



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

金属の塑性変形に魅せられて

吉田健吾

Kengo Yoshida

山形大学 大学院理工学研究科
助教

1 はじめに

はじめに、本稿執筆の機会を頂いたことに感謝申し上げます。これまで筆者は、塑性構成則およびひずみ局所化現象を主な対象として研究活動に従事してきた。多くの方々との議論を通し、また度々のご支援を頂いたお蔭で研究を継続することができた。本稿執筆をよい機会として、これまでの研究活動を振り返り、その当時の自身の心境を含めて綴ってみたい。

2 これまでの研究について

筆者が塑性力学の分野の研究に本格的に携わるようになったのは、博士課程の時に東京農工大学の桑原利彦先生にご指導いただいた時からである。金属材料の成形限界に関する研究を実施していたが、金属を引っ張れば伸び、そして破断に至るという当たり前のような挙動であるが、この物理現象に強く興味を惹かれた。さまざまな論文を読み漁り、Hillの分岐理論を中心とした塑性不安定論¹⁻⁴⁾の敷居の高さに驚愕したことを今でも鮮明に覚えている。一つの式変形に2週間もの時間を要したこともあった。目に見えるのはいたって単純な現象ではあるが、その本質的を物理的、数理的に解釈することの難しさを知った。一方、研究への興味は一層深まっていった。局所くびれ発生時のひずみによって表現される成形限界線にはひずみ経路依存性があることが古くから知られており、材料が受けるひずみ履歴が非線形である場合は成形限界線では適切に成形性予測ができない。ところが、いくつかの論文では応力で評価するとそのひずみ経路依存性が無くなるとの主張があった^{5,6)}。板材を用いた実験が主流であったため応力の同定は困難であり、この論争の決着は困難そうに見えた。しかし、桑原研究室では薄肉円管に自在に2軸応力場を負荷できる試験装置が開発されており、これを活用すれば

この問題が解決できると考え、すぐに研究を実施した。アルミニウム合金管と鋼管の2種類の試験片で実験を試したところ、アルミニウム合金管においては成形限界を応力で評価するとひずみ経路依存性はほとんど現れなかった⁷⁾。一方、鋼管では応力で評価しても一部を除いて経路依存性があることがわかった⁸⁾。塑性変形挙動の観点から整理し直すと、ひずみ経路の変化によって交差効果が発現して硬化率が変化する場合は経路依存性があったが、そのような挙動が現れなければ成形限界時の応力は経路に依存しないことを実験的に見出すことができた。

その後、現象論的塑性構成式に基づいた数値解析によって、この現象の再現および力学的なメカニズム解明を試みた^{9,10)}。まだまだ駆け出しの時であり、テンソル解析もそうであるが、それを駆使した有限変形論に基づいた数値解析を実施することにとっても苦労した。この時、山形大学の黒田充紀先生にご指導を頂く機会に恵まれたのが幸いであった。数値解析では、実験現象が見事に再現され、実験では測定が困難なひずみ局所化の進展を詳細に検討し、ひずみ経路変化が及ぼす影響を明らかにすることができた。

学位取得後は、主に結晶塑性構成則を利用した研究に従事してきた。Fcc金属を対象として、集合組織に起因する塑性異方性および大変形に伴う集合組織の発達を数値シミュレーションによって再現し、板材の成形限界に及ぼす影響を調査した^{11,12)}。そして、cube方位に集合組織が発達した板材をND回りに45°回転した方向に引っ張ると成形性が著しく上昇することが分かった。解析結果を検討したところ、geometrical hardening (またはtexture hardening) と呼ばれる塑性変形に伴う結晶方位の回転による硬化が顕著に発現することが成形性向上の要因とわかった。このような材料の内部状態の変化が解析に反映されることが、結晶塑性をはじめとするミクロの物理に基礎をおく構成式の強みであることをこの研究を通して強く実感し、その後益々この方面で

の研究に力を入れるようになった。結晶方位と geometrical hardening について研究を継続し系統的に調べたところ、45°回転した cube 方位は全方位のうち2番目に geometrical hardening が顕著な方位であり、実用性を考えると最も有力な方位であることがわかった¹³⁾。成形限界の解析には初期板厚不整を有するモデルを用いることが現在では一般的であるが、その他に分岐理論を適用することも可能である。解析手法の妥当性を検討する意味で、初期不整を有する解析と分岐解析の両方を適用して成形限界解析を実施した¹⁴⁾。分岐解析では、時間非依存の構成則を適用する必要がある、それに伴って活動すべり系の組み合わせを唯一に決定する必要がある。結果としては、どちらの解析手法を用いても同じ傾向を得ることができ、これまでの結果の妥当性を補強するような成果となった。

一時期鉄鋼メーカーのポスドクとして研究をさせて頂く貴重な機会を頂いた。その際、dual phase 鋼の反転負荷における加工硬化挙動に関する研究を実施した¹⁵⁾。はじめは単相の多結晶体を模擬した解析を実施したが、単相であっても多結晶体であれば内部応力は不均一になり、これによって反転負荷時に早期に降伏することを再確認した。次に軟質のフェライト相と硬質のマルテンサイト相を考慮して、個々の相の変形および巨視的な応力-ひずみ曲線を解析した。DP 鋼においては各相の強度差に起因して内部応力の不均一性が拡大し再降伏応力の低下が顕著になる。さらに、これが永久軟化をも引き起こす原因となることがわかった。

上述の研究とは多少毛色が異なるが、最近、液圧バルジ試験の数値解析を試みて、応力-ひずみ曲線を正確に大ひずみ域まで測定するための実験条件同定という研究を行った¹⁶⁾。これは鉄鋼研究振興助成のもとで実施したものであり、研究助成金を頂けることは若手にとって研究の励みにも繋がっており、とても感謝している。

3 研究活動を通して

学協会における研究活動を通して多くの研究者と活動を共にする機会があった。現在、創形創質部会の若手フォーラムの座長を拝命しているが、同年代の産学の研究者との交流の場として大いに活用させて頂いている。大学の研究室訪問や鉄鋼メーカーの工場見学・若手研究者との研究交流など、若手フォーラムならでは勉強会を企画・運営しており、他では得られない貴重な経験をさせて頂いている。ここでの交流が、将来的に、個人的な研究活動のみならず本研究分野のさらなる発展に繋がるものと確信している。

また、若手の時代を現在所属する山形大学機械システム工学科の環境で過ごすことができて非常によかったと思って

いる。本学科では、助教であっても独立した研究室の運営が任されており、授業では講義を担当することもできる。これまで実験や製図のほかに、材料力学、塑性力学の講義を担当してきた。時間に余裕がある若手の時に、研究室運営、卒論・修論の指導方法、講義の仕方などについてじっくりと考え、様々な試行錯誤をすることができた。大学教員にとって、研究活動と教育活動は一体であり、その両者について多くの経験を積むことができたことは大きな資産であると考えている。この経験を生かして今後の研究・教育に一層励んでいきたい。

4 最後に

本稿執筆の機会をお借りして、これまでの研究を振り返ることができた。研究を実施し論文を執筆している時は達成感や高揚感を少なからず感じていたのだが、改めて見直すと、成果と言えるほどのものだったのだろうか... と考えてしまう。塑性力学はものづくりの基盤技術として必須の重要な研究分野だと認識している。今後、この分野の発展に寄与できるように益々精進していきたい。筆者の代名詞となるような研究領域、研究手法を新たに開拓し、オリジナリティの溢れる成果を世界に発信できるように努めていきたい。

参考文献

- 1) R.Hill : On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. J. Mech. Phys. Solids, 1 (1952) , 19.
- 2) R.Hill : A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. J. Mech. Phys. Solids, 6 (1958) , 236.
- 3) S.Stören and J.R.Rice : Localized necking in thin sheet. J. Mech. Phys. Solids, 23 (1975) , 421.
- 4) J.R.Rice : The localization of plastic deformation. In Proc. IUTAM Congress, Theoretical and Applied Mechanics, ed. by Koiter W.T., (1976) , 207.
- 5) R.Arrieux, C.Bedrin and M.Bovin : Determination of an intrinsic forming limit stress diagram for isotropic sheets. Proc. 12th IDDRG Congress, 2 (1982) , 61.
- 6) T.B.Stoughton : A general forming limit criterion for sheet metal forming. Int. J. Mech. Sci., 42 (2000) , 1.
- 7) K.Yoshida, T.Kuwabara, K.Narihara and S.Takahashi : Experimental verification of the path-independence of forming limit stresses, International Journal of Forming Processes, 8 (2005) SI, 283.
- 8) K.Yoshida and T.Kuwabara : Effect of strain hardening

- behavior on forming limit stresses of steel tube subjected to nonproportional loading paths, *International Journal of Plasticity*, 23 (2007) 7, 1260.
- 9) K.Yoshida, T.Kuwabara and M.Kuroda : Path-dependence of the forming limit stresses in a sheet metal, *International Journal of Plasticity*, 23 (2007) 3, 361.
 - 10) K.Yoshida and N.Suzuki : Forming limit stresses predicted by phenomenological plasticity theories with anisotropic work-hardening behavior, *International Journal of Plasticity*, 24 (2008) 1, 118.
 - 11) K.Yoshida, T.Ishizaka, M.Kuroda and S.Ikawa : The effects of texture on formability of aluminum alloy sheets, *Acta Materialia*, 55 (2007) 13, 4499.
 - 12) K.Yoshida and M.Kuroda : Numerical investigation on a key factor in superior stretchability of face-centered cubic polycrystalline sheets, *International Journal of Mechanical Sciences*, 58 (2012) 1, 47.
 - 13) K.Yoshida, Y.Tadano and M.Kuroda : Improvement in formability of aluminum alloy sheet by enhancing geometrical hardening, *Computational Materials Science*, 46 (2009) 2, 459.
 - 14) K.Yoshida and M.Kuroda : Comparison of bifurcation and imperfection analyses of localized necking in rate-independent polycrystalline sheets, *International Journal of Solids and Structures*, 49 (2012) 15-16, 2073.
 - 15) K.Yoshida, R.Brenner, B.Bacroix and S.Bouvier : Micromechanical modeling of the work-hardening behavior of single- and dual-phase steels under two-stage loading paths, *Materials Science and Engineering A*, 528 (2011) 3, 1037.
 - 16) K.Yoshida : Evaluation of stress and strain measurement accuracy in hydraulic bulge test with the aid of finite-element analysis, *ISIJ International*, 53 (2013) 1, 86.

(2013年7月19日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

広島大学 大学院工学研究科機械システム工学専攻 教授

吉田 総仁

吉 田健吾先生の研究については、塑性現象を力学と実験の双方から丁寧にアプローチされており、大いに注目している。また、研究テーマも私が若い頃から取り組んできたものと近いものがあり、大変興味深い。

塑性変形・加工硬化挙動がひずみ経路に依存することに着目した実験研究および現象論的構成モデルの研究は1960～1980年代にも盛んに行われてきた。近年ではその塑性加工への応用（例えば成形限界予測など）や結晶塑性理論をベースとしたメカニズムの検討へと広がってきている。その意味では、吉田先生のgeometrical hardeningの結晶学的検討など新規性に富んだものと思う。

私は、こうした研究は今後おそらく二つの方向で進んでゆくのではないかと考えている。ひとつは成形シミュ

レーションの高精度化に資するようなマクロモデルに対する要求に応えるものであり、もうひとつはマルチスケールモデリングによる材料の微視組織とマクロ挙動の関連を深める研究である。ただし、現象論的マクロモデルについては私達の世代の研究者がこれまでもかなりのレベルまでやってきているので、吉田先生をはじめとする若い世代には先端的な実験観察も含めたマルチスケールモデリングの研究でぜひブレークスルーを図っていただきたいと思う。

吉田先生が述べられている「オリジナリティあふれる成果を世界に発信する」ことは研究者にとって何よりも大切な心がまえである。若手のホープが世界を代表する研究者となることを大いに期待したい。

新日鐵住金（株）技術開発本部 鉄鋼研究所 加工技術研究部長

末廣 正芳

「**金** 属の塑性変形に魅せられて」を非常に興味深く読ませて頂きました。吉田先生は塑性加工分野において非常にレベルの高い研究活動を行い論文として発表されています。この記事では、吉田先生のこれまでの研究活動の時系列的な振り返りとその時々感じたことが記載されています。

この文章を読んで私が興味をひかれた点はいくつもありますが、例えば「一つの式変形に2週間もの時間を要したこともあった、…その本質を物理的、数理的に解釈することの難しさを知った」というくだりは確かにそうだと共感を覚えました。物事をスピーディに進めようとすると一つの式に2週間というのは非常に長く無駄な作業のようにも感じますが、この一つの式に2週間かけた事がその後の研究活動を進めていく上での基礎・基盤構築に一つの役割を果たしたのだらうと思います。このような努力を若い間に何度も経験しておくことが、その後の大きな成果に繋がるのだらうと思います。「ミクロの物理に基礎をおく構成式の強みであることをこの研究を通して強く実感し」とありますが、このように実感できた背景には、一つの式変形に2週間もの時間を費やしたこともあげられるのだらうと推察します。

また、人との繋がりが研究の進展を早めたことも書か

れています。研究は個々人のアイデアから生まれることが多いと思いますが、そのアイデアを実現していく際に様々な研究者と議論することで研究がより深みを増し加速していく事は多々あると思います。その後の研究活動の中でも様々な人と出会い多くの研究成果をあげてきているのだらうと思いますし、また吉田先生自身、人との繋がりの重要性を認識されているものと想像します。現在は、若手フォーラムの座長として同年代の産学の研究者と交流していることが記載されていますが、この中では吉田先生自身の人との繋がりを増やすとともに、そこに参画している研究者からみた人との繋がりの増やしているのだらうと思います。

「若いうちの苦労は買ってでもせよ」ということわざがありますが、まさにその重要性を書かれているものと思います。この記事を読ませていただき、吉田先生が自身の研究においてさらに飛躍されると感じると同時に、この分野のリーダーの一人として活躍されるものと感じました。大学での原理原則に立脚した研究開発や人材育成は産学連携での将来にわたっての発展という視点において必須のものだと思います。このような視点も含めて吉田先生の更なる発展を祈念いたします。