

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04778

研究課題名(和文) 高張力鋼板の伸びフランジ成形限界の評価と予測のための新たなアプローチ

研究課題名(英文) A new approach for evaluation and prediction of stretch flangeability for high-strength steel sheets

研究代表者

日野 隆太郎 (Hino, Ryutaro)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授

研究者番号：10283160

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)：帯板の面内引張曲げ試験という新たな伸びフランジ成形性評価試験を提案し、590～980MPa級高張力鋼板について伸びフランジ成形限界の評価と予測を行った。
面内引張曲げにおいて2種の破断形態(板縁から割れる縁割れ、板縁から離れた位置を起点とする内割れ)があることを明らかにし、付与張力、鋼板強度、板縁性状が割れ形態や成形限界に及ぼす影響を整理した。またひずみ勾配と伸びフランジ成形限界ひずみの関連を明らかにし、同一のひずみ勾配では面内引張曲げの伸びフランジ成形限界は穴広げ試験のそれより高いことを示した。板縁性状が良好な場合、有限要素解析による面内引張曲げの伸びフランジ成形限界予測が可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新たに提案した面内引張曲げ試験という伸びフランジ成形性評価試験により、板縁が凹型となる従来の穴広げ試験で得られた伸びフランジ成形限界のデータは板縁が凸型となる面内引張曲げ変形には適用できないことが示された。一方で面内引張曲げ試験においても従来の穴広げ試験と同様に縁割れ・縁割れの2種の破断形態があること、ひずみ勾配の増大に伴い伸びフランジ成形限界ひずみが増大すること、材料強度の上昇に伴い伸びフランジ成形限界ひずみが低下することなどが示された。これらの知見はプレス成形の現場における縁割れ評価法の改善、縁割れ予測精度の向上に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In-plane stretch bending test was proposed as a new stretch flangeability testing method. Evaluation and prediction of the stretch flangeability for several high-strength steel sheets having strength levels ranging from 590 MPa to 980 MPa were conducted. It was clarified that there are two types of fracture, i.e. edge cracking from the outside edge of the bent sheet and internal cracking starting from a position apart from the edge. Effects of the stretching force, strength of the steel sheet, and sheet edge condition on the fracture type and stretch flangeability have been revealed. Relationship between strain gradient around the sheet edge and the forming limit in stretch flanging was also clarified, and the stretch flangeability in the in-plane stretch bending was found to be higher than that of hole expansion, under the same strain gradient condition. Numerical prediction of the forming limit in the in-plane stretch bending was successful when the sheet edge condition was good.

研究分野：弾塑性力学・塑性加工学

キーワード：高張力鋼板 伸びフランジ変形 成形限界ひずみ 面内引張曲げ試験 穴広げ試験 ひずみ勾配 有限要素解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車車体への高張力鋼板適用が拡大し、その強度レベルも向上している。しかし高張力鋼板は成形性の低い難成形材であり、とりわけ板縁部の伸びフランジ成形限界（縁割れ限界）が低いこと、およびその予測が困難であることが大きな問題となっている。従来、板材の伸びフランジ成形性は円孔付き試験片の穴広げ試験によって評価され、限界穴広げ率 λ によって伸びフランジ成形限界予測を行うことが標準的であった（図1参照）。しかし、よく知られているようにこの方法は実用性が低い。なぜなら、伸びフランジ成形限界は変形様式、穴縁近傍のひずみ分布（ひずみ勾配）、穴縁の性状など種々の要因によって変化するため、ある条件下で得られた限界穴広げ率 λ は別の条件下では役に立たないからである。

例えば図2に示すように板縁が凹型の場合と凸型の場合で板縁の伸びフランジ成形限界ひずみが変わるといふ指摘がある。また、板縁部の成形限界ひずみは板縁直交方向のひずみ勾配（ $\Delta\epsilon/\Delta r$ 、図2参照）によって変化するという指摘もあり、伸びフランジ成形限界は破断の起点となる板縁材料要素の応力・ひずみ状態だけでは予測できず、破断部周辺の応力・ひずみ分布や板縁性状の影響を考慮する必要がある。しかしながら、それらの所因子の影響を考慮できる実用的な伸びフランジ成形限界規準はなく、成形限界の解析的予測も容易ではない。

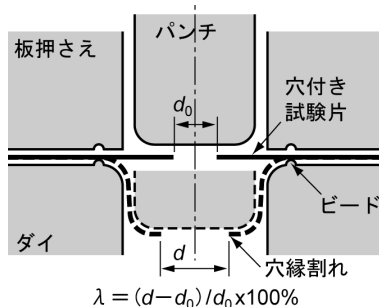


図1 穴広げ試験と限界穴広げ率 λ

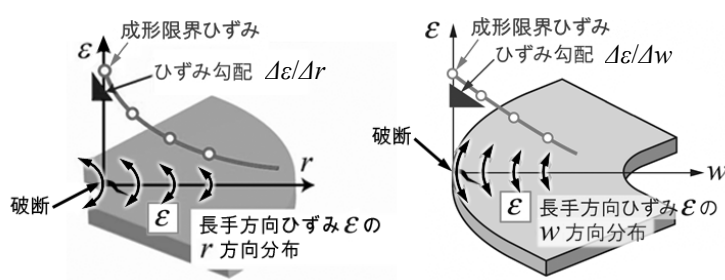


図2 異なる変形形態の伸びフランジにおける成形限界ひずみと長手方向ひずみの分布および板縁部ひずみ勾配

2. 研究の目的

本研究では、帯板の面内引張曲げ試験（図3参照）という新たな伸びフランジ成形性評価試験を提案し、種々の条件下で高張力鋼板の伸びフランジ成形限界を明らかにすること、および破断部周辺の応力・ひずみ分布が伸びフランジ成形限界に及ぼす影響を理解し、それを踏まえた伸びフランジ成形限界の評価・予測法を確立することを目的としている。そのため実験においては板縁の限界ひずみの測定だけでなくデジタル画像関連法に基づくひずみ分布観察も行い、併せて有限要素解析を行うことで破断部周辺の応力・ひずみ分布が伸びフランジ成形限界に及ぼす影響を明らかにする。また、従来の標準的試験法である穴広げ試験の結果と面内引張曲げ試験結果とを比較することで、これら2種の変形様式の違いが伸びフランジ成形限界にどのような影響を及ぼすかを明らかにし、変形様式に関わらず適用可能な普遍的な伸びフランジ成形限界規準を構築できるかどうかについても検討する。

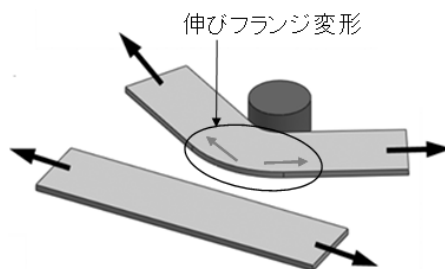


図3 面内引張曲げ試験の概念図

3. 研究の方法

(1) 基本的材料特性の取得：強度レベルや強化機構が異なる数種の高張力鋼板（二相鋼板 590Yと析出強化鋼板 590R，および二相鋼板 780Yと 980Y，板厚はすべて 1.0 mm）を供試材として、基本的な材料特性の取得を行う。具体的には、単軸引張りにおける各種物性値と変形抵抗曲線、二軸引張試験による降伏曲面調査、張出試験による成形限界線の調査などである。これらの情報は後述の有限要素解析や成形限界規準の検討において必要となる。

(2) 伸びフランジ成形性試験：面内引張曲げ試験および従来型の穴広げ試験を実施し、伸びフランジ成形性の調査を行う。重要なポイントは、デジタル画像関連法を用いることにより破断部

周辺のひずみ分布の推移を測定すること、対応する有限要素解析により応力分布の推移も調査することである。このような方法により、フランジ部板縁が凹型・凸型となる相異なる変形様式において、板縁破断部の伸びフランジ成形限界ひずみと、破断部周辺の応力・ひずみ分布の関連を実験的に明らかにする。

(3) 伸びフランジ成形性に影響を及ぼす因子の検討：実験結果と有限要素解析に基づき、破断部周辺の応力・ひずみ分布がどのように板縁の伸びフランジ成形限界ひずみに影響を及ぼすのか、伸びフランジ成形限界に影響を及ぼす主要な因子は何かを明らかにする。

(4) 伸びフランジ成形性の評価・予測法の検討：上述の検討結果を踏まえて、伸びフランジ成形性の普遍的な評価法・予測法を検討する。評価法についてはなるべく簡便な実験で評価できること、予測法については市販の有限要素解析ソフトウェアと連携して実成形問題に適用できることを念頭におく。

4. 研究成果

(1) 2種の破断形態—縁割れと内割れ：面内引張曲げ試験終了時の590R打抜き試験片の曲げ部外側における最大主ひずみ（長手方向ひずみ）分布の代表例を図4に示す。同図(b)の低張力条件（降伏荷重の45%張力）では曲げ外側の板縁を起点としたV字状あるいは斜線状のひずみ集中帯（局部くびれ）が見られ、板縁からき裂が生じた。これを縁割れと称する。一方、同図(c)の高張力条件（降伏荷重の95%張力）ではひずみ集中帯が交差してX字状の局部くびれが形成され、板縁ではなくX字交差部からき裂が生じた。これを内割れと称する。

縁割れと内割れの発生状況の一例（590R材）を表1に示す。付与張力が低い条件では縁割れが発生し、張力が高くなると内割れに移行することがわかる。またレーザカット材よりも打抜き材の方で縁割れが生じやすい。つまり板縁ダメージが大きいほど縁割れが生じやすいと言える。

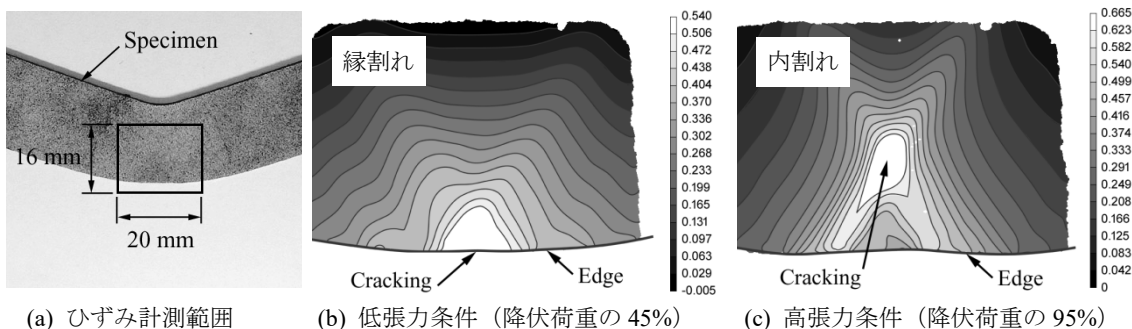


図4 面内引張曲げ試験における590R打抜き加工試験片の最大主ひずみ分布と割れ形態

表1 590Rレーザ加工試験片・打抜き加工試験片の縁割れ・内割れ発生状況
(※表中のT45等は張力条件。T45は降伏荷重の45%張力の意)

張力条件	レーザ加工試験片	打抜き加工試験片
T45	縁割れ	縁割れ
T55	縁割れ	縁割れ
T65	縁割れ	縁割れ
T75	内割れ	縁割れ
T85	内割れ	縁割れ
T95	内割れ	内割れ

(2) 伸びフランジ成形限界ひずみに及ぼすひずみ勾配と試験片加工法の影響：面内引張曲げ試験における伸びフランジ成形限界ひずみは以下のように決定した。図5に面内引張曲げ試験における曲げ外側部のひずみ分布を模式的に示す。試験片長手方向をL軸、幅方向をW軸で表す（L軸の位置は縁割れの場合は板縁から0.5mm、内割れの場合は局部くびれ交差位置とした）。最大主ひずみ ϵ のL方向分布図を描くと、最も発達する局部くびれの位置で ϵ は最大となる。この位置における相当塑性ひずみ速度と測定範囲全体（長さ12mmの範囲）の平均相当塑性ひずみ速度の比をひずみ速度比SRとして定義する。観察の結果SR>2で急速に局部くびれが発達するとみられることからSR=2を閾値として板縁の成形限界ひずみを求めた。

SR=2のときの最も発達した局部くびれ位置における最大主ひずみ ϵ の板幅W方向分布（図5参照）から、板縁から約5mmの範囲の平均ひずみ勾配、および板縁での成形限界ひずみを求め、この両者の関係をまとめたものが図6である。ひずみ勾配が増加するにつれて成形限界ひずみが増加すること、高張力条件でひずみ勾配が小さいときに内割れ、低張力条件ひずみ勾配が大きいときに縁割れとなることがわかる。また成形限界ひずみとひずみ勾配の関係においては、縁割れ時にはワイヤカット加工試験片に比べてレーザ加工試験片や片打抜き加工試験片の成形限界ひずみが若干低い傾向がみられるが、内割れ時には試験片加工法の影響は顕著ではない。この傾向は590Y材、590R材ともに共通であった。

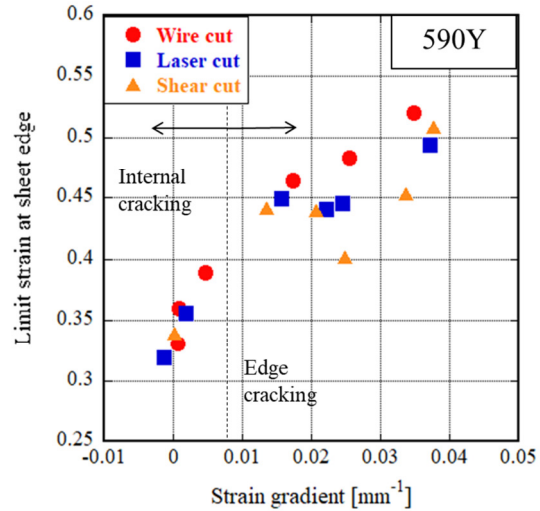
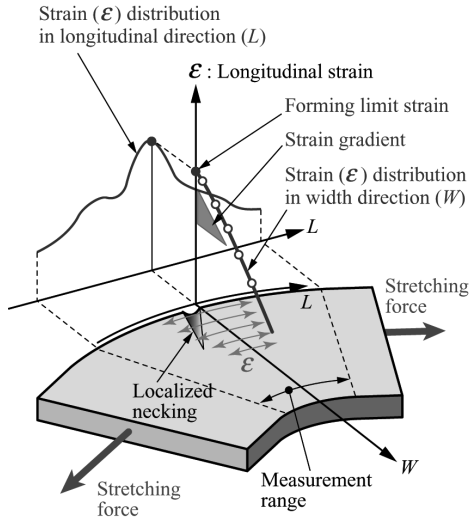


図5 面内引張曲げにおける曲げ外側板縁部のひずみ分布、成形限界ひずみ、ひずみ勾配の模式図 図6 590Y 試験片の面内引張曲げにおける板縁の伸びフランジ成形限界ひずみとひずみ勾配の関係

(3) 伸びフランジ成形限界に及ぼす材料強度レベルの影響：表1に示したように590MPa級高張力鋼板の面内引張曲げでは内割れ・縁割れの2種の破断形態が見られたが、より強度の高い780MPa、980MPa級高張力鋼板の面内引張曲げでは多くの場合縁割れが生じ、内割れはほとんど見られなかった。また、780Y、980Y級高張力鋼板では実験で得られたひずみ勾配の範囲が小さく、ひずみ勾配と伸びフランジ成形限界ひずみの関係が明瞭ではなかった。

590Y、590R、780Y、980Yの全4鋼種のレーザ加工試験片について、同一のひずみ勾配 0.02 mm^{-1} における縁割れの伸びフランジ成形限界ひずみを求め、材料の引張強さとの関係を整理したものが図7である。同図より、材料の引張強さの増加に対して面内引張曲げの伸びフランジ成形限界ひずみは線形減少するという明瞭な関係を見出すことができる。

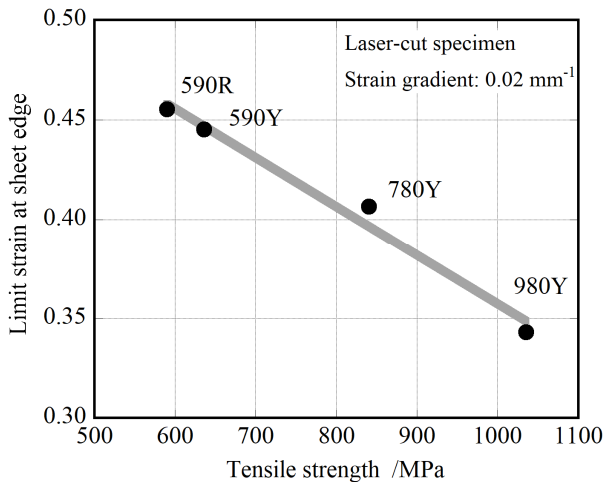


図7 ひずみ勾配が約 0.02 mm^{-1} における伸びフランジ成形限界ひずみと引張強さの関係（ひずみ速度比 $SR=2$ の時点、いずれもレーザ加工試験片）

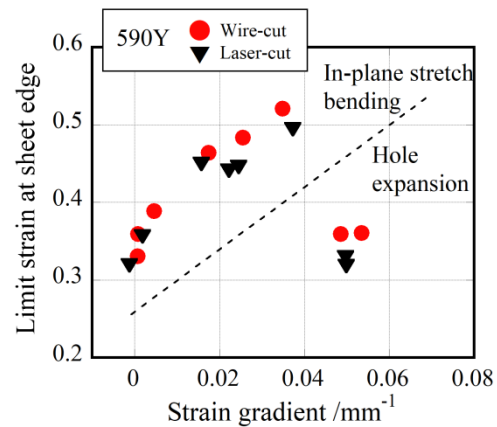


図8 590Y 試験片の面内引張曲げおよび穴広げ試験における板縁・穴縁の伸びフランジ成形限界ひずみとひずみ勾配の関係

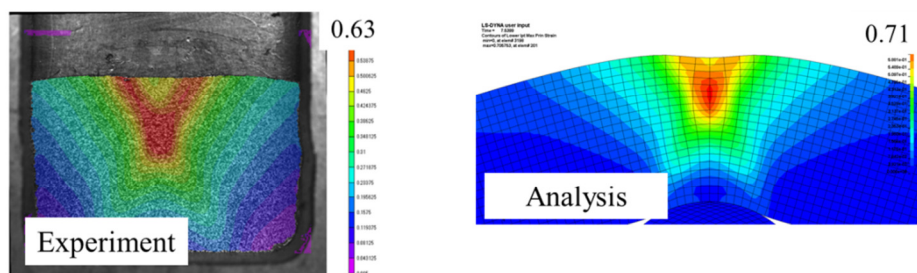
(4) 面内引張曲げ試験と穴広げ試験の比較：面内引張曲げ試験、穴広げ試験の双方において先述のひずみ速度比 SR に基づく伸びフランジ成形限界ひずみを求めた。図8は590Yワイヤカット加工試験片とレーザ加工試験片について、面内引張曲げ・穴広げ双方の伸びフランジ成形限界ひずみとひずみ勾配の関係をまとめたものである。同図中の破線より上側が面内引張曲げ試験結果、下側が穴広げ試験結果のプロットであり、両試験の縁割れ限界は同一規準で比較しても一致しないことがわかる。したがって板縁が凹型となる穴広げ試験で得られた伸びフランジ成形限界のデータは板縁が凸型となる面内引張曲げ変形には適用できないし、その逆もまた然りである。

(5) 面内引張曲げにおける伸びフランジ成形限界の解析的予測：有限要素解析による面内引張曲げの伸びフランジ成形限界予測を正確に行うためには、異方性降伏関数と試験片長手方向における大ひずみ域の加工硬化特性を高精度で与えることが肝要である。

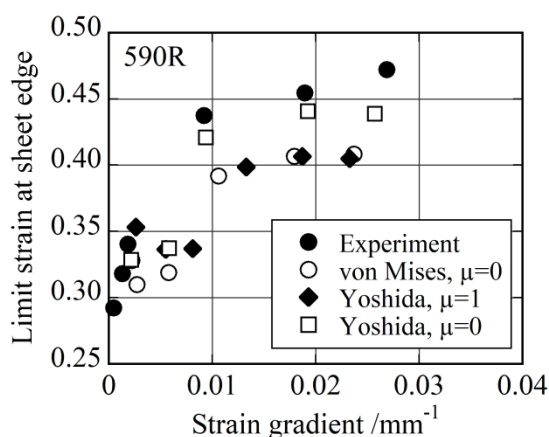
異方性降伏関数としては表現性の高い吉田6次異方性降伏関数を選定し、まず種々の条件下で二軸引張試験を実施することで降伏曲面（等塑性仕事面）の実験データを取得し、この実験結果

に合致するように降伏関数の異方性パラメータを決定した。大ひずみ域の加工硬化特性については、硬化永続型の Swift 型硬化則と硬化収束型の Voce 型硬化則に重み係数を乗じて足し合わせた重ね合わせ型硬化則で表現することとした。重み係数の決定は面内引張曲げ試験におけるひずみ履歴やひずみ速度比履歴の解析結果が対応する実験結果と一致するように決定した。

以上のように異方性降伏関数と大ひずみ域の加工硬化特性を考慮して LS-DYNA による面内引張曲げ試験の FEM 解析を行い、応力・ひずみ分布の変化やひずみ速度比の履歴を求め、実験と同様にひずみ速度比 SR に基づく伸びフランジ成形限界ひずみを決定した。その結果の一例を図 9 に示す。同図は 590R ワイヤカット加工試験片について、最大主ひずみ分布や伸びフランジ成形限界ひずみとひずみ勾配の関係における実験結果と解析結果を比較したものである。同図 (a) のひずみ分布においては内割れのひずみ分布形態、ひずみの局所化を適切に表現できている。同図 (b) の伸びフランジ成形限界ひずみについても、異方性降伏関数と大ひずみ域の加工硬化特性を適切に与えた解析結果 (□プロット) は実験結果 (●プロット) の傾向を (やや安全側予測ではあるが) 的確に再現できていることがわかる。



(a) 降伏荷重の 85%張力条件 (内割れ) における最大主ひずみ分布の実測結果 (左) と計算結果 (右)



(b) 伸びフランジ成形限界ひずみとひずみ勾配の関係

図 9 面内引張曲げ試験における 590R ワイヤカット加工試験片の最大主ひずみ分布と伸びフランジ成形限界ひずみ—実験結果と解析結果の比較

以上、本研究課題で得られた結果を改めて整理すると以下のようなになる。①590MPa 級高張力鋼板の面内引張曲げにおいて、低張力時に板縁から割れる縁割れ、高張力時に板縁から離れた位置を起点とする内割れが生じる。②縁割れにおける伸びフランジ成形限界ひずみとひずみ勾配は大きく、内割れにおけるそれらは小さい傾向がある。つまりひずみ勾配の増大に伴い伸びフランジ成形限界ひずみは大きくなる。③780MPa・980MPa 級高張力鋼板の面内引張曲げでは多くの場合縁割れが生じ、内割れはほとんど見られない。④板縁ダメージの大きい打抜き材では、ワイヤカット材・レーザ切断材に比べて縁割れが生じやすい。⑤伸びフランジ成形限界ひずみは材料強度にほぼ反比例して低下する。⑥同一のひずみ勾配条件下では面内引張曲げの伸びフランジ成形限界ひずみは穴広げ試験のそれより大きい。⑦有限要素解析による面内引張曲げの伸びフランジ成形限界予測については、異方性降伏関数と試験片長手方向における大ひずみ域の加工硬化特性を高精度で与えれば、ワイヤカット材・レーザ切断材については概ね予測可能と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 日野隆太郎, 渡部広大, 甲斐悠太, 吉田総仁
2. 発表標題 高張力鋼板の面内引張曲げ試験におけるひずみの局所化解析
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 日野隆太郎, 甲斐悠太, 間地健太
2. 発表標題 数種の高張力鋼板の面内引張曲げにおける伸びフランジ成形限界の比較
3. 学会等名 2021年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土屋淳, 間地健太, 甲斐悠太, 日野隆太郎
2. 発表標題 面内引張曲げにおける高張力鋼板のひずみ分布と縁割れ限界に及ぼす材料強度と試験条件の影響
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部広大, 日野隆太郎, 吉田総仁
2. 発表標題 高張力鋼板の面内引張曲げにおける伸びフランジ成形限界の実験観察と数値解析
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 日野隆太郎, 渡部広大, 甲斐悠太
2. 発表標題 高張力鋼板の面内引張曲げにおけるひずみ局所化解析に及ぼす材料モデルの影響
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 甲斐悠太, 渡部広大, 日野隆太郎
2. 発表標題 高張力鋼板の面内引張曲げおよび穴広げにおける縁割れ限界
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡部広大, 葛川剛士, 日野隆太郎, 吉田総仁
2. 発表標題 高張力鋼板の面内引張曲げにおける破断形態
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 Ryutaro Hino, Gustavo Capilla, Hiroshi Hamasaki, Koudai Watanabe, Fusahito Yoshida
2. 発表標題 In-plane stretch-bending test for determination of large-strain workhardening and fracture of sheet metals
3. 学会等名 The 13th International Conference on the Technology of Plasticity (ICTP2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
メキシコ	University of Guanajuato			