

高橋 不二男
F. Takahashi永洞 孝昭
T. Nagahora

金属部品の製造工程を合理化する場合、素材の除去工程、部材の接合工程を削減できる塑性加工の適用が有効である。特に工具を回転させて成形する回転加工は、金型を必要としない、工具を変えずに加工寸法を変更できるなどの特長があり、フレキシブルな製造工程を構築できる。

今回、回転加工によって管材に分岐を成形する加工方法を対象として、加工現象を力学的・実験的に解析する技術を開発し、加工性状を向上する潤滑剤および適正な加工プロセスを開発した。そして、変電機器の一つであるガス絶縁開閉装置 (GIS) 用アルミニウム製タンクの分岐成形に適用し、製造工程を大幅に合理化した。

It is effective, when streamlining metallic parts manufacturing processes, to utilize forming for the reduction of cutting or joining steps. When carrying out rotary forming with simple revolving tools that require no die sets, flexible work lines can be constructed.

The forming process involving, for example, metal flow, working force and product quality, was first investigated with specially developed experimental analysis techniques, while numerical analysis was used to examine pipe branching with rotary forming. The lubricant and forming processes were then optimized. This method has been successfully applied to the production of gas-insulated switchgear tanks.

1 まえがき

回転加工は、回転している工具を素材に局部的に押し当て、素材を徐々に変形させて最終形状に成形する加工法である。この加工法には次のような特長がある。

- (1) 金型を必要としない。
- (2) 工具の運動軌跡を変えるだけで加工寸法を変更できる。
- (3) 工具と素材との接触面積が小さいために、小さな力で加工できる。したがって加工装置を小型化できる。

一般的に、薄肉素材の成形を目的とした回転加工では、加工部の表面性状を確保するために工具にローラや球を用いて素材と工具との接触を転がり接触とする。しかしこのような方式では、工具の運動範囲に制限が生ずるといった欠点がある。

そこで今回、棒状工具を用いた管材の回転分岐加工⁽¹⁾に着目し、工具と素材とが滑り接触状態となる回転加工現象の解析技術を開発した。そして、GIS用アルミニウム製タンクの分岐成形に適用した。

2 回転分岐加工の概要

図1に示すように、だ円形の下穴を開けた素管を一对のクランプで固定し、所定の間隔に広げた工具を回転させながら引き上げて分岐形状を成形する。工具の先端は三次元曲面形状

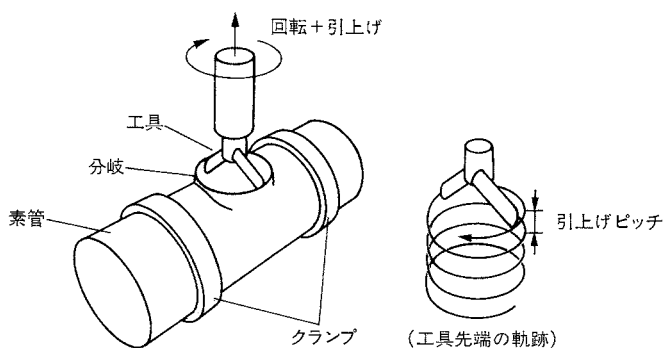


図1. 回転分岐加工 回転分岐加工では、棒状工具を回転させながら引き上げて素管に分岐を成形する。分岐直径の変更が容易で、多品種生産に適している。

Rotary branch forming

である。この加工法では、分岐直径の変更が容易で、分岐直径が素管直径と同じ寸法になるように成形することができる。

3 解析方法の開発

3.1 数値解析

回転分岐加工プロセスで発生する大変形を解明するため、有限要素法による非線形応力解析法を開発した。解析方法の概要を次に示す。

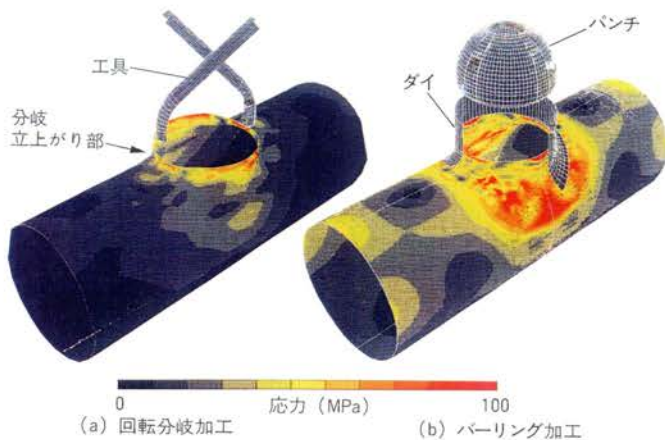


図2. 残留応力分布 回転分岐加工では、バーリング加工と比較して発生する残留応力が小さい。

Residual stress distributions

- (1) 工具と素管との接触点の移動を定義する。
- (2) 構成方程式として連合流れ則を採用する。
- (3) 材料特性には温度依存性を定義する。
- (4) 素管は大変形が可能な厚肉シェル要素とする。
- (5) 工具は剛体として扱う。

残留応力を解析した例をバーリング加工と比較して図2に示す。バーリング加工は分岐成形で広く活用されているが、回転分岐加工のほうが残留応力は小さく、特に素管端ではバーリング加工の1/3程度となり、形状精度の確保に有利であることがわかる。

3.2 加工実験

3.2.1 供試材 素管の断面形状は、加工条件による形状精度の差異が明確に現れ、加工によって座屈が生じない肉厚/外径の比を数値解析により究明し、外径140 mm、肉厚2.5 mmとした。また素材には、滑り接触による加工の特長が顕著になるように、一般的に加工時の潤滑が難しいとされているMg系アルミニウム合金A5083を選定した。

3.2.2 実験装置 図3に開発した装置を示す。装置の主な特長を次に示す。

- (1) 加工中に発生する回転力と引上げ力を評価するために、テーブルの下に2軸のロードセルを設けてある。
- (2) 素管各部の変形挙動を検出するための変位センサを設けてある。

図4に加工力を評価した結果を示す。加工力は、被加工部が工具の回転軸に対称でないため、回転角度によって大きく変動し、回転角180°を周期とする波形となる。また、加工力変動による素管の周期的な変形挙動も定量化できた。

4 解析

素材の常温での延性は低いので加工部近傍を加熱し、また工具と素材とは滑り接触となるため、潤滑剤を供給した状態

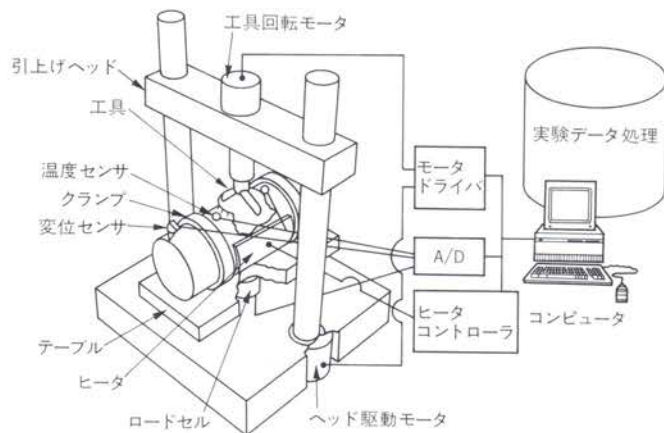


図3. 実験装置 実験装置には、加工力を測定するためのロードセル、素管の変形挙動を検出するための変位センサなどを組み込んである。

Experimental apparatus

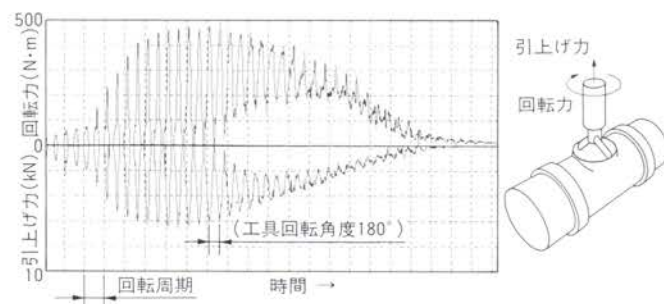


図4. 加工力 発生する回転力と引上げ力は、被加工部が工具の回転軸に対称でないため、工具回転に呼応した波形になる。

Working forces

で加工現象を解析した。

4.1 潤滑

4.1.1 潤滑特性の定量化 潤滑特性を加工エネルギーにより定量化した。ここで、加工エネルギーとは塑性変形と摩擦で消費されたエネルギーの和であり、加工力を加工開始から終了までの区間で積分した値で与えることができる。

4.1.2 潤滑剤の評価 獣脂、鉱物油、植物油などの被膜潤滑剤と鉱物系の固体潤滑剤を使用して加工したときの加工面粗さと加工エネルギーの関係を求めた。図5に示すように両者には良好な相関がある。例えば固体潤滑剤を使用した場合に加工エネルギーが大きくなっているが、実際に加工表面を観察すると、焼付いたこん跡が認められた。一方、焼付きが発生しない植物油でも、潤滑特性が非常に良好な獣脂と比較すると加工エネルギーで最大1.8倍もの差異が認められた。潤滑特性の定量化が非常に重要であることがこの事実からもわかる。また、潤滑剤の選定では素材に付着した潤滑剤の洗浄性も重要である。そこで、水により容易に洗浄することが可能で、しかも加工エネルギーができるだけ小さくなるように界面活性剤を調合し、新しい潤滑剤を開発した。

4.2 形状精度

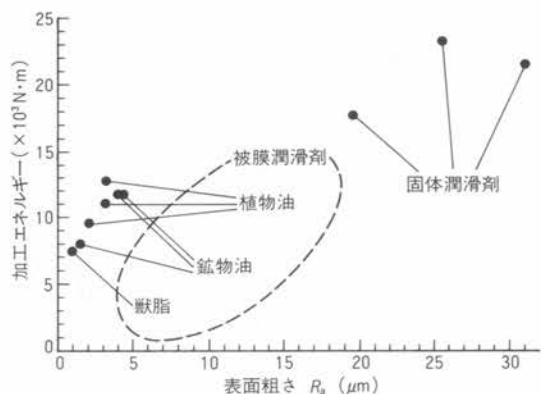


図5. 潤滑特性 潤滑剤の特性を、被加工部の表面粗さと加工エネルギーとで定量化して評価した。

Characteristics of lubricants

図6に引上げピッチと素管端の真円度との関係をクランプ間の距離をパラメータとして示す。また、引上げピッチと加工力から算出した最大回転力との関係も示す。

今回の実験範囲では、引上げピッチが小さいほど回転力は小さくなり、素管端の真円度が向上する。また、クランプ間距離が大きいくほど真円度は向上している。これは分岐形状の形成に伴って発生する弾性エネルギーは、加工力の減少に伴って少なくなり、また、クランプ間距離が大きいくほど広い範囲に分散するためと考えられる。

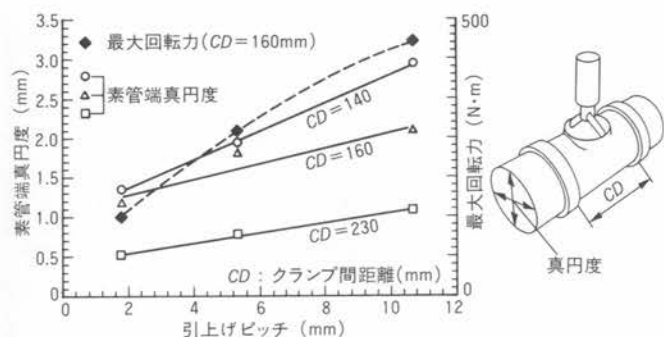


図6. 引上げピッチの影響 引上げピッチは、発生する回転力や素管端の真円度に大きな影響を及ぼす重要な加工パラメータである。

Influence of draw-up pitch

5 結果

工具と素材とが滑り接触する回転分岐加工に関する解析技術の開発によって、次のことがわかった。

- (1) 回転分岐加工で発生する残留応力はバーリング加工と比較して小さく、形状精度確保の点からも有利である。
- (2) 発生する加工力は、加工性状と密接な関係がある。特に形状精度を支配する要因は、引上げピッチとクランプ間距離である。

また、潤滑特性を定量的に解析することの重要性を示し、

解析結果に基づいて新しい潤滑剤を開発した。

6 適用

開発した回転分岐加工に関する要素技術を GIS 用タンクの分岐成形に適用した。図7にタンクの例を示す。素材はアルミニウム合金で、最大肉厚15mm、最大素管直径は1,500mmである。結果を次に示す。

- (1) タンクの製造工程では、分岐加工後にフランジなどの溶接工程がある。新しく開発した水洗浄可能な潤滑剤は、溶接部の機械的強度に影響を与えないことを確認した。
- (2) 解析結果を適用し、製品の開発期間を大幅に短縮した。
- (3) タンクに絶縁ガスによる内圧が作用した場合に引張り応力が最大となる部分は、図2で示した分岐立上り部である。回転分岐加工によるタンクは、この部分の残留応力が比較的小さいことから、強度が確保できる。



図7. GIS用タンク 回転分岐加工を適用したGIS用タンクは、素材はアルミニウム合金で、最大肉厚15mm、最大素管直径1,500mmである。
Gas-insulated switchgear tank

7 あとがき

開発した技術は製品の信頼性の向上に大きく寄与している。

文献

- (1) Cassidy V.M.: Tube fabrication: Branching without tears, Mod Met, 46, 9, pp.58-62 (1990)



高橋 不二男 Fujio Takahashi

1986年入社。塑性加工および金型の構造設計技術の開発に従事。現在、生産技術研究所精密技術研究部主務。
Manufacturing Engineering Reserch Center



永洞 孝昭 Takaaki Nagahora

1975年入社。変電機器の製造技術開発業務に従事。現在、浜川崎工場生産技術部主務。
Hamakawasaki Works