

# 新しい折紙型衝突エネルギー吸収体の廉価な逐次塑性加工法

埼玉工業大学 工学部機械工学科  
教授 趙 希禄  
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017028)

キーワード：部分加熱回転加工法，反転ねじり型折紙構造，衝突エネルギー吸収体

## 1. 研究の目的と背景

衝突エネルギー吸収体として設計される工業製品はよく見受けられる。自動車の前面衝突用のエネルギー吸収部材として、エンジンを左右から挟むようにして前後方向にボディ先端まで設置されているサイドメンバーという中空の細長い角柱構造は、前面衝突時に横へ折れ曲がるオイラー座屈が生じやすく、一旦それが発生すると、サイドメンバーは折れ曲がり、衝突エネルギー吸収量は極端に下がる。それに起因して、圧潰変形途中で、このようなオイラー座屈が生じることはなく、できるだけ圧潰変形を長く続け、衝突エネルギー吸収量を最大にすることは車両部品の衝突設計において最も重要な課題である。

本研究では、新たに反転ねじり型折紙構造 (Reversed Torsion Origami Structure; 以下 RTO) とそれを廉価に加工できる部分加熱回転加工法を提案する。新しく提案する部分加熱回転加工法では、角筒素材を軸方向に沿って段に分けて、段毎に単純な捩じり成形を繰り返すだけで成形品を得ることができる。また、ねじり塑性変形部分だけに対し加熱する方法を適用することによって、小さな加工荷重で加工できると同時に角筒素材を固定する治具の簡素化も実現できる。

本加工法の主な利点としては、高圧の油圧システムなど複雑な加工設備は不要で、部分的に単純な捩じり成形だけで済むので加工コストの大幅な節減が得られ、さらに内部の高い液圧による張り出し変形しないため局所的に肉厚が大幅に薄くなる問題も回避できる。本研究は RTO を部分加熱回転加工法で成形する問題点や成形品質等と、十分な衝突エネルギー吸収性能を持つかについて検討を行い、実用化に向けた知見をまとめる。

## 2. RTO と部分加熱回転加工法の提案

図 1 に示す自動車サイドメンバーと衝突荷重変形線図では、サイドメンバーが細長い形状を持つため、圧潰変形過程において、横へ折り曲がりやすく、衝突エネルギー吸収性能が極端に落ちることがよく見受けられる。

理想的な衝突変形パターンとしては、図 1 のサイドメンバーの衝突荷重変形線図に示すように、出来るだけ初期ピーク荷重値が低く、安定的な圧潰変形が長く続けられることは求められている。

これを実現するように、本研究は図 2 に示す RTO と加工方法を提案する。図 2 では、正方形断面の角パイプに対して、軸方向に沿って段に分けて、角パイプの両端を固定

治具を使い、上端を完全固定して、下端を回転できるようにする。図 2 の左から右へ示すように、一段ずつ高周波誘導 (IH : Induction Heating) 加熱してから、下端を回転させて、中間の加熱される部分だけをねじり塑性変形させる。上から下へ各段を順番にねじり変形させた結果、図 2 の右側に示すような RTO 構造が得られる。

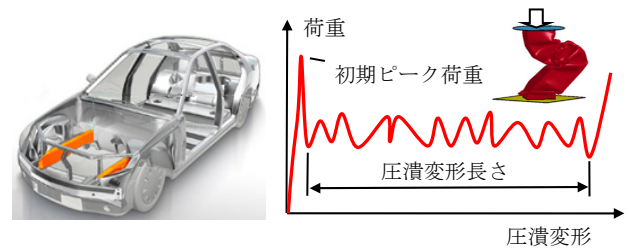


図 1. 自動車サイドメンバーと衝突荷重変形線図

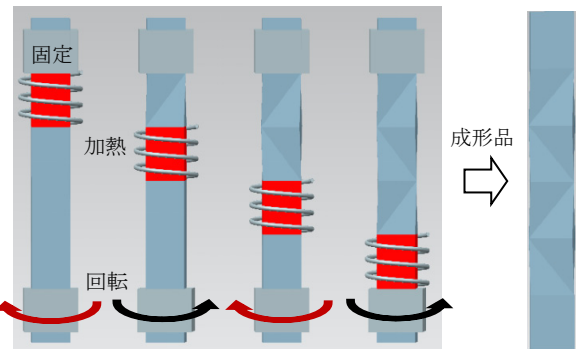


図 2. 部分加熱回転加工法と RTO 構造

## 3. 部分加熱回転加工法の成形性能検討

図 2 に示す部分加熱回転加工法を実施するために、有限要素法を利用して塑性成形過程のシミュレーションを行い、固定治具と角パイプ素材の間に生じる相対変位や、塑性変形部分の角パイプ素材に与える加熱温度などを検討する必要がある。

ここでは、検討のため、汎用ソフトウェア LS-DYNA を使い、図 2 に示す部分加熱回転加工法による RTO の塑性成形過程を解析する。図 3 に部分加熱回転加工法による RTO の成形解析モデルを示す。節点数は 42600、角筒成形素材の要素の平均寸法は 1.0mm、要素数は 22050 であり、成形の金型要素の平均寸法は 1.0mm、要素数は 20148 である。使用する素材の寸法は、長さ 300mm、辺長 50mm、板厚 1.6mm である。

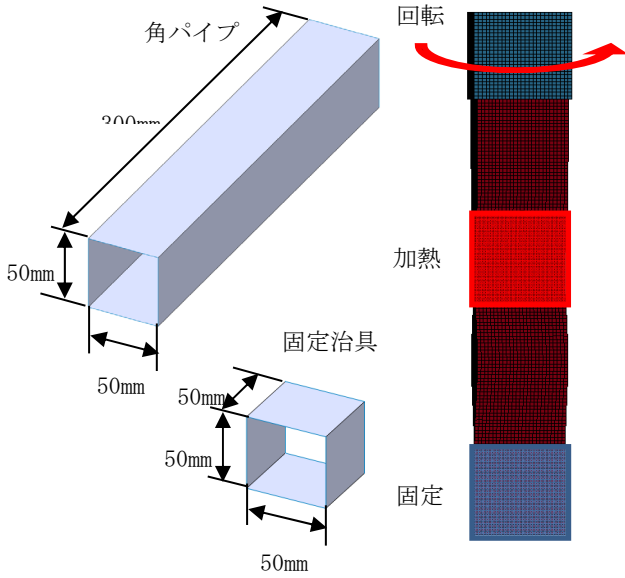


図 3. 部分加熱回転加工法の解析モデル

解析に使う材料は軟鋼材とし、降伏後の硬化特性を図 4 に示す応力と塑性ひずみ関係で与える。また、式(1)に示す Cowper-Symonds の式を用い、材料のひずみ速度依存性を考慮する。

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left[ 1 + \left\{ \frac{\dot{\epsilon}}{c} \right\}^p \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_y$  は動的降伏応力、 $\sigma_{y0}$  は静的降伏応力、 $\dot{\epsilon}$  はひずみ速度である。  $c$  と  $p$  は材料固有の定数であり、実際の自動車衝突解析事例の値を参考に、 $c=8000$  と  $p=8$  とした。

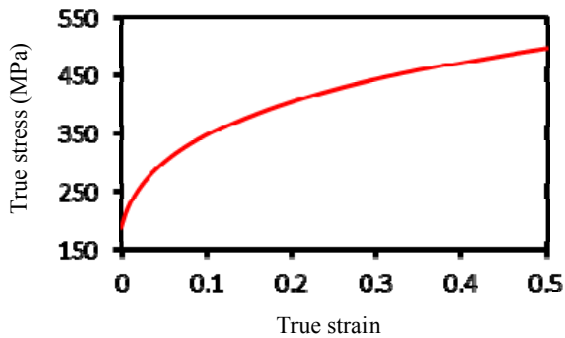


図 4. 材料の応力ひずみ線図

加熱による温度の変化に伴う材料のヤング率と降伏応力の温度依存関係については、図 5 と図 6 に示す軟鋼材のデータを用いる。高周波誘導加熱の温度については、軟鋼材の熱間塑性加工特性と加工の安定性を参考に 950℃ とした。実際に本研究の提案する部分回転加工法に適用する時、式(2)に従い高周波誘導加熱のコイルの電気抵抗や渦電流などを設計することができる。

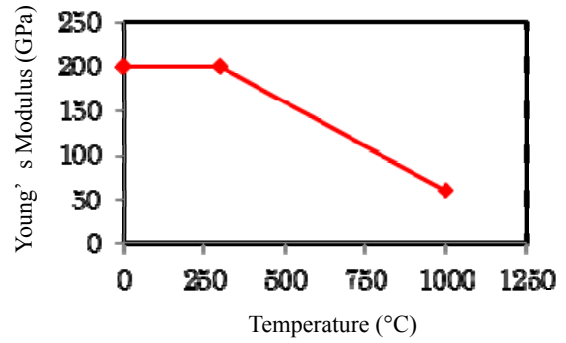


図 5. 温度とヤング率線図

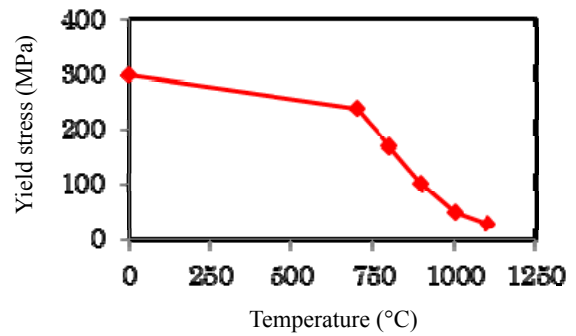


図 6. 温度と降伏応力線図

$$T = \frac{I^2 R t}{m C} \quad (2)$$

ただし、 $T$  は温度、 $R$  はコイルの電気抵抗、 $I$  は流れる渦電流、 $m$  は加熱する角パイプ部分の質量、 $C$  は比熱、 $t$  は加熱時間である。時系列の回転加熱加工法の成形荷重を図 7 に示し、0-0.02 秒では、3 つに分かれた固定治具をそれぞれ中心軸方向へ 5mm 移動し角パイプ素材をしっかりと締め付ける。それから 0.02-0.04 秒では、固定治具と固定治具の間にある角パイプ素材を加熱しながら、回転する部分の固定治具で角パイプ素材を締め付けたまま回転しねじり塑性変形させる。

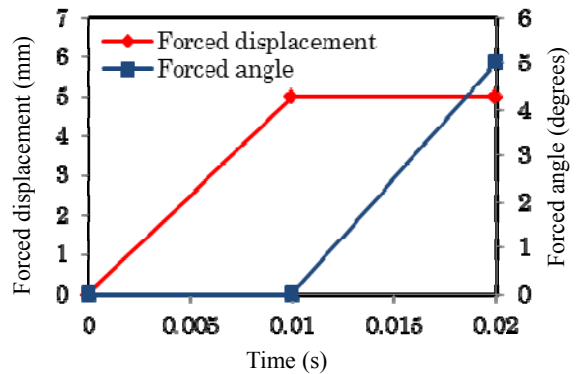


図 7. 時系列の加工荷重線図

以上の条件の下で図 8 に示すような解析手順に沿って、部分加熱回転加工法の成形解析を行い、得られた RTO 成形品の形状と肉厚分布を図 8 に示し、コンター図の赤い部分は板厚が薄く、青い部分は板厚が厚いことを示し、ただし、節点の 210854 と 213399 はそれぞれ最大と最小の板厚が示されている。同図から、部分加熱回転加工法では角パイプの内部から張り出し成形しないため、得られる RTO 構造は比較的板厚が均一に近い分布になっていることが容易に分かる。

図 9 により、部分加熱回転加工法で成形した RTO の最小板厚は 1.588mm で、元の板厚 1.6mm より 0.75%減少となり、最大板厚は 1.606mm で、元の板厚 1.6mm より 0.375%増加となった。よって、部分加熱回転加工法の成形過程においては、板厚の変化が全て 1%以内に抑えられ、安定的に成形できることが示されている。

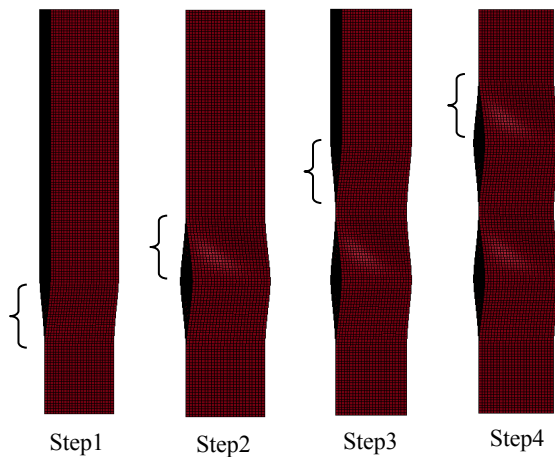


図 8. 部分加熱回転加工法の解析手順

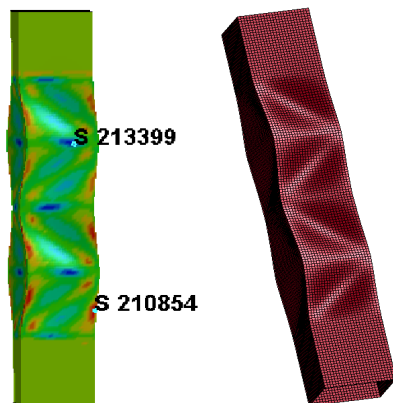


図 9. 解析した成形品の形状と板厚分布

部分加熱回転加工法で得られた成形品形状を 3 次元 CAD 形状と比較した結果を図 10 に示す。図中の右上の灰色で示す形状は CAD で作成したもので、左下の赤色で示す形状は加工した形状で、その形状の代表寸法として側面要素の対角線の長さを比較して、CAD 形状での長さは 73.72mm で、成形品形状での長さは 73.42mm であり、両

方の誤差は約-0.41%となった。よって、部分加熱回転加工法の形状加工精度は比較的が高いことが示されている。また、CAD 形状より成形品のほうが稜線に沿って丸みが付けられており、それによって RTO 構造の衝突エネルギー吸収性能が向上される傾向があると寄与できる。

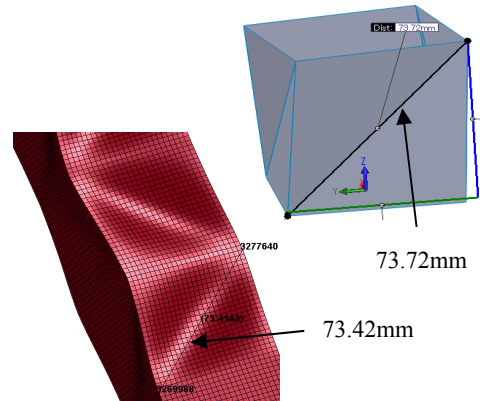


図 10. 成形品形状と CAD データの比較

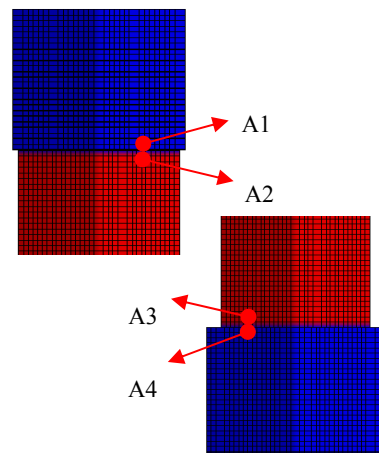


図 11. 固定治具と成形品の相対変位の観測点

部分加熱回転加工法の成形過程において、固定治具だけで角パイプ素材を掴み、固定治具と角パイプ素材の間で滑り現象を調べるために、図 11 に示すように、固定治具と角パイプ素材の接触する部分から相対変位の観測点を選んで、成形前後の観測点の間にある相対変位を求め、その結果を表 1 にまとめた。表 1 より、固定治具と角パイプ素材の間にある相対変形は非常に小さく、部分加熱回転加工法では、外部からの固定治具だけで角パイプ素材をねじり塑性加工の要求に満たすように掴むことが確認できた。

表 1. 固定治具と成形品の相対変位 (加熱温度 950°C)

	回転端	固定端
相対変位 [mm]	0.002	0.006



さらに部分加熱温度から成形精度への影響を調べるために、部分加熱温度を変えながら成形解析を行い、得られた結果を図 12 に示す。図中により、加熱温度の増加に伴い、固定治具と成形品の相対変位は段々と小さくなる傾向が見える。850℃を超えてから相対変位が徐々に一定となり、また成形実験に利用する IH 加熱器の都合上で加熱温度を 950℃としたが、図 12 の解析結果から本研究の設定した加熱温度 950℃が妥当であることが判る。

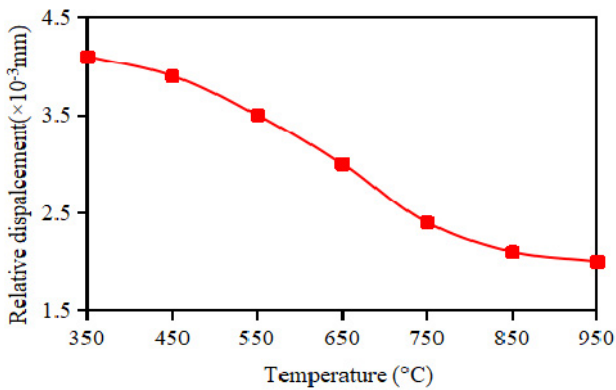


図 12. 固定治具-成形品の相対変位と加熱温度の関係

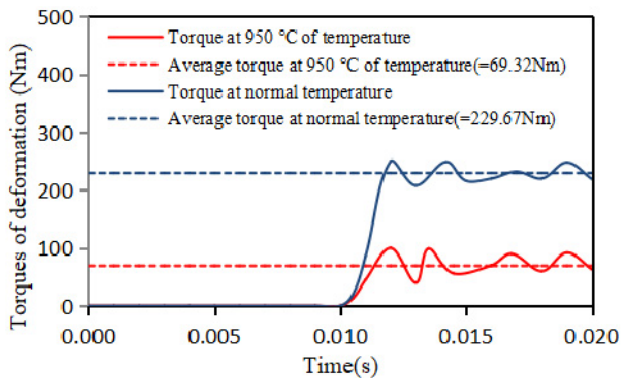


図 13. 加熱温度と塑性加工の回転トルク荷重の関係

加熱温度の増加により、ねじり塑性変形に必要な回転トルク荷重が小さくなることが容易に判るが、その関係を定量的に把握するために、加熱温度 950℃と室温での成形解析結果から、時系列の回転トルク荷重の変化を整理して、その結果を図 13 に示す。

ただし、加熱なしの場合、角パイプ素材の内部に固定治具を設置しない条件で成形解析したが、外側の固定治具と角パイプ素材の間の相対滑り変位が大きく、振り加工は不能となったため、ここで、振り変形に必要な回転トルクを解析することを目的とする前提で、固定治具と角パイプ素材の間にある接触条件として対応するペア節点変位を強制的に等しくする剛的結合として解析を行った。

図 13 により、部分加熱回転加工を開始すると、固定治具が移動し 0.01 秒後に角パイプ素材の固定が終了する。従って、0.01 秒までは、ねじり塑性加工トルクは 0 となっているが、0.01 秒を超えてから、ねじり塑性加工が開始し、

トルクが 0 から急に増加して、その後、多少トルクの値が変動する傾向が見えるが、双方のトルクの平均値を比較すると、部分加熱をすることによって、室温でねじり塑性加工に必要な平均トルク値 229.67Nm に対し、加熱 950℃でのトルク値は 69.32Nm であり、約 3.31 倍小さくなることが判る。

このように、部分加熱により加工トルクが小さくなることによって、2 つ有利な点があると考えられる。1 つは、必要な振り塑性加工トルクが小さいことから、固定治具と角パイプ素材の間にある相対変位も小さく、角パイプ内部の固定治具を省略できる。もう 1 つは、角パイプ素材の他の部分と比べて、加熱された部分が局所的に塑性変形に対する抵抗力が 3 割以下小さくなるため、他の部分は塑性変形せず、ねじり塑性変形部分だけがより安定的に加工できることになる。

#### 4. 部分回転加工装置の開発

前節の検討結果をベースに開発した部分加熱回転加工法の実験装置を図 14 に示す。図中より、実験装置は本体、角パイプ固定治具と IH 加熱器などから構成される。

実際には、図 15 に示す作業手順に沿って部分加熱回転加工を進めて行く。



図 14. 部分加熱回転加工法の専用実験装置

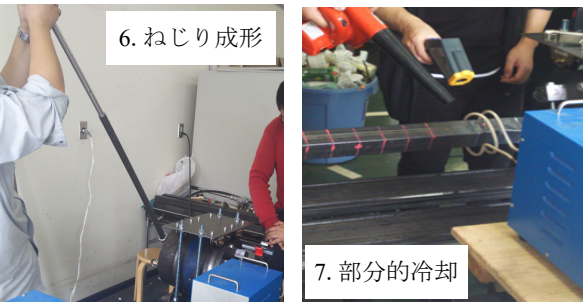
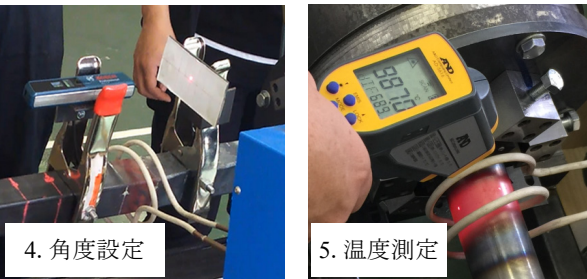
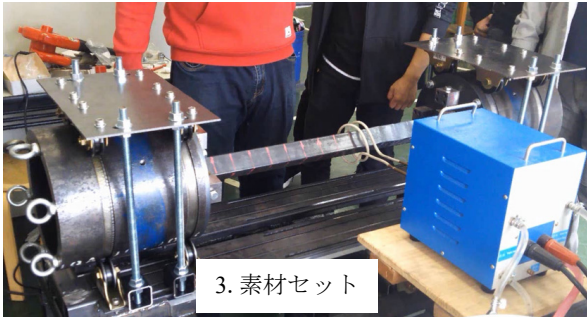
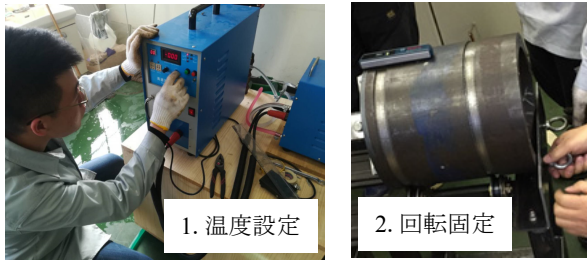


図 15. 部分加熱回転加工法の成形流れ

- (1) IH 加熱してから加熱温度を成形過程において 950℃ に保つように設定する。
- (2) 回転円筒の片側の端部を回転しないようにアイボルトで完全に固定する。
- (3) 加熱コイルを通した成形素材の角パイプを固定治具で回転円筒の中央部に固定する。
- (4) 加熱コイルを角パイプの成形部位に合わせて、回転角度を制御するためのインジケータを取り付ける。
- (5) 加熱温度を計測して、約 50 秒程度で 950℃ に温度上昇することを確認する。

- (6) バールを使い、人力で回転円筒を回して部分ねじり塑性変形を実施する。
- (7) 成形が完了した後、ブロワーバキュームを使い塑性成形した部位を冷却させる。
- (8) 各段に対し順番に同様な部分加熱回転成形を行い、最終的に RTO 構造が得られる。

### 5. RTO の衝突エネルギー吸収性能確認

成形した RTO の衝突エネルギー吸収性能を確認するため、有限要素法を利用して図 16 に示す RTO 構造と現行の正方形断面の角筒構造に対して、それぞれ同じ解析条件で衝突解析を行い、ただし、正方形角筒の場合は、横へ折り曲がる圧潰変形するパターンと最後まで圧潰変形が続けられるパターンの 2 つの結果が存在して、それらの衝突圧潰変形の様子を図 17 に示し、衝突エネルギー吸収量の比較結果を表 2 に示す。

表 2 により、RTO の衝突エネルギー吸収量は正方形角筒より多いことが確認できる。

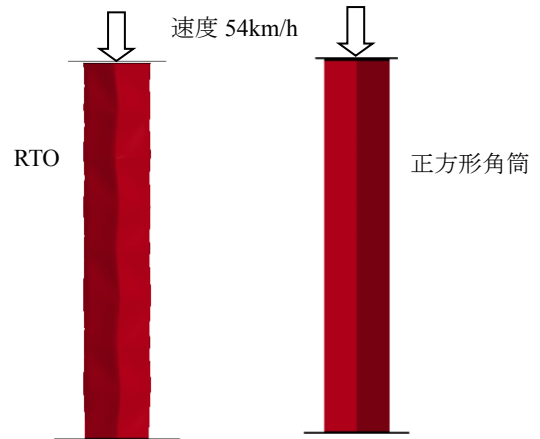


図 16. RTO と正方形角筒の衝突解析モデル

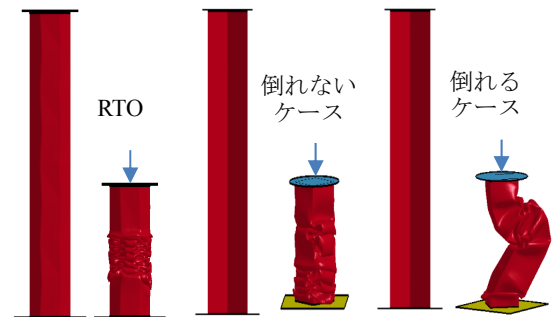


図 17. RTO と正方形角筒の圧潰変形様子

表 2. 衝突エネルギー吸収量の比較 (単位: MJ)

	RTO	倒れない	倒れる
エネルギー吸収量	8.92	5.02	4.47

図 17 より、部分加熱回転加工法で成形した RTO 構造の側面に沿って自然に得られた折り線に誘導され、座屈しわが衝突端から順番に積み重なるアコーディオン型の圧潰変形モードが得られている。

それによって、圧潰変形が同じ段階に進展した際に現れる座屈しわを比較しても、正方形角筒の圧潰変形がほとんど終わることに対して、RTO のほうがまだ真直の側面壁が残されており、引き続き安定的な反力レベルを保ちながら圧潰変形を続けられることで、比較的によく衝突エネルギーを吸収することが判る。

## 6. 結論

本研究では、従来より衝突エネルギー吸収体の性能向上および加工困難の問題を解決するため、新たに安価な方法で加工できる部分加熱回転加工法とそれによって得られる RTO を提案し、以下の結果が得られた。

(1) 本研究の提案した RTO は部分加熱回転加工法を用い安価に加工することができ、従来のハイドロフォーミング加工法のような張り出し変形モードはなく単純ねじり塑性変形だけで成形するため、得られる成形品の板厚はほとんど元の板厚と変わらない。部分加熱回転加工法で安定的に成形できることを示した。

(2) 部分加熱回転加工法は、軸方向に沿って段毎に成形していくため、必要な加工設備は簡単に用意できるものであり、また軸方向に沿う長さの制限はないので、従来の塑性加工法より、大型成形機械と金型が省略可能でしかも同程度の大量生産性も可能なことから、提案した部分加熱回転加工法の優位性が期待される。

(3) RTO は側面に沿って折れ線配置により座屈によるしわの分布を調整することができ、圧潰過程において安定的にアコーディオン型の圧潰変形を最後まで続ける特性を持つことが確認できた。

(4) 数値解析の結果より、本研究の提案した RTO は、従来の衝突エネルギー吸収体である正方形断面の角筒構造より優位性があり、従来の衝突エネルギー吸収体の代わりに RTO の適用は十分に可能性があるといえる。

(5) 本研究の研究結果により、3 次元の複雑な形状をもつ折り紙構造の加工困難な問題を解決することができ、折り紙構造を衝突エネルギー吸収体として実製品に組み込む目的に一歩前進したと考えられる。

今後は、部分加熱回転加工法による固定治具や回転装置などを開発し、実際に量産ベースで RTO を成形して、衝撃実験を実施し、その衝突エネルギー吸収性能を検証したうえで、実製品への応用開発を行う予定である。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団による一般研究開発助成 (AF-2017028) で実施されました。同財団に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1)Mahmood, H. F. and Paluszny, Design of Thin Walled Columns for Crash Energy Management –Their Strength and Mode of Collapse, SAE Paper 811302, (1981), pp.441-451.
- 2)Wierzbicki, T. and Abramowicz, W., Development and Implementation of Special Elements for Crash Analysis, SAE Paper 880895, (1988), pp.103-109.
- 3)萩原一郎, 津田政明, 佐藤佳裕, 有限要素法による薄肉箱型断面真直部材の衝撃圧潰解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.55, No.514, (1989), pp.1407-1415.
- 4)北川裕一, 萩原一郎, 津田政明, 有限要素法による薄肉任意断面形状部材の衝撃圧潰解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.57, No.537, (1991), pp.1135-1139.
- 5)野島武敏, 平板と円筒の折りたたみ法の折紙によるモデル化, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.543, (2000), pp.1050-1056.
- 6)萩原一郎, 灘吉聡, 折り紙工学を利用した円筒構造物の圧潰解析, 自動車技術会論文集, Vol.34, No.4, (2003), pp.145-149.
- 7)萩原一郎, 山本千尋, 陶金, 野島武敏, 反転らせん型モデルを用いた円筒形折り紙構造の圧潰変形特性の最適化検討, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.70, No.689, (2004), pp.36-42.
- 8)趙希祿, 胡亜波, 萩原一郎, 折紙工学を利用した円筒薄肉構造物の衝突圧潰特性の最適設計, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.761, (2010), pp.10-17.
- 9)Kong, C.H., Zhao, X.L. and Hagiwara, I., Hydro-forming process of manufacturing for reverse spiral origami structure, International Journal of Vehicle Performance, Vol.3, No.4, (2017), pp.347-364.
- 10)趙希祿, 胡亜波, 萩原一郎, 衝突方向のばらつきを考慮した半割り型自動車サイドメンバーの圧潰エネルギー吸収性能のロバスト最適化, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.767, (2010), pp.868-875.
- 11)趙希祿, 胡亜波, 萩原一郎, 折紙工学援用による半割り型自動車サイドメンバーの衝突圧潰エネルギー吸収性能に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.769, (2010), pp.1131-1138.
- 12)楊陽, 趙希祿, 戸倉直, 萩原一郎, トラスコアパネルからなる軽量化構造の衝突エネルギー吸収性能向上, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.815, (2014).
- 13)楠見和久, 野村成彦, 真木純, ホットスタンプにおけるプレス成形性と成形解析技術, 新日鉄技報, No.393, (2012), pp.47-54.
- 14)Zhao, X.L. and Hagiwara, I., Designing and manufacturing a super excellent and ultra-cheap energy absorb by Origami Engineering, ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, (2019).