

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05080

研究課題名(和文) 抵抗スポット溶接重ね継手の静的強度に及ぼす荷重角度依存性の解明

研究課題名(英文) Dependence of Load Angle on Static Strength of Resistance Spot Welded Lap Joints

研究代表者

北村 貴典 (KITAMURA, Takanori)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70274553

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：異なる母材引張強さの鋼板を用いた抵抗スポット溶接重ね継手に斜め方向に荷重負荷した際の継手強度に及ぼす荷重角度依存性を調査した結果、全ての鋼板で荷重角度が増加すると一旦低下し、最下点を示した後に増加する傾向があることを明らかにした。また、FEMを用いてマクロな鋼板の変形や応力状態を精度よく推定する手法を確立した。マクロな力学モデルを援用することで複合荷重下における抵抗スポット溶接継手の強度評価方法が確立できた。さらに破面観察結果およびFEMによる破断直前の板厚方向応力分布計算結果から母材強さが高い鋼材では2枚の鋼板間の開き角度増大に伴う鋼板の曲げが大きく影響する因子であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

抵抗スポット溶接された継手に引張せん断荷重や十字引張荷重が重畳した、いわゆる多軸応力が作用するような複合荷重下での強度についてはJISやISOなどの国内外の規格では規定がなく、ほとんど検討されていない。よって、荷重角度と継手強度の因果関係を示す因子は国内外ともに検討された例はほとんど無かった。また、斜め方向に引っ張る荷重の角度によっては規格で規定された引張せん断強度、十字引張強度より低い荷重で破断する実験結果を示した。この事実は溶接継手構造物の強度設計を見直す必要を示唆している。この強度低下要因、継手強度の荷重角度依存性を明らかにしたことが本研究の意義である。

研究成果の概要(英文)：The dependence of joint strength on loading angle was investigated for resistance spot welded lap joints with steel plates of different base metal tensile strengths when loaded in the slant direction. As a result, it was found that the joint strength of all steel plates tended to decrease once and then increase after showing the lowest point as the loading angle increased. A method for accurately estimating the macroscopic deformation and stress of steel plates using FEM was also established. By using the macroscopic mechanical model, a strength evaluation method for resistance spot welded joints under combined loading was established. Furthermore, from the observation of the fracture surface and the stress distribution calculated by FEM, it was confirmed that the bending deformation of the steel plate is a factor that significantly influences the strength of the joint in steels with high base metal strength.

研究分野：溶接力学

キーワード：抵抗スポット溶接 継手強度 複合荷重 高張力鋼板 荷重角度依存性

### 1. 研究開始当初の背景

図1に示すように日本工業規格(JIS)では、抵抗スポット溶接重ね継手の強さの試験方法として引張せん断試験(JIS Z 3136)、十字引張試験(JIS Z 3137)が規定されている。抵抗スポット溶接継手の引張せん断強度、十字引張強度については、多くの強度予測式が提案されている。特に、十字引張強度と開き角度の関係式では母材部に働く荷重と開き角度を関係付けた式で実験結果が整理されている。ここで、実環境では引張せん断荷重と十字引張荷重が複合した斜め方向の荷重が加わることは明らかである。報告者は図2に示すようなナゲットに対して斜め方向に荷重負荷を与えた複合荷重試験を行ったところ、図3に示すように引張せん断強度、十字引張強度よりも低い荷重で破断することを実験により確認した。Leeら(Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, 1988)も報告者らと同様の複合荷重下での抵抗スポット溶接重ね継手強度試験を行っており、報告者がLeeらの実験結果を整理したところ、報告者の実験結果と同様に強度低下を示す荷重角度が存在することを確認した。

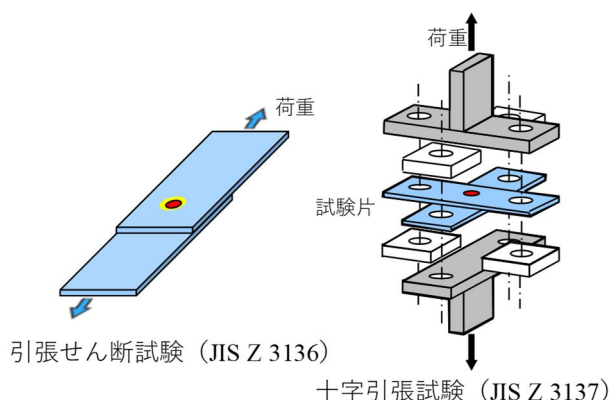


図1 抵抗スポット溶接重ね継手強度試験

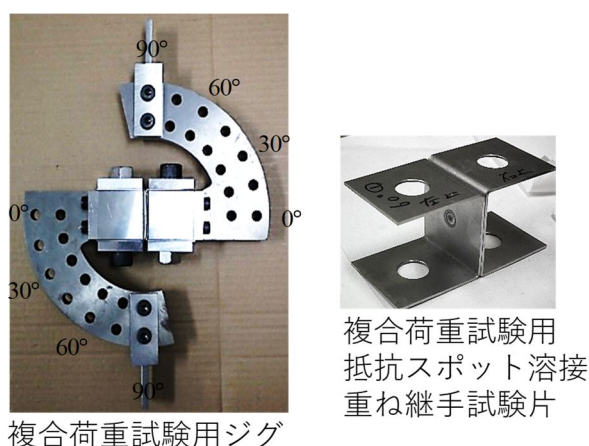


図2 複合荷重試験

### 2. 研究の目的

ナゲットに対して斜め方向に荷重負荷を与えた静的引張試験を行ったところ、引張せん断強度、十字引張強度よりも低い荷重で破断することを実験により確認したが、強度低下を含む継手強度の荷重角度依存性を決定付ける要因が何であるかは明らかにされていなかった。そこで、本研究は抵抗スポット溶接重ね継手に斜め方向に荷重が負荷した場合の静的強度に及ぼす荷重角度依存性を解明し、強度評価技術を確認することが研究目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究は抵抗スポット溶接重ね継手に対して斜め方向に荷重が負荷した場合の静的強度に及ぼす荷重角度依存性を解明し、強度評価技術を確認することである。

最初に、異なる母材引張強さの高張力鋼板を用いて複合荷重下における引張試験を実施し、継手強度に及ぼす荷重角度依存性を実験的に検討した。さらに、母材強さが継手強度の荷重角度依存性に及ぼす影響をマクロ的な観点から理論的に検討した。供試材料として板厚 1.6 mm の高張力鋼 HT980, HT590, および熱間圧延軟鋼 SPHC を用いた。作製した抵抗スポット溶接重ね継手を複合荷重試験用のジグに取り付けて荷重角度 0°~90°の間で変化させて複合荷重試験を行い、継手強度を求めた。

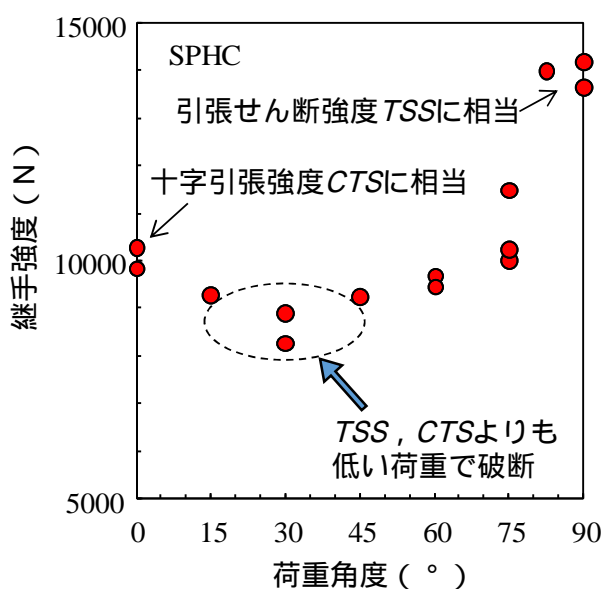


図3 複合荷重試験による抵抗スポット溶接重ね継手強度試験結果

また、破断直前の試験片外観より開き角度を求めた。また、実験値を基に最大荷重負荷時のトラス構造と仮定したマクロな力学モデルから継手強度の推定値を算出し、実験値と比較を行った。

次に、母材引張強さの異なる高張力鋼板を用いた複合荷重下における引張強度評価と破断形態をマクロ的およびミクロ的な観点から検討した。

また、有限要素法解析については、複合荷重試験の荷重 - 開き角度のマクロ的な挙動を精度よく再現できる弾塑性解析手法を最初に検討した。次に、荷重角度を変えた複合荷重試験をシミュレートし、ナゲット近傍の応力集中部における相当塑性ひずみに注目し、複合荷重試験における荷重角度の違いと相当塑性ひずみ発生量の関係から破断メカニズムを検討した。

ここまでの研究成果（後述）として、複合荷重下での抵抗スポット溶接継手の破断メカニズムを検討したところ、母材強さが高い鋼材では曲げ負荷が残った段階で破断することを有限要素法解析により明らかにした。そこで、曲げ負荷がより支配的となる L 字継手試験片の継手強度試験を実施し、強度支配因子の検討を行った。また、抵抗スポット溶接重ね継手の強度については重ね部の 2 枚の鋼板の開き角や回転角といった板自体の変形が継手強度に影響を及ぼすことがここまでの実験結果より示唆された。そこで、板の変形が複雑となる荷重角度が大きな場合と同等である引張せん断試験で板の変形と継手強度の関係について検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 研究の主な成果

異なる母材引張強さの高張力鋼板を用いて複合荷重下における引張試験を実施し、継手強度に及ぼす荷重角度依存性を実験的に検討した結果を図 4 に示す。HT980、HT590 および SPHC を用いた抵抗スポット溶接継手の複合荷重引張試験において、荷重角度が増加していく際に継手強度は一旦低下し、最下点を示した後増加する傾向があることを明らかにした。また、同じ板厚で異なる母材引張強さの場合、590 MPa 級までは継手強度は増加し、980 MPa 級では継手強度は変わらない、もしくは低下することを明らかにした。さらに、継手強度の実験値とマクロな力学モデルから推定した継手強度を図 4 に実線で併記する。実験結果と予測結果はおおむね一致し、複合荷重下での継手強度の荷重角度依存性はマクロな力学モデルで説明できることを示した。

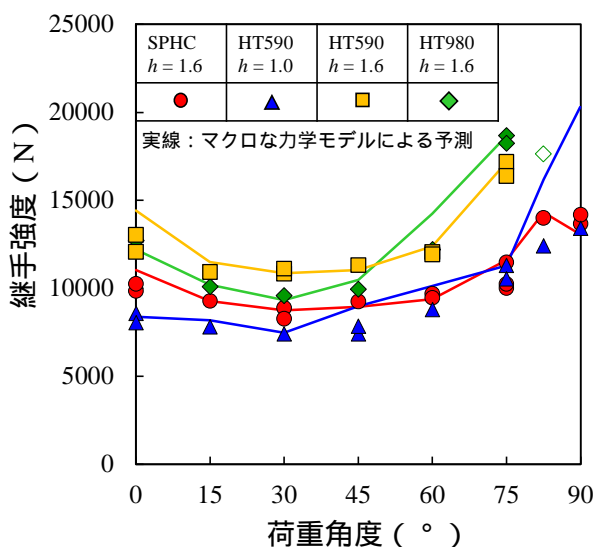


図 4 異なる母材強さの鋼板を用いた複合荷重下での継手強度

次に、高張力鋼板を用いた複合荷重下における引張強度評価と破断形態をマクロ的およびミクロ的な観点から検討した。一例として荷重角度 0°の時の破面写真を表 1 に示す。(b)は板界面側、(c)は板中央部、(d)は板表面側を示している。結果として、SPHC および HT590 においては破面の全面において延性破断を示すディンプルが確認された。それに対して HT980 では 2 枚の板の界面近

表 1 荷重角度0°の各鋼種での破面

0°	(b) 板界面側	(c) 板中央	(d) 板表面側
SPHC			
HT590			
HT980			



傍においてはディンプルが、板中央部から板表面近傍においてはすべりによる破断を示す平らな面が確認された。これは母材引張強さ増加と共に、板表面部と板界面部の応力差が大きくなることで破面に差が生じたものと考えられる。

SPHC および HT590 における複合荷重試験の FEM 解析を行った。解析に用いた FEM モデルの形状を図 5 に示す。図 6 には破断直前の試験片形状を模したマクロな力学モデルを示す。有限要素解析において、ジグによる試験片の拘束を考慮するため、図 6 に示すように実験より得られた内力  $S_{AE}$ 、 $S_{BF}$  および開き角度  $\theta_4$ 、 $\theta_5$  より  $S_{AE}\cos(\theta_4-\theta_1)$  と  $S_{BF}\cos(\theta_5+\theta_1)$  を算出して、仮想的な荷重を与えることでジグ拘束を模擬できるように境界条件を設定した。マクロな変形の一例として HT590 (板厚 1.6mm) で荷重角度  $0^\circ$  の場合の荷重と開き角度  $\theta_5$  の関係を図 7 に示す。実験結果と数値解析結果のマクロな変形は良い一致を示している。これにより軟鋼板のみならず高張力鋼板に対しても複合荷重試験における荷重—変位曲線およびマクロな変形挙動を精度よくシミュレートできる FEM 解析手法を確立できた。

次に、荷重角度を変えた複合荷重試験をシミュレートし、ナゲット近

傍の応力集中部における相当塑性ひずみに注目し、複合荷重試験における荷重角度の違いと相当塑性ひずみ発生量の関係から破断メカニズムを検討した。図 8 は、SPHC の荷重角度  $\theta_5=0^\circ$  における板長方向の応力  $\sigma_x$  分布であり、紫●、青●、緑●、黄●、赤(破断)●の順で変化を示している。また、図 9 は図 8 の各時点における内部応力の模式図を示している。紫●は試験開始直後であり曲げ応力のみが作用している。青●はさらに曲げ応力が増し応力の勾配は大きくなるが降伏応力に達する箇所が出てくるため、S 字の応力分布となる。緑●は引張応力が生じ始め、それにより青●の応力分布から右に平行移動し降伏箇所が増える。また、加工硬化により降伏点に達した箇所の応力が少し上昇する。黄●は引張応力の影響がより大きくなってはいるものの全面降伏はしておらず曲げ応力が残っている。赤●は全面降伏しており、均等に応力が作用している。

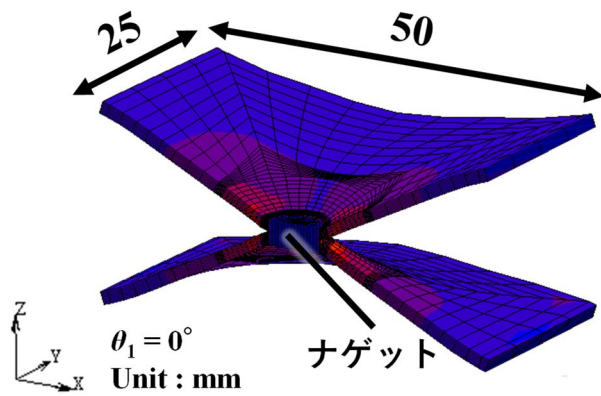


図 5 FEMモデル

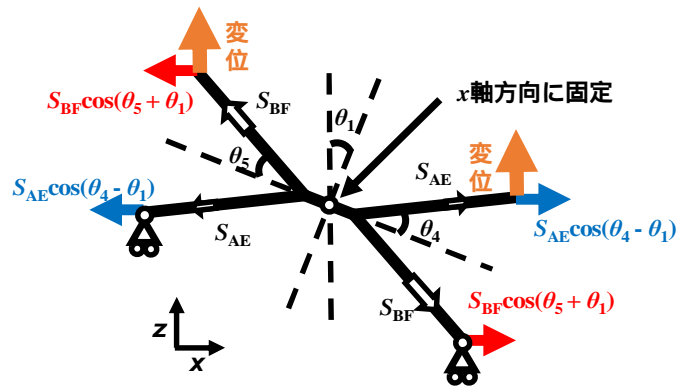


図 6 ジグの拘束を考慮した境界条件

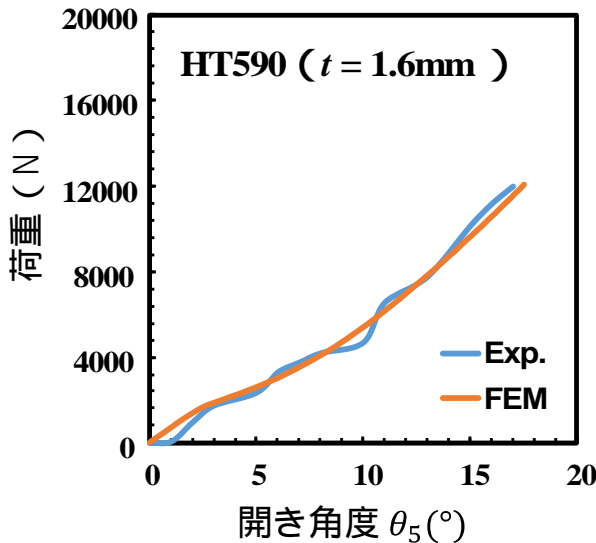


図 7 荷重と開き角度の関係

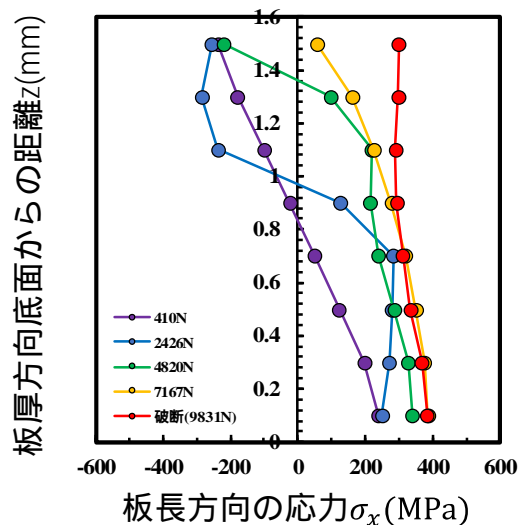


図 8 荷重角度  $0^\circ$  での  
応力の板厚方向分布

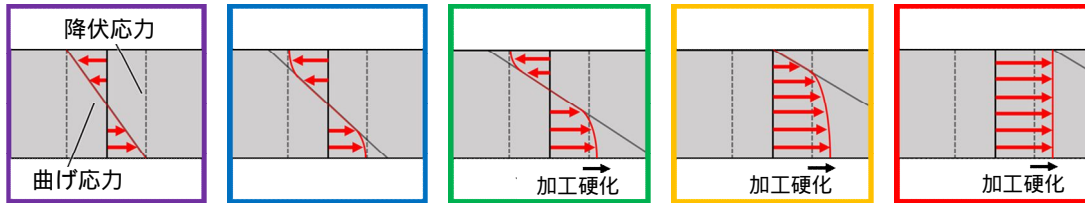


図9 荷重角度0°での内部応力の模式図

本解析では、SPHCは赤●の時点で破断し、HT590は黄●の時点で破断している。したがって、母材強さが異なっていたとしても破断に至るまで同様のプロセスを経ると考えられる。しかし、母材強さが高い鋼材ほど紫●に近くなり、破断に対する曲げ荷重の影響が大きくなるため、鋼材によって破断メカニズムは異なる。よって、母材強さが低い鋼材では全面降伏した後に引張荷重が主体となって破断すること、母材強さが高い鋼材では曲げ荷重が残った段階で破断することを明らかにした。

以上の検討から、複合荷重下での抵抗スポット溶接継手強度については、2枚の鋼板間の開き角度増大に伴う鋼板の曲げが大きく影響する因子であることを確認した。そして、本研究で確立した数値解析手法を用いて、2枚の鋼板間の開き角度を精度よく推定し、力学モデルを援用することで複合荷重下における抵抗スポット溶接継手の強度評価方法が確立できた。

## (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

抵抗スポット溶接された継手に引張せん断荷重や十字引張荷重が重畳した、いわゆる多軸応力が作用するような複合荷重下での強度についてはJISやISOなどの国内外の規格では規定がなく、ほとんど検討されていない。Leeら(Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, 1988)は複合荷重下での強度について楕円側による整理を行っているが、この結果を報告者が整理したところ、引張せん断強度、十字引張強度より低い荷重で破断する実験結果を示した。報告者も同様の試験を行い強度低下することを確認した。しかしながら、この強度低下要因、継手強度の荷重角度依存性は明らかにされていなかった。これらを明らかにしたことが本研究の位置づけである。

## (3) 今後の展望

本研究において、抵抗スポット溶接継手の強度はナゲット(接合部)近傍の鋼板の変形に大きく影響を受けることが判明した。そこで、この板の変形を適切にコントロールできれば継手強度向上を図ることができるものと考えられる。板の変形をコントロールする方法として抵抗スポット溶接以外の接合方法を併用することで実現できるものと考えられる。そこで、本研究の今後の展望としては、板の変形をコントロールする手法としてろう接に注目し、抵抗スポット溶接と併用した新たな継手強化法の開発が期待できるものと考えられる。

## (4) 当初予期していないことが起きたことにより得られた新たな知見

母材引張強さの異なる鋼板を用いた複合荷重試験をシミュレートした数値解析結果から、母材強さが低い鋼材では全面降伏した後に引張荷重が主体となって破断すること、母材強さが高い鋼材では曲げ荷重が残った段階で破断することを明らかにした。

これを受けて、曲げ荷重が主体となるL字継手の強度について検討した。さらに、継手強度と重ね部の2枚の鋼板自体の変形との関係を実験により検討した結果、L字継手の強度は2枚の鋼板の開き角度とナゲット端から引張軸までの距離が継手強度に大きな影響を与える因子であることを確認した。また、板の変形が複雑な荷重角度が大きな場合と同等である引張せん断試験について、板の変形と継手強度の関係について検討した結果、重ね継手の引張軸のずれに伴う接合部の回転変形よりも、2枚の鋼板の開口変形が継手強度に大きな影響を与える因子であることを確認し、ナゲット周囲の鋼板の変形抑制による継手強度向上効果も確認した。

## <参考文献>

Y. Lee, T. Wehner, M. Lu, T. Morrissett, E. Pakalns : Ultimate Strength of Resistance Spot Welds Subjected to Combined Tension and Shear, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, 26, 3 (1988), 213-219.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kitamura Takanori, Akiyama Tetsuya, Uemura Atsuro, Mihara Chinatsu	4. 巻 85
2. 論文標題 Effect of Combined Use of Brazing or Soldering around the Nugget on Tensile Shear Strength of Resistance Spot Welded Lap Joint	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Institute of Metals and Materials	6. 最初と最後の頁 345 ~ 351
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/jinstmet.J2020065	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11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩谷航希, 川端智也, 北村貴典, 秋山哲也
2. 発表標題 抵抗スポット溶接重ね継手における継手部近傍の板の変形と継手強度の関係の解明
3. 学会等名 日本金属学会九州支部 日本鉄鋼協会九州支部 軽金属学会九州支部合同学術講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野大輔, 近野 謙, 北村貴典, 秋山哲也
2. 発表標題 FEM解析による抵抗スポット溶接L字継手の引張強度に及ぼすアーム長さの影響の解明
3. 学会等名 日本金属学会九州支部 日本鉄鋼協会九州支部 軽金属学会九州支部合同学術講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平山 響, 長沢 瑞樹, 北村 貴典, 秋山 哲也
2. 発表標題 抵抗スポット溶接を用いた差厚L字継手における引張強度支配因子の解明
3. 学会等名 令和3年度溶接学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今村 光宏, 川端 智也, 岩谷 航希, 北村 貴典, 秋山 哲也, 植村 篤郎, 渡邊 海香
2. 発表標題 板の変形抑制による抵抗スポット溶接重ね継手の引張せん断強度の高強度化
3. 学会等名 令和3年度溶接学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今村光宏, 北村貴典, 秋山哲也, 川端 智也, 岩谷航希
2. 発表標題 抵抗スポット溶接重ね継手の引張せん断強度に及ぼすナゲット周囲の板の変形の影響
3. 学会等名 JAAA2021 シンポジウム「先進自動車製造技術における接合技術2021 (Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2021)」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平山 響, 北村 貴典, 秋山 哲也, 瀧崎真太郎, 近野 謙, 河野大輔
2. 発表標題 抵抗スポット溶接L字継手の引張強度に及ぼすアーム長さの影響
3. 学会等名 JAAA2021 シンポジウム「先進自動車製造技術における接合技術2021 (Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2021)」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近野 謙, 瀧崎 真太郎, 平山 響, 北村 貴典, 秋山 哲也
2. 発表標題 鋼板を用いた抵抗スポット溶接L字継手の引張強度評価
3. 学会等名 令和2年度溶接学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川端 智也, 今村 光宏, 北村 貴典, 秋山 哲也, 植村篤郎, 三原 知夏
2. 発表標題 抵抗スポット溶接重ね継手の変形と引張せん断強度の関係の解明
3. 学会等名 令和2年度溶接学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川端智也, 小林裕貴, 秋山哲也, 北村貴典
2. 発表標題 高張力鋼板を用いた抵抗スポット溶接重ね継手の複合荷重下での継手強度
3. 学会等名 日本金属学会九州支部 日本鉄鋼協会九州支部 軽金属学会九州支部合同学術講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林裕貴, 川端智也, 秋山哲也, 北村貴典
2. 発表標題 複合荷重試験における高張力鋼板を用いた抵抗スポット溶接継手強度の荷重角度依存性
3. 学会等名 令和元年度溶接学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林裕貴, 川端智也, 秋山哲也, 北村貴典
2. 発表標題 複合荷重試験における高張力鋼板を用いた抵抗スポット溶接継手強度の荷重角度依存性
3. 学会等名 溶接学会 2019年度 秋季全国大会
4. 発表年 2019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
---------	---------