

令和 2 年 9 月 3 日現在

機関番号：23304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06804

研究課題名(和文)革新的な軽量化・高強度化を開拓する加工法の検討

研究課題名(英文)Basic study on the new forming method for innovative lighter and high strength vehicles

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・教授

研究者番号：10744980

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：自動車の燃費と衝突安全性の向上のために、1470MPa以上の強度の自動車部品の成形を可能にする3次元熱間曲げ焼入れ(3DQ)技術が開発された。本研究では、従来の3DQの成形限界を拡大するために、せん断モード3DQの基礎研究を実施した。初等解析モデルを開発し、成形条件と荷重の関係を明らかにするとともに、小径薄肉鋼管を用いた予備試験を実施し、本法で曲げ半径が小さい場合でもしわの抑制が可能で均一な1470MPa以上の高強度が得られる材料にマーキングした格子を測定し、予想されたせん断変形が得られる。初等解析モデルを用いて、現行問題となった装置の弾性変形を解消した、高剛性の試験装置の設計を完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車の車体軽量化によるCO₂排出規制に対応するために、現在、自動車メーカーでは非鉄材料や樹脂・CFRPなどの新素材の導入・量産化が検討され、自動車のボディはマルチマテリアル化していくと考えられるが、コスト面での課題も予想される。今回の基礎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)：To improve fuel economy and crash safety of automobile, Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench (3DQ) Technology, which enables the formation of automotive parts with a tensile strength of 1470MPa or more, has been developed. In this study, fundamental research on new forming method is carried out to expand the forming limits in conventional 3DQ. The deformation in new method is shear mode instead of bending mode in conventional 3DQ. The elementary analysis model has been developed to clarify the effects of forming conditions on load. By preliminary test using small-diameter thin-walled steel tube, main results are as follows. It is made clear that wrinkles are suppressed with a small bending radius. High strength products, whose hardness distribution are uniform, are obtained. Laser marking lattice on the surface is measured. The expected shear deformation is obtained. Based on these results, a new high-rigidity test machine is designed by using the analysis model.

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

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車には、地球環境保護の観点より CO2 排出量の大幅な削減(燃費向上)が求められている。欧州連合(EU)では、2007年のCO2排出量実績に対して2015年までに-18%、2021年までに-40%の非常に高い削減目標を掲げている。CO2排出量の削減には、自動車車体の軽量化が極めて有効である¹⁾。また、乗員保護の観点から、自動車アセスメント試験(JNCAP, ユーロ NCAP, IIHS 等)は、年々厳格化する傾向にあり、高い衝突安全性も求められている²⁾。これらの両立のため、軽量かつ高強度な自動車部品の開発が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究の基礎となる3次元熱間曲げ焼入れ(3DQ)は、申請者が独自に開発した鋼管の焼入れと曲げ加工を同時に行う技術で、部品の鋼管化と高強度化(引張強さ1470MPa以上)が可能である。自動車の軽量化と衝突安全性の要求に応え、複数の自動車部品で実用化した。しかしながら、3DQにおける変形は曲げであるため、曲げ外周側の引張応力により板厚は減少し(図1)、内周側では圧縮応力により『しわ』が発生する(図2,3)。したがって、従来の3DQによる製品の成形可能範囲は、『しわ』が発生する最小曲げ半径と曲げ外周側の板厚減少によって決定される。そこで、変形モードを曲げからせん断に変更する新たなせん断曲げ3DQ(図4)を考案し、その実現可能性について検討した。

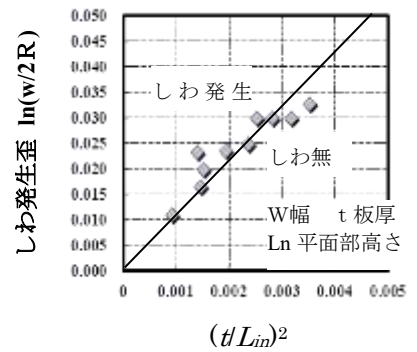
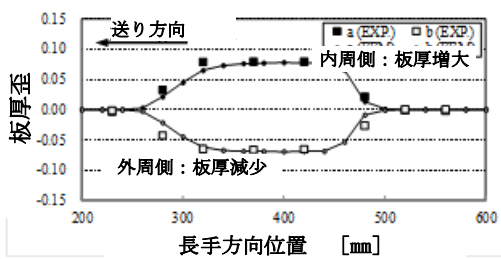
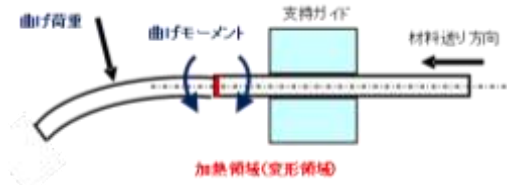


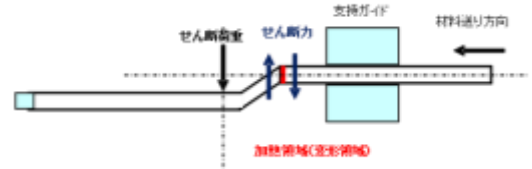
図1 3DQの板厚分布例

図2『しわ』発生例

図3 しわ発生限界 (R:曲げ半径)



(a) 従来の技術(曲げ3DQ)



(b) 今回の開発(せん断曲げ3DQ)

図4 今回の開発技術

3. 研究の方法

新たなせん断モード3DQの加工の、実現可能性と最適加工条件の検討を行う。従来の曲げモード3DQの初等解析モデルを作成し、せん断モード3DQの各種加工条件と荷重特性の影響を明確化する。解析結果に基づき、従来の試験機で試験可能な極小径・薄肉管を用いて予備試験を行い、新たなせん断モード3DQの実現可能性を明確にする。

さらに、3DQ(従来の曲げおよび開発のせん断曲げいずれも)の特長である部分焼入れ(部分的な高強度化)を活かした衝突エネルギー吸収向上に関して、FEM解析を実施した。

4. 研究成果

4.1 加工荷重

4.1.1 加工荷重の初等解析モデル

W:加熱幅[mm], 鋼管断面のA:高さ[mm], b:幅[mm], ρ:曲げ半径[mm], v:送り速度[mm/s]とし、従来の3DQにおいては

- ① 曲げの初等理論より、加熱位置でのモーメントMを(1)式より求める
- ② 変形抵抗式としては、温度T、炭素量量C、ひずみ速度εを考慮した美坂の式(2)を用いる
- ③ 図5(a)の釣り合いの式を解くことにより、ロボットの鋼管支持部での加工力などを求める

$$M = \int F \cdot b(\eta) d\eta \quad (1)$$

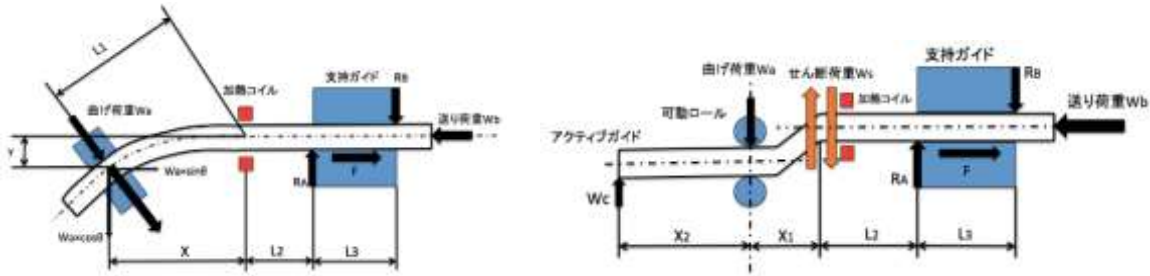
$$F = \varepsilon^m e^{\left(k' + \frac{A'}{T}\right)}, \quad \dot{\varepsilon} = \frac{Av}{2\rho W}, \quad A' : \text{定数}(2851+2968C-1120C^2),$$

$$k' : \text{定数}(0.126-1.75C+0.594C^2), \quad n=0.21, \quad m=0.13 \quad (2)$$

一方、せん断曲げ3DQについては、同一の変形抵抗式を用い

せん断降伏応力 τ
$$\tau = \frac{F}{\sqrt{3}}$$

とし、図5(b)の釣り合いの式を解くことにより、加工力などを求める



(a) 3DQ (従来の技術) (b) せん断曲げ3DQ (今回の研究)

図5 荷重予測の初等解析モデル

4.1.2 加工荷重の計算結果

図6に示すように、従来の3DQの加工荷重の実験値と計算値はよく一致しており、今回のモデルの妥当性が確認できた。図7より、従来の3DQでは、加工距離(加熱コイルとロボット支持部の距離)を増加させることで加工荷重が減少する。一方、せん断曲げ3DQでは加工距離に依存することなく荷重が一定である。特に、加工距離が短いほど理想的なせん断変形に近づくと考えられるため、加工荷重は曲げ3DQより大きくなる可能性が高い。

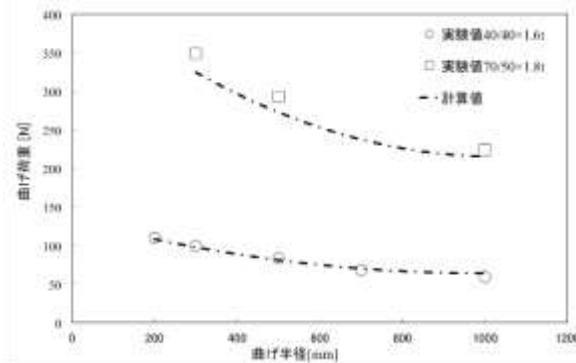


図6 従来3DQにおける初等解析モデル

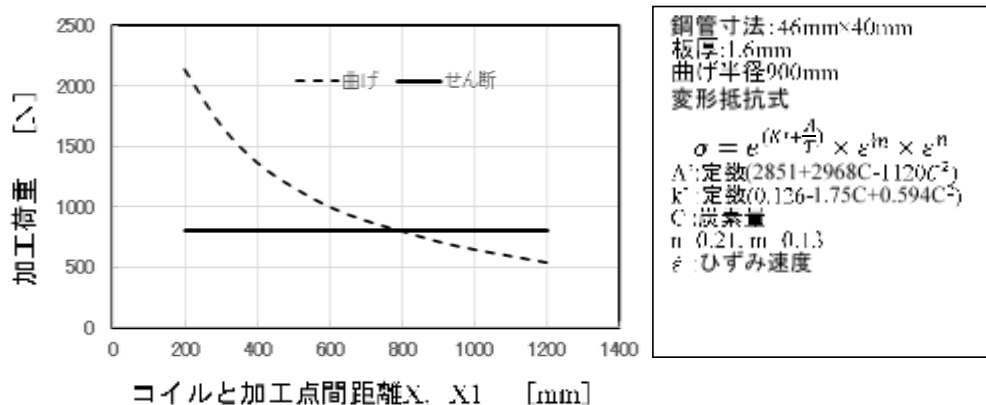


図7 せん断曲げ3DQと従来曲げ3DQの加工荷重

4.2 現行試験機による予備試験

これらの結果に基づき、現状の装置での加工可能な試験条件を選定し、小径薄肉鋼管（外径 $\Phi 25.4\text{mm}$ 、板厚 1.2mm ）を用いた予備試験を実施した。

4.2.1 しわ抑制効果

外径 $\Phi 25.4\text{mm}$ 、板厚 1.2mm を用いて、従来 3DQ とせん断曲げ 3DQ で試験を実施した。結果を図 8、図 9 に示す。今回行ったせん断曲げ 3DQ では、曲げ半径（中心曲げ半径）は $R39\text{mm}$ でもしわは発生しない。一方、従来の 3DQ では中心曲げ半径 $R150\text{mm}$ で、大きなしわが発生している。したがって、今回試験範囲では、せん断曲げによりしわの発生しない最小曲げ半径は約 $1/3$ 程度以下となっている。



中心曲げ半径 $R38.7\text{mm}$ ($V_y/V_x=1$)
図 8 せん断曲げ 3DQ



中心曲げ半径 $R100\text{mm}$
図 9 従来曲げ 3DQ

4.2.2 製品の強度

せん断曲げ 3DQ では、加工中上下面で冷却水の入射角（衝突圧力）が大きく異なる。従って上面の冷却不足による焼き戻しや硬度低下、硬度の不均一が懸念された。そこで、板厚中央のピッカース硬度を定常部 5mm 、硬度遷移領域 1mm ピッチで測定した。結果を図 10 に示す。今回の試験条件の範囲では、上下面共に正常な焼き入れがなされており、硬度は確保されていることが判明した。

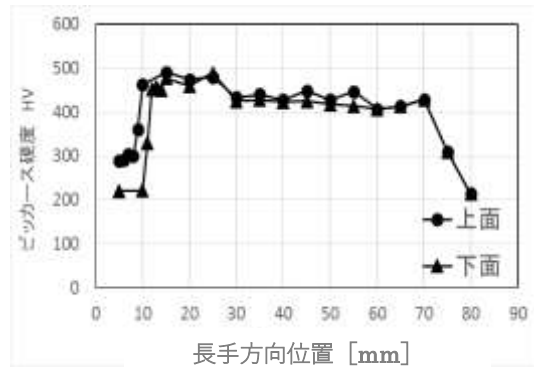


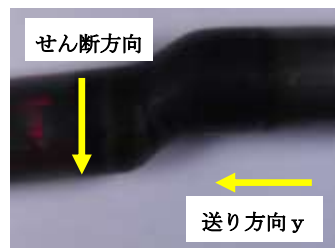
図 10 せん断曲げサンプルの硬度分布

4.2.3 せん断曲げ 3DQ における変形状態

ひずみ測定を行うために、あらかじめ丸管表面に示す $1[\text{mm}] \times 1[\text{mm}]$ の格子をレーザーマーキングした。加工後に、実顕顕微鏡で格子の変形 L_y と L_x を測定することによりせん断ひずみ τ_{xy} を算出した。

図 11 (c) に示す様に、今回のせん断曲げ 3DQ では予想された変形が確認できた。せん断ひずみ分布の測定結果を図 12、定常部のせん断ひずみと理論値の関係を図 13 に示す。

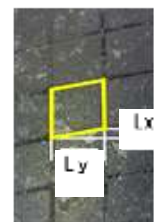
図 13 に示すように、定常になったせん断ひずみは、理論値の約 25%程度の値しか得られていない。これは、試験機の弾性変形、特に、ロボットの弾性変形によるものと考えられる。したがって、せん断曲げの装置としては、先端のクランプと支持ガイドの剛性を高くする必要がある。



(a) 試験材外観



(b) 試験前の格子



(c) 試験後の格子

図 11 せん断曲げ 3DQ の予備試験結果

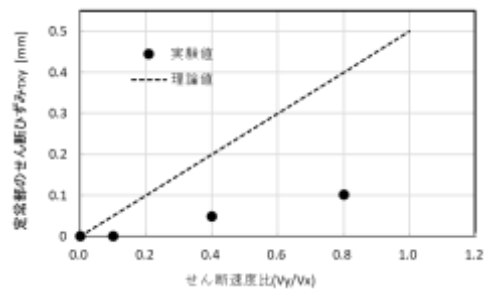
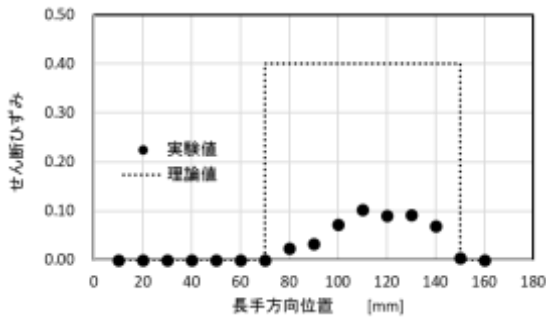


図 12 せん断ひずみ分布 ($V_y=4[\text{mm/s}]$, $V_x=5[\text{mm/s}]$) 図 13 せん断ひずみと理論値の比較

4.3 現行試験機による予備試験

従来の 3DQ 設備では加工荷重の制約から、本格的なせん断曲げ 3DQ の試験が困難である事が分かっている。そこで、前述の荷重予測モデルを活用し、剛性の高い新たな小型試験機的设计仕様を決定した。

4.4 3DQ の部分焼入れによる衝突吸収エネルギー向上

3DQ (従来の曲げおよび開発のせん断曲げいずれも) の特長である部分焼入れ (部分的な高強度化) を活かした衝突エネルギー吸収向上に関して検討した (図 14)。結果を図 16~18 に示す。焼入れを施さない従来の矩形断面の S 形状部品に対して、今回検討した最適化した断面を用いた 3DQ による部分焼入れにより、約 5 倍の衝突吸収エネルギーの向上が得られた。また、解析結果によれば、従来の矩形断面の 3DQ による部分焼入れ部品も、従来の 3 倍以上の衝突吸収エネルギーの向上が得られているが、変位 380mm においては焼入れ部分に大きく折れ変形が発生しており、割れが発生している可能性があるため注意する必要がある。

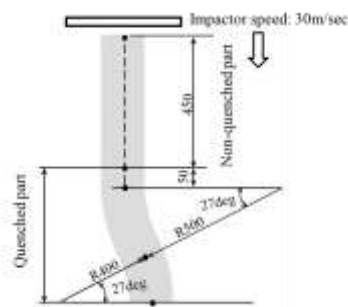


図 14 計算条件

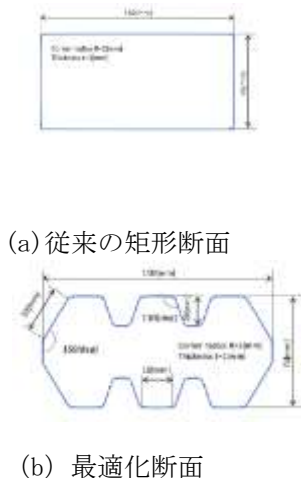


図 15 断面形状

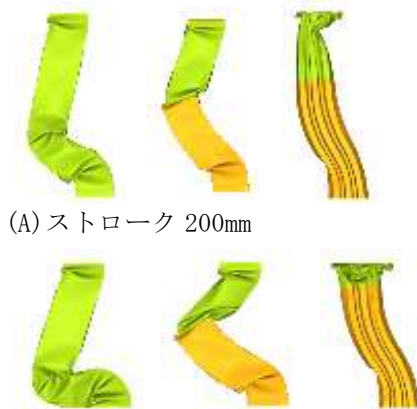


図 16 軸圧潰試験における変形状状

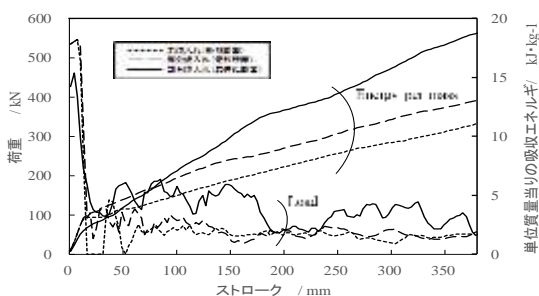


図 17 ストローク荷重線図

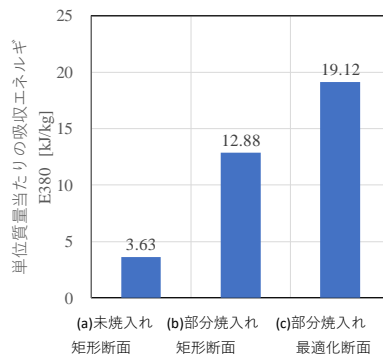


図 18 軸圧潰試験における衝突吸収エネルギー

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 SATO Masahiko, MIZUMURA Masaaki, KURIYAMA Yukihisa, SUZUKI Katsuyuki, TOMIZAWA Atushi	4. 巻 59
2. 論文標題 Deformation Type in Forming of Curved Conical Tubes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity	6. 最初と最後の頁 229 ~ 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.9773/sosei.59.229	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 -
1. 著者名 佐藤 雅彦, 水村 正昭, 吉田 亨, 栗山 幸久, 鈴木 克幸, 富澤 淳	4. 巻 59
2. 論文標題 異径円管成形における変形様式 板からの閉断面部品成形の基礎研究 第1報	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 塑性と加工	6. 最初と最後の頁 27,31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.9773/sosei.59.27	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 -
1. 著者名 富澤 淳	4. 巻 1
2. 論文標題 熱間曲げを用いた高強度部材の自動車用部品への適用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本塑性加工学会 会報誌『ぷらすとす』	6. 最初と最後の頁 176,179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 窪田, 富澤, 山本, 岡田, 浜, 宅田	4. 巻 57
2. 論文標題 3次元熱間曲げ焼入れ加工の成形可能範囲におよぼす各種要因の影響 3次元熱間曲げ焼入れ技術の開発 第2報	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 塑性と加工	6. 最初と最後の頁 879,885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.9773/sosei.57.879	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 -

1. 著者名 内海,長谷川,富澤,吉田	4. 巻 57
2. 論文標題 チューブフォーミング	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 塑性と加工	6. 最初と最後の頁 714,718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.9773/sosei.57.714	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 富澤 淳, 佐藤 雅彦, 内田 光俊, 中澤 嘉明	4. 巻 61
2. 論文標題 鋼板のハイドロフォームの基礎特性 材料流入を伴う鋼板のハイドロフォーム技術の開発 第1報	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 塑性と加工	6. 最初と最後の頁 268-273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.9773/sosei.60.268	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3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 植松,宮良,富澤,嶋田,水村
2. 発表標題 3次元熱間曲げ焼入れにおける丸管の寸法精度に及ぼす加熱幅の影響
3. 学会等名 平成29年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Tomizawa, S. Hartanto, N. Shimada, K. Uematsu
2. 発表標題 Crash Characteristics of Partial-quenched products by 3 Dimensional Hot Bending and Direct Quench
3. 学会等名 Int. Conf. on Tube Hydroforming (Tubehydro2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sato, M. Mizumura, T. Yoshida, Y. Kuriyama, K.Suzuki, A.Tomizawa
2. 発表標題 Effect of Deformation Path in Forming 3D Closed-Section Parts from Sheet Metal, 9th Int. Conf. on Tube Hydroforming
3. 学会等名 Int. Conf. on Tube Hydroforming (Tubehydro2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鳥塚史郎, 富澤淳など	4. 発行年 2016年
2. 出版社 しなやかで強い 鉄鋼材料	5. 総ページ数 399(293-301)
3. 書名 株式会社 イヌ・テイ・イス	

〔出願〕 計6件

産業財産権の名称 曲げ加工製品の製造方法及び製造装置	発明者 富澤, 嶋田, 桑山, 井上	権利者 新日鐵住金株式 会社, 日鉄住金 鋼管株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、15/782902	出願年 2017年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 曲げ部材の製造方法及び製造装置	発明者 嶋田, 富澤, 桑山, 井 上, 岡久, 木下, 巢山	権利者 新日鐵住金株式 会社, 日鉄住金鋼 管株式会社, 株式
産業財産権の種類、番号 特許、特願2016-146836	出願年 2016年	国内・外国の別 国内

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	発明者 富澤淳, 植松一夫	権利者 日本製鉄
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-134900	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

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
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-134901	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 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	発明者 富澤淳, 植松一夫	権利者 日本製鉄
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-134902	出願年 2019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
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-032058	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計2件

産業財産権の名称 曲げ部材の製造方法及び製造装置	発明者 嶋田，富澤，桑山， 井上，岡久，木下， 巢山	権利者 新日鐵住金株式 会社，日鉄住金 鋼管株式会社，
産業財産権の種類、番号 特許、6180597	取得年 2017年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 合金化溶融亜鉛めっき熱処理鋼材及びその製造方法	発明者 土岐，富澤，小嶋， 石井，今井，中村， 嶋田	権利者 新日鐵住金株式 会社
産業財産権の種類、番号 特許、10-1748540	取得年 2017年	国内・外国の別 外国

〔その他〕

-

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)	
研究 分 担 者	政木 清孝 (MASAKI Kiyotaka) (30323885)	沖縄工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授 (58001)	