

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01749

研究課題名（和文）冷却履歴を部分制御する高生産性テーラードホットスタンピング法の開発

研究課題名（英文）Development of tailored hot stamping having high productivity using partial control of cooling history

研究代表者

森 謙一郎（MORI, KEN-ICHIRO）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・特任教授

研究者番号：80127167

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：超高強度鋼自動車部材のホットスタンピングにおいて高強度部と高延性部を持つテーラード部材を生産するために冷却履歴を部分的に制御し、前工程で高強度部を部分金型で成形する部分成形法、成形前に高強度部を冷却する部分強制冷却法、成形前に高強度部を保温する部分保温法を開発した。また、角部を増肉して高強度な部材を製造するホットスタンピング方法、母板とパッチを重ねて成形して機械的に接合することによってパッチワークテーラード部材を製造する方法、穴抜き試験から引張強さ、全伸びを推定する方法、非めっき鋼板の表面酸化層を希薄りん酸と2周波超音波洗浄によって除去する方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高強度部と高延性部を持つテーラード部材は自動車の軽量化と衝突安全性向上に大きく貢献し、その部材を製造する技術において生産性を高めることは産業界から望まれている。テーラード部材において高強度鋼部でマルテンサイト、高延性部でフェライトに変態させる冷却履歴を達成するためのホットスタンピングの工程は学術的に大きな意義がある。また、大きな塑性変形とダイクエンチングによる部材角部のマルテンサイト組織微細化と硬さ向上メカニズム、希釈りん酸水溶液を用いた2周波超音波洗浄による表面酸化層の除去メカニズムなどの解明は学術的に大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：In order to manufacture tailored parts with high strength and high ductility zones in hot stamping of ultra-high strength steel automotive parts, the cooling history was partially controlled, and a partial forming process in which the high strength zones are formed with partial dies in the previous stage, a partial forced cooling process of the high strength zones before forming and partial thermal insulating process of the high strength zones before forming were developed. In addition, a hot stamping process for manufacturing high strength parts by thickening of corners, a hot stamping process for manufacturing patchwork tailored parts by mechanically joining a main blank and patch, an approach for estimating tensile strength and total elongation from a punching test, dual-frequency ultrasonic cleaning with diluted phosphoric acid solution for removing surface oxide layers of hot-stamped uncoated steel sheets were developed.

研究分野：生産加工学

キーワード：ホットスタンピング テーラード 冷却履歴制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車軽量化と高衝突安全性向上に対して超高強度鋼部材が必要になってきているが、冷間プレス成形では 1.2GPa 級超高張力鋼板が限界であるとされている。ホットスタンピングでは、鋼板を 900°C 程度に加熱して成形し、金型急冷を使ったダイクエンチングによって焼入れして引張強さが 1.5GPa 級の超高強度鋼部材が製造でき、スプリングバックがほとんどなく成形荷重も小さいため、現在世界的規模で生産が急拡大している。

ホットスタンピング部材の大半は全体が高強度になっているが、部分的に高延性も有している方が衝突安全性が高いという部材もあり、高強度部と高延性部を両立させたテーラード部材の製造法が望まれている。高強度部と高延性部を両立させたテーラード部材を生産するホットスタンピングには部分冷却と溶接テーラードブランクが一般的に用いられているが、溶接テーラードブランクは接合部の信頼性の問題があり、部分冷却に対する要求が強まっている。しかしながら、現状の部分冷却では、金型にヒーターを内蔵して高延性部の冷却速度を低下させてマルテンサイト変態を防止して延性の高いフェライト変態を生じさせているが、低い冷却速度ではダイクエンチングの時間が長くなって生産性が低くなる。このため、生産性の高い新しいテーラード部材のホットスタンピング方法の開発が望まれている。

2. 研究の目的

加熱した焼入れ鋼板を金型で急冷して超高強度鋼自動車部材を生産するホットスタンピングにおいて、冷却履歴を部分的に制御して高強度部と高延性部を両立させたテーラード部材を高い生産性で製造する方法を開発し、衝突安全性を向上させることを目的としている。さらに、角部を増肉させて強度を一層向上させ、パッチワークテーラード部材においてホットスタンピング中に母板とパッチを接合させ、テーラード部材の引張強さおよび全伸びの分布を簡易に推定し、非めっき鋼板の表面酸化層を除去することも目的としている。

3. 研究の方法

テーラード部材のホットスタンピング方法として、前工程で高強度部だけを部分パンチによって成形する部分成形法、成形前に高強度部を強制冷却する部分冷却法、成形前に高強度部を保温する部分保温法を開発し、冷却履歴を部分的に制御して高強度部と高延性部を両立させた部材を高い生産性で製造した。

ホットスタンピングにおいて、角部を増肉して高強度な部材を製造する方法を開発した。鋼板の両端を拘束して成形を行って部材角部を増肉し、同時に増肉した角部のマルテンサイト組織を微細化して強度を一層増加させた。

パッチワークテーラード部材のホットスタンピングにおいて、母板とパッチを溶接しないで加熱し、金型内で重ねて成形することによって接合する方法を開発し、アルミニウムメッキ鋼板において均一な金属間化合物層を生成させた。

穴抜き試験から推定する方法を開発し、穴抜き加工における加工荷重から引張強さ、せん断面比率から全伸びをそれぞれ求め、テーラード部材の引張強さおよび全伸びの分布を簡易に推定できるようにした。

非めっき鋼板のホットスタンピングにおいて発生する表面酸化層を、希薄りん酸と 2 周波超音波洗浄によって除去し、振動周波数割合などの条件を変化させて除去時間を短縮した。

4. 研究成果

(1) 高強度部と高延性部を有するテーラード部材

高強度部と高延性部を持つテーラード部材を製造するために、図 1 に示すような金型を加熱しないテーラードホットスタンピング方法を開発した。部分成形法では、第 1 段成形で高強度部だけを部分金型で成形し高延性部を金型に接触させないことで冷却速度を低下させ、第 2 段成形で十分に幅のある全体金型で部材全体を成形している。部分冷却法では、第 1 段冷却で高強度部を強制冷却することによって第 2 段冷却を省略している。部分保温法では、高強度部を高温に保って高延性部を徐冷することによって、1 段の金型で成形できるようにしている。3 方法の特徴を比較し、高強度部と高延性領部の硬さがそれぞれ約 470HV1 と約 230HV1 のテーラード部材が製造でき、金型を加熱していないためサイクルタイムは 15 秒と短くなった。

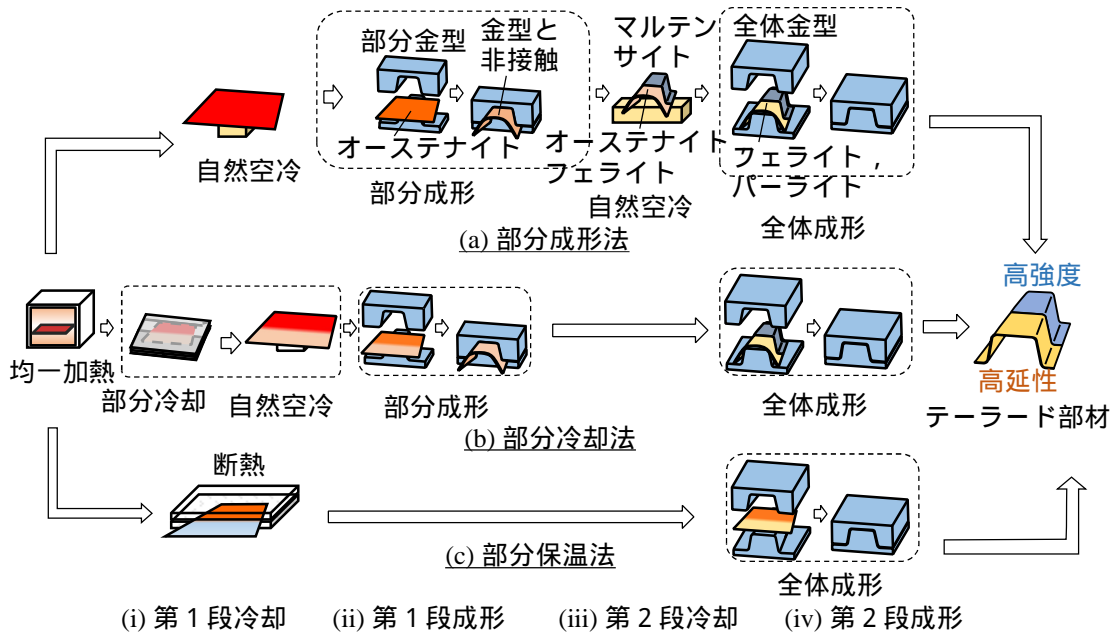


図1 高強度部と高延性部を持つテーラード部材を製造するためのテーラードホットスタンピング方法

(2) 部材角部の増肉

ホットスタンピングにおいて角部を増肉して部材の強度を高める方法を開発した。図2に示すように、加熱された鋼板が曲げられて両端がストッパーで拘束され、金型との接触によって部分的に冷却されて変形抵抗が増加し、板面方向に圧縮されることによって角部の板厚が増加する。角部を厚くすることによって成形品の強度が高くなり、さらに大きな塑性変形とダイクエンチングによって角部のマルテンサイト組織を微細化して硬さも増加した。ホットスタンピングされたハット型部材では、厚さが30%大きくなって角部の硬さが530HVとなり、曲げ荷重が約40%増加した。また、部材の形状精度、側壁焼入れ性も向上した。

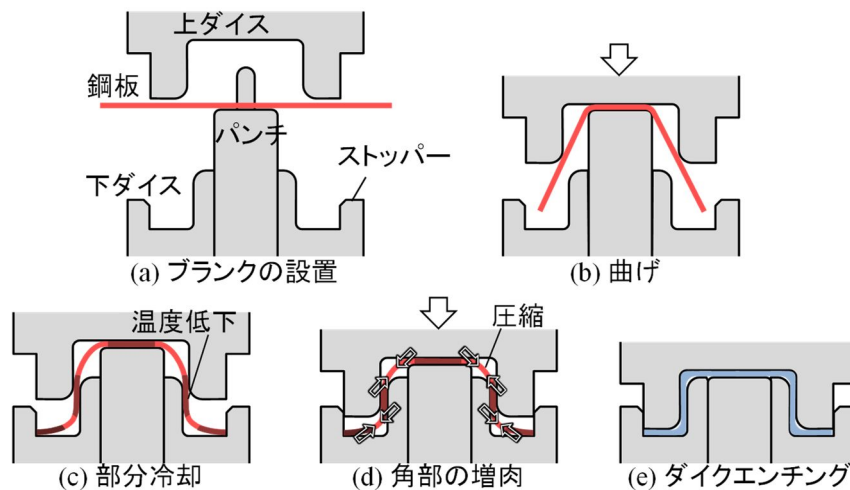


図2 部材強度を高める角部増肉ホットスタンピング

(3) パッチワークテーラード部材

パッチワークテーラード部材のホットスタンピングにおいて、溶接しないアルミニウムメッキ母板とパッチを加熱して成形中に機械的に接合した。ホットスタンピングでは、表面酸化を防止するためにアルミニウムメッキ鋼板が一般的に用いられているが、溶接したパッチワークブランクでは厚さに差があって不均一に加熱され、酸化を防止する金属間化合物が不均一に生成して酸化防止効果が低下する。そこで、溶接していない母板とパッチを重ねないようにして加熱して均一な金属間化合物を表面に生成させ、図3に示すように金型に重ねて設置して機械的に接合する。母板両端がストッパーで拘束されて板厚方向に圧縮されることによって局部的に座屈してダイスの段差部分に入り込んでインターロックが形成され、母板とパッチが機械的に接合される。ホットスタンピングされた部材では、母板とパッチの隙間はほとんどなくてレーザー溶接することができ、部材は十分な圧壊荷重とパンチストロークを有していた。テーパ部材お

よび亜鉛メッキ鋼板のパッチワーク部材も製造することができた。

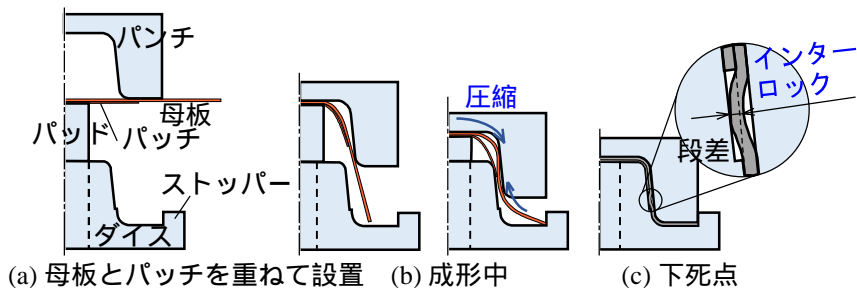


図3 パッチワークテラード部材のホットスタンピング中の機械的接合

(4) 穴抜き試験による引張強さと全伸びの推定

テラード部材では、機械的特性が分布するため部材から小さな引張試験片を切り出して測定を行うのは労力と時間が必要になるため、テラード部材の引張強さと全伸びの分布を簡易的に推定するための穴抜き試験方法を開発した。引張強さは最大穴抜き荷重時のせん断応力から、全伸びはスクラップ切口面のせん断面または破断面割合からそれぞれ推定した。図1(a)に示した部分成形法で製造されたテラード部材の引張強さおよび全伸びの分布を図4に示す。縮小試験片は部材から小さな試験片を切り出して測定した結果である。引張強さは高強度部で高く、全伸びは高延性部で大きく、テラード部材が得られている。穴抜き試験から得られた引張強さは縮小試験片の結果とよく一致しているが、全伸びに差があり縮小試験片はサイズの影響を受けている。

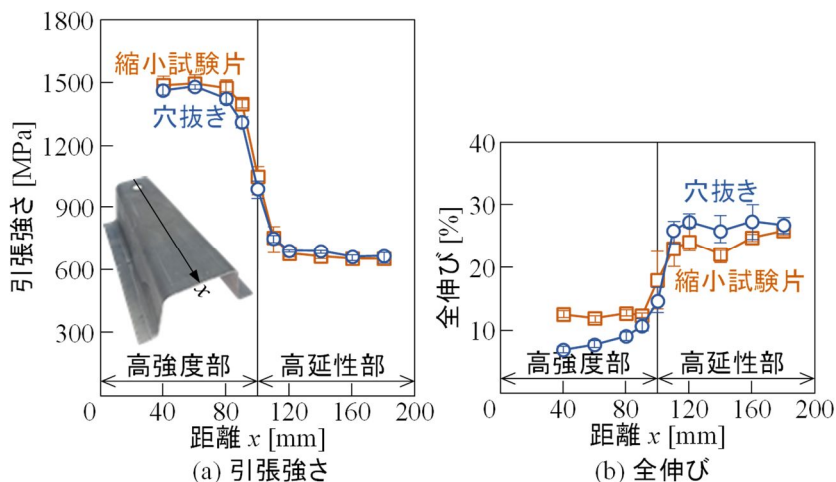
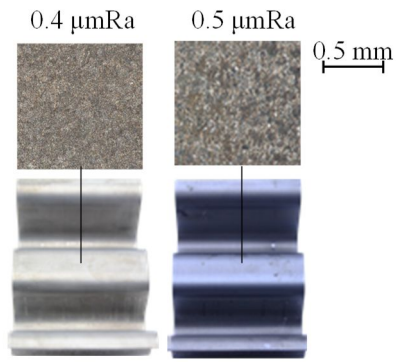


図4 部分成形法で製造されたテラード部材の引張強さおよび全伸びの分布

(5) 希薄リン酸と2周波超音波洗浄による表面酸化層の除去

ホットスタンピングでは、表面酸化を防止するためにアルミニウムメッキ鋼板が一般的に用いられているが、非めっき鋼板は低コストで加熱時間が短く、通電加熱、高周波加熱のような急速加熱にも対応でき、新しく開発される鋼板にも応用しやすい。非めっき鋼板はホットスタンピング後にショットブラストで酸化層を除去するのが一般的であるが、粗い表面、歪みが問題になっている。そこで、非めっき鋼板のホットスタンピング部材の表面酸化層を、図5に示すように希釈リン酸溶液を用いた2周波超音波洗浄によって除去した。超音波洗浄によって酸化層を除去された表面の性状は、ショットブラストによるものよりも高く、歪みも小さく、溶接性と塗装性は同様であった。

希釈リン酸溶液は、希釈塩酸溶液よりも除去時間が短く、リン酸鉄層を生成することによって洗浄後の放置による錆の発生を防止することができた。また、2周波を用いることによって除去時間が短くなった。希釈リン酸水溶液を用いた2周波超音波洗浄は、酸化スケールが溶解した後、薄いスケール部分と高圧部分から酸化スケールが剥離して酸化層が除去されたことが表面の観察から分った。除去時間は、pH と酸化スケールの厚さが減少するとともに、また溶液温度が上昇するとともに小さくなった。



(a) 超音波洗浄 (b) ショットブラスト

図 5 希釈リン酸溶液を用いた 2 周波超音波洗浄とショットブラストによって表面酸化層を除去されたホットスタンピング部材と表面

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11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 Nakagawa Yuki, Mori Ken-ichiro, Suzuki Yasutaka, Shimizu Yuki	4. 巻 192
2. 論文標題 Tailored tempering without die heating in hot stamping of ultra-high strength steel parts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials & Design	6. 最初と最後の頁 108704 ~ 108704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matdes.2020.108704	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 Suzuki Yasutaka, Mori Ken-ichiro, Hosoya Ryo, Abe Yohei	4. 巻 61
2. 論文標題 Joining of Taper Nut and Bolt to Ultra-high Strength Steel Sheet by Punching	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity	6. 最初と最後の頁 154 ~ 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9773/sosei.61.154	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 Maeno Tomoyoshi, Mori Ken-ichiro, Sakagami Masato, Nakao Yoshitaka, Talebi-Anaraki Ali	4. 巻 4
2. 論文標題 Minimisation of Heating Time for Full Hardening in Hot Stamping Using Direct Resistance Heating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing and Materials Processing	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jmmp4030080	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 Nakagawa Yuki, Mori Ken-ichiro, Nishikata Michiya	4. 巻 50
2. 論文標題 Hot stamping of non-rectangular steel sheets using resistance heating by local preheating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Procedia Manufacturing	6. 最初と最後の頁 298 ~ 302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.promfg.2020.08.055	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 Mori Ken-ichiro, Suzuki Yasutaka, Yokoo Daisuke, Nishikata Michiya, Abe Yohei	4. 巻 111
2. 論文標題 Steel sheets partnered with quenchable sheet in hot stamping of tailor-welded blanks and its application to separation prevention of fractured components	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 725 ~ 734
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-020-06100-4	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 Mori Ken-ichiro, Kaido Tomoya, Suzuki Yasutaka, Nakagawa Yuki, Abe Yohei	4. 巻 59
2. 論文標題 Combined process of hot stamping and mechanical joining for producing ultra-high strength steel patchwork components	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing Processes	6. 最初と最後の頁 444 ~ 455
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmapro.2020.10.025	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 Talebi-Anaraki Ali, Maeno Tomoyoshi, Ikeda Ryohei, Morishita Kazui, Mori Ken-ichiro	4. 巻 64
2. 論文標題 Quenchability improvement and control simplification by ice mandrel in hot stamping of ultra-high strength steel hollow parts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing Processes	6. 最初と最後の頁 916 ~ 926
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmapro.2021.02.037	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 Nakamura Naotaka, Mori Ken-ichiro, Okada Hiroki, Abe Yohei	4. 巻 114
2. 論文標題 Punching test for estimating tensile strength and total elongation of steel sheets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 1847 ~ 1858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-021-06898-7	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 Yuki Nakagawa, Ken-ichiro Mori, Tomoyoshi Maeno, Ryo Umeniya	4. 巻 105
2. 論文標題 Delayed cracking in hot stamping with hot trimming for ultra-high strength steel components	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 5081-5090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-019-04599-w	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 Naotaka Nakamura, Ken-ichiro Mori, Yuki Nakagawa, Takahiro Miyachi	4. 巻 7
2. 論文標題 Effect of contact pressure in die quenching on strength of hot-stamped parts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 7th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel	6. 最初と最後の頁 709-716
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 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 SUZUKI Yasutaka, MORI Ken-ichiro, MAENO Tomoyoshi, NAKAMURA Mitsuru, ABE Yohei	4. 巻 60
2. 論文標題 Joining of Bar and Nut to Die-Quenched Steel Sheet by Punching	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity	6. 最初と最後の頁 335 ~ 339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9773/sosei.60.335	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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 小松剛司
2. 発表標題 希薄リン酸と2周波超音波洗浄を用いたホットスタンピング成形品の酸化スケール除去特性
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村尚誉
2. 発表標題 穴抜き試験によるプレス成形品の引張強さと全伸びの予測
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高羽孝輔
2. 発表標題 超高張力鋼板への鍛造ナットの穴抜き接合
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田拓記
2. 発表標題 穴抜き加工による金属板材の機械的特性の予測
3. 学会等名 2019年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 海道智也
2. 発表標題 パッチワーク部材の同時接合ホットスタンピングにおける端部拘束による接合性の向上
3. 学会等名 2019年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西方理也
2. 発表標題 非矩形鋼板の通電加熱ホットスタンピングにおける部分前加熱
3. 学会等名 2019年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村尚誉
2. 発表標題 リン酸と2周波超音波洗浄を用いたホットスタンピング成形品の酸化スケール除去
3. 学会等名 第70回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間寛樹
2. 発表標題 鋼板の曲げ加工における面方向圧縮を用いた増肉テーラードホットスタンピング
3. 学会等名 平成30年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川佑貴
2. 発表標題 水没金型を用いた直接水冷ホットスタンピングの複雑形状部品への適用
3. 学会等名 第69回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村尚誉
2. 発表標題 通電加熱連続ホットスタンピングにおけるリン酸と超音波洗浄を用いた酸化スケール除去
3. 学会等名 第69回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	中川 佑貴 (Nakagawa Yuki) (50837739)	東京工業大学・工学院・助教 (12608)	
研究分担者	前野 智美 (Maeno Tomoyoshi) (80505397)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	
研究分担者	安部 洋平 (Abe Yohei) (60402658)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (13904)	

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
---------	---------