

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760512  
 研究課題名 (和文) 省エネルギーと継手効率 100%を両立した  
 薄板レーザー溶接重ね継手の接合条件  
 研究課題名 (英文) The joining conditions of laser welded lap joint  
 which was compatible with energy conservation and 100% of joint efficiency  
 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・助教  
 研究者番号：70274553

## 研究成果の概要：(200文字程度)

一般に、溶接継手の静的な性能は「継手の引張強度」を「母材の引張強さ」で割った「継手効率」で評価されている。継手効率=100%を保証しつつ、より小さい接合部面積を実現できる溶接接合条件を提案し、その有効性を示すことを研究目的とした。実験と数値解析により検討したところ、板厚の3倍の振れ幅で円弧状に溶接することにより、小さな接合部面積で高強度を有する溶接重ね継手を作成できることを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	0	2,500,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	240,000	3,540,000

## 研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：レーザー溶接, 重ね継手, 接合条件, 省エネルギー, 継手効率

## 1. 研究開始当初の背景

自動車車体などの薄板構造物ではテイラードブランク製法が多く採用されている。テイラードブランク材の組立溶接ではプレス品同士の溶接となるため、継手が重ね継手形状となり、従来より抵抗スポット溶接が用いられてきた。抵抗スポット溶接は2つの電極で重ね部を挟む必要があり、これが構造設計の自由度を拘束し、軽量化、高剛性化の妨げとなっていた。近年登場したレーザー溶接は重ね部の一方から溶接すればよいため、重ね部を挟む必要がなく、軽量化、高剛性化を実現するための構造を採用することが可能となった。一般に、溶

接継手の静的な性能は継手の引張強度を母材の引張強さで割った「継手効率」で評価されている。溶接継手の引張強度は母材の引張強さと同等、すなわち継手効率 $\eta = 1$  (100%)が理想であり、例えば、压力容器の設計に関するJIS B 8565および8266では要求される継手効率が明確に規定されている。

重ね継手の場合、上下2枚の板の接合部の面積が十分大きいことが継手効率 $\eta = 100\%$ を保証するための一つの目安となる。

レーザー溶接の特徴は小入熱、高速溶接で深い溶込みが得られることであり、この特徴が重ね継手へのレーザー溶接の適用を期

待されている施工上の主な理由である。しかしながら、細い溶接ビードとなるため、接合部面積は従来のアーク溶接などと比べて小さくなり、継手効率の観点から見ると上記のレーザー溶接の特徴がかえってデメリットとなっている。よって、必要以上の接合部面積を得ようとする（接合部面積を大きくすると、大入熱、低速溶接、もしくは溶接ビードが複数本必要となるなど省エネルギー化、高生産効率の観点からは逆行してしまう。

以上のことから、継手効率 $\eta = 100\%$ を保証できる接合部面積の最小値をどのように設定できるかが省エネルギー化のポイントである。

## 2. 研究の目的

レーザー溶接重ね継手における継手効率 $\eta = 100\%$ を保証するために必要十分な接合部面積を明らかにすること、さらに、実用化のために、継手効率 $\eta = 100\%$ を保証しつつ、より小さい接合部面積を実現できる溶接接合条件をビード形状を工夫することにより提案し、その有効性を示すことを研究目的とした。

## 3. 研究の方法

Fig.1 に静的引張試験に用いた試験片形状を示す。実験には板厚 $h=2.2\text{mm}$ の自動車用熱間圧延鋼板 SPHC を使用し、 $600^\circ\text{C}$ で1時間保持後、炉冷の残留応力焼鈍を施したものを

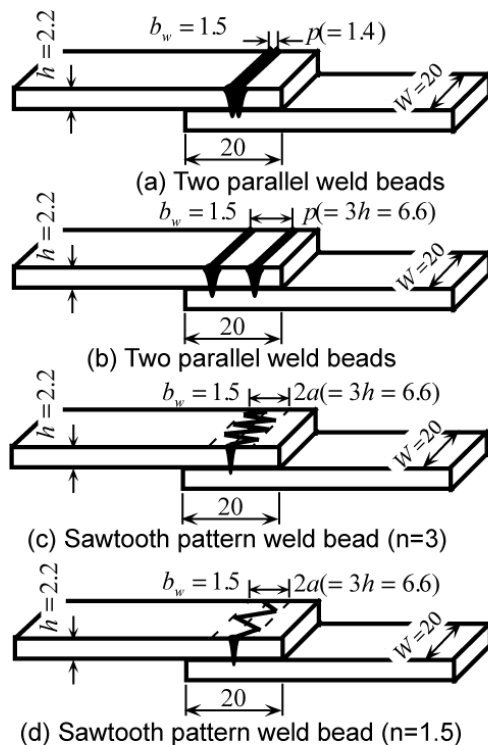


Fig.1 Various weld bead pattern of lap joint specimens

使用した。引張強さは $274\text{MPa}$ である。溶接はYAGレーザー溶接機を用いた。Fig.1に示すように幅 $W=20\text{mm}$ に短冊状に切り出した。重ね代は $20\text{mm}$ とした。溶接ビード形状として、Fig.1(a)に示すビード2本を狭いビード間隔( $p=1.4\text{mm}$ )で平行に置いた重ね継手、Fig.1(b)に示すビード2本を広いビード間隔( $p=6.6\text{mm}$ )で平行に置いた重ね継手および試験片幅 $20\text{mm}$ に波数3個(以下では、 $n=3$ とする)の鋸歯形状溶接重ね継手(Fig.1(c))と試験片幅 $20\text{mm}$ に波数1.5個(以下では、 $n=1.5$ とする)の鋸歯形状溶接重ね継手(Fig.1(d))を用いて静的引張試験を行った。

また、実験で使用した試験片について、数値解析により破断の基点となる応力集中部における最大相当塑性ひずみを計算し、これを用いて継手強度を推定できるか否か検討した。

## 4. 研究成果

重ね継手の静的引張強度試験を行った結果、全ての試験片において、荷重増加と共に継手部を中心に2枚の板の荷重軸のずれを一致させる向きに回転変形が生じ、Fig.2に示すような、3種類の破断位置を示した。Fig.2(a)は継手部でせん断破断する場合、(b)と(c)は母材部で破断する場合である。母材部で破断する場合は(b)に示すように継手接合部近傍で破断する場合と(c)に示すように継手部から離れた位置で破断する場合を示した。

Fig.3に本研究で取り上げた重ね継手溶接ビード形状の考え方を示す。Fig.3に示すようにビード2本を狭いビード間隔( $p=1.4\text{mm}$ )で平行に置いた重ね継手よりもビード2本を広いビード間隔( $p=6.6\text{mm}$ )で平行に置いた重ね継手の方が、継手部の回転変形を抑制できるため、静的引張強度が高くなることが期待できる。Fig.4に静的引張試験結果を示す。図の縦軸に静的引張強度をとり、横軸には単位板幅当たりの溶接長(以下では $l_w$ とする)をとって整理している。図中の破線は供試材の引張強さを示している。図中の△印がビード2本を狭いビード間隔( $p=1.4\text{mm}$ )で平行に置いた重ね継手、○印がビード2本を広い

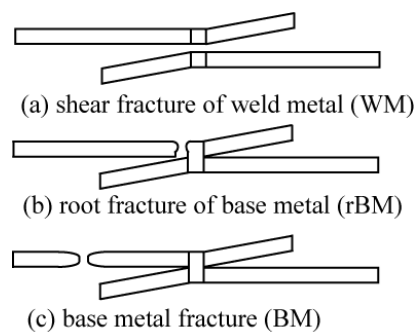


Fig.2 Types of fracture part

ビード間隔 ( $p=6.6\text{mm}$ ) で平行に置いた重ね継手の試験結果である。ビード間隔が狭い継手の方が低い強度を示しており、破断位置も継手部近傍で母材破断 (以下, rBM) となった。一方、ビード間隔が広い継手は供試材の引張強さと同程度の引張強度 (継手効率 100%) を示し、破断位置も継手部から離れた位置で母材破断 (以下, BM) となった。

次に、Fig.3 に示すように細かい鋸歯形状 ( $n=3$ ) と粗い鋸歯形状 ( $n=1.5$ ) の2者について、試験結果を Fig.4 に■印と▲印でそれぞれ示す。細かい鋸歯形状の継手は供試材の

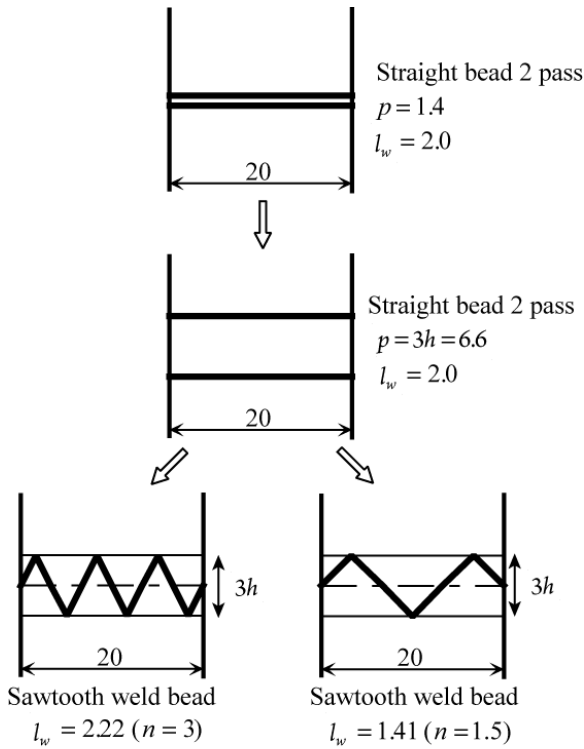


Fig.3 Weld bead pattern of lap joint

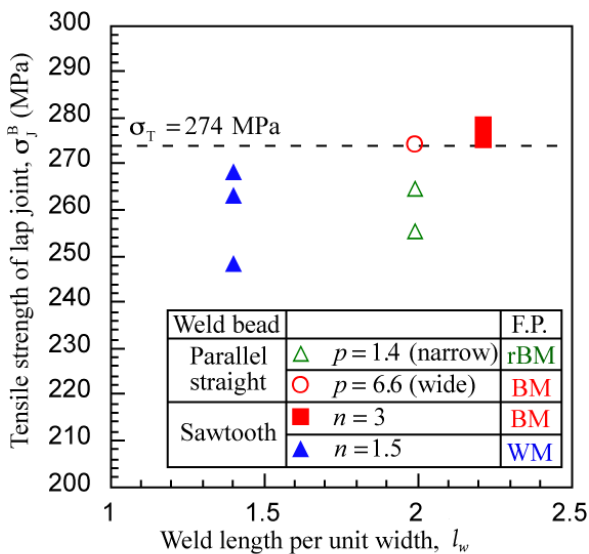


Fig.4 Influence for strength of lap joint by different weld bead pattern

引張強さと同程度の引張強度を示し、破断位置も BM となった。しかし、粗い鋸歯形状の継手は低い強度を示し、破断位置も継手部でせん断破断 (以下, WM) となった。

溶接ビードを平行に置いた試験片の単位板幅当たりの溶接長は  $l_w=2.0\text{mm}$  となるので、コストの面からも、母材部で破断して供試材の引張強さと同程度の引張強度を示し、かつ、 $l_w < 2.0\text{mm}$  となる鋸歯ビード形状が望まれているが、 $n=1.5$  の鋸歯ビード形状では粗すぎる結果となった。

そこで、Fig.5 に示すように、試験片幅 20mm 当たりの波数  $n=2$  となる鋸歯ビード形状重ね継手を作成し、静的引張試験を行った。結果を Fig.6 に●印で示す。Fig.6 には比較のため、Fig.4 に示した実験結果も Fig.4 の場合と同じ記号で併記している。Fig.6 に示すように、 $n=2$

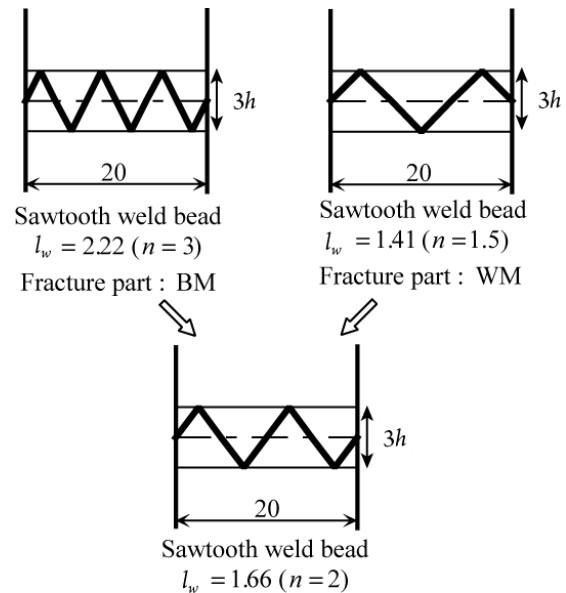


Fig.5 Sawtooth weld bead pattern of lap joint

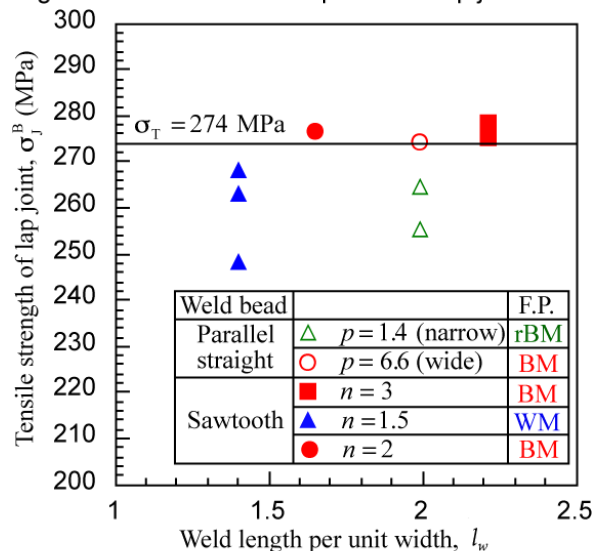


Fig.6 Influence for strength of lap joint by different weld bead pattern

の鋸歯ビード形状重ね継手は供試材の引張強さと同程度の引張強度を示し、破断位置もBMとなった。しかも、 $l_w=1.66<2.0\text{mm}$ であり、強度向上と溶接コスト低減を両立した溶接ビード形状として、波数  $n=2$  の鋸歯ビード形状は有効であることがわかる。

ここで、鋸歯ビード形状の場合、形状が山、谷の繰り返しとなるため、頂点では応力集中しやすいものと考えられる。そこで、Fig.7に示すように、粗い鋸歯形状 ( $n=1.5$ ) の重ね継手と波長、振れ幅はそのままビード形状を円弧にした試験片について静的引張試験を行った。試験結果を Fig.8 に▽印で示す。Fig.8 には比較のため、Fig.6 に示した鋸歯ビード形状重ね継手の実験結果も Fig.6 の場合と同じ記号で併記している。Fig.8 に示すように円弧ビード形状にした場合、供試材の引張強さと同程度の引張強度を示し、破断位置もBMとなった。よって、鋸歯ビード形状の場合、頂点での応力集中が強度低下に大きな影響を与えることがわかる。また、鋸歯ビード形状に対して、円弧ビード形状は波長、振れ

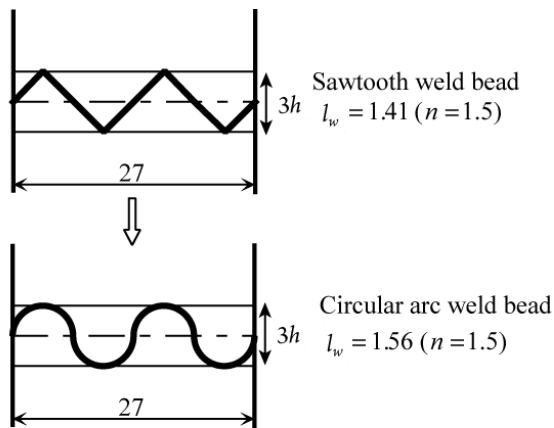


Fig.7 Circular arc weld bead pattern of lap joint

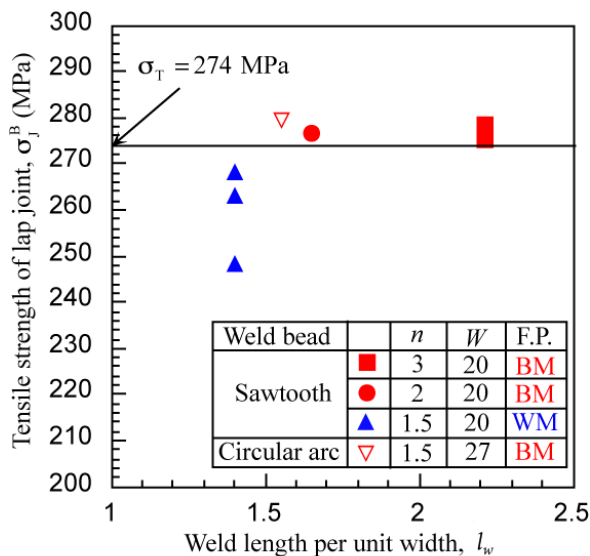


Fig.8 Influence for strength of lap joint by different weld bead pattern

幅が同じ場合は単位板幅当たりの溶接長が長くなるが、頂点での応力集中を緩和できるなど強度向上、溶接コスト低減の観点から有効な溶接ビード形状であることがわかった。

次に、実験で使用した試験片について、数値解析により破断の基点となる応力集中部における最大相当塑性ひずみを計算し、これを用いて継手強度を推定できるか否か検討した。Fig.9に解析に使用した3次元モデルの一例として、2本の直線ビード、鋸歯ビード形状および円弧ビード形状の要素分割モデルを示す。解析コストを低減するため、板幅方向1/2で作成した。解析結果を定量的に比較するため、相当塑性ひずみが最も集中する部分に Fig.10に示すような同寸法・同形状の最小ユニット要素を組み込み、その最小要素における相当塑性ひずみを求めた。なお、比較検討のため、直線ビード形状については、板厚が1.1mmの試験片についても実験を行っており、このモデルについても数値解析を行った。Fig.11に相当塑性ひずみの最大値と母材部の引張応力の関係を示す。引張試験で得られた板厚2.2mmの2本の直線ビードの試験片の破断応力260MPaと Fig.11に示す解析結果から、破断時の限界相当塑性ひずみは1.5となる。この限界相当塑性ひずみ1.5の情報

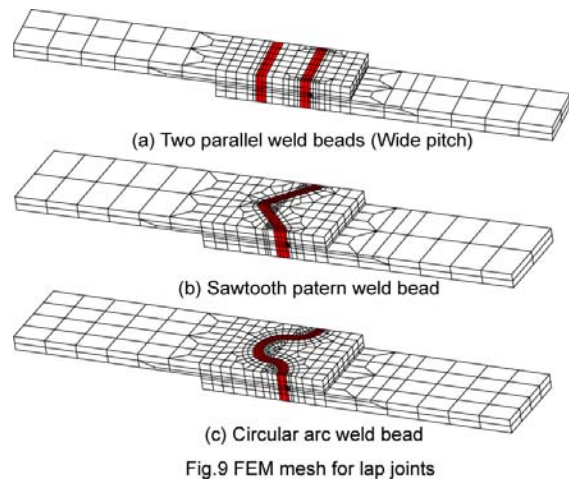


Fig.9 FEM mesh for lap joints

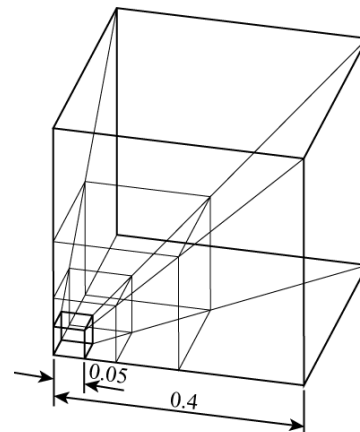


Fig.10 Minimum unit elements

Table 1 Experimental and predicted values of fracture strength

specimen	bead	$h$ (mm)	$W$ (mm)	$b_{w1}$ (mm)	$b_{w2}$ (mm)	$p$ (mm)	FP	$\sigma_J^B$ (MPa)	$\hat{\sigma}_J^B$ (MPa)
SP1	1pass	2.2	19.6	1.5	1.5	1.4	rBM	260	***
SP2	2pass	2.2	19.8	1.5	1.5	6.6	BM	274	274
SP3	1pass	1.1	19.2	0.72	0.0	0.0	BM	260	260
SP4	2pass	1.1	18.3	0.82	0.87	7.0	BM	267	274
SP5	sawtooth	2.2	26.9	1.5	0.0	6.6	WM	259	230
SP6	arc	2.2	27.0	1.5	0.0	6.6	BM	279	245

FP: Fracture position

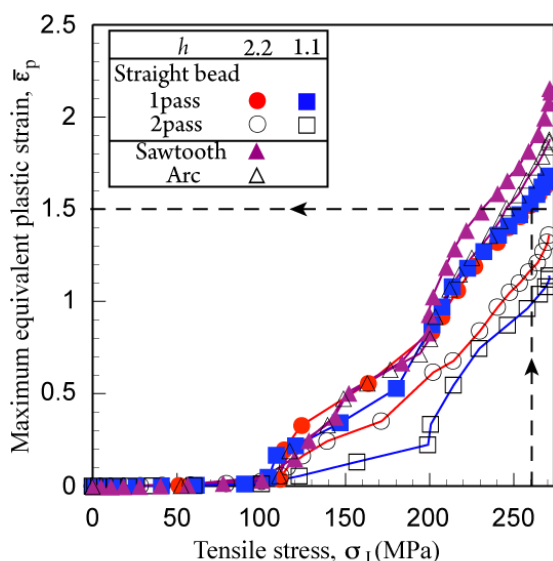


Fig.11 Effect of bead shape on equivalent plastic strain of slit tip

と応力-最大相当塑性ひずみ曲線の交点から各試験片の破断強度を推定した. Table 1 に引張試験で得られた破断応力の実験値と上記のようにして推定した破断応力の推定値を示す. 直線ビードにおいては Fig.11 に示すように, 2 本ビードの最大相当塑性ひずみ値は 1 本ビードに比べ低い結果が得られた. これは, 継手部に生じる回転変形の影響によるものだと考えられる. 重ね継手は負荷に伴い荷重軸のずれを一致させるように接合部が剛体変形し, 接合部近傍の母材部が塑性変形することにより, 継手全体として回転変形を生じる. ビードを 2 本置くことで剛体変形部が長くなるため, 回転角は小さくなり, 母材部の曲げに伴う応力集中が低下する. この傾向は実験結果をよく表現している.

一方, 鋸歯・円弧ビードにおいては Fig.11 に示すように, 限界相当塑性ひずみ値を 1.5 とした場合, 破断応力の推定値は実験値より低い値となり, 推定誤差は 12%であった. また, Fig.11 に示すように全試験片を比較すると, 鋸歯・円弧ビードの最大相当塑性ひずみ値は直線ビードに比べ高く, 実験で得られた傾向と一致しない. しかし, 鋸歯・円弧ビードの 2 つを比較すると, 円弧ビードの最大相

当塑性ひずみ値は鋸歯ビードに比べ低い結果が得られている. これは, 鋸歯ビード頂点部分の曲率を大きくすることで応力集中が低下したのだと考えられ, 実験で得られた傾向を表現できている.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 6 件)

- ①北村貴典, 薄板溶接重ね継手部の強度評価, 溶接学会九州支部 第 1 回 若手グループ研究会 (2009.3.17), 鹿児島県工業技術センター (鹿児島)
- ②T. Kitamura, T. Terasaki, Prediction of Static Fracture Strength of Laser Welded Lap Joint by Numerical Analysis, 8th International Welding Symposium(8WS) (2008.11.18), 国立京都国際会館 (京都)
- ③渡部晋治, 北村貴典, 寺崎俊夫, レーザ溶接重ね継手のはく離荷重に対する継手強度に関する研究, 日本金属学会九州支部 日本鉄鋼協会九州支部合同学術講演会 (2008.6.7), 九州大学 (福岡)
- ④寺崎俊夫, 秋山哲也, 北村貴典, 渡部晋治, 自動車用鋼板を用いたレーザー溶接重ね継手の十字引張強度に関する基礎研究, 平成 19 年度九州工業大学 SVBL 研究成果報告会 (2008.3.11), 九州工業大学 (福岡)
- ⑤北村貴典, 鮫島佳祐, 寺崎俊夫, 武村伸介, 自動車用鋼板のレーザー溶接重ね継手強度に及ぼす鋼板強度とビード形状の影響, 平成 19 年度溶接学会九州支部 研究発表会 (2007.7.27), 九州大学 (福岡)
- ⑥北村貴典, 鮫島佳祐, 寺崎俊夫, 武村伸介, レーザ溶接された自動車用鋼板の重ね継手強度に及ぼす鋼板強度とビード形状の影響, 溶接学会 平成 19 年度 春季全国大会 (2007.4.18), 日本教育会館 (東京)

### 6. 研究組織

(1)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・助教

研究者番号: 70274553