



研究会成果報告 - 41

「部材の極限軽量化に資する偏肉鋼管加工技術」 研究会活動報告

Activity Report of the Research Committee on “Uneven-walled Steel Pipe Processing Technology that Contributes to the Ultimate Weight Reduction of Parts”

東京農工大学
教授 桑原利彦
Toshihiko Kuwabara

崇城大学
教授 森 昭寿
Akihisa Mori

埼玉大学
教授 内海能亜
Noah Utsumi

岐阜大学
教授 吉田佳典
Yoshinori Yoshida

宇都宮大学
准教授 白寄 篤
Atsushi Shirayori

香川大学
准教授 吉村英徳
Hidenori Yoshimura

東京大学
教授 古島 剛
Tsuyoshi Furushima

1 はじめに

輸送機器の軽量化を目的として、中空部材である鋼管の適用が進んでいる。従来のチューブフォーミングでは均一な肉厚の鋼管が素材として使われている。しかし、製品のさらなる軽量化や高機能化を図るには、鋼管の肉厚は均一である必要はない。例えば、曲げ加工などでは曲げ外側で薄肉化するなどの問題があり、曲げ加工度や曲げ外側の強度などを鑑みれば、外側が厚肉の素材であることが望ましい。また曲げモーメントが大きい部位では直径が大きく肉厚が厚いことが好ましいが、反対に曲げモーメントが小さい部位では直径が小さく肉厚は薄くて構わない。また、局所的に材質を変化させたり、別材質の材料を局部に張り合わせるような技術があってもよい。

そこで本研究会では、素材となる鋼管およびその2次成形品において、剛性および強度を向上しつつ軽量化が達成できるように、それらの偏肉化を可能とする塑性加工技術を確立することを研究目的とした。研究会の運営においては、企業委員のアドバイスを頂戴しながら、学側委員が各自の得意な研究手法により、鋼管の偏肉加工技術を個別に開発した。また管材加工で優れた技術を有する企業の見学会を開催し、鋼管加工技術に関する知見を深めた。

各委員の研究テーマは以下の通りである。2章において、

各研究テーマごとにその概要を述べる。

- 液圧バルジ加工による偏肉管の製造技術 (白寄)
- マンドレルを利用したセミダイレス引抜き加工による可変肉厚加工 (古島)
- 爆発加工による局所圧接 (森)
- 圧縮-せん断組合せ応力負荷による偏肉管の製造技術 (桑原)
- 偏肉管の曲げ加工技術 (内海)
- 管鍛造プロセスの自動最適化 (応力制御を用いた管鍛造の解析的研究) (吉田)
- 冷間レデュース圧延における各パラメータの影響調査 (吉村)

2 個別研究テーマの概要と成果

2.1 液圧バルジ加工による偏肉管の製造技術

液圧バルジ加工は、現在、チューブハイドロフォーミングとして知られている管材の複合加工技術の基本技術である。管材の内側から液圧を負荷することで、管材の断面を所望の形状に成形する。管材を膨らませて断面の周長を大きくする場合には、肉厚が薄くなる。過度に薄くなると破裂するため、液圧のみならず、軸方向に圧縮して肉厚減少を防ぐ。軸方向の圧縮と液圧の組み合わせである負荷経路が成形の成否を左右する。

上述のように、通常の液圧バルジ加工では、負荷経路を検

討する必要がある。一方で、本研究テーマの液压バルジ加工による偏肉管の作製は、管材を膨らませることに伴う肉厚減少を積極的に利用するものであり、軸方向に圧縮する必要性はない。目標とした偏肉管は、外径が一定であるものとしたため、液压バルジ（自由バルジもしくは型バルジ）後に、膨らませた部分を空引き（引抜き加工）して、素管の外径に戻すことを試みた。

Fig.1は、外径14mm・肉厚1mmの電気抵抗溶接鋼管STKM11Aを素材として実験した結果の一例である¹⁾。膨らませた部分の長さは、外径と同じ14mmの場合である。空引き前の自由バルジでは管材に液压のみを負荷しており、軸方向には積極的に力を負荷してはいない。管材の両端は液体が漏れないように閉じているため、張出し部には周方向の引張応力のみならず、軸方向の引張応力も生じる。空引き後は、自由バルジで薄くなった肉厚が若干戻るが、目標とする偏肉管になっている。Fig.2は、空引き結果に及ぼすダイRの影響の実験結果である。

本研究テーマでは、上述のように偏肉鋼管を作製することができることを明らかにした。なお、この検討過程において、自由バルジでは、試験片の軸方向複数箇所を膨らませる実験^{2,3)}や、変形挙動に及ぼすひずみ速度の影響を明らかにするための実験（内圧負荷速度 1MPa/sec～15MPa/sec）および有限要素法シミュレーションも行った⁴⁾。ひずみ速度の増加に伴う材料硬化を考慮しなければシミュレーションで自由バルジの結果を再現することはできなかった。また、鋼管を円筒形に膨らませる型バルジ実験も行い⁵⁾、自由バルジの場合よりも長い範囲で肉厚が薄い偏肉管を作製することも明らかにしている。

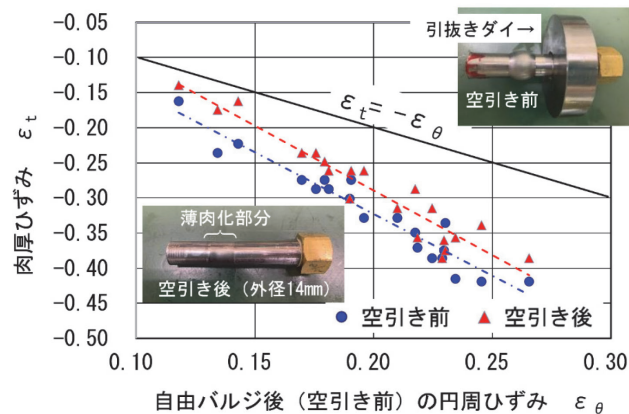


Fig.1 Thickness and circumferential strains, ϵ_t and ϵ_θ , at the maximum bulging section before and after hollow sinking (STKM11A, initial outer diameter 14mm, wall thickness 1mm, length of deformed region 14 mm). (Online version in color.)

2.2 マンドレルを利用したセミダイレス引抜き加工による可変肉厚加工

ダイレス引抜きは局部加熱と引張変形を組み合わせることによって金型を使わずに管材を縮管化する加工法である。本手法の詳細については著者らの他の解説論文^{6,7)}を参照されたい。本研究では、肉厚を積極的に可変させるためにFig.3に示すようなマンドレルを用いたセミダイレス引抜き方式を開発した。以下に断面減少率の制御について説明するダイレス引抜き中は体積一定則が成り立つため式 (1) が成り立つ。 A は断面積、 V は速度、添字0, 1はそれぞれ加工前と加工後を示す。そのため、ダイレス引抜きにおける断面減少率 r は式 (2) のように表される。式 (2) より、供給速度に対する引抜き速度の比 V_0/V_1 （以下、速度比と呼称する）が大きいほど断面減少率は大きくなる。

$$A_0 V_0 = A_1 V_1 \dots\dots\dots (1)$$

$$r = 1 - \frac{A_1}{A_0} = 1 - \frac{V_1}{V_0} \dots\dots\dots (2)$$

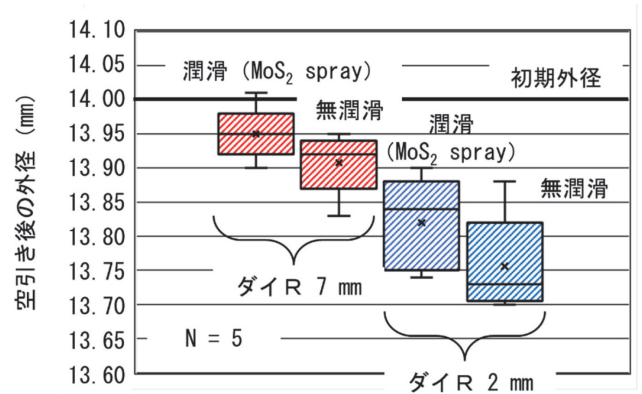


Fig.2 Outer diameter after hollow sinking (STKM11A, initial outer diameter 14mm, wall thickness 1mm, length of deformed region 14 mm). (Online version in color.)

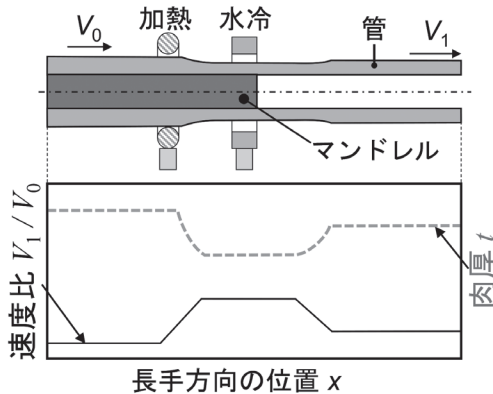


Fig.3 Schematic illustration of variable thickness control by semi-dieless drawing with mandrel.

マンドレルを用いたセミダイレス引抜ききの断面減少の原理はダイレス引抜ききと同じであり、断面減少率は式 (2) で表される。式 (1) の断面積 A を外径 D と内径 d で表し、整理すると引抜き後の外径 D_1 は式 (3) のように表される。このとき、引抜き後の内径 d_1 はマンドレル径 d_m と等しいと仮定する。

$$D_1 = \sqrt{(D_0^2 - d_0^2) \frac{V_0}{V_1} + d_m^2} \quad (3)$$

加工後の肉厚 t_1 は $t_1 = (D_1 - d_m) / 2$ であるので、式 (4) を得る。

$$t_1 = \frac{1}{2} (D_1 - d_m) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{(D_0^2 - d_0^2) \frac{V_0}{V_1} + d_m^2} - d_m \right) \quad (4)$$

式 (4) に基づいて加工中に速度比 V_0/V_1 を変化させることで、単一の管材において長手方向に肉厚分布を意図的に制御可能である。例えば、加工中に速度比を大きくすると薄肉に、小さくすると厚肉となる軸方向に肉厚が変化する管を作製できる。外径 6 mm、肉厚 1 mm の機械構造用炭素鋼 (STKM13C) 管のセミダイレス引抜ききにより、厚肉部が 0.99 mm、薄肉部が 0.73 mm となる可変肉厚管を創製することに成功した⁸⁾。

Fig.4 に STKM13C 管のセミダイレス引抜ききで作製した可変肉厚鋼管の肉厚分布を示す⁹⁾。式 (4) に基づき、速度比 V_0/V_1 が増加したとき肉厚減少量が増加し、その逆もまた同様である。このように、セミダイレス引抜ききでは加工中に供給速度に対する引抜き速度の比を制御すると可変肉厚管を作製できる。速度比の単純な制御により可変肉厚加工が可能な点は、セミダイレス引抜ききの高い柔軟性を示している。

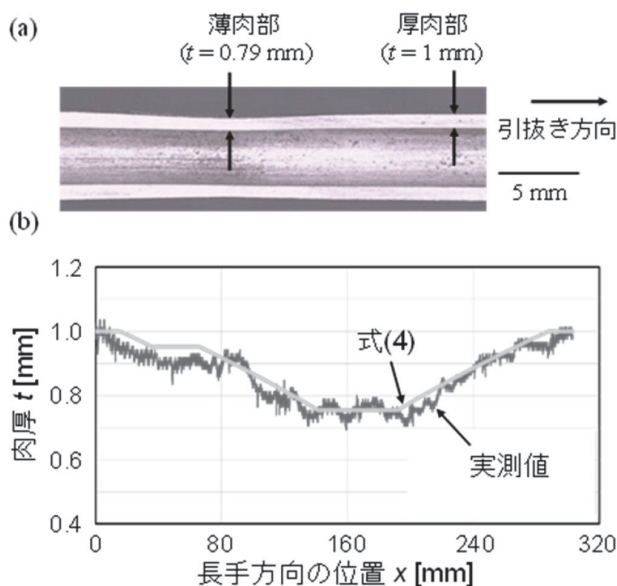


Fig.4 Variable thickness distribution fabricated by semi-dieless drawing with mandrel. (Online version in color.)

2.3 爆発加工による局所圧接

爆発加工法は、爆薬が爆発するエネルギーを金属材料に作用させることで接合・成形・粉末固化といった材料加工を行う方法である¹⁰⁾。その中の1つである爆発圧接 (爆発圧着) 法は、金属板を瞬間的に高速度まで加速させ、別の金属板に斜め衝突することで強固に接合できる方法であり、融点や密度といった機械的特性の異なる材料組合せでも比較的容易に接合できるとされている¹⁰⁾。本研究ではこの利点を活かし、鉄鋼管の内面あるいは外面に軽金属材料のパイプを任意の部分だけに局所的に接合させることで部分的な増肉化あるいは偏肉化を図るための実験的手法を用いて検討した。

管材を爆発圧接するためには、外側に配置した管 (外管) を飛翔させて内側の管 (内管) へ接合させる外部装薬法と、逆に内管を飛翔させて外管の内面に接合させる内部装薬法の2種類の方法が考えられる。異種金属管を接合させるのに最適な条件を求めるために、材料組合せと装薬方法を変えながら実験を行った^{11,12)}。結果として外部装薬法を用いた場合では、爆発圧着特有の波状界面を有した接合を達成することができた。しかし、外管が収縮するため、肉厚 3.0 mm の冷間引抜き炭素鋼鋼管 (STKM13C) やステンレス鋼鋼管を用いても外管表面にしわが発生し、管の長手方向に対して外径が異なる結果となった¹¹⁾。

内部に装薬する爆薬には紐状の導爆線を用いた。導爆線は粉末状の爆薬を紙と糸で被覆してさらに防水加工を施したもので、どんなに長くても末端まで爆発現象を生じるので伝爆用として用いられるものである¹⁰⁾。直径 6 mm ほどであるので、内管の内面には爆発による爆轟ガスが作用する。しかし、ガス圧では均等に圧力が作用せず、内管を楕円状に変形させるだけになるため、圧力伝達媒体としてシリコンゴムを用いることで均一な変形を促すことができた¹²⁾。ただし、炭素鋼鋼管を用いる場合は外管・内管のどちらを用いる場合も内圧破壊でクラックが発生する。そのためクラックの発生を抑え間隙を調整するため、中間管としてアルミニウムパイプを外管と内管との間に配置したが、隙間なく密着しただけで接合までには至っていない¹²⁾。

本方法では、外径 25.4 mm、肉厚 1.2 mm のステンレス鋼鋼管に対して外径 20.0 mm、肉厚 1.7 mm のアルミニウム合金パイプとの組合せ (間隙 1.5 mm) で全長接合を達成し、また外管の中心部分だけを局所接合することに成功した¹³⁾。接合例を Fig.5 に示す。アルミニウム合金 A6063 を用いた場合では反応層や接合未達の箇所も見受けられたものの、A1070 の場合では全長接合・局所接合のどちらの場合でも、Fig.5 に示すような反応層やクラックを生じずに良好な接合を達成した。またその接合界面は平滑または Fig.5 (c) に示すような微小な波状界面を有しており、良好な接合を達成したとい

える。また、導爆線の爆轟速度（爆発が進行していく速度）である約6300 m/s¹⁴⁾とGurneyの式¹⁵⁾を用い、内管の飛翔速度と衝突角度を求め、接合可否領域を作成した。その結果、接合した条件では接合可否領域内で衝突していることを確認し¹³⁾、また、未接合の場合は接合条件の下限近傍または下回る条件であることを確認した。これらの式から概算した接合可否条件は実験パラメータの決定に有効であり、他の材料組合せでも同様に条件設定を決定しやすくなったといえる。

2.4 圧縮－せん断組合せ応力負荷による偏肉管の製造技術

輸送機器の軽量化は、省エネルギー化や材料節約の観点から重要な技術課題である。機械構造物に多用される棒材の軽量化には、管材への置換が有効であるが、管材のさらなる軽量化を達成する手法として、部材肉厚分布の最適化が求められている。強度が必要な部分の肉厚は厚く、それ以外の部分は薄く加工することができれば、部材のさらなる軽量化が達成できる。

塑性加工を用いた棒材および管材の局所的な増肉加工法が考案されているが^{16,17)}、これらは中実および中空丸棒を対象とした局所増肉加工の研究であり、薄肉円管材を対象とした局所増肉加工の研究は報告されていない。

本研究では、円管材の軽量化を実現する局所増肉加工法の開発を目的として、薄肉円管材にトルク T を負荷しせん断応力 τ を発生させ、同時に管軸方向に圧縮荷重 F を負荷し、圧縮応力 σ を作用させる加工法を提案した (Fig.6)¹⁸⁾。薄肉円

管材に τ を負荷することで、塑性変形を開始するのに必要な σ を小さくできる。この結果、小さい圧縮荷重で塑性変形が進展し、圧縮荷重に起因する座屈の発生を防ぐ効果が期待できる。本研究では、 τ と σ の組み合わせを変化させ、座屈の発生がなく塑性変形による増肉加工が可能となる応力条件および圧縮試験条件を明らかにすることを研究目的とした。

各応力経路試験で得られた試験片の写真をFig.7に示す。ここで、Fig.7 (a) はチャック間距離 $L=70$ mm、左から $|\sigma|:\tau=1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1$ の条件、Fig.7 (b) は $L=20$ mm、左から $|\sigma|:\tau=2:1, 1:1, 1:2$ の条件で試験を行った試験片である。 $L=70$ mmの試験では、 $|\sigma|:\tau=1:0$ ではチャック部近傍が外側に大きく張出すような座屈が、 $|\sigma|:\tau=2:1$ では試験部全体で凹凸を持つような座屈が見られ、 $|\sigma|:\tau=1:1, 1:2, 0:1$ では試験部全体が振れるような座屈が見られた。また、 $L=20$ mmの試験では、 $|\sigma|:\tau=2:1$ では試験片中央部が外側に張出すような座屈が見られた。 $|\sigma|:\tau=1:1, 1:2$ では大きな座屈変形は見られていないが、指令値に測定値が追従しなくなったため試験を終了した。結果、 $|\sigma|:\tau=2:1$ の試験条件において、 $L=20$ mmで $\epsilon_t^p=0.095$ 、 $L=70$ mmで $\epsilon_t^p=0.066$ までの増肉変形を達成した。ただし

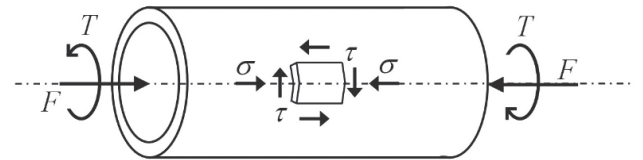


Fig.6 Stress components applied to a tuber specimen subjected to axial force F and torque T .

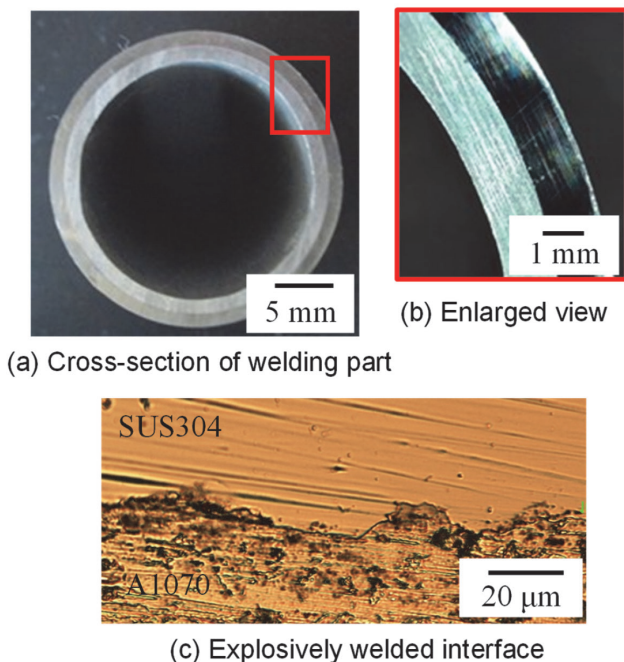


Fig.5 Welded part for stainless steel 304 and aluminum alloy 1070. (Online version in color.)

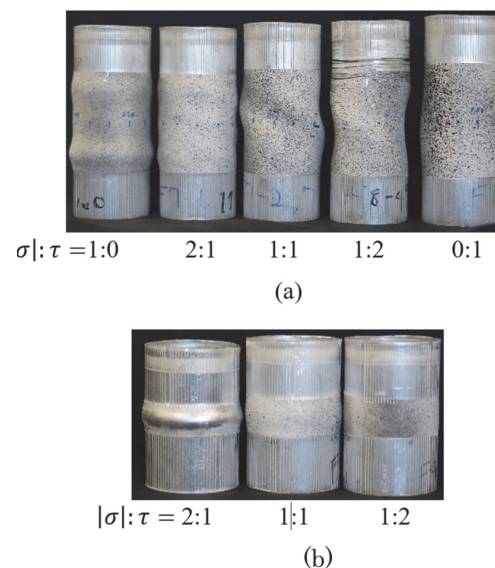


Fig.7 Specimens obtained in linear stress paths. (Online version in color.)

$L=20\text{ mm}$ の条件で発生した座屈を防止するためには、円管を金型で囲うなどの座屈防止対策が必要である。 $L=20\text{ mm}$ の条件で最も増肉変形が進展する応力経路は、 $|\sigma|:\tau=2:1$ と $1:1$ の間にあると考える。

2.5 偏肉管の曲げ加工技術

管材の曲げ加工では圧縮側の肉厚は厚くなり、引張側では薄くなる。曲がり管は自動車などの強度部材や流体が流れる配管に適用されているが、以前より引張側の薄肉化による強度不足の懸念が解消されていないでいる。そこで、素管として偏肉した管を曲げ加工することによって、曲げ引張側と圧縮側の肉厚差を減少させ、曲がり管の強度不足を解消することを目的とした。

本件では、Fig.8に示すような穴円形部を断面中心から偏心させた管材の曲げ変形特性および肉厚差を減少させる理想的な偏心量を調査した^{19,21)}。変形特性としては、普通管の曲げによる断面の肉厚分布はcosカーブと近似性があり、偏心管断面の肉厚分布は前者の逆位相となるので、曲げ加工後の肉厚の均一化が望める。また、引張側に厚肉部を配置することによってへん平化が抑制される。さらに、肉厚の変化量は薄肉部の方が厚肉部より大きい。他に、心材を適用した偏心管の曲げではへん平化が抑制されるが、心材による摩擦が管内で発生し、偏肉が進むことがわかった。そして、理想的な偏心量 e としては、曲げ加工後の肉厚 t 、加工前の管外径 D_0 、内径 d_0 、肉厚比 $T_t=2t/(D_0-d_0)$ と定義すれば、Fig.9のようにS25C鋼管のプレス曲げ実験で $e=0.15\text{ mm}$ となった²²⁾。

鋼管の水平展開として、アルミニウム合金押出偏心円管²³⁾および帯板の面内曲げから推定する押出角管²⁴⁾の回転引曲げ加工についても調査した。

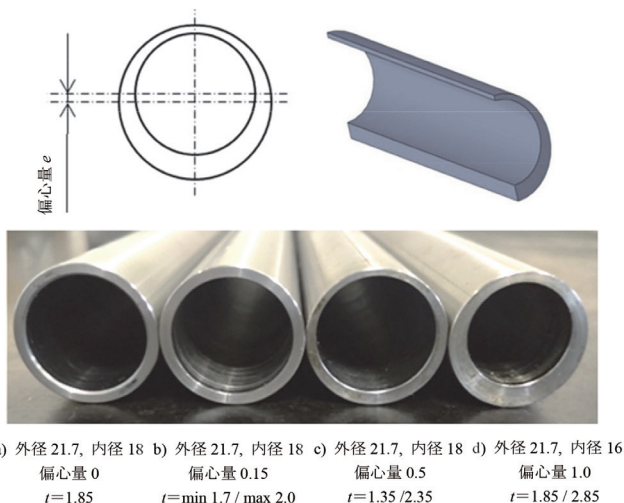


Fig.8 Normalized steel tube, S25C (length 260 mm). The hole was machined. All units are in mm. (Online version in color.)

2.6 管鍛造プロセスの自動最適化（応力制御を用いた管鍛造の解析的研究）

チューブフォーミングにおいては軽量化と複雑断面形状付与による剛性確保・制御を実現する。従来の拡・縮管、フランジ変形や曲げに加えて、積極的な増肉が可能となればさらなる複雑形状が創成可能となる。一方、板鍛造においては、塑性加工による複雑形状の創成ならびに増減肉を、比較的廉価な薄板材を素材とし、例えば縮みフランジなどの積極的な増肉ならびに分流などの併用によって実現する。これらの技術は軸対称成形となっており、素材を鋼管とすることによって工程の一部省略が可能となり、管壁に特に大きな増肉効果を実現する管鍛造 (Tube Forging) 技術が確立されれば、管材の形状特性を利用したさらなる成形技術の高度化が実現される。

本研究では管端部のフランジ成形に着目し、管軸方向への荷重付加によって材料を半径外向き方向へ流動させるプロセスを対象とした。工具形状および摩擦係数の組み合わせがフランジ半径に及ぼす影響を、有限要素解析 (FEA) 機械学習に基づく最適化手法を組み合わせた自動運転有限要素解析システムを利用することで、加工条件の自動最適化とナレッジデータベースの自動構築を試みた。また材料流動時に管内壁に生じる材料引け欠陥の発生有無ならびに引けの発展に及ぼす加工条件の影響についての解析的検討およびプロセスウィンドウの自動生成を試みた。

マンドレルおよびガイドによって鋼管側壁を拘束し、管端部を円周状パンチによって押下することによって端部をフランジ成形する工程を研究対象とする (Fig.10)。解析には塑性加工汎用FEAコードDEFORM™2Dを用いた。当該プロセスにおいて、フランジ外径を最大化するフランジ流出厚さ G および管材-マンドレル間ならびに管材-金型間摩擦定数の組み

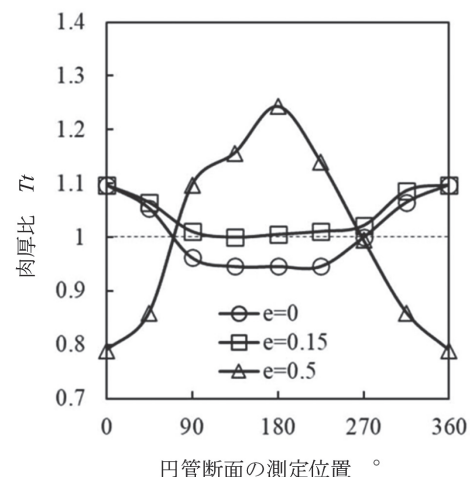


Fig.9 Thickness ratio of tube cross section after bending (Normalized steel tube, S25C)²²⁾.

合わせの最適化、ならびに管内壁表面の自己接触による引け欠陥発生プロセスウインドウの自動構築を、FEAと最適化手法を組み合わせた自動運転有限要素解析システム (Auto-pilot FEA, APFEA) を用いて求めた (Fig.11)。最適加工条件の探索には設計空間探索ソフトウェア pSeven™ を用いた。説明変数には流出厚さ G と管材-マンドレル間および管材-金型間のせん断摩擦定数 m_m および m_d ($0.03 \leq m_m, m_d \leq 0.10$) を用い、目的変数をフランジ半径 R_{out} としてサロゲートベース最適化 (Surrogate based optimization, SBO) を用いてこれを最大化した。また引け半径発展に及ぼすフランジ流出厚さ G についても調査した。

その結果、フランジ外径を最大化するべく、加工条件を自動的に最適化する手法を構築し、管端部フランジ成形における製品形状および寸法について、工具の幾何学的条件のみならず、摩擦の分布が影響することがわかった。また、フランジ流出厚さ G が鋼管肉厚の 50% 以上となると、引けが発生することがわかった。

2.7 冷間レデュサ圧延における各パラメータの影響調査

ストレッチレデュサ圧延は鋼管を縮径する仕上げ工程で用いられており、特に冷間レデュサ圧延は小径管の製造に

用いられている。この圧延では、本来偏肉は避けるべき欠陥だが、自動車部材等で曲げ外側の増肉などには、横断面内の偏肉化には適しており、大量生産性から造管時でできることは有用であると考ええる。ストレッチレデュサ圧延は多くが 120° 周期対称の 3 ロールの多スタンドで行われており、偏肉化を行うには Fig.12 のロールの孔形形状を非対称にすればよいと考える。

本研究では、実験で検討することが困難なため、横断面内 180° の面对称の 3 次元弾塑性有限要素解析にて実施した。計算時間が膨大となるため、MSC 社製 Marc に初期ステップの収束後にデータを出力し、流線に沿って横断面形状と相当ひずみおよび応力成分を積分した入力データを再度読み込ませる方法で定常圧延解析を行った。解析結果は以前実機の形状やトルクの結果と比較して定性的な結果は一致していることを確認しており、本検討では摩擦係数などの条件はそのままでロール形状を変更して偏肉化を検証した。Fig.12 のロール寸法において、3 ロールの内の 1 個の楕円率 $Ov = (b-a)/a$ を変更し、単スタンド圧延後の面内の肉厚分布を示した結果が Fig.13 である。0° および 120° がロールボトム部、60°、180° がロールのフランジ部にあたるが、フランジ部で増肉変化が大きく、楕円率が大きいほど増肉効果が高いことが分かった。通常の実レデュサ圧延ではスタンド間で前後方張力を付与して肉厚をあまり変化させずに縮径するが、この解析を多スタンドに拡張して最適な肉厚制御法を解明していく必要がある。

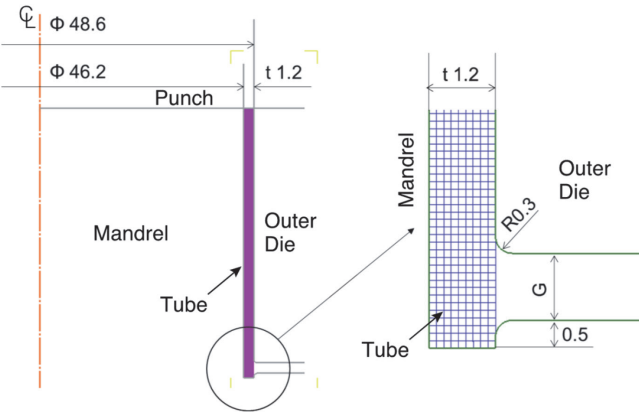


Fig.10 Finite Element analysis conditions for flange forming of steel tube edge (unit: mm). (Online version in color.)

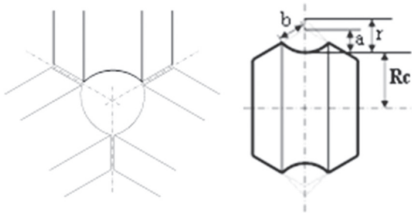


Fig.12 Roll geometry of stretch reducer rolling.

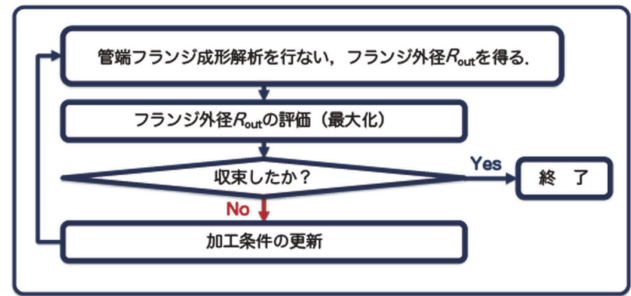


Fig.11 Workflow of auto-pilot FEA system for optimization of flange forming of steel tube edge. (Online version in color.)

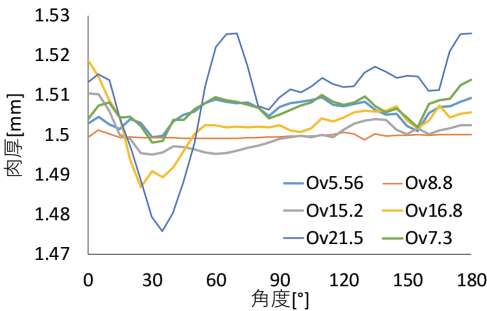


Fig.13 Effect of Ovality (Ov) on the wall thickness distribution in cross section. (Online version in color.)

3 おわりに

輸送機器部材の軽量化を目的として、鋼管の肉厚や直径を局所的に変化させるための偏肉化技術を開発した。同様の技術開発を志向されている技術者や研究者の方々の参考になれば幸いである。

研究活動においては、定期的に研究発表会を開催し、本稿の執筆者以外の委員の方々から的確な助言を得て、研究を推進する上で大いに参考にさせて頂いた。ここにお名前を記し、深甚なる謝意を表する：岡本辰憲（日本製鉄）、勝村龍郎（JFE スチール）、佐藤雅彦（新日鐵住金）、田村翔平（日本製鉄）、松本昌士（JFE スチール）、水村正昭（新日鐵住金、呉高専）、三原豊（香川大）

参考文献

- 1) 白寄篤：CAMP-ISIJ, 35 (2022), 54, CD-ROM.
- 2) 白寄篤, 松崎純弥：CAMP-ISIJ, 33 (2020), 42, CD-ROM.
- 3) 白寄篤：CAMP-ISIJ, 33 (2020), 556, CD-ROM.
- 4) 白寄篤：CAMP-ISIJ, 34 (2021), 25, CD-ROM.
- 5) 白寄篤, 宮内晋太郎：CAMP-ISIJ, 36 (2023), 24, CD-ROM.
- 6) 岸本拓磨, 古島剛：ぶらすとす, 5 (2022), 432.
- 7) 古島剛：ぶらすとす, 2 (2019), 161.
- 8) 王冠歡, 岸本拓磨, 古島剛：CAMP-ISIJ, 35 (2022), 105, CD-ROM.
- 9) 古島剛, K.Wang, 岸本拓磨：CAMP-ISIJ, 36 (2023), 26, CD-ROM.
- 10) 衝撃塑性加工, 日本塑性加工学会編, コロナ社, (2017), 62.
- 11) 森昭寿, 上野綾平, 柿木駿亮：CAMP-ISIJ, 33 (2020), 54, CD-ROM.
- 12) 森昭寿, 八重慶一：CAMP-ISIJ, 35 (2022), 48, CD-ROM.
- 13) 森昭寿, 有馬直哉：CAMP-ISIJ, 36 (2023), 39, CD-ROM.
- 14) 伊東繁, 長野司郎, 濱田亨, 村田健司, 加藤幸夫：日本機械学会九州支部講演論文集, 008-2 (2000), 61.
- 15) M.A.Meyers：Dynamic Behavior of Materials, John Wiley & Sons, Inc., (1994), 236.
- 16) T.Iura, K.Mori, K.Yamamoto, Y.Aono, K.Kurita, O.Nakamura and T.Sano：Proc. 6th Int. Conf. Technol. Plast. (6th ICTP), Springer, Berlin Heidelberg, (1999), 613.
- 17) 桑原義孝, 岡部永年, 朱霞, 黄木景二, 生田文昭, 村上宗司：塑性と加工, 51 (2010), 331.
- 18) 峯村一輝, 桑原利彦：CAMP-ISIJ, 33 (2020), 557, CD-ROM.
- 19) 内海能亜, 齋藤佳久, 吉田昌史：CAMP-ISIJ, 33 (2020), 52, CD-ROM.
- 20) 中島邦斗, 内海能亜, 吉田昌史：CAMP-ISIJ, 34 (2021), 27, CD-ROM.
- 21) 中島邦斗, 内海能亜：ぶらすとす, 5 (2022), 422.
- 22) 中島邦斗, 内海能亜, 吉田昌史：鉄と鋼, 108 (2022), 394.
- 23) 内海能亜, 中島邦斗, 吉田昌史：2023年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2023), 47.
- 24) 中島邦斗, 内海能亜, 吉田昌史：塑性と加工, 64 (2023), 182.

(2024年1月22日受付)