計算結果を与えるようなパラメータの組を見つけ出すことであり、最小二乗問題として定式化することができる。これはすなわち非線形最適化問題

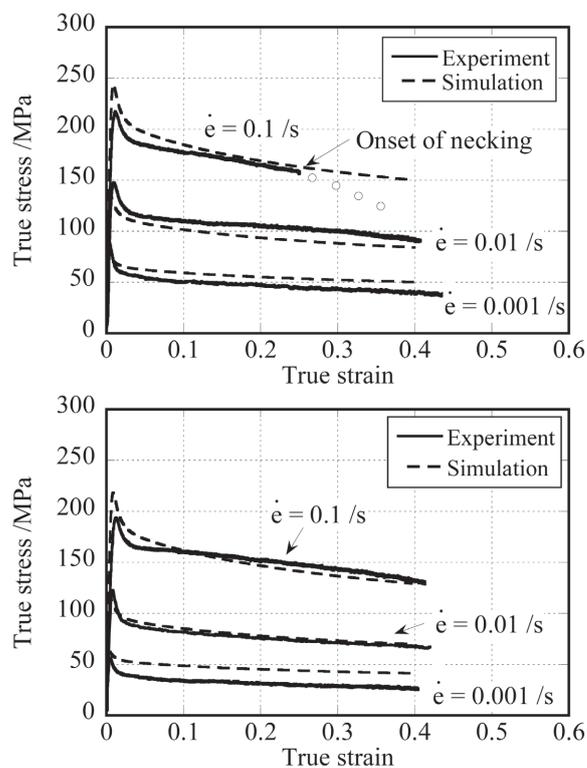


図2 公称ひずみ速度0.1, 0.01, 0.001s⁻¹におけるβチタン合金の応力-ひずみ曲線と対応する計算結果の比較, (上) 試験温度750°C, (下) 800°C

であるが、逐次二次計画法のような一般的な最適化手法で簡単に解が得られる。結果の例として図3に780MPa級高張力鋼板の繰返し応力-ひずみ曲線と、本手法により得られた材料パラメータでの計算結果を示す。両者は非常に良く一致しており、提案手法の有効性が確認できる。また、ここではパラメータ同定の枠組みを示したが、実際は繰返し引張圧縮試験そのものが困難である。そこで筆者らの手法では鋼種毎に材料パラメータの探索範囲(上限値と下限値)を適切に設定することで単軸引張試験結果のみからでもある程度信頼できる結果が得られることを確認している。しかしより精度の高いパラメータの決定のため繰返し変形特性を反映しつつ簡便な装置で素早く特別な実験技術を必要としない試験方法の提案が求められており、現在は繰返し曲げ試験によるパラメータ同定手法の開発¹²⁾を進めている。

筆者はここで紹介した以外にも例えば鋼板の温間成形¹³⁾、異種金属積層板の高精度プレス成形解析¹⁴⁾、異方性降伏関数の提案¹⁵⁾などの研究にも携わっており、そのほとんどが共同研究などなんらかの形で産学連携の形をとっている。おかげで助教として仕事をしているこの4年半の間に随分たくさんの方と知り合い、研究内容だけでなく企業における研究の位置付けというものを勉強させて頂いた。とりわけ大学では狭い専門分野に特化した研究のみに偏りがちである。基本原理を突き詰めるためには大切なことであり、それができるからこそ大学での研究職を選んだのは事実である。一方で、共同研究を通じて感じたことは、このような基礎研究の成果を産業に活用できる形で提示することもまた大学の大切な役割だということである。筆者はまだ研究者としては駆け出しであるが、国内の研究レベル向上と国内産業への貢献に尽力したいと思っている。

2 学生フォーミュラ活動

最後に余談であるが学生指導について述べさせて頂く。講

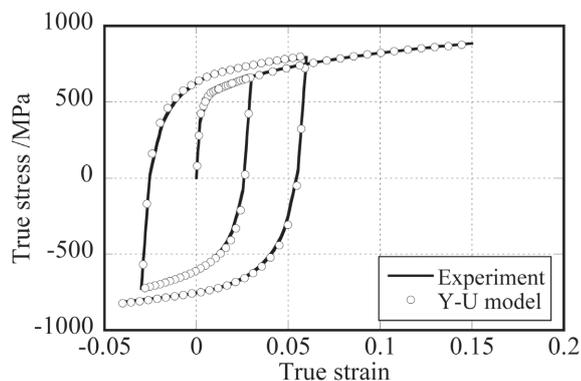


図3 780MPa級高張力鋼板の繰返し応力-ひずみ曲線と最適化手法により決定した材料パラメータによる計算結果の比較

義、および研究室での学生への研究指導は大学教員であれば例外なく受け持っているはずなので、ここでは学生フォーミュラ活動について触れる。ご存じない方もおられるであろうが、学生フォーミュラ大会は公益社団法人自動車技術会が企画する大学・高专などの学生によるフォーミュラ大会である。ようするにレーシングカーを学生が自ら設計・製作し、大会で走らせて競争する。その採点基準は走行性能を評価する動的審査と、コストやプレゼンテーション能力を争う静的審査の二つから構成されており、この大会を通してエンジニアとしての総合力を養うことができる。広島大学も2010年度より大会に参加し、今年は総合12位という好成績を残すことができた。この活動に参加している学生は例外なく良く身体が動き、自ら考えるようになる。研究指導や専門科目の講義とは異なるが、機械に興味を持って機械系に入学してきた学生が、自らその能力を伸ばす場所を提供することも大学としての役目だと考えている。できることは限られているが今後も可能な限りサポートしていくつもりである。

参考文献

- 1) 濱崎洋, V.V.Toropov, 新島数洋, 吉田総仁: 塑性と加工, 46 (2005), 397.
- 2) H.Hamasaki, K.Shinbata and F.Yoshida: Mater. Trans., 46 (2005), 3073.
- 3) 濱崎洋, 石丸詠一郎, 兼折直樹, 上森武, 吉田総仁: 第42回塑加工春季講演会講演論文集, (2011), 245.
- 4) R.G.Stringfellow, D.M.Parks and G.B.Olson: Acta Metall. Mater., 40 (1992), 1703.
- 5) F.Yoshida and T.Uemori: Int. J. Plast., 18 (2002), 661.
- 6) X.T.Wang, H.Hamasaki, M.Yamamura, R.Yamauchi, T.Maeda, Y.Shirai and F.Yoshida: Key Engineering Materials, 410-411 (2009), 177.
- 7) X.T.Wang, H.Hamasaki, M.Yamamura, R.Yamauchi, T.Maeda, Y.Shirai and F.Yoshida: Mater. Trans., 50 (2009), 1576.
- 8) W.G.Johnston and J.J.Gilman: J. Appl. Phys., 30 (1957), 129.
- 9) 濱崎洋, 志垣征聡, 吉田総仁, Vassili Toropov: 鉄と鋼, 95 (2009), 740.
- 10) H.Hamasaki, K.Gejima, V.Toropov and F.Yoshida: Proceedings of 10th International Conference on Technology of Plasticity, (2011), 309.
- 11) H.Hamasaki, K.Yelim, R.Hino and F.Yoshida: Steel Research International, Special Edition: 14th International Conference, (2012), 343-346.
- 12) H.Hamasaki, S.Nakamura, V.V.Toropov and F.Yoshida: CD-ROM Proceedings of 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, (2011)
- 13) N.Saito, M.Fukahori, D.Hisano, Y.Ichikawa, H.Hamasaki and F.Yoshida: Key Engineering Materials, 535-536 (Accepted) .
- 14) K.Yilamu, R.Hino, H.Hamasaki and F.Yoshida: J. Mater. Proc. Technol., 210 (2010), 272.
- 15) F.Yoshida, S.Tamura, T.Uemori and H.Hamasaki: Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET2011), (2011), 807.

(2012年12月5日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム部門 教授

桑原 利彦

濱 崎先生の最近のご活躍は学会講演会などでも目立っています。謙虚な態度で積極的に質問される姿勢は特に印象的です。これまでの研究テーマも、材料構成則（温度依存性を含む）、材料構成則のパラメータ同定のための簡易実験手法の開発、塑性加工工程の最適化など、助教としての4年半の間に多岐に渡る研究を手がけられています。研究者の資質として必須である知的好奇心が旺盛な方と拝察します。恥ずかしながら私が30代の頃はこれほどの仕事をしていませんでした（まさに蛸壺状態でした）。ですので、正直に申せば、「これからもこのペースで頑張ってください」とエールをお送りするだけで十分と思っています。

強いて申し上げれば、これまでの研究テーマを拝見しますと、出身研究室の影響をいまだ引きずっておられる感があります。まだお若いのでこれは仕方がないことですが、なるべく早い時期にそこから脱却されて、自分固有の城の基礎を30歳代に築かれれば、今後の発展は自ずと開けてくると思います。そして国際的評価の高いジャーナルへの論文掲載を目標とされれば言うことなしです。私は、博士課程を修了して2年ほどたった頃、博士研究の御指導を頂いた神馬敬先生から、「そこから多くの枝葉が伸びるような、幹となる研究がい

いね」とさりげなく言われたことがあります。ちょうど新しい研究テーマの模索に苦しんでいた時期でしたので（神馬先生はおわかりだったのでしょうか）、背筋が伸びるような緊張感を憶えました。研究テーマについては、産業界のニーズも大切な指標のひとつですが、最終的には自分が心底やってみたいと思うかどうか判断基準になると思います（後者の方が「幹となる研究」となることが多いと感じています）。また私の場合は、自力で研究テーマを見つけたというよりも、多くの場合、人との出会いが契機となりました。ですので、時には自分を蛸壺状態に置き、時には多くの人と交わる、というバランスも大切かと思っています。

学生フォーミュラ活動もサポートされているとのこと。勉学以外のことにも熱中できる学生は、研究面においても伸び代が大きいです。その意味で、学生の課外活動をサポートすることは、優秀な若手技術者を育てるという点で大変よいことだと思います。研究でご多忙かとは思いますが、是非継続して下さい。

勝手な私見を申しましたが、ご容赦下さい。濱崎先生のますますの御発展を祈念しております。

JFEスチール（株）スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 部長

蛭田 敏樹

躍 動は毎月楽しんで読ませていただき、顔見知りの若手／先輩研究者・技術者の記事に接し感銘を受けることも多々あります。今回、エールを送る立場になろうとは予想もしていませんでした。実は私自身濱崎先生と直接面識がなく、論文を拝読する程度でしたが、吉田先生の研究室からのOBが当研究部に在籍しており、濱崎先生のお噂もかねがね伺っておりましたので、今回エールをお引き受けした次第です。

そのOBから、濱崎先生は研究熱心で、丁寧に学生の指導をされる先生だと伺っています。また、在学中には、先生は博士課程に在学中だったとのことですが、研究計画を指導され、実験結果について熱く議論したので学会発表や修士論文は満足できる仕上がりになったと聞いています。学生が社会に出てからのことも考え、休憩時には留学生を交えて英語でコミュニケーションする場を作られ、語学の重要性を率先して教えて頂いたそうです。先生の人柄は穏やかで、優しい半面、趣味？のカーレースの話になると、熱っぽくF1の話がされると伺っています。最後に記載されている学生フォーミュラ活動では今後もサポート活動を継続され、優れた学生の育成に力を注いでいただきたいと思います。

先生の研究分野は塑性力学、材料の応力-ひずみの構成則、塑性加工の数値解析、塑性加工の数値最適化手法など、塑性加工分野で幅広い研究活動をされています。我々加工技術に関わる者としては、材料の変形挙動を取り扱う基礎となる応力-ひずみの関係が極めて重要であり、加工方向が異なる場合の移動硬化モデルは実用的にも大きな価値があると思います。さらに「確率的最適化手法によるテンションレベリング工程の信頼性設計」の研究では、初期板厚、降伏応力などの材料のばらつきが、不良に及ぼす影響を明らかにし、確率的最適化手法を組合せ、テンションレベリングの信頼性を大幅に向上できることを示されました。薄物、高強度の材料が増加する現状では、テンションレベラーの信頼性、操業技術の向上に大いに役立つものです。

先生が述べていますように、「国内の研究レベルの向上と国内産業への貢献に尽力したい」との気概は大変頼もしく、若い研究者でありながら、将来を見据え、産学連携を進められる研究姿勢は今後も多いに期待されます。塑性加工を利用する産業分野では、製品の品質向上、生産性の向上に関するテーマは多くあり、現在の研究を深化され、この分野での研究開発に邁進していただきたいと思います。