



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

新たな発想で迫る塑性変形の面白さと未来

Fun and Future of Plastic Deformation Approaching with New Ideas

古島 剛

Tsuyoshi Furushima

東京大学
生産技術研究所
准教授

1 はじめに

筆者は東京大学生産技術研究所機械・生体系部門に2016年10月に准教授として赴任し、変形加工学に関するPIとして研究・開発に従事している。また同大学工学研究科機械工学専攻にも所属し、設計・生産分野の教育に注力し、変形加工・塑性加工をはじめとするものづくり教育を担当している。生産技術研究所の昔ながらの伝統として、講師以上は独立した研究室を持つことになっている。筆者の研究室は立ち上げてまだ3年と比較的若く、幸いにして研究室を一から立ち上げる生みの苦しみと楽しさの両方を味わいながらここまで研究・教育に取り組んできた。本稿では、筆者がこれまでに行ってきた変形加工学に関する研究を単に成果という観点だけでなく、当時、体験したことも含めて振り返りながら、変形加工学分野に対する研究に対する思いと未来への展望を述べていきたい。なお筆者が鉄鋼協会に入会したのは比較的最近の2018年のことで、本稿の中では一部鉄鋼材料以外の内容も含まれていることをご理解頂ければ幸いである。

2 研究の振り返り

2.1 研究の原点

筆者は、学部4年生である2002年2月に東京都立大学工学部機械工学科塑性工学研究室に配属された。当時、恩師である真鍋健一教授（現首都大学東京名誉教授）から与えられたテーマは、酒井孝助手（現成蹊大学教授）が担当する「強ひずみ加工による結晶粒微細化」であった。実はこれには裏話があり、当時の機械工学科では卒業研究の配属は研究室そのものではなく、研究テーマを選択するというルールであり、そのとき筆者が選んだテーマはマグネシウム合金管の曲げであった。ところが、研究室に入ってみると、筆者の配属とは入れ違いで上記のテーマを担当していた前助手の先生が異動

してしまい、思わぬ形で研究テーマ選択時とは異なる結晶粒微細化のテーマに取り組むことになった。今考えると、このとき加工法そのものよりも材料寄りの実験の経験や知見を得られたことが大きな糧になっている。単結晶材料を対象に強ひずみ加工の過程で、どのように結晶方位が回転し、再結晶組織を形成していくのかを詳細に観察する必要のある研究であり、観察には非常に時間を要する大変な研究であった¹⁾。しかしながら、この研究を通じて、「材料内で何が起きているのかを観察する」ということの大事さを学んだ1年だった。修士課程に進学する際に与えられたテーマは「ダイレス引抜きによる金属マイクロチューブの創成」である。このときも実は本当に取り組みたかったテーマは、医療機器や電子機器に微細プレス成形に関する研究であったが、何となく真鍋教授からダイレス引抜きのテーマを勧められて、微細プレス成形のテーマは友人に譲ったのである。このように学部も修士課程も、当初思い描いていた研究とは異なるテーマでスタートしたのが筆者の研究の原点である。

2.2 ダイレスフォーミングに関する研究

修士課程における研究テーマであるダイレス引抜きは、図1に示すように局部加熱（非一様な温度場）と引張変形によって金型を使わずに金属チューブを細くする加工法である²⁾。無痛注射針やマイクロ熱交換器用の微細なマイクロチューブを作る際に、微小な金型を必要としないというのは大きな利点になり得るだろうという発想から着手した研究テーマである。ダイレス引抜きのテーマでは、局部加熱と変形、材料の温度依存性といった様々な加工条件・材料因子を考慮する必要があり、実験ですべてを検証するのは困難だろうということで、熱と変形を連成させた有限要素解析モデルの構築が必要であると自ら考えて取り組むに至った³⁾。またダイレス引抜きのための実験装置自体も自ら設計・自作し、実験を行い、はじめて深夜にマイクロチューブを創製した際の

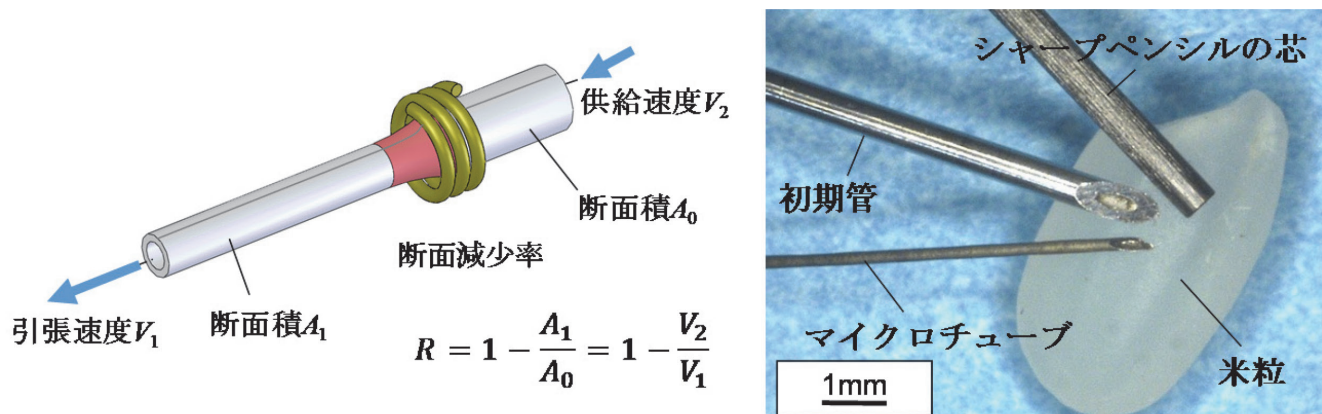


図1 ダイレス引抜き原理と創製した外径0.2mmのマイクロチューブ

感動は今でも覚えている。修士課程ではこのように解析や実験装置の製作、実験等、様々な経験をする事ができた。実験装置を設計・自作した経験は、現在の研究でも活かされており、世の中になく装置（あるいは購入すると高額な装置）は、自分で作ってしまえば良いと考えて研究を行っている。この後にダイレス引抜きのテーマで博士課程に進み、大学教員への道を進んでいくことを考えると、ちょっとした選択の違いが、振り返ってみると後の自分の研究の人生に大きな影響を与えていることに気づかされる。博士課程に進むとダイレス引抜きのテーマをさらに掘り下げ、材料組織とダイレス引抜き性の関係を明らかにした。さらに学部生時代の研究を活かし、マイクロチューブに適した素管を結晶組織制御により造管することでダイレス引抜き性を向上させる手法の提案を行い⁴⁾、その有効性を明らかにすることができた。その後の、首都大学東京の助教、東京大学生産技術研究所の准教授時代には、ダイレス引抜きをさらに応用することで円管だけでなく異形管のマイクロチューブ⁵⁾や難加工性材料であるチタン合金やセラミックス⁶⁾のマイクロチューブの創製に成功した。さらに学部の研究室配属時に諦めたマグネシウム合金へも展開している。また局部加熱と圧縮変形の組み合わせで座屈の場所を制御することで、蛇腹形状を連続的に形成し、ペローズに応用するダイレスフォーミング法を開発した⁷⁾。塑性加工というと普通は金型を使って形状を付与することを想像するものだが、ダイレスフォーミングは全く金型を用いずに、局部加熱による非一様な温度によって材料の変形抵抗を制御して、必要な箇所を変形させている。思い通りの形状に加工することは当然難しくなるが、その分、面白さもある。「金型を使わない」という言葉の響きは、未来を匂わせる塑性加工法であり、今もその魅力に取りつかれている。

2.3 材料の不均質性と表面あれ進展

博士課程時代にダイレスフォーミングの研究と並行して、ダイレス引抜き時に金型と接していない自由表面が、塑性変形とともに荒れていく現象に着目し、自由表面における表面粗さを予測する有限要素解析モデルの構築についても研究を行っていた。この内容は、最終的に博士論文には入れることはできなかったが、ダイレス引抜きという「加工」面の研究とは異なり、材料組織と塑性変形挙動の不均一変形を結びつける、「材料」面の研究についても種をまくことができた。大学教員になってからも上述のダイレスフォーミングの研究と並行して取り組んでいる研究テーマの一つである。金型と接触しない自由表面において、塑性変形とともに何故表面あれが生じるかという点、マクロ的には均質に見える金属材料でもミクロの視点で見ると材料は無数のそれぞれ方向性を持った結晶粒の集まりで構成されており、応力負荷時におけるシュミット因子の違いに起因して、強度は均質に分布しておらず、不均質であるからであると考えられている。最初に取り組んだのは、この表面あれ現象を予測するモデルの構築である。なるべく実用的な予測を実現するために、流行りの結晶塑性という選択肢を捨てて、単純に結晶粒単位の強度（変形抵抗）のばらつきを与えるという方法を提案した⁸⁾。結晶粒そのものの強度を求めるのは容易ではないが、平均的（マクロ）な強度からのばらつきであれば、単純な方法で評価できるのではという発想からモデルを構築した。この不均質モデルは、単純ながら塑性変形後の表面粗さを定量的に予測が可能であることを示すことができた。さらには修士課程配属時に友人に譲ったテーマでもある微細プレス成形を対象にし、成形中の表面あれを定量的に予測することも示すことができた。図2に示すように微細プレス成形といえども、有限要素法において100万要素を使用し、材料内に2万個の結晶粒が存在し、金型との接触も存在するモデルにも

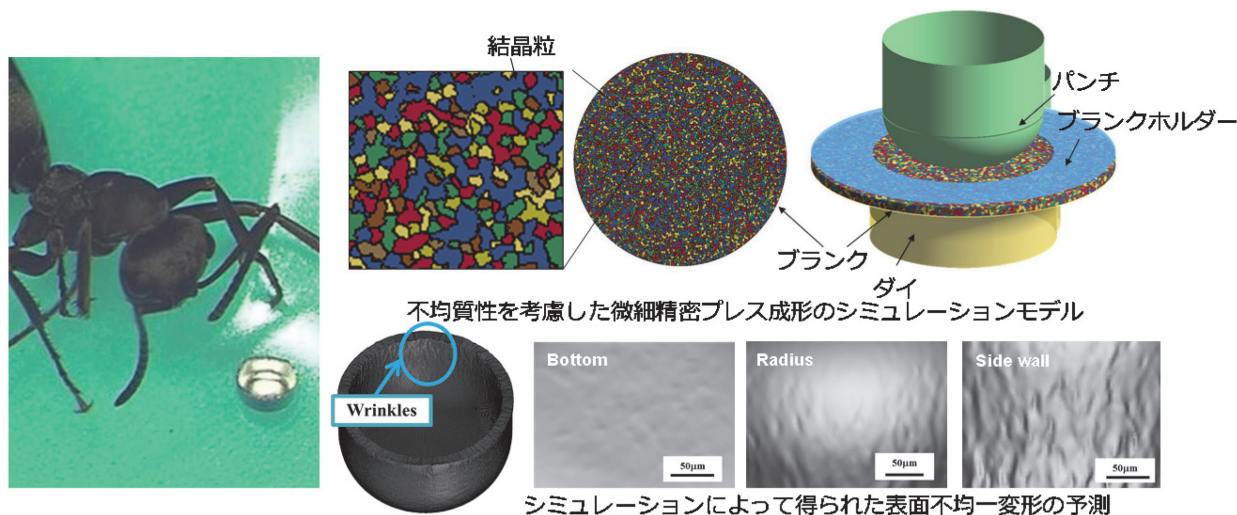


図2 材料の不均質性を考慮した微細プレス成形の有限要素解析による表面あれ予測

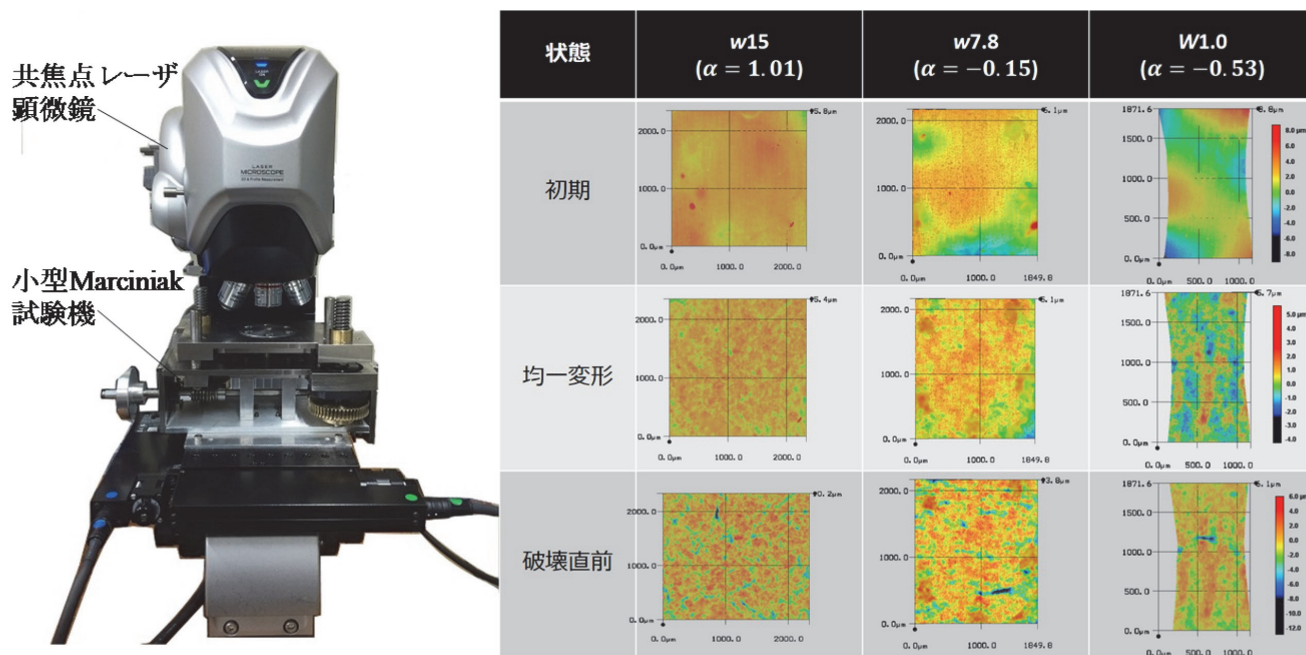


図3 塑性変形中の表面あれ進展挙動のその場観察

かわらず、実用的な計算時間で、定量的な表面粗さの予測が可能なることを示すことができた⁹⁾。

2.4 その場観察・可視化

前節の塑性変形に伴う表面あれ進展に関する研究をしていたときに、表面あれという材料のミクロ的な不均質さによって生じる表面の不均一変形がどのようなメカニズムで生じているのかを明らかにしたいと思い始めた。そこで塑性変形中の表面をより詳細にその場観察・可視化するという研究を開始した。三次元的な表面性状を観察可能な共焦点レーザー顕

微鏡上に設置可能な、その場観察用のための小型単軸引張試験機や二軸引張変形を生じさせる小型Marciniak試験機を自作し、少しずつ変形を加えては、表面あれの進展を評価するという試験方法を提案した¹⁰⁾。また同時にSEM-EBSD観察によって結晶方位の配置がその後の変形による表面あれ進展にどのような影響を及ぼしているかを可視化した¹¹⁾。変形を加えた最終的な試験片に生じる結果のみにとらわれることなく、そこに至るまでの過程を詳細に観察・可視化することができ、表面あれ進展現象のメカニズムを解明する一助となっている。学生時代に恩師である真鍋教授に結果の要因を考え

る際には「犯人は現場にいる。最終的な結果だけを見るのではなく試験片をよく見なさい。」という言葉は何度もかけられた。この言葉は研究における本質に迫る非常に重要なものとして筆者の中で位置づけられている。

3 研究に対する考え方

これまで筆者が取り組んできた個々の研究について振り返ってきた。ダイレスフォーミング、表面あれ進展、その場観察・可視化と一見、関連性のないテーマを実施しているように見えて、図4に示すように塑性変形挙動における非一様場・非定常場・不均質場とそれらの可視化というキーワードで繋がっている。これらのキーワードを変形加工・塑性加工と組み合わせることで、これまでになかった発想で研究を展開できるのではと考えている。教科書の中の記述や従来の研究において例えば温度や荷重等の境界条件は定常・一様場を、材料等は均質と考えることが一般的である。しかしながら、研究をブレークスルーするためには、これらの一様、定常、均質の「否定」が重要だと筆者は考えている。例えばサーボプレスでは加工モーションの振動や速度可変等の非定常化の恩恵によって成形性が向上することが知られている。このような発想は、真鍋教授が年度初めに学生に表1を使って説明していたことに端を発している。それぞれの物理量の偏導関数

を考えることが新たな研究のヒントになる。筆者の研究の中でもダイレスフォーミングは局部加熱、すなわち非一様温度場による変形抵抗の制御が重要である。表面あれ進展においては、材料の結晶粒単位の不均質場による自由表面近傍の不均一変形の理解が重要である。さらにこのような非一様場・非定常場・不均質場のこれまでにない塑性変形状態で何が起きているのかを詳細に観察することが、新たな現象を見出す

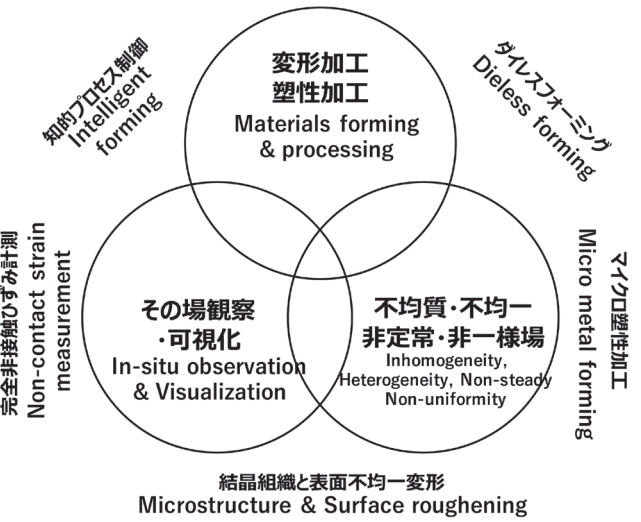


図4 研究に対する3つの考え方

表1 固体の変形特性を支配する各因子の偏導関数とその物理的意味

	P, p	T	L	t	δ	σ	ε
P, p		$\frac{\partial T}{\partial P}$	$\frac{\partial L}{\partial P}$	$\frac{\partial t}{\partial P}$	$\frac{\partial \delta}{\partial P}$	$\frac{\partial \sigma}{\partial P}$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial P}$
T	$\frac{\partial P}{\partial T}$		$\frac{\partial L}{\partial T}$	$\frac{\partial t}{\partial T}$	$\frac{\partial \delta}{\partial T}$	$\frac{\partial \sigma}{\partial T}$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial T}$
L	$\frac{\partial P}{\partial L}$ 荷重分布 圧力分布	$\frac{\partial T}{\partial L}$ 局所加熱 温度勾配		$\frac{\partial t}{\partial L}$	$\frac{\partial \delta}{\partial L}$ 変形勾配	$\frac{\partial \sigma}{\partial L}$ 変形抵抗・ 強度分布	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial L}$ ひずみ勾配
t	$\frac{\partial P}{\partial t}$ 負荷速度	$\frac{\partial T}{\partial t}$ 加熱・ 冷却速度	$\frac{\partial L}{\partial t}$		$\frac{\partial \delta}{\partial t}$ 変形速度	$\frac{\partial \sigma}{\partial t}$ 応力速度	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ ひずみ速度
δ	$\frac{\partial P}{\partial \delta}$	$\frac{\partial T}{\partial \delta}$ 加工発熱	$\frac{\partial L}{\partial \delta}$	$\frac{\partial t}{\partial \delta}$		$\frac{\partial \sigma}{\partial \delta}$ 加工硬化率	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \delta}$ 加工硬化率
σ	$\frac{\partial P}{\partial \sigma}$	$\frac{\partial T}{\partial \sigma}$ 加工発熱	$\frac{\partial L}{\partial \sigma}$	$\frac{\partial t}{\partial \sigma}$	$\frac{\partial \delta}{\partial \sigma}$		$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma}$
ε	$\frac{\partial P}{\partial \varepsilon}$	$\frac{\partial T}{\partial \varepsilon}$ 加工発熱	$\frac{\partial L}{\partial \varepsilon}$	$\frac{\partial t}{\partial \varepsilon}$	$\frac{\partial \delta}{\partial \varepsilon}$	$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$ 加工硬化率	

P: 荷重, T: 温度, p: 圧力, L: 場所・位置, t: 時間, δ: 変形, σ: 応力・変形抵抗, ε: ひずみ

うえで大事である。そのために、その場観察・可視化の技術を導入し、研究を実施することで新たな知見を生み出していきたいと考えている。

4 おわりに

加工技術は、日本のものづくりを支えている基盤技術であり、筆者が取り組んでいる変形加工・塑性加工をはじめ切削加工、鍛造、射出成形や最近では積層造形等、様々な方法がある。これら加工技術の大きな目的は、素材に必要な形状に変えることである。そんな中、筆者は他の加工方法にはない変形加工・塑性加工の強みは何だろうかと常々考えている。大量かつ高速に安価で形状を作りこめるという点は、すぐに思いつく長所だろう。しかし、積層造形が爆発的に流行し、多品種少量生産が叫ばれる中、大量、高速、安価というキーワードがいつまで変形加工・塑性加工の長所でいられるだろうか。また切削加工の高速化は、変形加工・塑性加工のレベルを凌駕するときに来るかもしれない。さて他の加工技術と変形加工・塑性加工の違いは何かと考えてみると、最大の特徴は素材を変形させて形状を創成しているという点であろう。変形というキーワードは、最大限生かすべきである。変形させて何がかわるか。はじめに思いつくものとして加工硬化による強度の向上である。こういった特性は切削加工や積層造形では生み出せない新しい機能である。部位ごとに塑性変形の度合いを変えれば、強度を傾斜させた部材が作りこめるかもしれない。他には何かあるだろうか。塑性変形中は、材料内部の組織に転位が蓄積される。あるいは熱を加えながら塑性変形させれば再結晶を生じさせ結晶粒の微細化等も可能である。こういった特性をうまく利用し、他の加工方法で生み出せない新しい機能を変形加工・塑性変形だけで付与で

きる可能性はないだろうか。このような視点に立つと、変形加工・塑性加工の新たな可能性に繋がるのではないかと期待している。筆者が取り組んでいる非一様場・非定常場・不均質場の考え方によるこれまでにない加工方法の提案や、新たな機能創出のための塑性変形現象の可視化が、変形加工・塑性加工のさらなる発展の一助になればと願う次第である。

参考文献

- 1) T.Sakai, T.Furushima, K.Manabe, H.Morimoto and E.Nakamachi : JSME Int. J. Ser. A, 49 (2006), 216.
- 2) 古島剛, 真鍋健一, 酒井孝 : 塑性と加工, 47 (2006), 870.
- 3) 古島剛, 真鍋健一 : 塑性と加工, 48 (2007), 51.
- 4) 古島剛, 清水徹英, 真鍋健一 : 塑性と加工, 48 (2007), 412.
- 5) T.Furushima, A.Shirasaki and K.Manabe : J. Mater. Process. Technol., 214 (2014), 29.
- 6) T.Furushima and K.Manabe : CIRP Annals – Manuf. Technol., 66 (2017), 265.
- 7) T.Furushima, N.Q.Hung, K.Manabe and O.Sasaki : J. Mater. Process. Technol., 213 (2013), 1406.
- 8) T.Furushima, T.Masuda, K.Manabe and S.Alexandrov : J. Solid Mech. Mater. Eng., 5 (2011), 978.
- 9) T.Furushima, T.Nakayama and K.Sasaki : CIRP Annals – Manuf. Technol., 68 (2019), 257.
- 10) T.Furushima, Y.Hirose, K.Tada and K.Manabe : Proc. Eng., 207 (2017), 1946.
- 11) P.Knysh, K.Sasaki, T.Furushima, M.Knezevic and Y.P.Korkolis : Comp. Mater. Sci., 167 (2019), 42.

(2019年9月12日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻 教授

久保木 孝

「若手研究者・技術者の研究紹介に先輩研究者の方からコメント」とのことですが、「先輩研究者」というよりも同じ領域の一人の研究者としてコメント申し上げます。古島先生にはじめてお会いした際に、強い「オーラ」を感じさせられた記憶があります。いずれ塑性加工分野の第一人者となるであろうとの印象を持ちました。この印象には誤りはなく、順調に業績を積み上げられてきています。特に「ダイレス引抜き」に関する一連の研究は完成度が高く、現在の古島先生の代名詞とも呼べる成果です。加熱域の適正化やマイクロチューブへの適用など、より深い研究を遂行し、技術の完成度を高めたことは着目に値します。さらに、それまでの発想を超えた加工条件においてペローズ形状の成形に成功していることは、海外の研究者からも注目を集めています。

古島先生の「躍動」の記事を拝見すると、これらの研究活動を通して重要な経験をされたようです。自ら考え、自ら設計・自作し、自ら実験するなど様々な経験をし、感動するような成功体験をされたとあり、これらの経験が重要であることは納得でき、今後も古島先生の活動を支えていくものと考えられます。

古島先生は、これまでの学会活動は日本塑性加工学会などに対して献身的に尽力されてきており、2018年度に

日本鉄鋼協会に入会されたことは、日本鉄鋼協会には大きな力を得たと言えます。しかしながら、日本の科学技術の発展を考えると、日本鉄鋼協会には、古島先生の研究活動の妨げとならないように、負荷をかけないようにお願いしたいところです。

傍から見ると研究活動は順風満帆であり、「ダイレス引抜き」を軸として研究領域を拡大されながら活躍されてきています。贅沢な話ですが、これらに加えて全く異なった新規の軸から発展する新たな活躍も見てみたいと感じております。

真鍋先生よりの言葉、「犯人は現場にいる。最終的な結果だけを見るのではなく試験片をよく見なさい。」を非常にうまく咀嚼して、研究活動に活かしてこられているようです。筆者自身も諸先輩方から多くお言葉を頂き、研究や人生の中で大きな糧となっています。著者自身の状況を改善するために、最近お世話になっている先輩の言葉は「適当」です。古島先生は責任感が強すぎるので、「適当」に切り抜けられることを考えられた方がよい場合もあるかもしれません。

最後に、古島先生はこれまで非常に頑張ってこられていますので、「ますます」とは言わずに、今後も「これまでと同様に」ご活躍をされることを祈念いたします。

日鉄テクノロジー(株) 富津事業所 構造力学ソリューション部

水村 正昭

中空である管材は内部に流体を通す配管としての役割だけでなく、軽量化の観点から構造材としても有効な素材である。一方で中空故に内部からの拘束が難しいため、その加工に関する課題は多く、研究としても非常に面白い分野といえる。しかし、管材の塑性加工すなわちチューブフォーミングは、鍛造や板材成形と比べると非常にニッチな技術分野であることは否めず、最近では研究者の数も減って高齢化も進んできた(私自身もそうだが)。そんな時に、チューブフォーミング分野で伝統ある都立大から、若手ホープとしてデビューしたのが古島先生であった。

初めて彼と会ったのは、まだ彼が学生の頃であった。私の記憶が確かならば、日本塑性加工学会のチューブフォーミング分科会の研究例会が都立大で開催された時である。真鍋教授の研究室の学生として、研究内容の講演と、実際の研究装置の説明をされていた。その時に紹介されていた内容は、本記事にも記載されているマイクロチューブのダイレス引抜きである。当初は縦型の引張試験機を改造した手作りの装置であったが、残念ながら見学のデモンストレーションでは途中で材料がちぎれてしまったことを覚えている。加熱と上下の速度を精度よく制御する必要があり、非常に高難度な加工に挑戦し

ていると感じられた。しかし、その後も何度か同じ研究室を見学する機会があり、その都度装置を見させて頂いた。すると、実験装置は縦型から横型へ、高周波加熱からレーザー加熱へ、等々、見るたびに進化していった。そこに至るまでの彼の粘り強さや創意工夫に感心させられた。また、加工の完成度を高めるだけでなく、適用素材やサイズの幅も広がっていった。さらには圧縮させてペローズまで作ってしまったのには驚かされた。根気や努力だけでなく、研究を心底楽しんで行っているということがよくわかった。

また、2011年に北海道の登別で開催された国際会議TUBEHYDROのこともよく覚えている。まだ教員になったばかりの頃だったと思うが、自ら率先して若手研究者のイベントを一人で企画・実行していた。語学力はもちろん、そのリーダーシップにも目を見張るものがあった。

好奇心旺盛な彼は今後もますます研究の幅を広げていくことと思う。しかし、冒頭にも述べたように、ニッチなチューブフォーミングの分野では彼は非常に稀有な存在である。是非とも当該分野を発展させるべく次代のリーダーとして活躍していただきたい。