



## 躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

# 塑性加工教育研究の道程と後来

Education and Research on Metalforming, its Path and Future

吉田佳典

Yoshinori Yoshida

岐阜大学 工学部 機械工学科  
機械コース 准教授

地域連携スマート金型技術研究センター  
副センター長

## 1 はじめに

筆者は岐阜大学工学部機械工学科機械コースに所属し、生産加工学、特に塑性加工学に関する研究・開発に取り組んでいる。また兼担する岐阜大学地域連携スマート金型技術研究センター（以下、金型センター）においてはものづくり実践教育に注力し、プレイングマネージャーの育成に取り組んでいる。応用研究と基礎研究のバランスをとりながらこれらに学生を参画させ、悪戦苦闘しながらも楽しく学んでいる。本稿では、筆者がこれまで行ってきた各種成形加工の変形解析およびその高精度化への取り組み内容を中心に、僣越ながらも塑性加工研究および教育の今後について考察する。

## 2 数値解析から材料試験へ

### 2.1 有限要素解析との出会い

著者の研究歴は、平成7年4月における名古屋大学工学部材料プロセス工学科第4講座（材料加工工学講座）への配属とともに始まった。学部から修士にかけて、恩師である石川孝司教授から頂戴したテーマが「剛塑性有限要素法（以下FEM）を用いたせん断加工の変形解析」であった。学部時代は、同講座の湯川伸樹助教授の開発されたアダプティブリメッシング技術を活用することによる解析精度の向上<sup>1)</sup>を、修士課程では多孔質体降伏関数ならびに損傷発展モデル（Gurson-Tvergaard-Needlman model）<sup>2)</sup>を導入することで亀裂生成および進展の計算を実現した<sup>3)</sup>。本研究において開発した解析プログラムは研究室で培われたオリジナルコードであり、学部4年当初は湯川先生から授かった膨大なFORTRAN（当時は77）ソースコードとの戦いであった。先人のコードを読み取りながら新たな機能を追加して行く作業においては油断大敵で、常に薄氷を履む思いで臨む必要が

あった。これは、ほんの少しの改造が、コードの遥か遠くで気付かないうちに小さな矛盾を生み、これが誤動作の遠因となる現象が頻発するためである。ちなみに商用の汎用コードが身近で、ユーザサブルーチンなどによる機能追加が比較的簡単に行える現状から思えば、FEMコードの自作経験を有する最後の世代であるかもしれない。

### 2.2 材料試験研究への転身

修士論文の締切りは近づいても、実験結果と解析結果が一向に近づかず、焦りばかりが高まり夜も眠れないほどであった。これが解析的研究の怖さの一つである。結果が出ない、結果が出てもそれが正しいのか否か判然としない、さらに結果が明らかに正しくない場合はその原因がどこにあるのか、ゴールが見えない！…といった負のスパイラルに陥る。一方、実験的研究においては成功か失敗かに関わらず、必ず「結果」が出る。隣で超塑性を研究していた友人をうらやましく思いつつ、解析的研究における独特の難しさを体感した。

なんとか修士課程を修了した後、足元を見つめ直すべくまず着目したのは応力状態が初期損傷の発生に及ぼす影響であった。切欠付丸棒引張試験を行うことで種々の応力状態（応力三軸度）における内部損傷（微小ボイド）の量を地道に調査した。さらに当該引張試験のFEM解析を実施し、その結果と実験結果における履歴とが一致するように延性破壊パラメータを同定した。また原著<sup>2)</sup>における空孔生成速度の取扱いは実験事実を表現できないため、モデルの修正ならびにこれを変形解析に適用することでせん断加工部のだれ、せん断面長さ、破断面長さおよびかえり（ばり）を予測することが可能となった<sup>4,5)</sup>。ここで筆者は、材料試験によって各種パラメータを事前にかつ適切に同定することが近道であるという至極当然の理を身をもって実感し、これが今でも教訓として生かされている。本技術開発においては本会の鉄鋼研究振

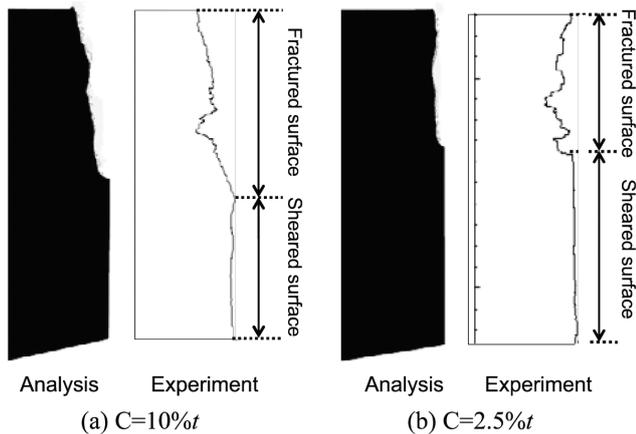


図1 鋼板の丸抜き加工の変形解析結果と実験結果の比較 (板厚1.2mmの場合の (a) 工具間クリアランス10%  $t$  および (b) 2.5%  $t$  の結果)

興助成 (第13回受給) を賜り、効率的に進めることができた。

その後も延性破壊パラメータの同定に関する材料試験法の開発および板材への応用<sup>6,7)</sup>を進め、またこの微小ボイド測定手法を用いて二層鋼 (DP鋼) の組織がボイド生成および成長に及ぼす影響に関する調査<sup>8)</sup>、ならびに被加工材の材質がせん断工具刃先の摩耗に及ぼす影響を解析的に検討<sup>9)</sup>することが可能となった。

また平成21年に岐阜大に移った後、平成23年にはドイツのドルトムント工科大の成形加工技術・軽量構造体研究所 (Institut für Umformtechnik und Leichtbau、所長: A. E. Tekkaya教授) にて客員研究員として在外研究し、その流れでLemaitre 損傷モデルにおける材料パラメータの同定手法開発および高炭素鋼のせん断加工解析への適用にも携わった<sup>10)</sup>。

### 2.3 鋼管の成形性評価試験

せん断加工の変形解析から派生して延性破壊予測および材料試験に関する研究を進める中、板材およびバルク材料だけでなく鋼管の二次成形性評価に関する仕事をするチャンスを頂いた。創形創質工学会管工学フォーラムおよび研究委員会への参画である。平成15~18年度に日本鉄鋼協会創形創質工学会「鋼管の成形性評価試験に関する研究会 (主査: 香川大学 三原豊教授)」<sup>11,12)</sup>に、平成20~23年度に同部会「鋼管二次加工性評価試験方法の標準化研究会 (主査: 東京農工大学 桑原利彦教授)」に参画し、主に画像解析を用いた鋼管の引張試験に関する技術開発と標準化に従事した。ここでは他の大学の先生方および企業の研究者の方々と協調して大規模な研究を行うという大変貴重な機会を得た。

### 2.4 逆解析を用いた流動応力同定

材料試験に関する研究とその応用研究を推進する中で「数値解析精度の半分は材料試験が担保する」という教訓を体得できた。名古屋市工業研究所の西脇武志博士 (現・大同大学教授) および村田真伸博士とともにFEMに基づく最適化を用いた流動応力同定技術の開発に取り組んだ。これは平滑および切欠付丸棒引張試験を用いることによって種々の応力状態において荷重曲線を得て目的関数とし、FEMに基づく逆解析と応答曲面法による最適化技術を適用することで流動応力曲線を得るものである。通常、引張試験においてはくびれが発生するまでの一様伸びの範囲でしか流動応力を得ることができないが、本技術によってくびれ発生以降および破断までの同定が可能となった<sup>13)</sup>。この技術を積分型延性破壊条件式における限界ダメージ値の同定に適用し、円柱据込み圧縮における表面割れ予測を行なった<sup>14)</sup>。また3次元デジタル画像相関法 (DIC) によって引張試験におけるくびれ形状の経時変化をとらえ、開発した流動応力同定において得られるFEM解析結果と比較検討することによって本手法の妥当性を検証した<sup>15)</sup>。今後、種々の塑性加工プロセスに関する応用研究に展開したい。

### 2.5 生体医療材料加工技術

これまで自動車および航空宇宙分野に目を向けて研究を行ってきたが、平成21年から生体インプラントの研究を開始した。全く新しい分野での研究であったが、筆者の出身大学・学科の先輩である市野良一教授および黒田健介准教授からの温かいご指導を受けて実施した。

純チタン丸棒の表面に転造によって種々の表面凹凸を付与し、さらに陽極酸化処理によって二酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) を成膜した後に、これらをIGSラット脛骨に埋植してチタン丸棒表面における骨伝導能を評価した。その結果、微小表面凹凸と表面処理が生体活性に及ぼす影響を確認した<sup>16)</sup>。また、実際に骨ねじを製造して、その表面に微小表面凹凸を分布させてラット脛骨に埋植することで、表面状態が抜去トルクにどのような影響を及ぼすかを確認した<sup>17)</sup>。また金型センターに導入した金属積層造形機においてはTi-6Al-4Vの造形が可能であり、これを用いたインプラント製造技術の構築も行なっている。

骨ねじならびに人工股関節などの生体インプラントの使用量は、高齢化社会に突入した我が国において今後増加の一途を辿る。現在、海外製品が国内市場を占めており、日本人の体格にあった製品開発および各個人の体格に合わせたテーラーメイドインプラント製造技術の確立が切望されている。また、決して安価でないインプラントの低価格化も課題の一つであり、このためには塑性加工技術の応用が重要である。

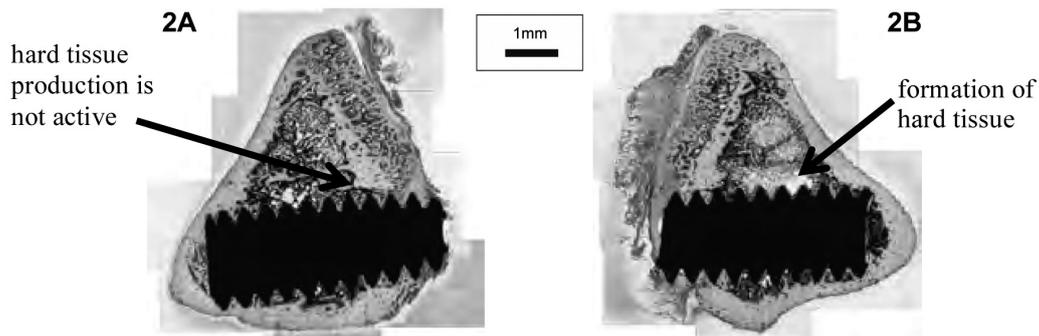


図2 転造チタン骨ねじのラット脛骨埋殖実験結果の例

### 3 塑性加工教育・研究の行方

現在、塑性加工を専門とする研究室および教員が減少している。これは塑性加工に限らず生産加工分野全体の傾向であるようだが、いずれにしてもものづくりを基盤とする我が国においては深刻な問題ではなかろうか。ものづくり教育に対する社会的要請が極めて高いにも関わらず、このような事態を招いていることは遺憾である。若手技術者および研究者の養成は我々大学教員の使命であり、これからも尽力する所存である。

また、塑性加工技術がこれからの日本のものづくりにおいて必要不可欠であり続けることは言を俟たないが、単に塑性加工だけで完結する製造技術のみならず、他分野との融合ならびに協調が今後ますます重要となってくる。前述した積層造形や接合などの種々の加工法のメリットと塑性加工を組み合わせることによって新たな価値を創造することが重要であり、紆余曲折ここまで来た筆者も、まさに微力ながらこれに貢献する所存である。

#### 参考文献

- 1) 湯川伸樹, 犬飼佳彦, 吉田佳典, 石川孝司, 神馬敬: 塑性と加工, 39 (1998) 454, 1129.
- 2) V.Tvergaard and A.Needleman: Acta Metall., 32 (1984), 157.
- 3) 吉田佳典, 湯川伸樹, 石川孝司, 細野定一, 村瀬道德: 塑性と加工, 44 (2003) 510, 435.
- 4) 吉田佳典, 村瀬泰章, 湯川伸樹, 石川孝司: 塑正と加工, 46 (2005) 532, 392.
- 5) T.Ishiguro, Y.Yoshida, N.Yukawa and T.Ishikawa: Mater. Trans., 50 (2009) 7, 1671.
- 6) Y.Yoshida, N.Yukawa and T.Ishikawa: Steel Res. Int., SE, (2011), 586.
- 7) Y.Yoshida and T.Ishikawa: Mater. Res. Innovations, 15 (2011), 422.
- 8) 石黒太浩, 湯川伸樹, 石川孝司, 吉田佳典, 吉田博司, 藤田展弘: 鉄と鋼, 97 (2011) 3, 136.
- 9) 石黒太浩, 中村圭佑, 早川暢祥, 吉田佳典, 湯川伸樹, 石川孝司, 村瀬道德, 中野奨, 吉田浩二: 鉄と鋼, 97 (2011) 3, 99.
- 10) K.Isik, Y.Yoshida, L.Chen, T.Clausmeyer and A.E.Tekkaya: C. R. Mec., 346 (2018) 8, 770.
- 11) 三原豊, 吉田佳典: ふえらむ, 13 (2008) 6, 375.
- 12) 吉田佳典: 塑性と加工, 51 (2010) 591, 313.
- 13) M.Murata, Y.Yoshida and T.Nishiwaki: J. Mater. Process. Technol., 251 (2018), 65.
- 14) 村田真伸, 吉田佳典, 西脇武志: 塑性と加工, 59 (2018) 686, 977.
- 15) T.Nishiwaki, M.Murata and Y.Yoshida: Procedia Manuf., 15 (2018), 1762.
- 16) Y.Yoshida, K.Kuroda, R.Ichino, N.Hayashi, N.Ogihara and Y.Nonaka: CIRP Ann., 61 (2012), 579.
- 17) Y.Yoshida, K.Kuroda, R.Ichino, N.Hayashi, N.Ogiwara and Y.Nonaka: Procedia Eng., 81 (2014), 340.

(2018年9月26日受付)

## 先輩研究者・技術者からのエール

香川大学 名誉教授

三原 豊

**私**が、吉田先生と初めて仕事を御一緒したのは、2002年鉄鋼協会管工学フォーラムで研究会の立ち上げを検討していた時だったと思います。当時、自動車の軽量化に向けて剛性の高い中空部材の製造方法として、チューブ・ハイドロフォーミングが注目されていましたが、鋼管の加工性とチューブ・ハイドロフォーミングの加工限界を結び付けるための鋼管の加工性試験方法については、体系的な研究はなされておりました。そこで、鉄鋼協会の研究会制度を利用し、第1期として加工性評価試験方法の研究会、第2期として試験方法の標準化研究会を立ち上げました。先生は、これら研究会の設立準備段階から参加され、企業の方々との共同研究の難しさ、トップクラスの先生方との共同研究の在り方や、プロジェクトの立案からマネジメントの仕方に及ぶ、研究とは違う勉強もされたことと思います。また、私の印象では、研究実績のある先生方の中に入っても、自分の意見を的確に発言できるとともに、目上の方に対しては大変礼儀の正しい物言いをできる人と感じていました。

研究面では、それまで先生が研究されてきた積分型損

傷予測(応力3軸度を中心)の考え方をチューブ・ハイドロフォーミングの成形限界予測に適用されると同時に、引っ張り変形中のひずみを測定する独自の画像処理システムを作成するなど、新しい工夫を取り入れられていました。これらの手法は、他の先生方にも大いに参考になったと思います。また、先生は、その後も、塑性加工を受けた材料の損傷について研究を進められ、さらに高度なくびれ発生以降および破断までの応力、ひずみ状態を同定できる方法を開発されるなど、研究分野でも成果をあげられているのは、持ち前の自分の頭で考え、工夫する研究への取り組み態度が生きているものと頼もしく思っています。

岐阜大学へ移られてから、金型技術研究センターの副所長として、産学共同研究、産業界の技術者教育などに従事され、さらに幅の広い研究者になっておられると思います。今後、先生の得意とされる分野をさらに大事に育て、深め、最新のAI技術なども取り入れ、その分野の体系化をされ、世界で活躍される技術研究者になられることを祈ります。若い先生方が成長される姿を見ることは大変楽しいことです。

新日鐵住金(株)技術開発本部鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部長

樋渡 俊二

**吉**田佳典先生は塑性加工の分野に数多くいらっしゃる素晴らしい吉田先生のお一人のため、いつもフルネームで区別しています。大活躍の吉田佳典先生が未だ躍動を執筆していなかったということに驚きつつも、今回、ご指名いただいた荣誉に恐縮しつつ筆を執らせていただきます。

鉄鋼メーカーで高強度鋼板に関わる研究開発を担当している私にとって、吉田先生の延性破壊に関する研究は本当に有益な知見を与えてくれます。鋼材が高強度になればなるほど延性破壊が加工の限界を制約することが多くなり、また、板材のせん断加工では延性破壊の挙動をコントロールしなければなりません。先生の研究の出発点はFEMとのことですが、連続体の前提の下で破壊を扱う延性破壊理論の研究は、産業界で塑性加工プロセスの最適化が普通にFEMで行われている今、有用性を増すばかりでしょう。さらにそれを発展させ、実験と理論の両面からDP鋼の微細組織の影響に踏み込んだ研究は鋼材開発に関わる技術者にとってたいへん示唆に富むものでした。先生のフィールドは延性破壊から材料試験やトライボロジーへ、あるいは板材、バルク材、管材から生体医療材料へ、また、金型センターの兼担を通じて基礎研究から応用研究へとどんどん拡大しています。今後

の一層のご活躍がたいへん楽しみです。

塑性加工の教員が減少する中、このように周囲の期待を一身に背負った吉田先生ですので、学協会や講演大会、国際会議などの運営に関わる仕事も数多くお引き受けせざるを得ないのでしょうか、いつ研究や教育をしているのか、不思議なぐらいご多忙を極められているとお見受けします。一方で、私が吉田先生に接した当初に驚いていたのは、機敏に効率的に仕事をさばく姿でした。例えば、先生が司会と書記をした打ち合わせでは議論しながらも会議終了時に議事録が出来上がっていました。先生のこの処理能力をもってすれば心配は要らないのかもしれませんが、目先の忙しさに振り回されることなく、本質を追及するライフワーク的な研究に取り組む時間も確保していただきたいと思っています。

吉田先生がキャリアを積んだ名古屋大学と岐阜大学はものづくりが最も盛んな中部地区を代表する大学です。そのようなDNAを持った先生が塑性加工を専門とする若い研究者たちを引っ張っていること、そして教育を通じて産業界で活躍する人材を輩出していることから、日本のものづくりは決して負けないと信じています。これからも産業界からエールを送り続けます。