



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

様々な材料の加工に関する研究開発を通じて

Research and Development on Various Material Forming

梶川翔平

Shohei Kajikawa

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 准教授

1 はじめに

筆者は、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に所属し、塑性加工を中心とした金属や木材などの加工技術の開発に取り組んでいる。大学では、加工学や機械製図など、ものづくりに関連する授業を担当している。本協会では、創形創質工学部会の管工学フォーラムおよび若手フォーラムに参画させて頂いている。本協会における活動が縁となり、本稿を執筆する機会をいただけたことに感謝しつつ、筆者の学生時代から現在に至るまでの研究や、それにまつわる活動について紹介したい。

2 学生時代における研究活動

筆者は、学部4年生である2010年4月に、京都工芸繊維大学工学部機械システム工学課程の塑性加工研究室に配属された。当時、選択した研究テーマは鉄鋼材料とは関係のない、木質系材料の成形加工に関するテーマであり、このテーマを飯塚高志先生（現・京都工芸繊維大学教授）の下、博士後期課程に至るまで取り組んだ^{1,2)}。木質系材料は、鉄鋼材料とは異なり、材料が非常に不均質であることに加え、温度や湿度の影響を受けやすく、再現性のある実験結果を得るために苦労したことを覚えている。また、木質系材料の変形を表現するための構成式が存在しないため、有限要素法（FEM）解析などによる加工のシミュレーションが難しく、実験を中心とした調査であった。この時期に行った実験用金型の設計や、様々な材料試験機、分析機器を用いて行った実験の経験は、現在の研究活動において非常に役立っている。

3 博士後期課程修了後の研究活動

3.1 研究環境の変化

2015年10月に、電気通信大学大学院情報理工学研究科知能機械工学専攻に助教として着任した。久保木孝先生（電気通信大学教授）のサポートを得ながら、学生時代に取り組んでいた木質系材料の成形加工に関する研究テーマに加え、金属材料の塑性加工に関する研究テーマもスタートさせた。この時期から、初めてFEM解析にも触れることとなり、筆者の研究の幅が広がった。研究活動においては、学生を指導しながら、ともに研究を進める点は、学生時代とは異なった。様々な学生とディスカッションをする中で、学生からアイデアをもらったり、学生の発言がきっかけで筆者にも新しいアイデアが生まれたりと、学生時代よりも研究が進みやすくなったように感じている。本章では、筆者が電気通信大学に着任後、取り組んだ金属材料の塑性加工に関する研究の一部を紹介する。

3.2 拡張型抽伸加工に関する研究

薄肉管材を効率的に成形する工法として、拡張型抽伸加工を提案し、提案工法における管材の成形限界、減肉率および精度などに関する調査に取り組んでいる。図1に示すように、管端に円すいプラグを押し込み、口広げ加工した後に、口広げ部をチャックした状態で、プラグを引き抜くことによって、拡張しながら全体を加工する。一般的な縮管型の抽伸加工と異なり、周方向応力 σ_θ が引張りとなるため、半径方向の負の偏差応力 σ_r が大きくなり、効率的な減肉加工が実現できる。本研究は、秋山雅義先生（元・京都工芸繊維大学教授）からいただいたアイデアをもとにスタートさせた研究であり、2017年頃から現在に至るまで継続して取り組んでいるテーマである。

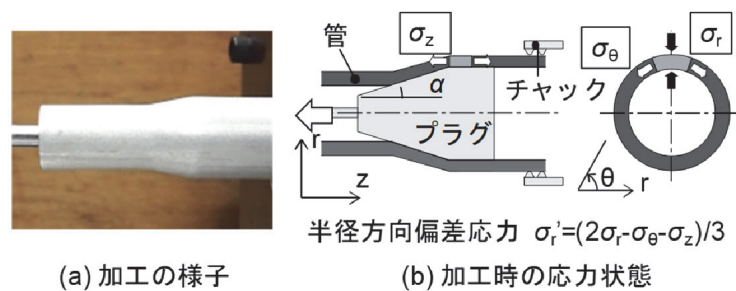


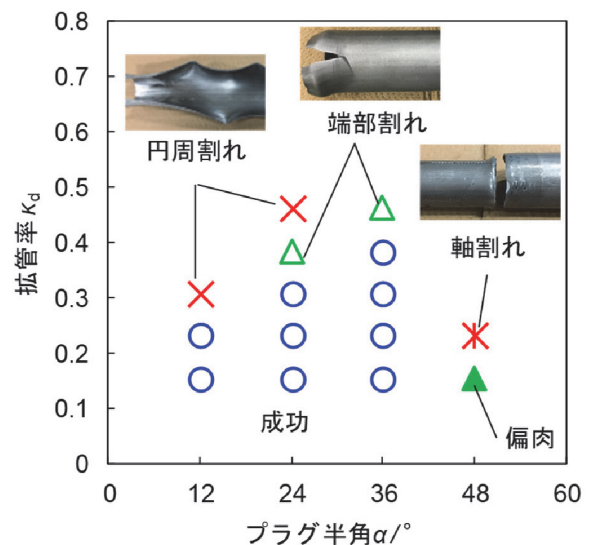
図1 拡管型抽伸加工の概要 (Online version in color.)

拡管型抽伸加工において、プラグ半角 α が成形限界に大きく影響を及ぼす。図2に、炭素鋼鋼管 (STKM13C) を供試材として用いた場合に、管内径の拡管率 κ_d および α が成形可否に及ぼす影響を示す^{3,4)}。 α は加工時における管の割れやすさに大きく影響し、 $\alpha = 36^\circ$ 程度のプラグを用いることによって、高い κ_d まで加工できることを明らかにした。 κ_d が大きくなるほど減肉率 γ は上昇し、最大減肉率は0.32に達した。STKM13Cのみならず、供試材として、アルミニウム合金管 (A1070) や銅管 (C1220) を用いた際の成形性についても明らかにしている^{5,6)}。現在は、成形品の寸法精度を向上させるため、プラグ形状の改良を進めている。また、円管だけでなく、四角管の成形にも取り組んでおり、形状不良の少ない四角管を作るために適正なプラグ形状の調査を進めている⁷⁾。

3.3 逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工に関する研究

高い生産性と成形性を両立する新しい口広げ加工法として、逃げ有りパンチを用いた口広げ加工を提案し、高い成形性を得るにあたって適正なパンチ形状の調査に取り組んでいる。提案工法では、図3に示すように、回転させた管に逃げ溝を有するパンチを押し込むことによって、管端を広げる。パンチに逃げ溝を設けると、管とパンチの接触面積が低減するとともに、潤滑効果が向上するため、加工荷重が低減し、座屈の抑制が期待できる。一般的なスピニング加工と比べると、管と工具の接触面積は広いため、加工の効率は高く、短時間の加工が実現できると考えられる。本研究は、拡管型抽伸加工において、その前段加工である口広げ加工の段階で管に座屈が生じることが問題であった中、久保木先生が開発された逃げ有りダイスを用いた口絞り加工⁸⁾にヒントを得て、2019年頃よりスタートさせた研究である。

本工法において、管とパンチが接触する部分の面積が成形性に大きく影響する。接触面積を定義するパラメータである接触角 γ が異なる様々なパンチを用いて実験を行った結果、 γ が 300° 程度の逃げ有りパンチを用いることによって、最大口広げ率は1.12に達した⁹⁾。これは、従来のプレスによる

図2 拡管型抽伸においてプラグ半角 α および拡管率 κ_d が成形可否に及ぼす影響 (STKM13C) (Online version in color.)

口広げ加工にて得られた値の1.8倍程度の値であり、適切な γ を持つパンチを選択することによって、提案工法による大幅な成形限界の上昇を実現した。現在は、さらなる成形限界の向上を目指し、溝数や押し込み速度など、接触角 γ 以外のパラメータが成形性に及ぼす影響について調査を進めている。

3.4 深底容器成形に関する研究

金属薄板から効率的に深底容器を成形するための工法として、局所的な圧縮加工による容器成形技術を開発している。図4に凸型パンチを用いた圧縮加工の概要を示す。凸型パンチの先端部にて容器底部を成形した後に、容器フランジ部を局所的に圧縮することによって、フランジ部の材料を半径方向に伸ばし、容器側壁部を成形する。一般的な深絞り加工の場合、パンチによって板を引っ張って加工するため、加工時に割れが生じる可能性があるが、提案工法の場合、主に圧縮によって加工するため、割れが生じにくく、1工程で深底容器を成形することができる¹⁰⁾。本研究は、筆者が京都工芸織

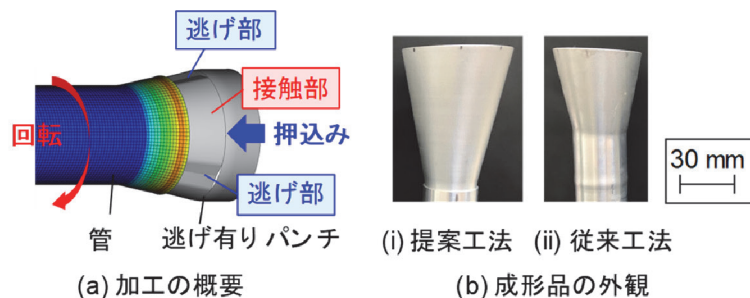


図3 逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工 (Online version in color.)

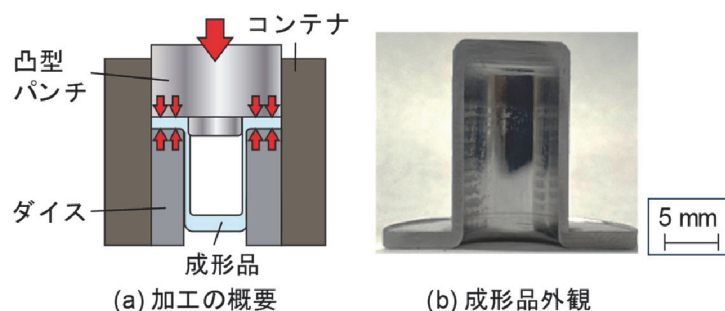


図4 凸型パンチを用いたフランジ圧縮加工による深底容器成形 (Online version in color.)

維大学を修了し、電気通信大学に着任する際に、飯塚先生から、金属材料に関する研究テーマも持っておいた方が良くだろうということで頂いたテーマであり、2015年頃から現在に至るまで、断続的に取り組んでいる。現在は、成形した深底容器の形状精度向上を目的とした多段加工法の開発に取り組んでいる¹¹⁾。

また、上記の板材成形に関する研究を行っていたことが縁となり、企業の方とともに多段深絞り加工による電気自動車用の電池ケース成形に関する研究にも取り組んだ。電池ケースは、断面が高アスペクト比かつ深底の容器形状であるため、複数工程の絞り・しごき加工によって、成形する必要がある。本研究では、工程数をできるだけ少なくしつつ、所望の形状を得るため、企業の方と連携しながら、FEM解析および実験によって、寸法精度に優れた電池ケースを成形するにあたって適正なパンチ、ダイスおよびブランク形状を明らかにした¹²⁾。

4 英国Swansea大学への留学

2018年4月～9月に英国のSwansea大学にて、半年間、Visiting Researcherとして、Eduardo de Souza Neto先生 (Swansea大学教授) の下、木材のマルチスケール有限要素解析に関する研究に取り組んだ。Neto先生は、有限要素法に基づく解析手法を専門としており、この分野における第一人者である。筆者は、木材が周期的な構造を持っていることに着

目し、この構造を再現したモデルを用いたマルチスケール有限要素解析によって、木材の複雑な変形挙動の再現に取り組んだ。Neto先生とは、2017年に国際会議COMPLASに参加した際に、秋山先生と久保木先生の紹介の下、知り合った。

Swansea大学では、日本の大学とは異なり、指導教員ごとに研究室が構成されておらず、1つの大きな部屋に指導教員の異なる様々なPh.D.の学生がいた。筆者は学生部屋にデスクをいただき、研究に取り組んだ。教員がふらっと学生部屋に入ってくると、学生と教員は互いにファーストネームで呼び合い、対等に議論している様子が印象的であった。筆者もNeto先生と定期的に研究打ち合わせを行ったり、解析プログラムを使わせていただいたりと大変お世話になった。このような留学生活を乗り越えたことで、筆者の英語力はほんのり向上するとともに、留学前まで抱えていた今後の人生に対する不安もなんとなく軽減された気がした。若手の皆様は、機会があれば、是非とも海外留学に挑戦いただきたいと思う。

5 おわりに

本稿では、筆者の研究とそれにまつわる活動について紹介した。振り返ると、多くの素晴らしい研究者の方々のサポートを得て、研究を進められたことを改めて実感できた。今後も、様々な研究者の方々と出会い、良い刺激を受けながら、様々な研究に取り組んでいければと考えている。2019年に創

形創質工学部会の若手フォーラムに入会したことから、最近
は同世代の若手の研究者の知り合いが増えた。若手フォー
ラムでは、年に2~3回程度の勉強会を実施しており、大学の研
究室や企業の工場の見学、著名な先生方をお招きしての講演
会などを実施している。筆者にとって、研究や学会活動につ
いて相談、協力できる同世代の方々が増えたことは大変心強
く感じている。近年では、日本塑性加工学会をはじめとした
他学会の若手の会との共催行事も多い。若手の研究者の減少
により、学協会によっては若手向けの行事運営が難しくなっ
ていくところもある中、学協会の垣根を越えて協力し合っ
ていくことが今後重要になっていくのではないかと思う。2022
年度からは若手フォーラムの座長も担当させていただいてい
る。若手の皆様は、是非とも創形創質工学部会の若手フォー
ラムに入会いただきたいと思う。

参考文献

- 1) 梶川翔平, 飯塚高志 : 材料, 64 (2015) 5, 381.
- 2) S.Kajikawa and T.Iizuka : J. Mater. Process. Technol., 225 (2015), 433.
- 3) S.Kajikawa, H.Kawaguchi, T.Kuboki, I.Akasaka, Y.Terashita and M.Akiyama : Metals, 10 (2020) 12, 1642.
- 4) 張世良, 川口光, 久保木孝, 赤坂勇, 寺下雄三, 秋山雅義, 梶川翔平 : 塑性と加工, 63 (2022) 743, 174.
- 5) S.Zhang, T.Kuboki, M.Akiyama and S.Kajikawa : Proc. 10th Int. Conf. Tube Hydroforming, (2022), 253.
- 6) S.Zhang, T.Kuboki, M.Akiyama and S.Kajikawa : Proc. 14th ICTP, (2023), 594.
- 7) S.Kajikawa, Y.Kato, S.Zhang, T.Kuboki and M. Akiyama : Proc. 14th ICTP, (2023), 612.
- 8) W.Oba, Y.Imaizumi, S.Kajikawa and T.Kuboki : J. Mater. Process. Technol., 262 (2018), 350.
- 9) S.Kajikawa, K.Iizuka and T.Kuboki : Proc. 10th Int. Conf. Tube Hydroforming (2022), 211.
- 10) S.Kajikawa, T.Kuboki and T.Iizuka : J. Mater. Process. Technol., 288 (2021), 116835.
- 11) S.Kajikawa, T.Kuboki and T.Iizuka : Proc. COMPLAS XIV, (2017), 54.
- 12) S.Kajikawa, T.Takasan, T.Kuboki, K.Tamaoki, K.Onishi, A.Gunji and A.Yamauchi : Proc. COMPLAS XVI, (2021), 556.

(2023年10月6日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

宇都宮大学 工学部 機械システム工学科 准教授

白 寄 篤

梶川先生には、日本鉄鋼協会の管工学フォーラムで活動のみならず、日本塑性加工学会（以下、塑性加工学会）でも大変お世話になっている。私の方は、塑性加工学会のチューブフォーミング分科会で、長年、幹事を務めており、特に近年では、梶川先生のお世話になることが多い。その関係で、この原稿執筆者としてご指名いただいたき、立場相応以上のお役目で恐縮している。

直近で先生に大変お世話になったのは、コロナ感染症禍で急速に普及したオンライン会議システムの設定と操作である。参加者全員がオンライン参加であるならまだしも、対面とオンラインとのハイブリッドとなると、生じる可能性がある問題を準備段階からよくよく想定しなければならない。四捨五入で還暦の私および同類の幹事では頭が回らないところを、梶川先生に助けていただき、2022年11月には、無事、ハイブリッド開催の国際会議（管材の塑性加工に関する国際会議TUBEHYDRO 2022）を実施することができた。なお、この国際会議は、コロナ禍で延期されたものの、2003年から隔年開催しているものであり、梶川先生は2019年の台湾での開催時に優秀論文講演賞を受賞している。

受賞歴ということでは、梶川先生は、学生時代から、塑性加工学会からのみならず、日本機械学会と日本材料

学会からも授賞されている。多くの方々から学術・研究分野での活躍が期待されている人物である。そのような梶川先生に上述のような縁の下のお役目を快くお引き受けいただいております、大変ありがたいことである。

梶川先生も私も携わっている研究分野は、塑性加工学会の会員数の変化で考えると、日本国内では縮小傾向にある。1997年の約4,300名がピークであり、それ以降徐々に減り、2022年度末では約2,300名である。このような状況下で学協会の運営を維持するために、縁の下役目が回ってくる機会は、私が若かったときに比べれば増えていると考えられる。

日本のみならず、世界を考えれば、日本の国内事情のことばかりでは済まないところがある。梶川先生は、現在、世界的に活躍されている電気通信大学の久保木孝教授とともに研究および学生の指導に日々励まれている。梶川先生は、久保木先生の活躍される姿を間近にさせていらっしゃる、英国への海外留学の経験もあり、また、企業との共同研究もされており、実体験に基づいて将来を深くお考えと思われる。

心身の健康を第一に、梶川先生には益々ご活躍いただけることに期待しております。

(株)三五 精鋼・シャシー部 担当社員

陣内 雄士

梶川翔平先生とは、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で初めてお会いしてからのお付き合いです。今回このような依頼を頂き、誠に恐縮です。お会いした当初は、電気通信大学に着任されて間もない時期で、博士後期課程では木竹材の成形加工に関する研究に取り組まれていたこともあり、金属材料の塑性加工に関する研究成果はもってられません。それから8年ほどたち、梶川先生の「躍動」の記事を拝見すると、研究領域を広げられ、チューブフォーミングをはじめとした金属の塑性加工分野においても、成果を残されていることに感銘致しました。

筆者の会社では、自動車部品に関する製品開発、生産技術開発を多く行っており、チューブフォーミング、すなわち、管材の塑性加工技術は、弊社の得意分野です。金属の管材は、配管や構造部材などの用途に使用されており、近年では、自動車用の部品としての需要も高まっています。自動車部品分野では、軽量化や、高剛性・高強度を目的とした管製品が求められており、管製品の形状の複雑化や、難加工材の適用など、成形の難易度も上がってきています。このため、チューブフォーミング技術の発展は非常に重要だと感じています。例えば、自動車の排気システムを構成する管は非常に複雑な

形状をしています。このような管は曲げ、口絞り、口広げ加工など様々な要素技術を組み合わせた複数工程にて製造されます。梶川先生の管の拡管加工に関する研究は、管製品のさらなる軽量化や複雑化を実現するにあたって、重要な成果だと思います。チューブフォーミング分科会に加え、日本鉄鋼協会の管工学フォーラムにも参加されており、チューブフォーミング分野において今後の活躍が期待される研究者の1人です。

梶川先生の記事を拝見すると、板材成形や、木材加工など、チューブフォーミング分野以外にも多くの研究に取り組まれており、その研究の幅広さが梶川先生の特徴ではないかと思えます。例えば、板材成形に関する研究では、深底容器成形技術の開発にも取り組まれています。電気自動車用の電池ケースは今後ますます需要が高まると予想され、電気自動車の今後の普及を鑑みると、重要性の高い技術と思われます。学協会活動においても、創形創質工学部会の若手フォーラムの座長を務められるなど、存在感を増しておられます。塑性加工分野の研究者が減少する中、若手研究者同士の連携は重要だと思います。この分野を支える研究者として、今後ますますのご活躍を期待しております。