

ダイレスベローズ成形のファジィプロセス 制御システムの開発

首都大学東京大学院 理工学研究科 機械工学専攻
教授 真鍋 健一
(平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012005)

キーワード：ダイレスベローズ成形，ファジィ制御，熱援用，金属管，座屈変形

1. 研究の目的と背景

金属ベローズは伸縮性と機密性の面から熱膨張・収縮や機械的振動を吸収することができ、空調・プラント設備、真空装置等の配管技術や自動車、船舶、航空機等の輸送機器部品、さらに医療用機器や小型センサー部品へと需要が拡大し、そのニーズの多様化によって多種少量生産が要求されている。しかし、その従来成形法は液圧成形、プレス加工、ロール加工などの金型や工具を用いる方法であり、多品種少量生産に対応できない成形法が主流であった。東日本大震災以降、安全・安心の観点から社会インフラ整備のなかでもベローズに対するニーズも高まっており、特に製造コスト面からもフレキシブルなダイレス工法が期待されている。

著者らにより金型工具を用いない局部加熱によるダイレスベローズ成形法が開発されたが、そのベローズ品質はベローズ山高さやピッチがばらつき、製品精度や品質の向上が技術課題となっていた^{1)~5)}。

熱援用方式の本ダイレスベローズの成形メカニズムは開発して間もないため十分に解明されておらず、材料や管寸法等の適用範囲も未知となっている。従来の転写加工技術と異なり金型を用いない本工法では、材料変形の自由度が極めて高いため、上述したベローズ山高さやピッチのばらつき、製品の精度・品質向上の課題解決には高度プロセス制御技術を導入して高精度化高品質化を図ることも要求される。

そこで、本研究では著者らが開発したダイレスベローズ成形法においてより高い製品精度と製品品質を得るため、局部加熱下の変形形状を画像取得システム⁶⁾でセンシングしながらファジィ推論を用いたインプロセス適応制御システムの開発を目的とした。加工中のベローズ形状が形成される過程の情報はマシンビジョンを用い、ファジィ制御アルゴリズムを用いて管の供給速度の適応制御を行った。その制御システムを用いて、従来の制御なしダイレスベローズ成形結果との比較を行い、ファジィ適応制御の有効性と製品精度・品質の向上を図る加工条件について実験的に検討した。

2. 熱援用ダイレスベローズ成形法の原理

図 1 に本熱援用工法によるダイレスベローズ成形法の原理を示す。本ダイレスベローズ成形の基本原理は金属管に与える軸圧縮変形による座屈変形を利用するものである。金属管を軸圧縮したときには各種モードの座屈変形が生じるが、本成形法では局部加熱し、加熱部と非加熱部の変形抵抗差から変形抵抗の大きな非加熱部が金型の役割を果たして、加熱部のみに座屈が生じるように、しかもその座屈モードが連続的に発生して蛇腹形状を創成する。まず、図 1 の(a)では金属管の片側を供給速度 V_2 で移動させ、もう一端を V_2 より速い圧縮速度 V_1 で移動させることによって、圧縮変形を付与する。(b)ではその圧縮変形で加熱部では増肉しながら金属管を移動させる。その間に(c)のように局部加熱部で座屈が発生し、形成された山部が非加熱部に移動すると座屈変形が非加熱部で停止し、(d)のように加熱部でその次の座屈が発生する。この一連の変形が繰り返されることによって、金属管に連続的な座屈モードが形成され、最終的に蛇腹形状の金属ベローズが成形できる。本成形過程で安定した座屈モードが形成されるように、本研究では管の内部にマンドレルを挿入した。そのため、本工法は金型を全く用いないフルダイレス成形でなく、セミダイレスベローズ成形と呼ぶことにした。

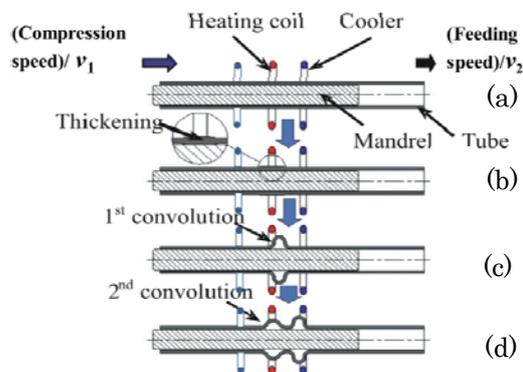


図 1 熱援用ダイレスベローズ成形法の原理図

なお、成形後にはマンドレルを引き抜いてベローズとした。

本実験では圧縮速度 V_1 と供給速度 V_2 の速度差を、式(1)に示す圧縮率と定義した。

$$C = V_1/V_2 \quad (1)$$

3. マシンビジョンを用いたファジィ適応制御システムの開発および実験方法

図2に本セミダイレスベローズ成形で用いたマシンビジョンによるファジィ適応制御システムの概要を示す。図1に示した本成形法の原理に基づき、供試管を移動しながら負荷する軸圧縮は、圧縮速度 V_1 と供給速度 V_2 をサーボモータ駆動のアクチュエータを利用し、それぞれ独立に制御することを可能としている。局部加熱には出力2kW、周波数2.2MHzのトランジスタ式高周波加熱装置を用いた。安定した加熱域を得るために水冷による冷却コイルを用いた。4mm幅の加熱コイルは出力トランスに固定した。供給速度 V_2 は0.3mm/sとした。ダイレスベローズ成形中の座屈の山形状のセンシングには、市販のCCDカメラをもつマシンビジョンによる画像取得システムを用いた。その画像処理とファジィアルゴリズムの実行にはLabVIEWソフトウェアを用いた。そのファジィ推論から得られた出力はサンプリングごとの圧縮速度増分で ΔV_1 とした。

なお、ファジィ制御で用いたメンバーシップ関数はベローズ形成時の高さ、ベローズ山高さの誤差、圧縮速度の誤差および出力のゲインの4つに対して設定した。

供試材としては外径 $D=5\text{mm}$ 、肉厚 $t=0.5\text{mm}$ のSUS304ステンレス鋼管を用いた。

本研究で対象とした金属ベローズの目標成形形状を図3に示す。ベローズ山部の外径 h は7.0mmとし、ベローズピッチ p は2.7mmとした。図4に、図3で示した成形形状をもとにファジィ制御で用いた横軸に成形加工中の時間軸で示した参照曲線を示す。

4. 実験結果および考察

4.1 プロセス制御しない場合のベローズの成形形状不良

図5にダイレスベローズ成形において圧縮速度の制御をしない場合に生じる成形不良の例を示す。(a)はベローズ山高さの変動、(b)はベローズピッチの不良、(c)はベローズ形状の不良である。いずれも成形加工条件の変動が成形後の形状に大きな影響を及ぼしていることがわかる。そのため何もフィードバック制御しない加工条件を一定値で設定のみを行うオープン制御の場合には安定した高精度のベローズ形状を得るのが難しいことがわかる。

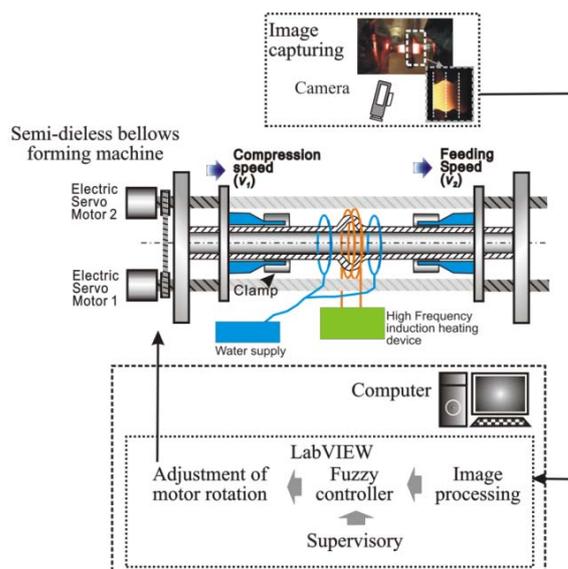


図2 開発したビジョンベースファジィ制御ダイレスベローズ成形システム

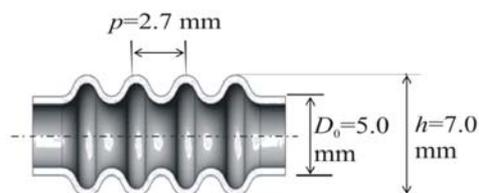


図3 実験で目標とした金属ベローズの成形形状と寸法

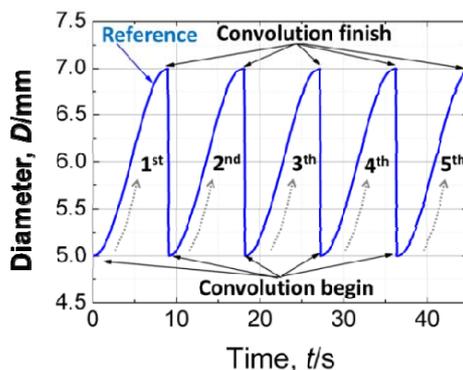


図4 ビジョンベース熱援用ダイレスベローズ成形で用いた目標としたベローズの外径参照曲線

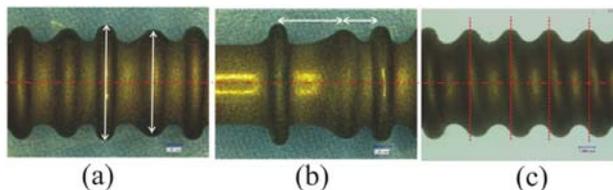


図5 ベローズ成形実験で観察される成形不良例 (a)ベローズ高さ不良 (b)ベローズピッチ不良 (c)ベローズ形状不良 (非軸対称なベローズ山形状)

4. 2 ファジィ制御とファジィ適応制御した場合のベローズ成形形状

成形加工中のファジィ制御出力増分と、それに対応したベローズ形状の応答結果について、ファジィ制御した場合とファジィ適応制御した場合の結果を、**図6**と**図7**にそれぞれ示す。図6から、ファジィ制御だけでは、ベローズ高さに関しては目標から大幅にずれており、時々刻々の成形状況に対応したファジィ適応制御の場合(図7)には成形加工段階で制御出力が時々刻々変化している。その結果、ベローズ高さは目標に近い値が得られている。特に本成形加工では成形加工条件が時々刻々大きく変動しているため適応制御が適していることがわかる。

4. 3 供給速度 V_2 によるファジィ適応制御結果の影響

図8にファジィ適応制御した場合のベローズ形状に及ぼす供給速度 V_2 の影響を示す。ベローズ成形形状は供給速度により影響を受け、ベローズの山高さ、谷の高さおよびピッチがそれぞれ変化する。本実験の範囲内では $V_2=0.3\text{mm/s}$ が妥当であることがわかる。

4. 4 異なる目標ベローズ高さに対するファジィ適応制御結果の影響

図9に異なる目標ベローズ高さに対するファジィ適応制御結果の影響を示す。この場合は3種類のベローズ高さ $h=6.0, 6.5, 7.0\text{mm}$ とした場合についてファジィ適応制御結果への影響を示している。この結果から、異なるベローズ高さに対してもファジィ適応制御にすれば安定したベローズ高さが得られることがわかる。

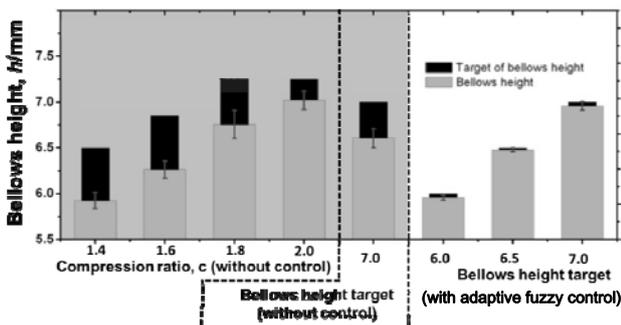


図9 種々の設定ベローズ山高さ h に対するダイレスベローズ成形品精度に及ぼすファジィ制御の効果

4. 5 ファジィ適応制御におけるベローズ成形形状に及ぼす初期圧縮速度 V_1 の影響

図10に異なる初期圧縮速度 V_1 における目標ベローズ成形形状に及ぼすファジィ適応制御の効果を示す。 $V_1=0.60\text{mm/s}$ とした場合、ベローズ成形形状が目標形状とよい一致が見られ、ピッチも最も精度が得られることがわかる。

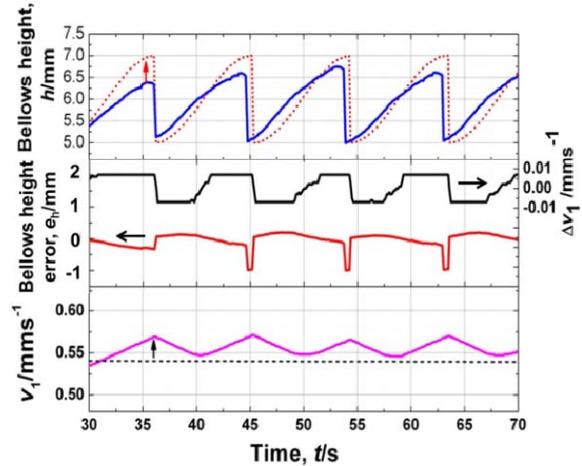


図6 ファジィ適応制御ダイレスベローズ成形実験におけるベローズ成形形状の制御履歴

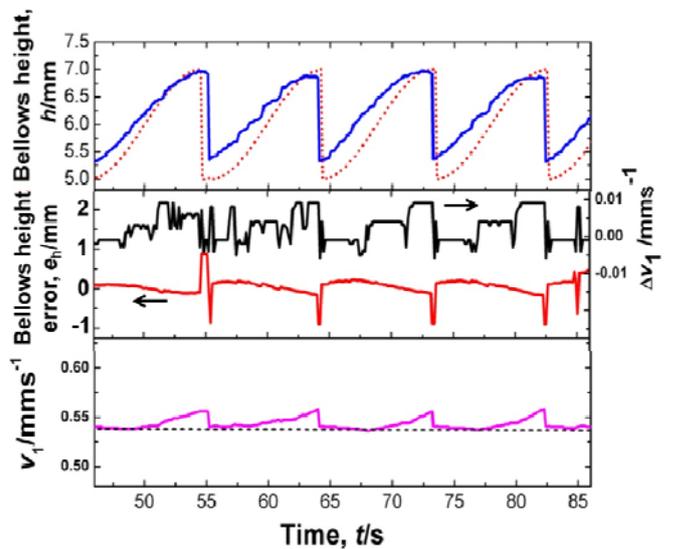


図7 ファジィ適応制御ダイレスベローズ成形実験におけるベローズ成形形状の制御履歴

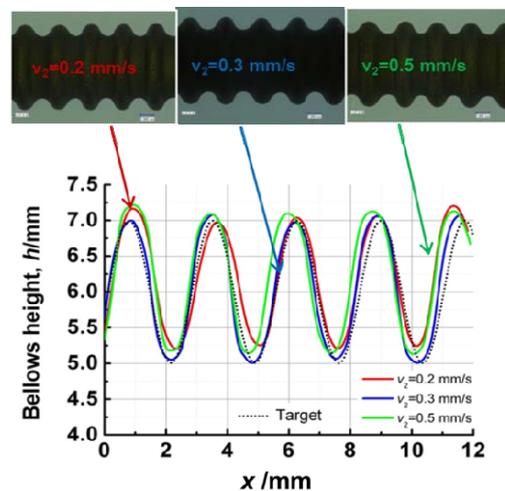


図8 ファジィ制御ダイレスベローズ成形品の成形形状に及ぼす供給速度 V_2 の効果

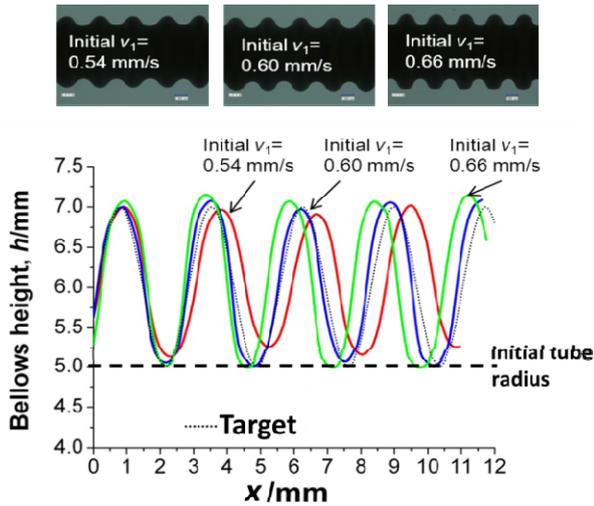


図 10 ファジィ制御ダイレスベローズ成形におけるベローズ山高さ h に及ぼす設定圧縮速度 V_1 の影響

4. 6 ファジィ適応制御におけるベローズ高さに及ぼす初期圧縮速度 V_1 の影響

図 1 1 に異なる初期圧縮速度 V_1 における目標ベローズ高さに及ぼすファジィ適応制御の効果を示す。 V_1 は 0.54 ~ 0.66 の範囲ではどの初期圧縮速度 V_1 でも、制御をしない場合と比べ、比較にならないほどファジィ適応制御とすることでベローズ高さを安定した精度が得られることがわかる。

以上の結果から、ファジィ適応制御を導入することによって、制御しない場合に発生したベローズ形状不良は見られなくなるだけでなく、ベローズ成形形状や精度の面で高い品質を確保できることが明らかとなった。

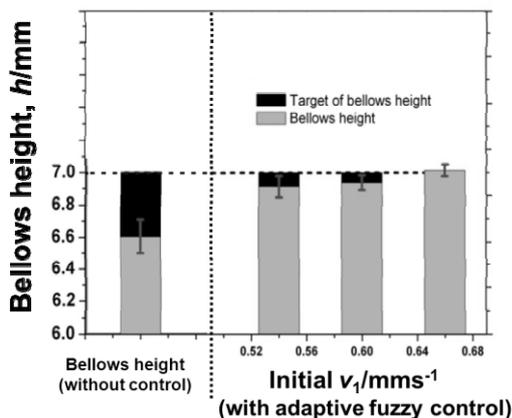


図 11 ファジィ適応制御ダイレスベローズ成形におけるベローズ山高さ h に及ぼす設定圧縮速度 V_1 の影響

5. まとめ

本研究では、著者らの開発した熱援用ダイレスベローズ成形における成形形状および製品精度と品質の向上を

目指して、ファジィ推論を用いたインプロセス適応制御システムの開発を行った。加工中のベローズ形状が形成される過程の情報を、マシンビジョンに基づくファジィ適応制御アルゴリズムを用いて管の供給速度の適応制御を行った。その制御システムを用いて、従来の制御なしダイレスベローズ成形実験結果との比較を行い、製品精度・品質の向上を図る加工条件について実験的に検討した。

得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 成形加工中に圧縮速度をファジィ適応制御することによって、制御しない場合に生じていた成形不良は抑えられ、安定した成形が可能となることを示すことができた。
- 2) ファジィ制御とファジィ適応制御を比べた場合、ファジィ適応制御の方が、成形されるベローズ形状およびその高さの精度が向上し、また初期圧縮速度や目標ベローズ高さが異なる場合に対しても、ファジィ適応制御の方が、高い製品精度や安定した成形を達成するために優れていることを実験により示し、ファジィ適応制御の有効性を明らかにした。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の平成 24 年度一般研究開発助成として採択され行われたものであり、同財団からの研究助成に対し深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 古島剛, N.Q. Hung, 真鍋健一, 佐々木修: 金属管のセミダイレスベローズ成形法に関する研究, 塑性と加工, 53-614(2012), pp.251-255.
- 2) S. Supriadi, N.Q. Hung, T. Furushima, O. Sasaki, K. Manabe: A Novel Dieless Bellows Forming Process Using Local Heating Technique, *Steel Research International* special edition, 82(2011), pp.950-955.
- 3) T. Furushima, N.Q. Hung, K. Manabe and O. Sasaki: Fabrication of Metal Bellows Using Semi-Dieless Compression Technique, *Proc. 5th TUBEHYDRO2011*, (2011), pp.116-120.
- 4) 古島剛, 鈴木祐太, Nguyen Quang Hung, 真鍋健一, 佐々木修: 金属管のセミダイレスベローズ成形法の開発, 平成 23 年度塑加春講論, (2011), pp.61-62.
- 5) Tsuyoshi Furushima, Nguyen Quang Hung, Ken-ichi Manabe and Osamu Sasaki: ダイレス圧縮加工による金属ベローズの創成, 61 回塑加連講論, (2010), pp.87-88.
- 6) Sugeng Supriadi, Tsuyoshi Furushima, Ken-ichi Manabe: Real-time Process Control System of Dieless Tube Drawing with An Image Processing Approach, *Journal of Materials Transactions*, Vol.53 No 5, pp. 862-869, 2012.