

令和 5 年 10 月 23 日現在

機関番号：23304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05172

研究課題名(和文)軽量化・高強度化を実現する革新的加工法の実証研究

研究課題名(英文)Empirical research on innovative processing methods to achieve lighter weight and higher strength

研究代表者

富澤 淳(Tomizawa, Atsushi)

公立小松大学・生産システム科学部・特任教授

研究者番号：10744980

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：自動車にCO2排出量と衝突安全性の向上のために、1470MPa以上の自動車部品を製造可能とする三次元熱間曲げ焼入れ(以下3DQ)技術が解決された。今回の研究では、従来の課題であった『しわ』の発生と『板厚減少』を解決する革新的な加工技術の実証検討を実施した。加工の変形モードをせん断モードとした新たな『せん断曲げ3DQ』の実証研究するために、新たな高剛性の試験機を設計し導入した。また、特殊な誘導加熱コイルとコンパクトな冷却ノズルも設計した。これらの本試験機と加熱冷却装置を用いて実験とFEM解析によって、矩形鋼管を素材として『しわ』を発生させずに極小曲げ半径の加工に目途を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、環境問題を解決するため、バッテリーを搭載したハイブリッド車や電気自動車の改良が続けられている。これらの車両ではバッテリーが高重量となるため、高強度化による部品の軽量化や電池を保護するための堅牢な保護構造が必要となる。これらに対応するために、今回の研究成果は上記の要求や必要性にぴったり合致し、しかも安価でリサイクル性に優れた鋼の持つ性能を究極まで引き出すものであり、また日本の独自技術であることから、その実施意義は極めて高い。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional hot bending and quenching (3DQ) technology, which enables the manufacture of automotive parts with a pressure of 1470 MPa or higher, has been developed to improve fuel economy and crash safety of automobile.

In this study, empirical research work on new "shear bending 3DQ" method is carried out to solve the problems of "wrinkles" and "thickness" in conventional 3DQ. A new high-rigidity testing machine was designed and introduced for experimental research of a new "shear bending 3DQ" in which the deformation mode of processing is the shear mode. The special induction heating coil and the compact cooling nozzle also are designed. Through experiments using the testing machine and the heating/cooling equipment, it is confirmed that this new shear bending 3DQ method is effective.

研究分野：塑性加工学

キーワード：熱間曲げ 焼入れ 3次元曲げ せん断曲げ

研究成果報告

1. 本研究の狙い

近年、自動車にCO2排出量の削減の要求が高まっている。特に、電気自動車等のバッテリーを保護する軽量で堅牢な構造部材の実用化が望まれている。これらの要求に応えるため、申請者は鋼管を素材として、焼入れと曲げ加工を同時に行う3次元熱間曲げ焼入れ（以下3DQ）技術を世界で初めて開発し、1470MPa以上の高強度な自動車部品を実用化した。しかし、3DQは曲げ変形であるため、曲げ内周の圧縮応力により『しわ』が発生するため、製品の成形範囲が制約される。そこで、変形モードを曲げからせん断に変更することにより、しわ発生を抑制し小さな曲げ半径が可能な新たなせん断曲げ3DQ(図1)を考案した。本加工法の有効性を実証するのが、研究の目的である。

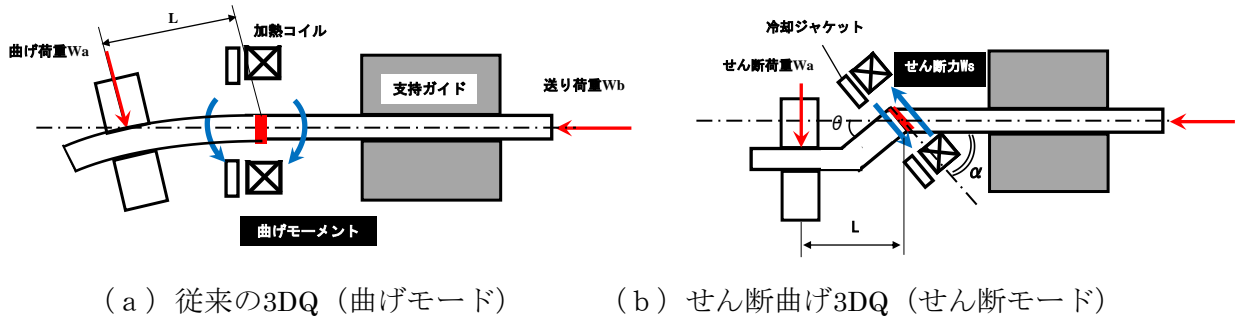


図1 せん断曲げ3DQ (今回開発)

2. せん断曲げ3DQの実証研究

2. 1 従来試験機による予備試験結果 (これまでの研究)

従来の単腕ロボットを備えた3DQ試験装置を用いて、加熱コイルを送り方向に垂直に設定（コイル傾斜角 $\alpha=90^\circ$ ）し、小径の丸鋼管を素材として、従来の3DQ曲げおよびせん断曲げの試験を実施した。従来の3DQでのしわ発生限界はR100mm付近であるが、せん断曲げ3DQでは曲げ半径R39mmでもしわは発生しなかった。ただし、せん断曲げではロボットの許容荷重となり、また短腕ロボットを主体とした試験機の弾性変形に起因する製品の加工精度悪化が認められた。






	
曲げ半径 R125mm しわ無	
	
曲げ半径 R100mm しわ微小	曲げ半径 R50mm しわ無
	
曲げ半径 R75mm しわ大	曲げ半径 R39mm しわ無
従来の3DQ (曲げモード)	せん断曲3DQ (せん断モード)

図2 従来の3DQ試験機（ロボット方式）による曲げ試験結果
（コイル傾斜角 $\alpha=90^\circ$,丸管外径 $\Phi 25.4$, 板厚1.2mm）

2. 2 高剛性試験機と特殊加熱・冷却装置の設計と製作

L：モーメントアーム，D：鋼管外径，t：板厚， σ ：変形抵抗 とすると，全塑性モーメントを用いた簡易計算により，従来3DQの加工力 W_a とせん断曲げ3DQの加工力 W_s の比 W_s/W_a は(1)式となる． $D=25.4\text{mm}$ ， $t=1.2\text{mm}$ ， $L=25\sim 150\text{mm}$ とすると， $W_s/W_a\approx 3\sim 12$ となる．せん断曲げの加工荷重 W_a は，従来の3DQの加工荷重 W_a に比較してきわめて大きく，せん断加工力に対して十分な剛性を有する試験機を設計・製作した．試験機の主仕様を表1，外観を図2に示す．

$$\frac{W_s}{W_a} = \frac{2\sqrt{3}L \cdot \{D^2 - (D - 2t)^2\}}{D^3 - (D - 2t)^3} = \frac{4\sqrt{3}L \cdot (D - t)}{D^2 - 6Dt + 4t^2} \dots (1)$$

表1 新設3DQ試験機の主仕様

高周波加熱電源容量 /kW	7
高周波加熱周波数 /kHz	400
最大送りストローク /mm	250
最大せん断ストローク /mm	300
最大送り速度 /mm・s ⁻¹	25
モータ容量/kW	0.4
最大冷却水量/L・min ⁻¹	12.0

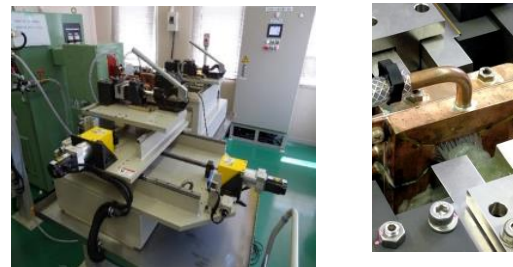
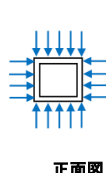
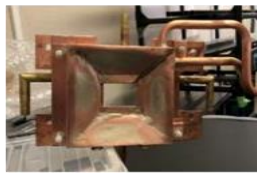
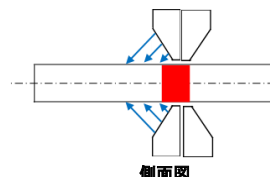


図2 高剛性の新設試験機の外観

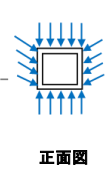
今回試験には，のせん断曲げのために，加熱コイルを傾斜させた場合の温度均一性が確保できる装置および極小半径の曲げのコンパクトで冷却能力を有する装置が必要となる．そこで，新たな特殊加熱コイルと冷却ジャケット（特許出願済）を設計製作した（図3,図4(b））．



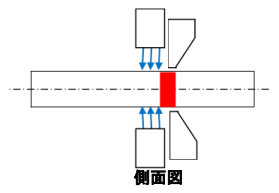
正面図



側面図



正面図



側面図

(a) 従来

(b) 今回開発

図4 特殊冷却ジャケット

図3 特殊加熱コイル
(コイル傾斜角 $\alpha = 45^\circ$)

2. 3 高剛性試験機による試験結果

導入した試験機により，矩形断面鋼管（ $20\text{mm}\times 20\text{mm}\times t 1.2\text{mm}$ ）を素材としてせん断曲げ3DQの試験を実施した．加熱コイルを送り方向に垂直に設定（コイル傾斜角 $\alpha=90^\circ$ ）し，入・出側の送り速度 V_0 ， V_x を 2.0mm/s と，せん断速度 V_y を $0.2\sim 0.7\text{mm/s}$ とした．試験結果と従来の3DQの曲げ試験結果を図5に示す．従来3DQのしわ発生限界は $R100\text{mm}$ 付近であるが，せん断曲げでは曲げ半径 $R60\text{mm}$ でもしわ発生しなかった．また，図6に示す良好なせん断変形も得られた．これまで冷間加工も含めて矩形断面鋼管のせん断曲げは例がなく，世界で初めて成功した．

さらに，開発した特殊加熱コイル（傾斜角 $\alpha=45^\circ$ ）と冷却ジャケットを用いて，加熱コイルを送り方向に 45° に設定（コイル傾斜角 $\alpha=45^\circ$ ）し，加工の進行方向を 45° と 90° （せん断角 $\theta=45^\circ$ ， 90° ）して，せん断曲げの試験を実施した．試験条件を表5に示す．試験状況を図11に示す．これらの試験で得られた加工後のサンプルの外観を図12に示す．せん断曲げ成形に成功し，極小曲げ半径の加工に目途を得た．特に， $\theta=90^\circ$ 曲げでしわを発生せず曲げ半径は約 5mm （製品幅の約 0.25 倍）の製品が得られ，極小曲げ半径でのしわ抑制が可能であることを確認できた．





	
曲げ半径 R150mm しわ無	$V_y/V_x=0.5/2$ 曲げR100mm しわ無
	
曲げ半径 R100mm しわ微小	$V_y/V_x=0.7/2$ 曲げR60mm しわ無
従来の 3DQ (曲げモード) : 3DQ 試験機 (ロボット方式)	せん断曲 3DQ (せん断モード) : 新試験機 (ロボット不使用)

図5 従来の 3DQ 試験機と新設試験機による曲げ試験結果
(コイル傾斜角 $\alpha=90^\circ$, 矩形管 20×20 , 板厚 1.2mm)

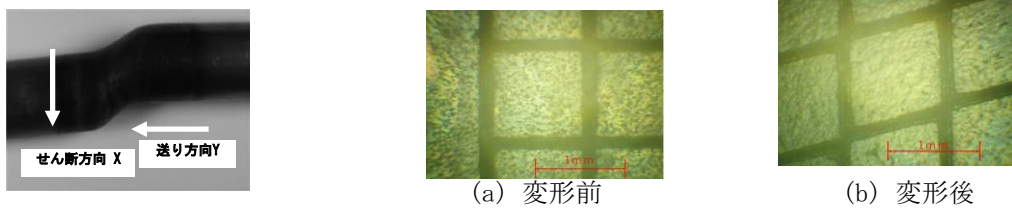


図6 素材にマーキングした格子の変形



図7 試験状況 (コイル傾斜角 $\alpha=45^\circ$)

表6 試験条件

送り速度 $V_0 / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	2.0
せん断角 $\theta / ^\circ$	45 (出側速度 $V_x=2\text{mm/s}$, $V_y=2\text{mm/s}$) 90 (出側速度 $V_x=0\text{mm/s}$, $V_y=2\text{mm/s}$)
狙い加熱温度 / $^\circ\text{C}$	900
冷却水流量 / $\ell \cdot \text{min}^{-1}$	13.8



(a) せん断角 $\theta=45^\circ$
出側速度 $V_x=2\text{mm/s}$, $V_y=2\text{mm/s}$



(b) せん断角 $\theta=90^\circ$
出側速度 $V_x=0\text{mm/s}$, $V_y=2\text{mm/s}$

図8 コイル傾斜角 $\alpha=45^\circ$ での試験結果

開発した特殊加熱コイル（傾斜角 $\alpha=45^\circ$ ）と冷却ジャケットを用いて、 90° 曲げでしわを発生せず極小半径の曲げ製品が得られた。ただし、今回の実験では図9(b)に示す様に、周方向に冷却不均一による未加熱部分が発生した。今後、均一性を確保するためにノズル配置の修正や各ノズルへの流量分布の適正化が必要である。

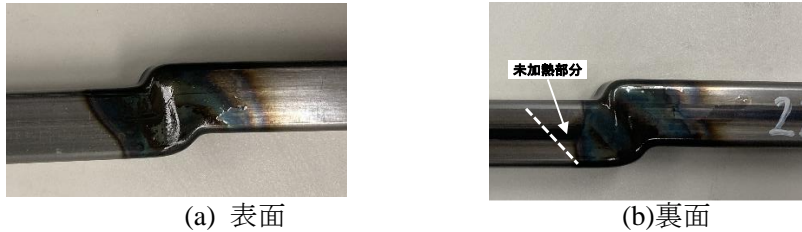


図9 加工後の鋼管の外観

2. 4 FEMによる解析結果

丸断面の鋼管（図2）と矩形管(図5, 図8)のせん断曲げ3DQ試験について、FEM解析¹⁾を実施した。結果を図10, 図11に示す。しわ発生については、今回のFEM解析で実験とほぼ一致する結果を得られており、解析においてもせん断曲げ3DQのしわ抑制効果を確認した。いずれの解析結果も、変形様態という観点からはしわの発生がなく、一致している。今後、しわの発生だけでなく、板厚をより正確に予測可能な解析モデルを作成する予定である。

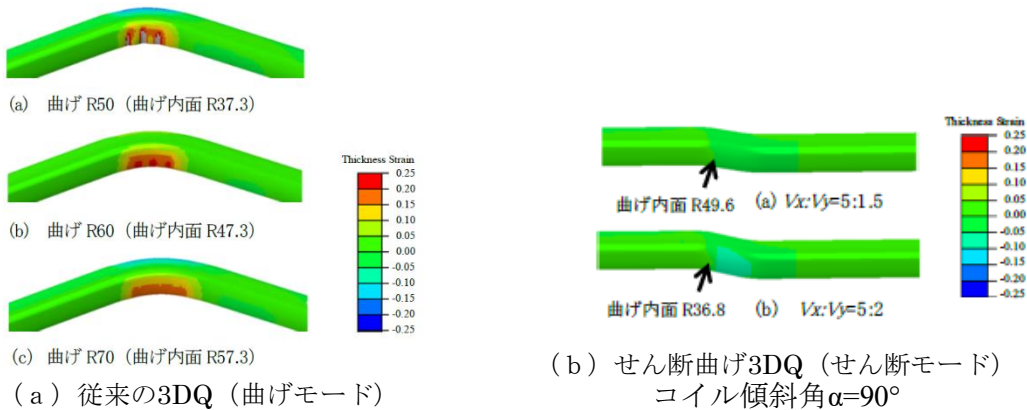


図10 FEMによる丸管 $\Phi 25.4 \times t1.2$ の変形(図2に対応)

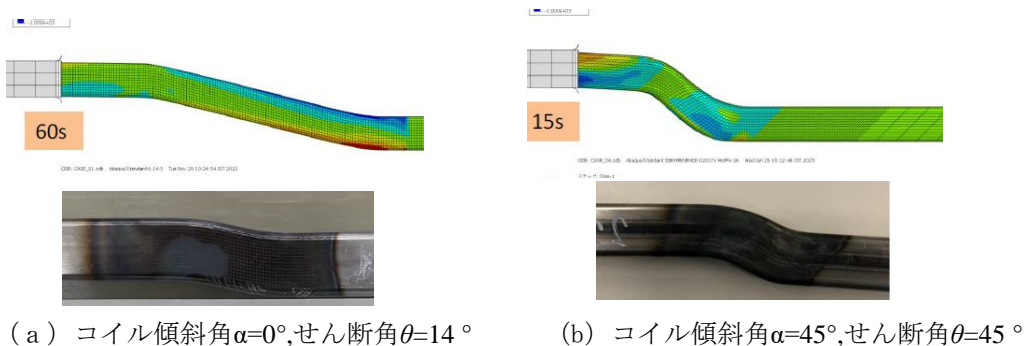


図11 矩形管 $20 \times 20 \times t1.2$ のせん断曲げのFEM解析結果と実験結果の比較(図5,8に対応)

1) H. Kubota, A. Tomizawa, K. Yamamoto, N. Okada, T. Hama, H. Takuda: Finite Element Analysis of Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench Process Considering Phase Transformation and Temperature Distribution by Induction Heating, ISIJ Int., 54-8(2014), p. 1856-1865

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 TOMIZAWA Atsushi、CHANSOCHEAT Tieng、UEMATSU Kazuo、NAKAZAWA Yoshiaki	4. 巻 63
2. 論文標題 Affecting Factors of Partially Quenched S-shaped Products for the Improvement of Energy Absorption in Axial Crash	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity	6. 最初と最後の頁 33 ~ 38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9773/sosei.63.33	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TOMIZAWA Atsushi、SHIMADA Naoaki、SATO Masahiko	4. 巻 63
2. 論文標題 Sheet Hydroforming Technology of Welded Double and Triple Blanks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity	6. 最初と最後の頁 19 ~ 24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9773/sosei.63.19	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomizawa Atsushi、Soedjatmiko Hartanto Sanny、Uematsu Kazuo、Shimada Naoaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Crash Characteristics of Partially Quenched Curved Products by Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1322 ~ 1322
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/met10101322	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 植松、富澤
2. 発表標題 FEM による熱間せん断曲げの予備検討 熱間せん断曲げ技術の開発 第1 報
3. 学会等名 塑性加工学会 2022年度 塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富澤, 横山, 植松
2. 発表標題 熱間せん断曲げの予備試験結果 熱間せん断曲げ技術の開発 第2 報
3. 学会等名 塑性加工学会 2022年度 塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富澤, 横山, 松尾, 植松
2. 発表標題 角管の熱間せん断曲げの試験結果 熱間せん断曲げ技術の開発 第3 報
3. 学会等名 塑性加工学会 第73回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植松一夫, 嶋田直明, SANNY SOEDJATMIKO HARTANTO, 富澤 淳
2. 発表標題 3次元熱間曲げ焼入れによる部分焼入れ部品の衝突特性 (1)
3. 学会等名 自動車技術会2020年春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富澤 淳, CHANSOCHEAT TIENG, 植松一夫, 中澤 嘉明
2. 発表標題 3次元熱間曲げ焼入れによる部分焼入れ部品の衝突特性 (2)
3. 学会等名 自動車技術会2020年春季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 中空屈曲部品の製造装置及び中空屈曲部品の製造方法	発明者 富澤淳, 植松一夫	権利者 日本製鉄(株)
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-212410	出願年 2021年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 冷却装置及び冷却方法	発明者 富澤淳, 植松一夫	権利者 日本製鉄(株)
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-46821	出願年 2022年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 冷却装置及び冷却方法	発明者 富澤淳, 植松一夫	権利者 日本製鉄(株)
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2021/006525	出願年 2021年	国内・外国の別 外国
産業財産権の名称 中空屈曲部品の製造方法及び中空屈曲部品の製造装置	発明者 富澤淳, 植松一夫	権利者 日本製鉄(株)
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2021/013878	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>1. 依頼講演 (1) 3次元熱間曲げ(3DQ)技術の開発, 日本塑性加工学会北陸支部 第85回技術懇談会(2021年12月) (2) 次世代モビリティのフレーム構造を実現する加工技術, 第116回粟崎ビジネスサロン(2022年3月)</p> <p>2. 雑誌掲載 (1) 富澤: 次世代モビリティのフレーム構造を実現する熱間曲げ焼入れ(3DQ)技術の開発, 北陸経済研究, 第497号p.36-p.37(2021年11月) (2) 富澤, 植松: 3次元熱間曲げ焼入れ(3DQ)による製品開発, 日本塑性加工学会誌「ぶらすとず」5巻第51号, p.148-p.152(2022年3月)</p> <p>3. 展示会出展 (1) 3次元熱間曲げ焼入れ(3DQ)技術の研究開発: 北陸技術交流テクノフェア2021出展(2021年10月) (2) 次元熱間曲げ焼入れ(3DQ)技術の研究開発: T-Messe 2021富山県ものづくり総合見本市出展(2021年10月)</p> <p>4. 本研究に係る特許(国内登録) (1) 富澤 淳, 植松一夫: 中空屈曲部品の製造方法, 中空屈曲部品の製造装置, 及び中空屈曲部品, 特許第7205409(2023.1.6)</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	末吉 敏恭 (sueyoshi toshiyasu) (10264475)	琉球大学・工学部・准教授 (18001)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	政木 清孝 (masaki kiyotaka) (30323885)	埼玉工業大学・工学部・教授 (32410)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関