

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26420048

研究課題名（和文）自動車用超ハイテン衝撃部材用次世代ヘミング技術の開発

研究課題名（英文）Development of new hemming technology for joining ultra-high strength automobile parts

研究代表者

安部 洋平（Abe, Yohei）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：60402658

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、プレス機を利用した超ハイテン（引張強さが1GPa以上の鋼板）のヘミング（板を折り返す加工法）により線状に接合して強度を増加させた自動車用圧縮中空部材を開発した。超ハイテンの既存プレスヘミング性を明確にし、変形集中を防止したヘミング法を開発して限界の向上させた。ヘミングで接合された中空部材の圧縮試験を行って、圧縮荷重を測定と破壊メカニズムを解明し、性能を向上させて超ハイテン部材用次世代ヘミング技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：In this study, hollow parts having the high compressive force assembled by linearly press hemming for automobiles were developed. The forming limit of conventional hemming on joining ultra-high strength steel parts was investigated. New hemming method for prevention of deformation concentration was developed to improve the limit. The compression test of the hollow parts joined by hemming was carried out. The compressive load was measured, and the fracture mechanism was clarified. New hemming technology for joining ultra-high strength parts for automobiles was successfully developed.

研究分野：塑性加工学

キーワード：ヘミング 接合 超ハイテン 超高張力鋼板 中空部材 圧縮荷重 変形集中の防止 プレス成形

1. 研究開始当初の背景

米道路安全保険協会の新規格により自動車の衝突安全性の向上が求められていた。本規格に対応する車体部材は超高強度な超ハイテン（超高張力鋼板）を抵抗スポット溶接により複数の点で接合されているが、溶接部の周囲で強度が低下しやすい熱影響部を有し、高強度なために溶接電極の消耗も大きくなっている。高い接合強度と高い生産性を有する超ハイテンの接合法が求められている。プレス機を利用したヘミングは加熱なしに接合するために熱影響部がなく、プレス機を用いるために高速で接合でき、高い接合強度と高い生産性を有する超ハイテンの接合法になる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、プレス機を利用した超ハイテンのヘミングにより線状に接合して強度を増加させた自動車用圧縮部材を開発する。これまでにヘミングは薄い軟鋼板などの外板を接合する技術として確立されているが、構造部材の超ハイテンへは利用されていない。超ハイテンの既存プレスヘミング性を明確にし、変形集中を防止したヘミング法を開発して限界の向上させる。次にヘミングで接合された中空部材の圧縮試験を行って、圧縮荷重を測定するとともに破壊メカニズムを解明する。さらに、性能を向上させて超ハイテン部材用次世代ヘミング技術を確立する。

3. 研究の方法

3.1 超ハイテンのプレスヘミング性とヘミング性の向上

ヘミングした代表的な超高張力鋼板の機械的特性を表1に示す。1.2mm厚さの引張強さが1180MPa級から590MPa級の鋼板であり一部の鋼板は表面に合金化溶融亜鉛めっき(GA)処理されている。超ハイテンは980MPa以上の鋼板である。引張強さとともに絞り伸びが低下して延性が小さくなる。

表1 ヘミングした代表的な超高張力鋼板の機械的特性

鋼種[MPa]	めっき	板厚 [mm]	引張強さ [MPa]	絞り [%]	伸び [%]
590	GA	1.20	607	78.3	22.0
780	GA	1.21	791	58.1	19.4
980	GA	1.22	1024	41.3	14.6
1180	なし	1.20	1203	57.9	8.5

一般的なヘミングによる接合では、ある程度曲げられた外板に平らな内板が挿入された後に、外板がさらに曲げられて接合される。外板の曲げ半径が小さくなり、限界を下回るとクラック、破断が生じて接合できなくなる。図1(a)に示すように一般的に加工時に外板の曲げ半径が小さくなる部分をパンチ側壁に接触させて圧縮を付加して破断を抑制できる。しかしながら、さらに延性の低い板材では圧縮部上方で破断を生じることがある。

そこで、図1(b)に示すように予め曲げられた内板と溝付きパンチを用いて変形集中を防止する。曲げられた内板と外板が接触して曲げ半径が大きくなり、変形の集中が緩和されて破断を抑制して板材を接合できる。内板は一般的にプレス成形により得られているためにプレス成形中に曲げておけば工程数は増えない。

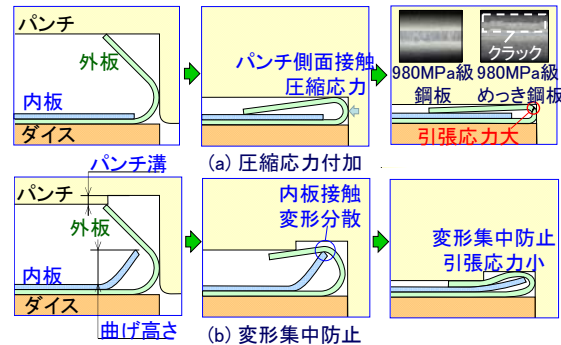


図1 一般的な圧縮応力を付加するヘミング法と変形集中を防止したヘミング法

自動車の衝突安全性の向上のために客室周りの部材には強度が求められている。ここでは、進行方向からの衝撃に対して客室の変形を防ぐサイドシルを想定したモデル部材で評価した。ヘミングによる板材の接合条件および外板と内板を図2に示す。平板の外板とハット状の内板は、それぞれ2段とハット状に曲げられた後に接合される。変形集中を防止した接合では、内板の高さ h の変化とパンチに2mmの溝を設けて変形の集中を分散させた。従来の圧縮付加は、 $h=0\text{mm}$ でパンチの溝がない。外板と内板の奥行きは予備試験用の50mm、またはサイドシルのモデルとした300mmであり、内板の両端をヘミングにより接合する。接合する幅は一般的な溶接による接合を想定してフランジ幅 L =約15mmである。そのために、溶接された部材よりもヘミング加工された部材の重量はフランジ部が3枚になるために大きくなる。

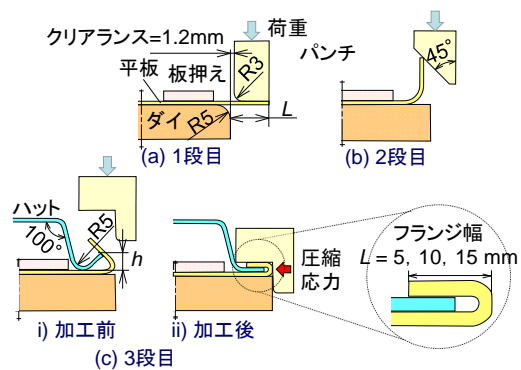


図2 ヘミングによる板材の接合条件および外板と内板

比較のために抵抗スポット溶接で板材を接合した。溶接条件と溶接部を図3に示す。ヘミングされるフランジ部は3枚になるが、溶接では2枚であり、外板の幅は内板と同じである。図3(b)に示すように溶接ナゲットが形成されて接合されている。また、数多く溶接を行うと図3(c)に示すように融点の低いめっきが溶接電極に付着しており、多大になると溶接が安定しなくなるために定期的な電極を磨き、短くなったら交換した。

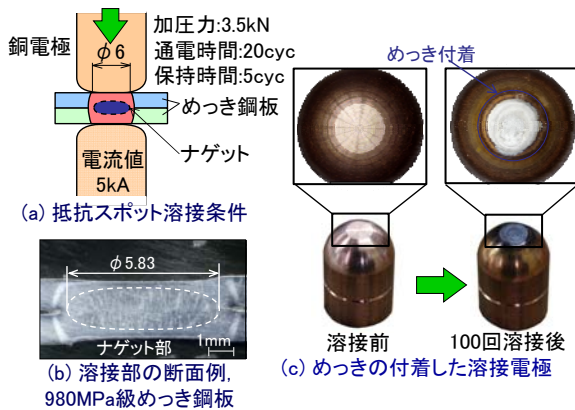


図3 抵抗スポット溶接条件と溶接部

3.2 中空部材の圧縮強度と破壊メカニズムと圧縮強度向上

中空部材の圧縮強度試験方法を図4に示す。図4(a)に示す300mmの長さのハット曲げた内板の縁部を図2の方法で接合し、得られた図4(b)に示す部品を軸方向に圧縮して荷重を測定した。断面形状は図4(c)に示すようである。ヘミングではフランジ部を全て接合し、抵抗スポット溶接では一般的な約50mm間隔に片側に7点、両側で合計14点接合した。接合された中空部材は軸方向に約360mm/sの平均速度で100mmだけ圧縮され

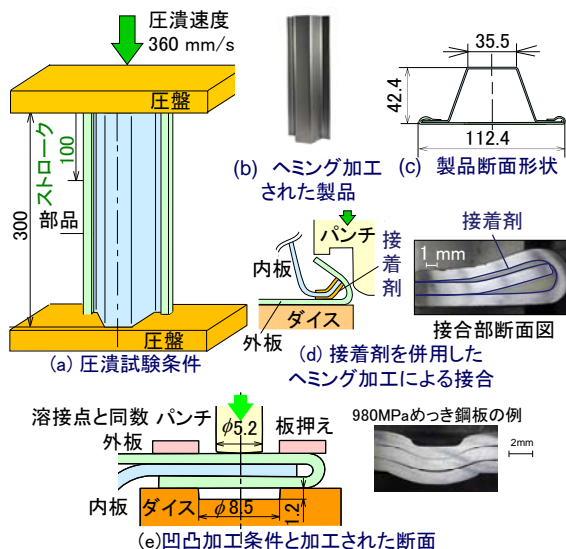


図4 中空部材の圧縮強度試験方法

た。試験回数は1条件につき3回とした。また、強度を向上させるために図3(d)に示すようにヘミング時にエポキシ樹脂系の接着剤(セメダイン製EP138)を塗布して接合した後に120°Cで硬化させた部材と、図3(e)に示すようにヘミング後に凹凸加工を行った部材も用いた。自動車部品でも塗装の焼付工程で硬化する接着剤が使われることがあり、同種の接着剤である。

4. 研究成果

4.1 超ハイテンのヘミング性の評価とヘミング性の向上

1180MPa級鋼板、外板の1段目、2段目と接合における荷重-ストローク線図を図5に示す。外板の1段目と2段目の荷重は小さく、3段目は板材の開きを抑制するために荷重は大きい。

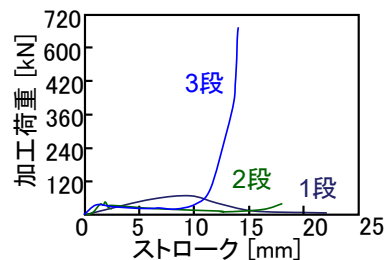


図5 加工荷重-ストローク線図(1180MPa級鋼板、 $h=7\text{mm}$ 、300mm中空部品の換算値)

ヘミングにより接合できる範囲を図6に示す。パンチのくぼみ、内板の高さとパンチのくぼみがない圧縮付加のヘミング $h=0\text{mm}$ では高い延性を有する780MPa級の鋼板は接合できているが、それよりも高強度な鋼板は接合できない。980MPa級と1180MPa級の鋼板はそれぞれ $h=4\text{mm}$ 以上と $h=7\text{mm}$ にすることで変形の集中を分散して接合できている。以上のように開発した変形集中を防止するヘミング法によって加工限界を向上できた。

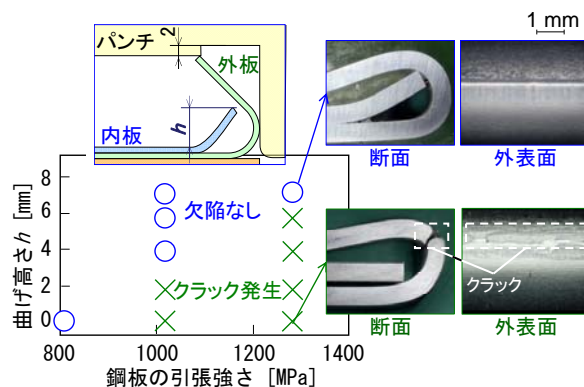


図6 ヘミングにより接合できる範囲

ヘミングにより接合された1180MPa級鋼板の外板の板厚分布と980MPa級鋼板の接合部のめっき厚さ分布を図7に示す。図7(a)に

示すように曲げられた部分の外板は薄くなっており、パンチ側壁に圧縮される部分が大きく減少している。図7(b)に示すようにヘミングにより接合された外板のめっき厚さはパンチ側壁に圧縮される部分において大きく減少し、反対にその周囲へ材料が流れている。一方、溶接部では溶接電極部で減少している。

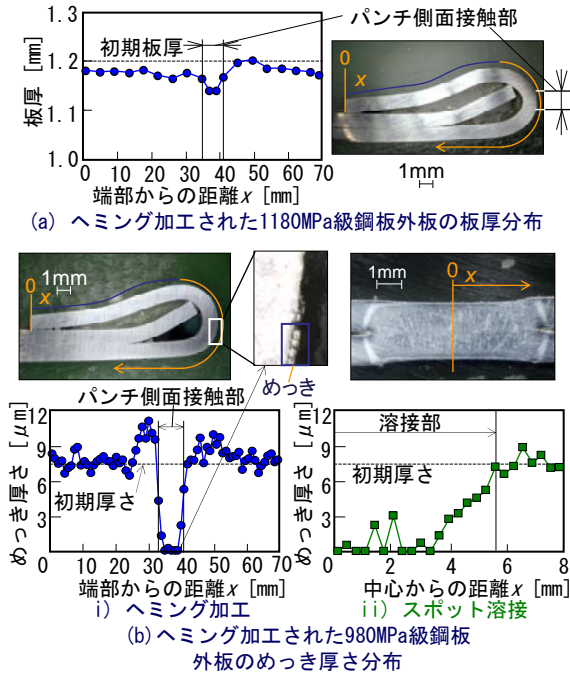


図7 ヘミングにより接合された外板の板厚分布と接合部のめっき厚さ分布

4.2 中空部材の圧縮強度と破壊メカニズムと圧縮強度向上

圧縮試験における1180MPa級の中空部材の変形挙動を図8に示す。ヘミングにより接合された部品では、圧縮により内板の座屈が生じて、内板が外板より引き抜けている。抵抗スポット溶接された部品は溶接部の間で座屈が生じ、蛇腹状に変形している。

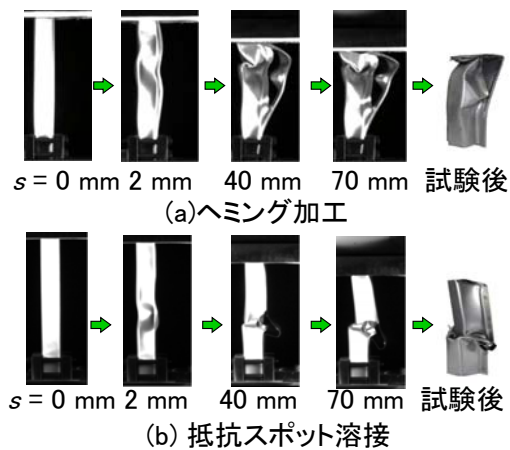


図8 圧縮試験における1180MPa級の中空部材の変形挙動

圧縮試験における中空部材の変形挙動の分類を表2に示す。ヘミングにより接合された部品ではいずれの鋼板においても内板の引き抜けが生じて変形していたが、スポット溶接により接合された部品は座屈が生じて蛇腹状に変形していた。ヘミングにより接合された中空部材の圧縮破壊メカニズムとしては、内板の座屈の後に接合部が引き抜ける形態である。

表2 圧縮試験における中空部材の変形挙動の分類

		鋼板		
		780MPa級 めっき鋼板	980MPa級 めっき鋼板	1180MPa級 鋼板
接合方法	ヘミング加工	内板引き抜け	内板引き抜け	内板引き抜け
	抵抗スポット溶接	蛇腹状	蛇腹状	蛇腹状

圧縮試験における圧縮荷重とストロークの関係を図9に示す。いずれの荷重もストローク初期において急激に最大値まで上昇した後に急落している。スポット溶接された部品では座屈が繰返し起きることがあるので、その後もいくつかの極大が生じることがある。

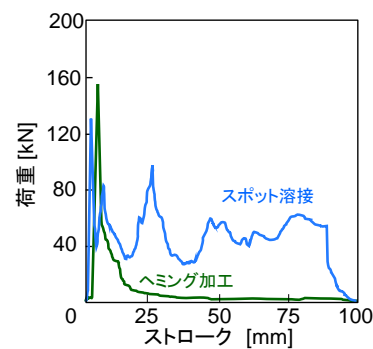
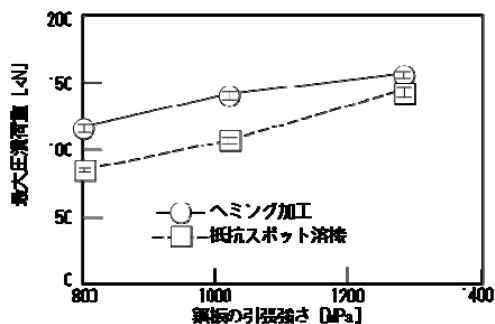


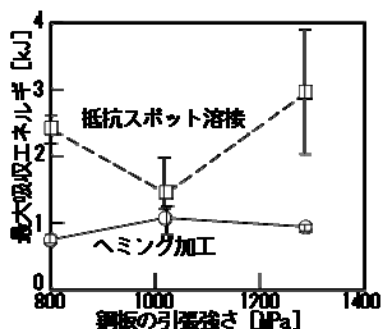
図9 圧縮試験における圧縮荷重とストロークの関係

最大圧縮荷重と吸収エネルギーを図10に示す。吸収エネルギーは、図9の圧縮荷重—ストローク線図の面積とした。最大荷重は鋼板の引張強さとともに増加しており、ヘミングはスポット溶接よりも高くなっている。吸収エネルギーは変形挙動によるためにばらつきが生じているが、ヘミングではフランジ部が引き抜けて折れ込んだために座屈する挙動に

なった溶接よりも低くなっている。自動車車体用を想定すると最大荷重を大きく受け持つサイドシルのような部品にヘミングによる接合は有効である。



(a) 最大圧縮荷重



(b) 吸収エネルギー

図 10 最大圧縮荷重と吸収エネルギー

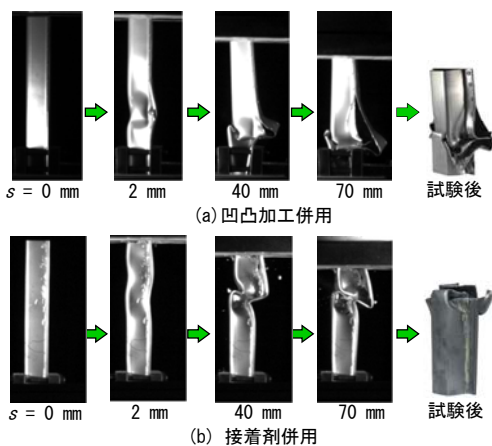


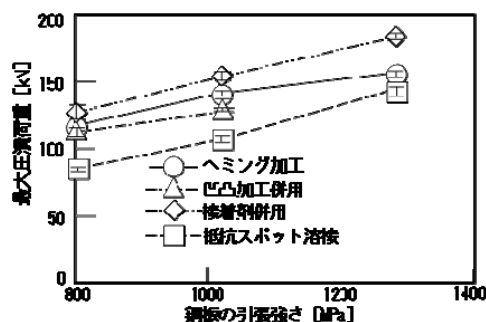
図 11 圧縮試験における 980MPa 級めっき鋼板の中空部品の变形挙動

図 8 と表 2 に示した様にヘミング加工された部材では、軸方向の圧縮負荷を受けると内板の座屈が生じて、内板が外板より引き抜けていた。そこで、内板が外板より引き抜けないように図 4(d) に示した接着剤の併用と (e) に示したように凹凸加工を行なった中空部材を得て、圧縮試験を行った。接着剤の併用は自動車のドアの部分で一般的に利用されている。凹凸加工は、現段階ではヘミング加工後に 1 点ずつ行ったが、実成形ではプレス工程を 1 段階追加すれば可能と思われる。なお、

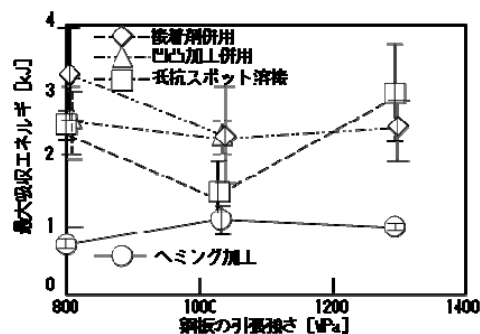
h が大きくなると凹凸加工できないので 980MPa 級鋼板までとした。

接着剤の併用、凹凸加工された 980MPa 級めっき鋼中空部材の圧縮試験における部品の变形挙動を図 11 に示す。接着剤の併用、凹凸加工のいずれも座屈の变形挙動に変化した。

接着剤を併用、凹凸加工された中空部材の最大圧縮荷重と吸収エネルギーを図 12 に示す。最大荷重は鋼板の引張強さとともに増加していることは図 10 と同様である。凹凸加工ではわずかに下がっているが、接着剤を併用することで荷重が増加できている。接着剤を併用、凹凸加工された中空部材の吸収エネルギーは、いずれも变形挙動が蛇腹状に変化したためにヘミングよりも大きくなっている。条件によっては溶接よりも大きい。以上のように内板が外板より引き抜けないようにして圧縮特性を向上できた。



(a) 最大圧縮荷重



(b) 吸収エネルギー

図 12 接着剤の併用、凹凸加工された中空部材の最大圧縮荷重と吸収エネルギー

4.3 まとめと今後の課題

超ハイテンの既存プレスヘミング性を明確にし、変形集中を防止したヘミング法を開発して限界の向上させた。ヘミングで接合された中空部材の軸方向圧縮試験を行って、圧縮荷重と破壊メカニズムを解明した。

今後の課題としては、中空部品の軽量化、他部品への適用、曲線部への適用がある。ヘミングの接合部は 3 枚となり溶接部よりも重くなっている。質量あたりの最大荷重はヘミングで接合された部材のほうが少し大きい。接合しているフランジ幅を短くして軽量

化することが重要である。サイドシルの軸方向負荷を対象にしたが、ポール衝突、バンパーを想定すると曲げ変形を受けるために、曲げの評価も必要である。車体部品を想定すると直線上の部品だけでなく、曲線部を有することがある。板先端では大きな伸び、縮みが生じるためにそれぞれ破断としわが生じやすく、欠陥になり接合できなくなる可能性がある。これらの限界と限界を向上させるヘミング技術の研究開発が重要となる。

今回の対象は超ハイテン材として鋼板のみを取り扱ったが、自動車のマルチマテリアル化によってアルミニウム合金板、樹脂材の利用が増えてくることが予測される。ヘミング加工による接合では外板を曲げることによって接合するためにこれら材料との組み合わせることができる。アルミニウム合金板は延性が高くないこともあり、開発したヘミング方法が活用できる可能性がある。

5. 主な発表論文等 (計 6 件)

- 1) Yohei Abe, Ken-ichiro Mori, Kazuma Nakagawa, Assembly of ultra-high strength steel hollow part by hemming using pre-bent inner sheet, Proceedings of International Conference on Technology of Plasticity 2017, in printing.
- 2) 安部洋平, 中川一真, 森謙一郎, ヘミング加工により接合された超強度鋼中空部材におけるフランジ幅の短縮化と部材の曲げ強度, 平成 29 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 2017, 145-146.
- 3) 安部洋平, 伊地智航, 宮澤貞雄, 森謙一郎, 中川一真, ヘミング加工性と接合された中空部品の強度に及ぼす鋼板強度の影響, 第 67 回塑性加工連合講演会講演論文, 2016, 149-150.
- 4) 安部洋平, 伊地智航, 森謙一郎, 曲げ部の変形集中を防止した超高張力鋼板のヘミング加工による接合, 平成 27 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 2015, 55-56.
- 5) 安部洋平, 村田 祐治, 森謙一郎, 伊地智航, ヘミング加工により接合された高張力鋼中空部品の圧潰強度, 第 65 回塑性加工連合講演会講演論文集, 2014, 105-106.
- 6) Zamzuri Hamedon, K. Mori, Y. Abe, Hemming for joining high strength steel sheets, Procedia Engineering, 81 (2014), 2074-2079.

[学会発表] (計 6 件)

- 1) Yohei Abe, Ken-ichiro Mori, Kazuma Nakagawa, Assembly of ultra-high strength steel hollow part by hemming using pre-bent inner sheet, International Conference on Technology of Plasticity 2017, 2017 年 9 月, イギリス, 採択
- 2) 安部洋平, 中川一真, 森謙一郎, ヘミング加工により接合された超強度鋼中空部材におけるフランジ幅の短縮化と部材の曲げ強度, 平成 29 年度塑性加工春季講演会,

2017 年 6 月, 岐阜

- 3) 安部洋平, 伊地智航, 宮澤貞雄, 森謙一郎, 中川一真, ヘミング加工性と接合された中空部品の強度に及ぼす鋼板強度の影響, 第 67 回塑性加工連合講演会, 2016 年 10 月, 埼玉
- 4) 安部洋平, 伊地智航, 森謙一郎, 曲げ部の変形集中を防止した超高張力鋼板のヘミング加工による接合, 平成 27 年度塑性加工春季講演会, 2015 年 5 月, 神奈川
- 5) 安部洋平, 村田 祐治, 森謙一郎, 伊地智航, ヘミング加工により接合された高張力鋼中空部品の圧潰強度, 第 65 回塑性加工連合講演会, 2014 年 10 月, 岡山
- 6) Zamzuri Hamedon, K. Mori, Y. Abe, Hemming for joining high strength steel sheets, International Conference on Technology of Plasticity 2014, 2014 年 9 月, 愛知

[その他]

ホームページ等

<http://plast.pse.tut.ac.jp/sotsuken/index.html>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
安部 洋平 (ABE Yohei)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60402658
- (2) 研究分担者
森 謙一郎 (Mori Ken-ichiro)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80127167