



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

電縫鋼管に関する技術開発を通じて

Development of Technology for ERW Pipes

井口敬之助

Keinosuke Iguchi

新日鐵住金(株)

技術開発本部 鉄鋼研究所

利用技術研究部 主幹研究員

1 はじめに

筆者は入社以来、主に電縫鋼管の利用加工技術および製造技術に関する研究開発に携わってきた。最初に配属された部署では、電縫鋼管の利用加工技術の一つであるハイドロフォーム技術の開発にとりくんだ。その後、利用加工技術から一転して電縫鋼管の製造技術の開発にとりくんだ。電縫鋼管製造工程の中で、鋼板を円管上に連続成形するロールフォーミングの研究開発を行い、製造ラインの能力拡大、生産性向上の検討を行った。そして一昨年から、再び電縫鋼管の利用加工技術開発に挑戦している。本報文では、筆者がこれまで取り組んできた技術開発事例をご紹介しますとともに、今後の研究者としての目標を述べさせていただきたいと思う。

2 大拡管ハイドロフォーム技術の開発

筆者が最初に取り組んだ研究テーマは、ハイドロフォームの大拡管技術の開発であった。ハイドロフォームは、金型内に鋼管を投入して型締めし、鋼管内部に水を満たして高水圧を付与して拡管させ、金型に密着させることで所望の部品形状を得る成形方法である(図1)¹⁾。

ハイドロフォームでは、拡管時に内圧を付与すると同時に、軸押しポンチで材料を管軸方向に流入させることができる。これにより拡管時の肉厚減少を抑えることができる^{2,4)}。ハイドロフォームは閉断面構造部品を一体成形でき、溶接代を省略できるため、部品統合と軽量化のメリットが大きい成形方法である。しかしながら、従来のハイドロフォーム技術では拡管率(拡管後断面周長/素管断面周長)は、1.0~1.1程度であり最大でも1.4程度である。このため、ハイドロフォームの適用部品はシャシ系部品であるクロスメンバー、サイドメンバーおよび排気系部品であるエキゾーストマニホールド等にかぎられている。この限界を取り払い、部品統合と軽量

化のメリットを広く享受するためには、拡管率限界を大きく向上させる必要がある。すでに、中間熱処理と管端縮径をもちいて大拡管を行う技術は提案されている⁵⁾。しかしながら、量産を考慮した場合、熱処理なく冷間成形のみで大拡管率を達成できる事が望ましい。

そこで、当時の開発メンバーと何度も議論を繰り返して考案したのが、割れ座屈なく、大拡管が可能な交差式可動金型機構である。(図2)¹⁾ハイドロフォーム成形では、軸押しにより材料を流入させることで肉厚減少を抑えることができる。しかし材料と金型の摩擦抵抗、座屈などが問題となり十分に効果を発揮できないことが、大拡管を実現できない大きな要因であった。筆者らが考案した交差式可動金型は、可動金型に設けた狭いスリットに長尺のカウンターを組みこんでいる。このような構造とすることで可動金型により材料流入を促進するとともに、長尺のカウンターにより、拡管中の鋼管を全長に渡って保持し続けることができ、座屈を防止することができる。筆者らはこの交差式可動金型を用いることで、従来複数プレス部品を溶接して製造されていたアクスルハウジング(ディファレンシャルギア、ドライブシャフト、デフオイルを収容するサスペンション部品である)の一体成形に取り組み、3工程のハイドロフォーム成形により、図3のような一体型のアクスルハウジングの成形に成功した¹⁾。

本開発は、筆者が入社後初めて取り組んだ研究テーマであった。開発当時は直属の上司と繰り返し繰り返し議論をさせてもらい、いくつもの案を試しては、やりなおすということを行った。また本開発は、お客様であるスズキ(株)様との共同開発として取り組んだ物であり、スズキ(株)で本開発をご担当された金田裕光氏にも、成形技術についての議論はもちろん、アクスルハウジングという部品に要求される様々な特性や設計要件についてご指導頂き、何度も打合せを持ちながら取り組んだ。当時は研究者として働き始めたばかりであったため、無我夢中であり自分の事で頭が一杯であった

が、上記のような社内、社外の先輩研究者の方に忙しい中で本当に長時間にわたり議論や相談に付き合っていただけで、様々な課題を乗り越えられたのだと感じている。研究者として働き始めて気づけば十年以上たった今になって、この頃に社内外の先輩方にご指導いただいたことが自分の基本になっていると思う。

3 電縫鋼管のロールフォーミングの開発

上記の大拡張ハイドロフォーム技術の開発途上で名古屋技術研究部に異動となり、一転して利用加工技術から電縫鋼管の製造技術の開発に取り組むことになった。現場の課題に直結する開発に取り組む技術研究部では、大学の先生方との共同研究に深くかかわることになった。事の発端は異動してすぐに取り組んだ数値シミュレーションによる電縫鋼管製造ラインの改善検討である。電縫鋼管は、鋼板をロールにより連続的に円管状に成形したのち電気抵抗溶接で板の両端を接合することで製造される。私の研究テーマはこのロール成形による板変形過程を数値シミュレーションで正確に予測して、実生産ラインの改善を進めることであった。すでに鋼板の数値シミュレーションソフトは種々リリースされており、前述したハイドロフォーム成形技術の開発でも活用していた。ところが、ハイド

ロフォーム成形の検討に用いていた動的陽解法による検討を行ったところ、ロール成形において重要となる板端部の挙動やロール直下での変形を精度よく再現できなかった⁶⁾。開発は最初の精度検証の段階で行き詰ってしまい停滞した。

困った私は、当時の上司の勧めで、種々の板材成形シミュレーションに関する研究を行われており、数値解析に詳しい京都大学宅田裕彦先生の研究室にご相談に伺った。ここで宅田裕彦先生と先生の研究室で当時助教をされていた浜孝之先生（現在同研究室准教授）のお二人に相談にのっていただき、板材の曲げ成形に関して、各種有限要素法解法が及ぼす影響を明らかにする共同研究を開始することとなった。共同研究では基本に立ち返り、平板両端にモーメントを加えて金型を用いず曲げを行う単純曲げとダイ、ブランクホルダー、パンチを用いて金型による拘束を行いながら曲げを付与する2つの基本的な曲げについて検討を行った。動的陽解法、静的陽解法、動的陰解法および静的陰解法の各コードを用いて解析を行い変形プロセス、応力分布、応力推移の観点から詳細に比較検討した。その結果、金型接触のない純曲げ成形では、成形速度の影響が非常に大きく生じることが確認できた。一方で成形速度を十分遅くすることで解法によらずほぼ一致した解析結果が得られることも明らかとなった。ところが金型接触が存在するケースでは、動的陽解法のみ他の3つの解法に比べて縦壁での応力低下量が大きくなり、異なる結果を示すことがわかった。これらを踏まえてロール成形において、実験とFEM解析を実施し各種有限要素法解析の結果を比較した。その結果、静的陰解法および動的陰解法を用いることで、板端部の変形挙動を精度良く予測できることが明らかと

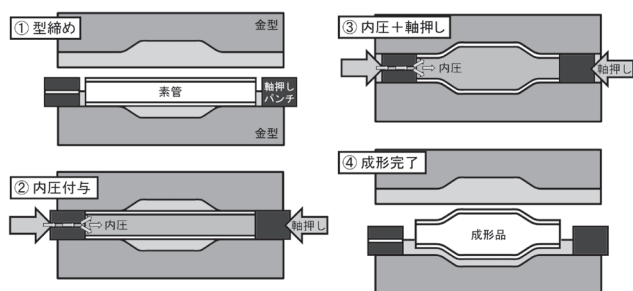


図1 ハイドロフォーム加工工程¹⁾

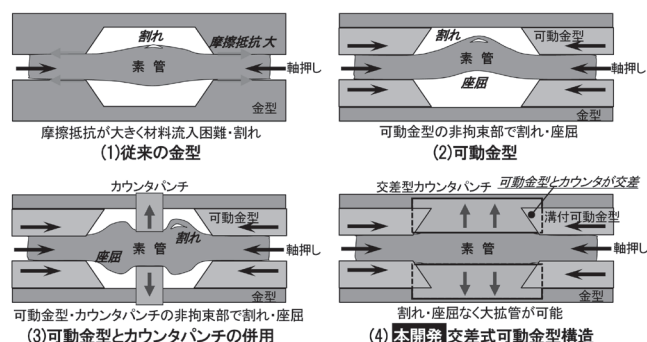
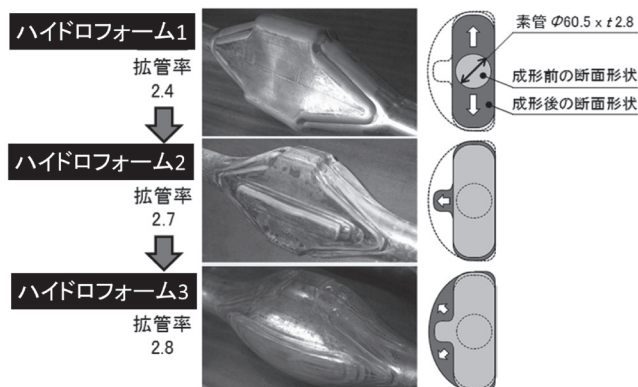
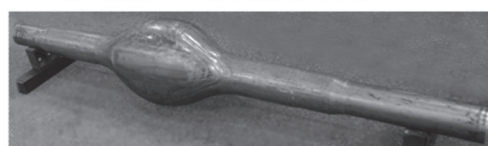


図2 交差式可動金型構造¹⁾



(1) 各成形工程における拡張部の状態



(2) ハイドロフォーム3後・最終成形品の全体形状

図3 一体型アクスルハウジング¹⁾

なった⁶⁾。共同研究で得られた本知見をもとに、静的陰解法をもちいた有限要素法解析で、実生産ラインでの鋼板の挙動を精度良く予測することができるようになり、さまざまな課題検討が大きく前進した。両先生とはその後も名古屋技術研究部に在籍した期間を通して、ロール形式による加工ひずみ量やスプリングバック挙動の違いについて共同研究をさせていただいた。これらの共同研究を通して、現場での開発ではしっかり究明しきれなかった多くの事象を明らかにすることができた⁷⁻¹⁰⁾。また研究の後半では、社会人ドクターとして頻繁に先生の研究室に伺い、研究の進め方についてご指導いただきながら、研究成果を学位論文としてまとめる機会を持つことができた。企業での開発経験を経た後に、改めて博士課程において実験結果や解析結果の解釈、研究の進め方といった研究者としての基本を今一度厳しくご指導いただけたことは、自分にとって大きな財産となったと感じている。

技術研究部では、現場の課題であれ、基礎研究であれ結局は原理原則に立ち返って検討を進めていくことが重要であるということを改めて学ばされたと感じている。鉄鋼業の製造現場ではこれまで先輩方により様々な調査や研究開発がなされ、多くのことが明らかにされてきた。しかしながら、高強度化や高機能化の要求が高まるなかで原理原則を十分つかめていない新たな課題や現象も多数でてきている。これらの現象を社内の技術者と協力しあうことはもちろん、社外の先生方のお力もお借りしつつ明らかにしていくことで新しい製品、技術を物にしていくことが、我々鉄鋼業の若手研究者の使命であると考えている。

4 成形品の疲労特性まで含めた利用技術の開発

一昨年から再び、入社当時と同じ鋼材の利用技術の開発を行う部署に異動となり、改めて鋼管の利用技術の開発に取り組むこととなった。近年では軽量化の要求が非常に高まっている。その中で高強度化、薄肉化により軽量化を進めるだけでなく、部品の構造を変化させることで軽量化を実現するケースもでてきている。その一例として従来、鋼板と棒鋼で構成されていたトーションビームを、パイプ中央部をV字に潰した閉断面構造に置き換えたパイプトーションビームがあげられる(図4)。鋼管の特徴の一つである閉断面構造を生かすことで、剛性向上と軽量化を実現する構造として適用が広まりつつある。しかしながらパイプトーションビームは、中央部が深く潰れた複雑な形状をもつことから、車の走行中に繰り返し振じりを負荷される際に応力集中が大きく、鋼管の母材部で疲労破壊することが知られている。従来、パイプを用いた足回り部品で疲労破壊の起点となるケースが多かった溶接ビード付近

ではなく、加工を受けた母材部で疲労破壊することから、加工後の残留応力や表面の状態が重要な要素となっている。

それ故、疲労特性を向上させるために、冷間加工後の残留応力を焼鈍処理により除去する方法や焼き入れにより高強度とする取り組みがなされている¹¹⁻¹²⁾。一方で将来、コストがかかる熱処理工程の省略を検討していく場合は、加工による残留応力が疲労特性に大きな影響を及ぼすことが予想される。そこでハイドロフォーム研究開発の新しい切り口として、ハイドロフォーム成形時の軸押し加工が残留応力に及ぼす影響について、実部品サイズでの実験、解析を実施して詳細な検討を行った。その結果、図5に示すようにハイドロフォーム成形時の軸押しによりスプリングバック前の周方向の応力分布が均一化されていき、最終的に金型からとりはずした際の残留応力が大きく低下することが明らかとなった¹³⁾。

今後は高強度な鋼材の適用が進むだけでなく、従来とは異なる負荷が鋼材に加わる、新たな構造が採用されていくことが考えられる。割れ、シワ、といった成形性の観点からの開発だけでなく、成形品の部品特性と関わる因子と加工条件の関連性という視点からの開発もさらに行っていきたい。

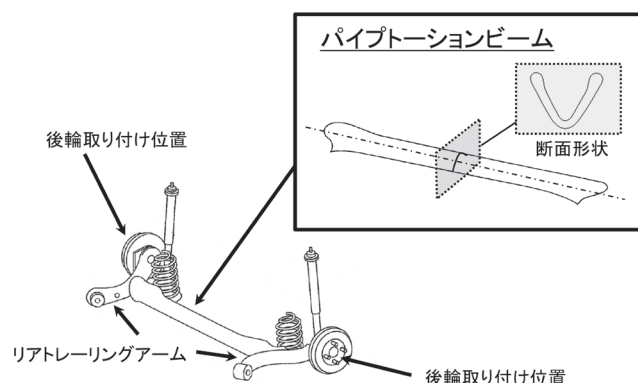


図4 トーションビーム式のリアサスペンション

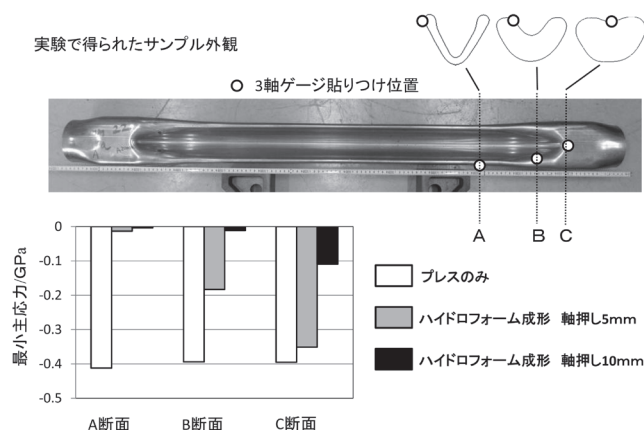


図5 ハイドロフォーム中の軸押しが残留応力に及ぼす影響

5 おわりに

躍動の副題には「若手技術者の取り組みと将来の夢」とある。しかしながら今後10年、20年を見据えて夢を語るのは、いざこういう機会をいただくと未熟な自分には非常に難しく、上手くまとめることができなかった。普段研究者にもかかわらず、目の前の事ばかりに囚われていることを思い知った次第である。できないことを嘆いていてはじまらないので、遠い将来のことはまず一度棚上げとしてこの機に改めて今現在の現場現物により真剣に向き合うことを肝に銘じた。私の研究成果を待っていただいているお客様や製造現場の方の声に真剣に耳を傾け、率直で踏み込んだ対話をさせていただいて、現場現物を良く知ることを実践したい。それにより何がこれから社会で必要とされているかを掴んで、的を得た開発を行っていきけるよう努力していこうと思う。

最後になりましたが、これまで取り組んだ様々な研究開発でお世話になった方々にこの場を借りてお礼を申し上げますとともにこのような発信の機会を下さった事に感謝致します。

参考文献

- 1) 和田学, 金田裕光, 水村正昭, 井口敬之助: 塑性と加工, 55 (2014) 647, 52.
- 2) 真鍋健一: 塑性と加工, 39 (1998) 453, 3.
- 3) 淵澤定克: 塑性と加工, 41 (2000) 478, 13.
- 4) 栗山幸久: 塑性と加工, 45 (2004) 524, 21.
- 5) 上田照守, 田口昭: プレス技術, 18 (1980) 9, 12.
- 6) T.Hama, K.Iguchi, H.Hishida and H.Takuda: Steel Res. Int., 2 (2008) 79, 587.
- 7) K.Iguchi, K.Nishida, T.Hama, H.Nakamura, Y.Kuriyama and H.Takuda: Steel Res. Int., 9 (2010) 81, 186.
- 8) K.Iguchi, Y.Kuriyama, N.Moroi, T.Hama and H.Takuda: Steel Res. Int., vSPL ISSUE, (2012), 927.
- 9) 井口敬之助, 栗山幸久, 師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦: 塑性と加工, 53 (2012) 622, 1003.
- 10) 井口敬之助, 栗山幸久, 師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦: 塑性と加工, 53 (2013) 628, 436.
- 11) 山本出, 近藤正顕, 志満津了, 福士孝聡, 中村英幸, 穴井功: 素形材, 50 (2009) 12, 44.
- 12) T.Maeno, K.Mori and K.Adachi: Journal of Materials Processing Technology, 214 (2014) 1, 97.
- 13) 井口敬之助, 和田学, 水村正昭, 末廣正芳: 平成26年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2014) 301.

(2015年3月20日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

京都大学 大学院エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻 教授

宅田 裕彦

井口敬之助さんは、私の研究室で社会人から初めて受け入れた博士後期課程学生であり、彼の成功により、その後継続して社会人からの受け入れをするきっかけになった人物である。

私が教授になってまだ間もないころ、当時新日本製鐵名古屋製鉄所の所長であった研究室（鉄鋼業に多くの卒業生がお世話になっている小門研）の先輩である二村文友さんが、私が製鉄所におじゃまさせてもらうやいなや（翌日だったかも）当時の名古屋技術研究部長の上島良之さんを私の研究室まで派遣していただき、何か一緒に共同研究できるテーマはないかということを探してくださいました。そのことには今も大変感謝しているが、それがきっかけで電縫鋼管のロール成形のシミュレーションを一緒にやることになり、まず、菱田博俊さんが担当された。その後転勤等で井口さんに交代となったのを機に、彼を博士後期課程に受け入れ、両者の退路を断つような形で本格的に共同研究を行った。

井口さんのいいところは、まず陽性であるということと、研究に対しては向いている方向はともかくとして、大きなベクトルを持っているということである。当時の上司の栗山幸久さんにベクトルの方向をうまく調整していただきながら研究を進め、当方では毎年修士課程の学生を1名つけ、一つ一つテーマをクリアしていった。社会人ということで当初はできれば2年でと考えていたが、通常の業務をこなしながらの論文作成等は大変であったようで、当方でタイムスケジュールをしっかりと管理し、半年期間短縮の2年半で学位を取得してもらった。その頑張りには、投げられたボール（例えば論文の修正）がこちらにある時間をできるだけ短くするなどして報いたつもりである。

学会発表での弁舌も立つ人なので、塑性加工やその周辺の若手研究者のリーダー的存在として、今後益々活躍されんことを期待しています。

スズキ（株） 要素技術開発部 専門職（課長）

金田 裕光

ある日、井口さんからお電話を頂いた。聞けば、「躍動」に寄稿されるのでそのコメントを依頼したいとのこと。お世話になった井口さんからの依頼ならとお引き受けたのだが、改めて読み返してみると、錚々たる方がコメントを書かれている。恐縮しながら、まずは筆を執ってみた。

本文中にも書かれているが、井口さんとはハイドロフォーム成形に関する共同開発で一緒した。初めてお会いした時の印象は、髭を生やしたその風貌から気難しい方かと思ったのだが、実際には5分も経たずにそんな心配は消えてなくなった。ざっくばらんな人柄に加えて、理解しようという意欲が大変旺盛で質問攻めにあう事も度々であったし、当方からの依頼に対して次々とアイデアが提案された。例えて言うなら、“打てば、それ以上に響く”といったイメージである。

このハイドロフォーム成形技術の開発では、断面周長比で約3倍となる、それまでの常識を大きく上回る拡張率を冷間成形のみで実現できた。さらにこの取り組みは、成形性と部品としての要求性能を同時に満たす形状設計を並行で進める必要があったため、難易度が高いものであった。そのため成形技術と部品の要求性能の両者について、井口さんと何度も議論を交わしたことを覚えている。成形技術の中でキーとなったのが、大拡張に必要な材料を効率よく流入させる交差式可動金型であり、せん断変形を積極活用する3工程ハイドロフォーム成形である。詳細は別稿に譲るとして、いずれの技術もその一つ一つがきちんと原理原則に則っており、結果

がその正当性を証明している。本文中では、“原理原則に立ち返って検討を進めることの重要性”を、技術研究部時代に学ばれたと書かれているが、井口さんはその術をその当時から学ばれていたと思えてならない。

鉄鋼材料であれ自動車であれ、開発や製造の現場には課題が多数あり、これを解決していかなければならない。自動車分野で言えば、燃費向上、軽量化、知能化、安全性向上、環境対応、生産拠点のグローバル化が主なところであろうか。井口さんが取り組まれている、加工条件と残留応力と疲労強度の関係もやっかいな課題の一つで、トーションビームに限らず、軽量化を推し進めれば直面することになる。ぜひとも、予測技術を含めてその解決策を確立していただきたいと願っている。課題解決に当たっては、“現場現物（現実）を大切に、原理原則に従って進める”ことが、結局は近道であろう。私も一技術者として肝に銘じたい。

本文を読ませていただいて、井口さんも社会人ドクターとして、社外で先生に師事するという貴重な経験を経験されたことを知った。この中で、研究者としての基本という大きな財産を得ることができたとのことで、今後も優れたご研究をされていくに違いない。

筆を置く段になって、ふと“錚々”を辞書で調べてみると、“よく鍛えた鉄などの響き”という意味があった。まさに鉄鋼に携わる者にふさわしい言葉である。井口さんのご活躍が錚々と響き渡る様を想像しながらエールを送りたい。