



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

金属成形解析のためのマルチスケール塑性論 フレームワークの構築に向けて

Toward the Development of a Multiscale Plasticity Theory Framework for Metal Forming Analysis

大家哲朗

Tetsuo Oya

慶應義塾大学

大学院理工学研究科

総合デザイン工学専攻 専任講師

1 はじめに

この度、「躍動」の執筆をする機会をいただき、大変光栄に存じます。筆者は2012年より日本鉄鋼協会に所属し、創形創質工学部会にて若手の会を中心に活動してきましたが、この場を借りてこれまでの研究活動を振り返り、今後の展望を述べてみたいと思います。筆者は2005年に東北大学大学院情報科学研究科にて学位を取得しましたが、その際に行った研究は構造体中の振動エネルギーの可視化(振動インテンシティ計測)であり、現在の研究と直接の関係はありません。その後豊田工大にて設計工学の研究に携わり、東京大学生産技術研究所・柳本研(現工学系研究科)にて複層鋼板プロジェクトに従事しました。詳細は第2章にて述べますが、ここでの研究経験がその後の金属材料の成形性に関する塑性力学的研究につながるものであったと考えています。現在は慶應義塾大学にて、塑性力学と設計工学に関する研究・教育に従事しています。本稿では、筆者のこれまでの研究のうち、金属材料の塑性変形に関するものを紹介します。

2 複層鋼板の塑性変形に関する研究

鉄鋼材料の高強度化はマルテンサイト比の増加に繋がり、低延性化をもたらす場合があります。軽量化設計のためには高強度材料は不可欠ですが、低延性材料はプレス成形性の悪化を引き起こすため、生産性が低下します。そこで、高強度化と十分な延性の保持を同時に達成することが求められ、現在までに様々な材料が開発されています。複層鋼板は更なる高強度化と高延性の両立を企図されたプロジェクトであり、その内容と成果が文献¹⁾にまとめられています。筆者は複層鋼板の塑性加工性の解析的評価を主に担当し、ハット曲げによる成形性評価やV曲げにおけるスプリングバック解析など

を行いました。詳細は解説記事²⁾にて説明しています。当時不思議だったことは、単体では脆性的なマルテンサイト系ステンレス鋼が、高延性鋼を用いて複層化されることによって、単層時の破断伸びを大きく超えるようになることでした。

材料の変形能は引張試験で評価されることが多いですが、金属材料がプレス成形に供された場合には、その破壊までに至る変形量は引張試験で得られた破断伸びを大きく上回ることがあります。材料自体の延性と加工時の成形性との違いです。これは応力勾配および十分な加工硬化能力を残した材料領域が危険領域を保護することが原因と考えられます。複層化による延性向上の原因も似たようなメカニズムにあると考察しました。すなわち、鉄鋼材料自体は複合材料ですが、塑性力学のマクロ的視点では均質かつ一様変形するとみなします。しかし複層化という幾何形態は均質的とはみなせないのので単層材料のように扱えず、その延性を考察するにはむしろ成形性評価に近いアプローチが必要と考えたということです。その後、高延性層の加工硬化能力の余力を低延性層側に界面を通して供給することで、低延性層側のくびれの発生を遅滞化するというようなモデルを考案しましたが、十分検討する前に時間切れとなりました。しかし、本研究を通して材料の延性と成形性について考えたことは、以降で説明する一連の研究を実施するにあたって良い経験になりました。

3 現在進行中の研究

以下の研究は、M & M Research社および学生時代の指導教員であった伊藤耿一東北大学名誉教授らとの共同研究として進められているものです。筆者が本格的に参加して以降の成果について紹介します。尚、これらは現在進行中の研究課題であり、理論の細部や結果については今後もアップデート

される予定です。なお、多くの機能はM & M Research社のNXT Defect Evaluatorにて利用可能となっています。

3.1 非関連流れ則と非法線則に基づく塑性構成式

材料の塑性変形挙動を予測する際に重要なのが材料モデルと呼ばれる数理的枠組みです。中核をなすのが塑性構成式であり、関連流れ則と法線則が基本形として受け入れられています。また、材料ごとに加工硬化則と降伏関数を定める必要がありますが、これらはスカラー関数であり、実験データにうまく当てはまるように関数形とパラメータを決定すればよいです。問題は流れ則で、応力増分と塑性ひずみ増分の間のテンソル関係がどのようなものになるかを実験的に確定することは難しく、適切な物理的仮定が必要です。Hillのポテンシャル理論によると、何らかのポテンシャル関数の外向き法線方向がひずみ増分方向に一致するとされ（法線則）、ポテンシャル関数として降伏関数を用いる関連流れ則が多く用いられています。本来降伏関数はその名の通り降伏応力を与えるものであり、塑性ポテンシャル関数はひずみ成分を与えるものなので物理的な役割は異なります。しかし、関連流れ則に基づく塑性構成式は、特に金属成形の分野では長年標準的なモデルとして使われてきました。定式化が簡単であり実験的に扱いやすいことが大きな理由と思われる。しかし、本来独立に定めるべき塑性ポテンシャル関数を降伏関数で代替しているのが物理的に正確ではなく、関連流れ則モデルは近似的なモデルと言えます。ゆえに、対象とする材料の降伏曲

面と塑性ポテンシャル曲面の相似度が低い場合には誤差が拡大すると考えられます。コンクリートや地盤材料に対しては非関連流れ則が昔から適用されていますが、21世紀に入ると金属成形の分野にも適用事例が増加しています。

詳細は省きますが法線則についても同様なことが言え、応力増分方向と塑性ひずみ増分方向のベクトルの向きが完全に一致する保証はないので、接線方向成分を考慮する非法線則が存在します。数学的に考えると、関連流れ則は降伏曲面と塑性ポテンシャル曲面が完全一致している場合の非関連流れ則であり、非法線則は接線成分が0の場合の法線則とみなせます。ゆえに、非関連流れ則および非法線則はその名称から特殊な理論であるとの印象を与える場合がありますが、関連流れ則と法線則を内包する一般モデルであると言えます（図1）。また、既存の非関連流れ則モデルは関連流れ則モデル用の降伏関数をそのままの形式で用いているものがほとんどであり、一般化を目的として構築されたものではないため、総パラメータ数がかかなり多くなるなど使い勝手の悪いものになっています。そこで我々は、より一般的な塑性モデルの構築を意図し、Hillの異方性降伏関数を高次化した非関連流れ則モデルを構築しました。本モデルは任意次数の降伏曲面と塑性ポテンシャル曲面を独立に評価でき、必要な実験も引張試験（ σ_0 , σ_{90} , r_0 , r_{45} , r_{90} ）と等二軸試験（ σ_b ）のみ（次数を決める場合には平面ひずみ試験も必要）であり、これだけで降伏曲面と塑性ポテンシャル曲面を独立に定めることができます。陽な塑性ひずみ増分式や凸関数条件も得られています。本モデルは次

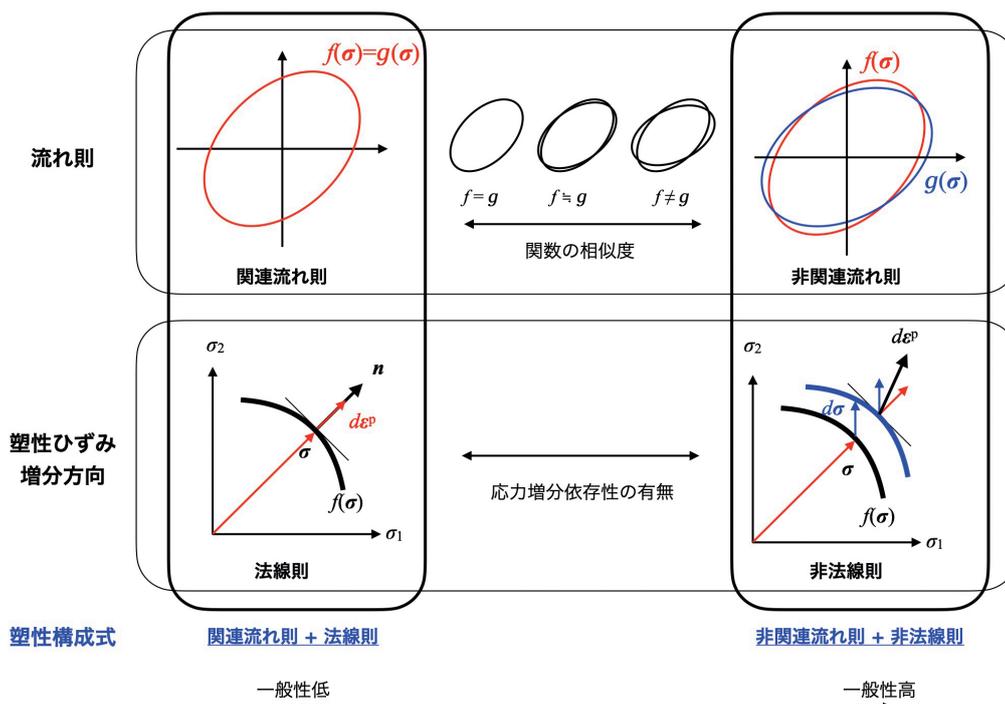


図1 非関連流れ則および非法線則モデルの概念

節で説明する成形限界予測手法の内部で使用されています。以上の内容の大部分は解説記事³⁾にて詳しく説明しています。

従来からある解析精度向上への要求のみならず、例えば成形限界予測を基にした逆解析による材料設計や加工プロセスおよび金型デザインの最適化のように、成形解析の役割の拡大が期待されます。そのためには、現在の標準的なモデルでは不十分であり、成形解析の中核となる材料モデルの本質的なアップデートが求められていると筆者は考えています。

3.2 分岐理論による成形限界予測

前節で説明した非関連流れ則モデルは一般的な塑性解析にも有用ですが、特に威力を発揮するのは複合負荷の場合や破壊近傍などの応力場が急変する状況です。法線則に基づく関連流れ則モデルでは、塑性ひずみ増分方向が直前の応力場によって拘束されるので、応力場の急変には追従し難いからです。

一般に、金属塑性加工の分野における破壊予測は、成形限界線図 (Forming Limit Diagram : FLD) を用いる手法か、延性破壊条件を用いる手法かのどちらかが適用される場合が多いです。FLDの取得には手間のかかる実験が必要であることと、材料や加工法 (ひずみ履歴) が異なる場合への汎用性が低いことが問題です。延性破壊条件の適用はFEMとの親和性が

高く利用しやすいという利点がありますが、破壊基準の物理的意味が必ずしも明確でないことと、やはり破壊基準パラメータを実験的に獲得する必要があるために汎用性が欠けるという問題があると考えられます。一方、客観性と汎用性を兼ね備えた手法が理論的にFLDを求める手法であり、例えばHillやSR等の理論が知られています。理論FLDは材料の破壊そのものではなく、その直前に生じる局所分岐の発生を成形限界とみなすものです。ゆえに、材料の塑性変形過程を正確に追跡し、適切な分岐基準を定義する必要がありますが、過去の理論は不十分な点もあり、成形限界予測手法としては普及しませんでした。伊藤らはHillの一般分岐理論を拡張した3次元局所分岐理論を構築しており (せん断帯発生基準)、同理論に基づく成形限界予測手法を考案しました。現在我々は、3次元局所分岐理論の枠組みに伊藤-呉屋の応力増分依存性塑性構成式および前述の非関連流れ則モデルを適用した方法論を用いています。詳細は解説記事⁴⁾と文献⁵⁾に譲りますが、本手法は一切の破壊試験を必要とせず任意の材料に対して理論FLDを提供でき、FEMによる成形解析と併用することで、対象が板材かバルク材かを問わず、被加工材に生じる破壊の時期・位置・形態を事前に知ることができます (図2)。

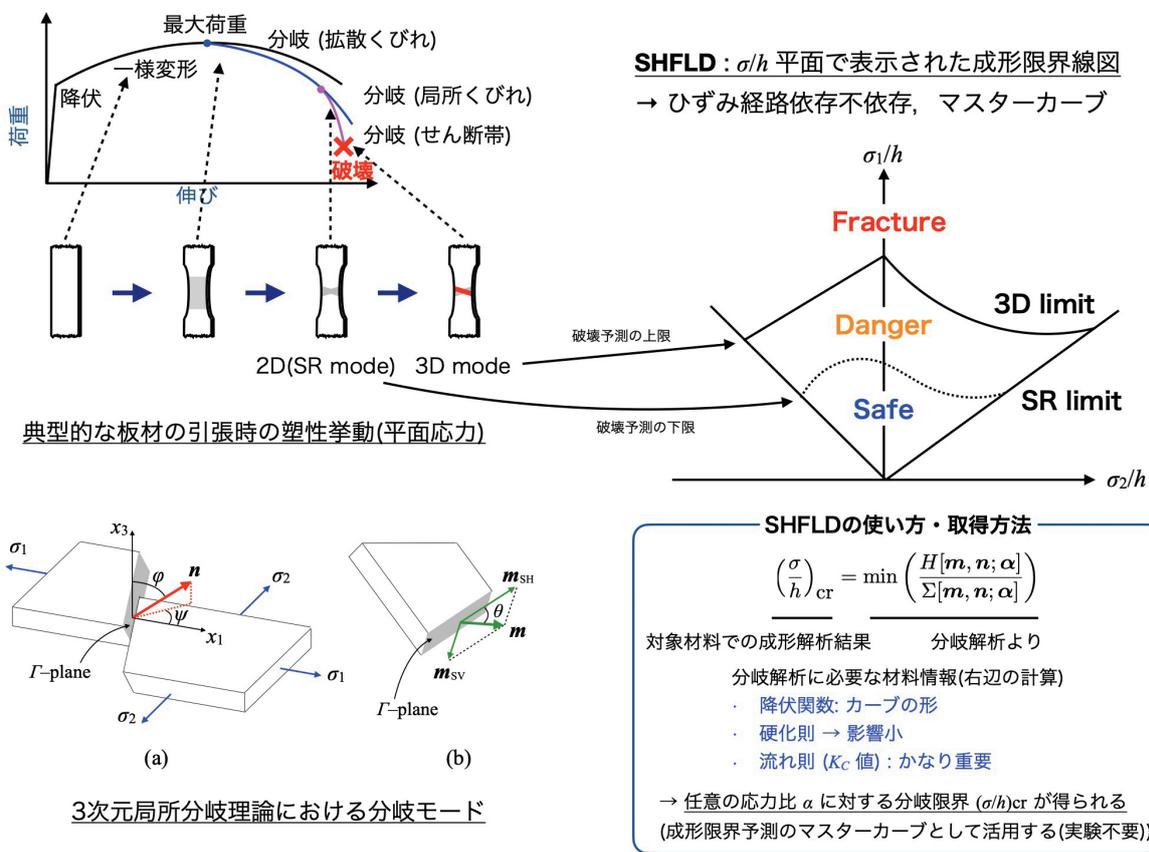


図2 3次元局所分岐理論に基づく成形限界予測手法 (SHFLD) の概念

3.3 有限要素多結晶モデルを用いた数値材料試験法

以上のような材料モデルおよび成形限界予測手法についての研究をしていく課程で、材料試験自体に対する検討をすることが多くなりました。引張試験程度であれば、大抵の大学・企業等に装置が存在しますし、無くとも論文等からもデータの入手は可能です。しかし、それ以外の二軸試験、せん断試験などの専用の装置や治具が必要な材料試験は一般的と言え難く、データ取得の手間もかかります。ゆえに、解析ソフトに含まれる高級な材料モデルを使用したいと思ってもすぐには使えないということはよくあることです。そこで筆者らは、引張試験等の実施容易な材料試験のデータのみを用いて、それ以外の試験データをシミュレーションによって予測可能にするための数値材料試験法の構築に取り組みました。最終的に必要なものは異方性パラメータ等の巨視的パラメータなので、それらのような現象論モデルに内包されるパラメータを含まないモデルが必要となります。ゆえに、筆者らは有限要素多結晶モデル (Finite Element Polycrystal Model : FEPM) に基づく仮想材料の構築とその学習過程の

実装を行いました。FEPMはいわゆる結晶塑性モデルの一つですが、一般によく用いられるひずみ速度依存型構成式ではなく、すべてのすべり系のすべりの有無を収束計算によって判定する逐次累積法に基づいています。数値材料試験法の大枠は、多結晶モデルに含まれる微視的パラメータ (結晶方位とすべり系の硬化則) を最適化手法または機械学習によって既知データに対して当てはまるように決定するというものです (図3)。既知データは例えば引張試験で得られる流動応力曲線やLankford値 (r 値) です。もし、仮想材料の自由度が十分で、かつ学習が成功していれば、その学習済み仮想材料は実材料の力学的挙動を計算機上で近似できるようになるので、あとは所望のデータを取得できるような変形解析を実施すればよいということになります。基本的な流れはシンプルなものですが、パラメータをどう選んで実験データと関連づけるか、学習過程に投入する最適化手法 (遺伝的アルゴリズム等) や機械学習法 (深層学習等) はどのようなものが適しているか、等の問題があります。単なる最適化問題に落とし込むことは仮想材料の物理的解像度の低下を招くので注意が

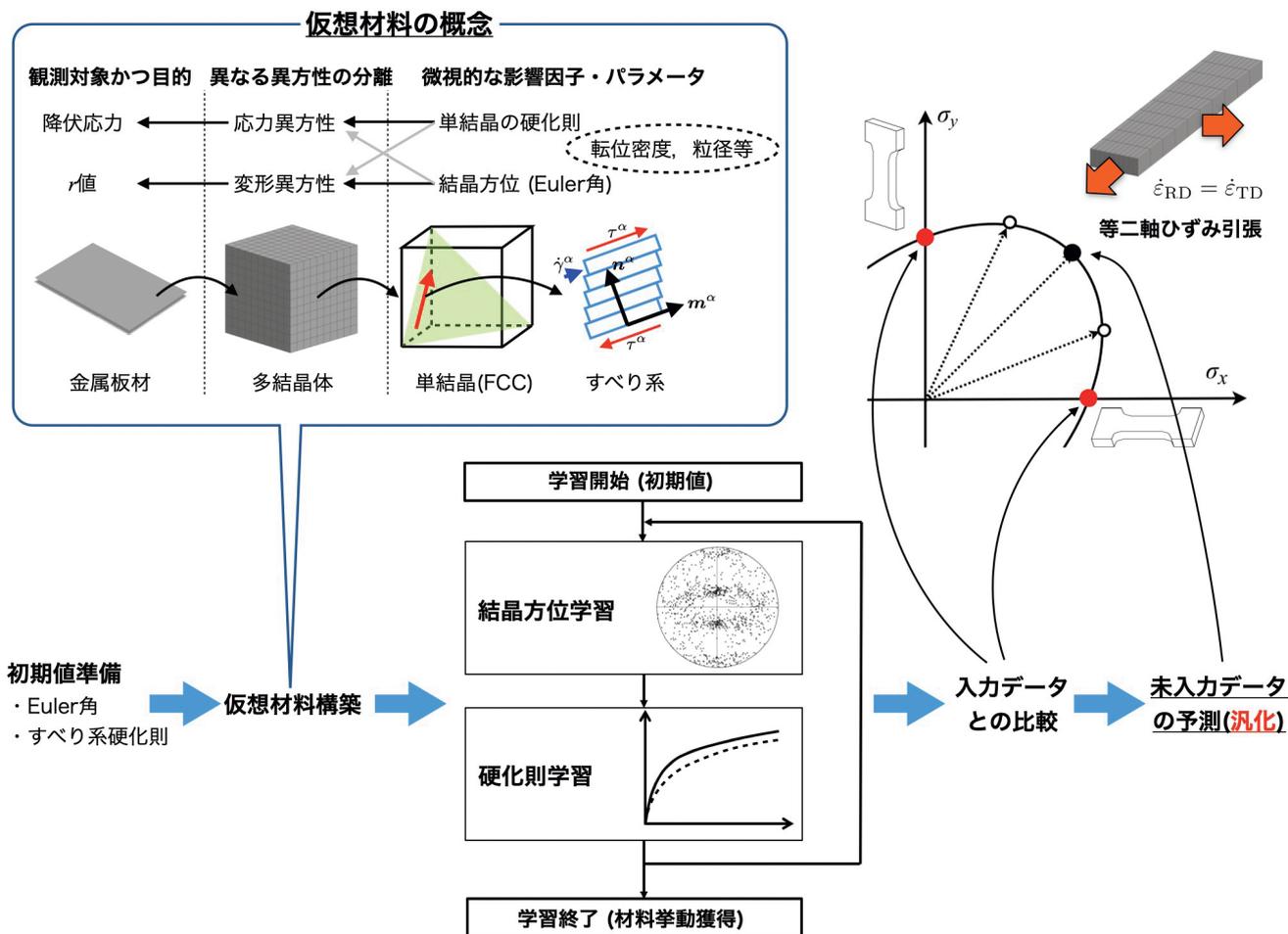


図3 FEPMを用いた数値材料試験法の概要

必要です。最適解自体が得られても、パラメータセットが物理的に妥当かどうか不明だからです。測定量と物理的関係性の深いパラメータ同士を関連づけた学習を行うべきであると考えられます。筆者らはこれまでにFCC材料⁶⁾とHCP材料⁷⁾についての数値材料試験法の検証を行なってきており、うまく行く手応えを得ています。BCC材料は結晶構造が複雑であり、FCCおよびHCPに比べると困難が伴います。現在取り組んでいるところですが、将来的にはすべての結晶構造を包括するシステムを構築し、完全な材料試験レスに近づけられたらよいと考えています。

余談ですが、本システムは元々Fortranコードでしたが、現在は学習部分もFEM部分もPython化されています。これによってコードの可読性が向上し、コード量自体も大幅に削減することができました。様々な最適化および機械学習スキームがPython界には用意されており、それらを簡単に活用することができます。並列計算やGPUコンピューティングによって計算時間の削減が可能ですが、要素数を増やしたりすると学習終了まで数日を要する場合がありますため、学習過程の見直しやプログラムの効率化、そして強力な計算機の導入が必要と考えています。

4 おわりに

金属塑性の利用技術は長い歴史を持ち、今後も必要であり続ける代替不可能なものです。より効率的で高度なものづく

りを行ううえでは従来の知見では足りず、塑性力学およびその解析技術の更なる発展が求められます。そのためにはマクロ塑性力学と材料科学の深い統合化が不可欠ですが、従来の学問体系ではちょうど境界領域にあたるため十分進展しているとは言えず、今後はより野心的な取り組みが必要と考えています。筆者のような浅学非才の身には余る難問ですので、皆様のご指導ご鞭撻をいただければ幸いです。

参考文献

- 1) 小関敏彦, 井上純哉, 鈴木俊夫, 長井寿, 谷口裕一: 金属, 80 (2010) 4, 3.
- 2) 大家哲朗, 柳本潤: 機械の研究, 71 (2019) 5, 341.
- 3) 大家哲朗, 伊藤耿一: 塑性と加工, 57 (2016) 662, 188.
- 4) 大家哲朗, 伊藤耿一: 塑性と加工, 56 (2015) 658, 914.
- 5) T.Oya, J.Yanagimoto, K.Ito, G.Uemura and N.Mori: Journal of Physics: Conference Series, 1063 (2018), 012155.
- 6) S.Onoshima and T.Oya: Procedia Manufacturing, 15 (2018), 1833.
- 7) G.Vago and T.Oya: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 967 (2020), 012057.

(2020年10月7日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東北大学大学院工学研究科 金属フロンティア工学専攻 教授

及川 勝成

筆者は、ご縁もあって、ここ4～5年塑性加工の研究の縁辺で研究をさせてもらっている。大家先生とは、筆者がこの分野の研究を始めたことから付き合わせていただいている。大家先生は、学位の研究では塑性加工とは関わっておられなかったようですが、その実質的な指導教員は伊藤耿一東北大学名誉教授であり、金属加工の王道の研究室の出身と言えます。大家先生とも伊藤先生のご紹介で研究情報の交換をするようになりました。

大家先生は、タイトルにもあるように、金型成型解析のためのマルチスケール塑性論に取り組んでおられます。これは、長年、塑性加工分野で大きなギャップになっていたところの問題で、小職から見ても非常に挑戦的な課題に取り組んでおられると感じます。塑性力学自体のフレームワークは大かた教科書的なものが決まっており、それらの理論に基づいた有限要素法解析などで、大規模、複雑な加工プロセスの計算も可能となりつつあり、商用ソフトも多数販売されています。一方、私のような材料屋からすると、金属材料はマイクロ組織が重要で、それにより流動応力も変化するため、マイクロ組織制御とそれによる加工特性改善に熱中します。しかし、従来の塑性力学のフレームワークには、マイクロ組織因子は

陽には考慮されず、それが一つの要因ではありますが、定量解析という観点では物足りなさがあり、理論と現実の材料には大きなギャップを感じざるを得ませんでした。大家先生は、そのような分野に果敢に取り組んでおられます。大家先生の研究の注目すべき点は、タイトルの“金型成型解析のための”に示されているように、研究を基礎研究に終わらせることなく、“もの作り”に役立つようにまとめ上げるところだと思います。つまり、工学をきっちりとなされている点だと感じます。昨今、論文による成果重視の偏重で、“もの作り”に役に立つという気概が感じられない研究が増えていると感じています（私だけでしょうか?）。そういう中で、大家先生は、研究の役立て方も考えながら研究なされていると感じます。近い将来、引張り試験を行えば、色々な材料試験は数値シミュレーションにより得られる時代が来て、有限要素解析の定量性も改善することが期待できます。

日本では、塑性加工の分野の大学教員の数が、急激に減少しておりますが、塑性加工は“もの作り”を支える重要な分野です。この分野をリードする研究者として、益々活躍することを期待しております。

(株)ユニプレス技術研究所 解析センター 担当部長

吉田 亨

私と大家先生との関係は、東北大学情報科学研究科・伊藤耿一先生（東北大学名誉教授）の研究室の先輩・後輩になります。私が会社の研究開発部門に所属していた時期に伊藤先生のお誘いもあり、研究室のゼミ合宿に講師として参加させてもらった際、博士課程の学生だった大家先生にお会いしたのが初めてでした。当時、ゼミ合宿は大学から遠く離れた宮城蔵王の山深い場所にある施設で行っていたのですが、皆が車で移動する中、大家先生は峠を自転車で行きつけられ、その“タフさ”を印象深く覚えています。後から聞くと、クラブ活動もクロスカントリー関係だったようです。大家先生の博士課程の研究テーマは「薄肉構造物の振動インテンシティ計測に関する研究」であり、塑性加工とはかけ離れた内容でした。卒業後に移られた豊田工大でも設計工学の研究ということで塑性変形や加工に迫り着くまでに少し時間を要したようです。その後、東京大学の柳本潤教授の研究室に移られ、「複層鋼板の塑性変形に関する研究」に従事されました。このときの研究報告が非常に印象的で、マルテンサイト組織の材料が他の材料と複層化されることで拘束影響もあり、延性が大きく向上するという内容でした。当時、自動車車体向け鋼板の高強度化が進んでいましたが、高強度化すると、延性が下がる、スプリングバックが大きくなると課題が言われる中、鉄鋼材料

の無限の可能性を感じたことを良く覚えています。その後、材料モデルと言われる塑性構成式の研究、分岐理論による成形限界予測、有限要素多結晶モデルによる数値材料試験と目を見張る勢いで塑性加工関連の研究を発表され、その“しなやかさ”に驚かされました。塑性構成式における従来の常識は降伏曲面と塑性ポテンシャル曲面を関連させ、ひずみ増分方向を曲面の垂直方向に定める関連流れ則でしたが、大家先生は異方性降伏関数を高次化した非関連流れ則モデルを構築され、さらに非法線則に適用するという、全く新しいモデルを展開されました。破断限界予測や数値材料試験の研究も塑性構成式の開発とリンクしながら進められており、有限要素法シミュレーションの精度が格段に向上することが期待されます。私事ですが、現在の会社では自動車部品の設計・開発に携わっています。地球環境を守り、安全な自動車にするためには、新しい材料を使いこなし、新しい部品を産み出していかなければなりません。この分野も格段に進歩しており、さらに、進化することが求められています。大家先生の研究は、シミュレーションを革新的に進化させ、産業界に大いに役立つものです。持ち前の“タフさ”と“しなやかさ”を駆使して、この分野の研究を高め、発展させて頂ければと思います。