

自動車車体へのレーザー溶接技術の適用

Applications of Laser Welding Technologies to Automotive Bodies

木谷 靖 KITANI Yasushi JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
大井 健次 OI Kenji JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部長・博士 (工学)
玉井 良清 TAMAI Yoshikiyo JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)

要旨

高張力鋼板重ね溶接継手へのリモートレーザー溶接適用および連続溶接適用によるフレーム部品の剛性向上について紹介する。980 MPa 級鋼板の溶接において、リモートレーザー溶接継手は抵抗スポット溶接継手より高い十字引張強さとなり、溶接線サイズを容易に調整できるリモートレーザー溶接がはく離強度向上に有利であることが示唆された。ハット型試験片のフランジ部を抵抗スポット溶接、レーザー溶接、レーザー・アークハイブリッド溶接で溶接を行ない、ねじり剛性を評価した結果、連続溶接であるレーザー溶接、レーザー・アークハイブリッド溶接の方が高い剛性となり、溶接位置をフランジ中央から角部 R 止まりおよび内部とすることでさらに剛性が向上した。

Abstract:

The application of remote laser welding to the high tensile steel sheet lap joint and the rigidity improvement of the frame parts by application of continuous welding were introduced. In the lap welding of 980 MPa grade steel sheet, the remote laser welded joints showed higher cross tensile strength than the resistance spot welded joints. The remote laser welding, which allowed easier control of the weld size, had an advantage for the improvement of peel strength. As a result of torsional rigidity test of the hat shape test pieces whose fringes were welded by resistance spot welding, laser welding and laser-arc hybrid welding, laser and laser-arc hybrid welding as continuous welding provided the higher rigidity. Further changing welding position from the fringe center to the corner end and the inside corner led to improve the rigidity.

1. はじめに

自動車車体に適用される溶接法の 1 つにレーザー溶接がある。レーザー溶接は抵抗スポット溶接やアーク溶接に比べて歴史は浅く、自動車分野においては 1990 年代に高出力 CO₂ レーザの普及に伴い、テーラード・ブランクの溶接に広く適用されるようになった^{1,2)}。その後、光ファイバーによるビーム伝送が可能な高出力 Nd:YAG レーザが市販されるようになり、ロボットによる 3 次元溶接技術が開発され、抵抗スポット溶接に代わって車体組立てに適用された³⁻⁵⁾ が、レーザー設備が高価であること、継手の精度要求が厳しいことなどの理由により限定的な適用に留まった。

近年、Nd:YAG レーザと同様に光ファイバーでのビーム伝送が可能で、高出力かつビーム集光性に優れたファイバーレーザーあるいはディスクレーザーが普及し、改めて自動車車体へのレーザー溶接適用が注目されるようになった。高集光性のレーザーにより実現されたりリモートレーザー溶接^{6,7)} は、溶接時間を大幅に短縮でき、高価なレーザー設備を使用してもコストメリットが得られる溶接法として適用が広まりつつあ

る。また、近年自動車車体の軽量化を目的として、車体部品の高張力鋼板化が進んでいるが、軽量化と強度・剛性の両立のために、抵抗スポット溶接による点溶接からレーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接による連続溶接に転換するというニーズが高まっている。

JFE スチールでは、自動車車体の軽量化ニーズに対応して、優れた特性の鋼板を開発・提供するとともに、それら鋼板による部品性能を高めるための溶接方法として、レーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接技術の開発を行ってきた。本報告では、JFE スチールにおける最近の研究開発例として、高張力鋼板の重ね溶接へのリモートレーザー溶接適用とフレーム部品フランジ部への連続溶接としてのレーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接適用による剛性向上について検討した結果について述べる。

2. 高張力鋼板重ね継手のリモートレーザー溶接

2.1 リモートレーザー溶接の特徴

リモートレーザー溶接プロセスの光学系構成模式図を図 1 に示す。ガルバノスキャナと呼ばれる 2 枚のミラーの角度を高速で制御することにより、ワーク上の一定範囲内でのレー

2014 年 1 月 13 日受付

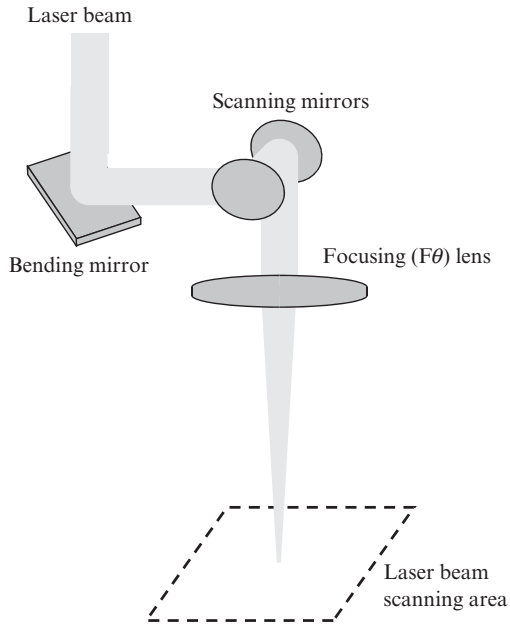


図1 リモートレーザー溶接プロセスの模式図

Fig. 1 Schematic illustration of remote laser welding process

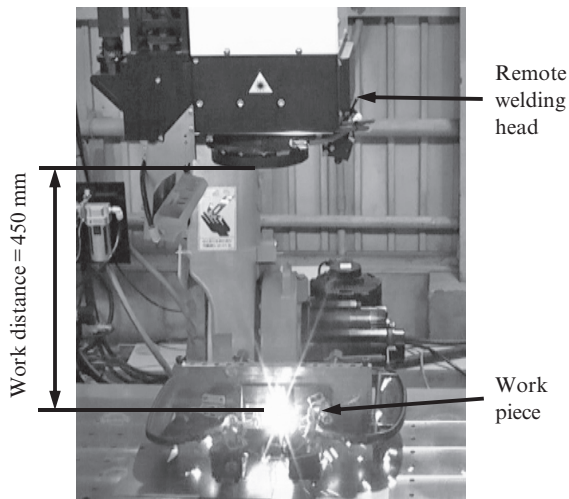


写真1 ロボットリモートレーザー溶接システムの例

Photo 1 Example of robotic remote laser welding system

レーザービーム照射位置を瞬時に移動させることができ、レーザービーム照射範囲内の離れた箇所の溶接をビーム移動時間のロスなく行なうことが可能となる。このレーザービーム照射範囲を大きくするには、焦点距離の長い集光レンズを使用することが有利であり、そのために集光性に優れたファイバーレーザーあるいはディスクレーザーを組合せたシステムが普及している。写真1にロボットによるリモートレーザー溶接システムの例を示す。このシステムでは、ファイバーレーザー発振器、6軸多関節ロボットとガルバノスキャナ光学系を組み合わせ、ワーク距離450 mmでワーク上に200 mmφのビーム照射範囲を実現し、ロボットの動作とガルバノスキャナの制御を同期させた「オン・ザ・フライ」溶接により高効率の溶接施工を可能としている。

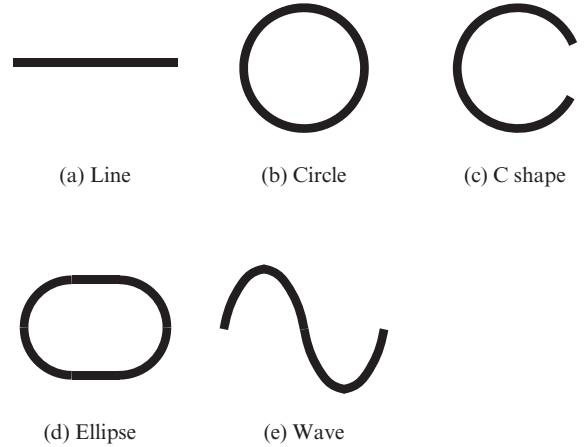


図2 リモートレーザー溶接におけるさまざまな溶接線形状

Fig. 2 Variation of weld line shapes in remote laser welding

リモートレーザー溶接では、レーザービームをガルバノスキャナによって走査するため、ロボット、加工機の動作による溶接と異なり溶接線形状の制約がほとんどない。そのため、図2に示すような直線以外の円、C字、楕円のような曲線、波線などのさまざまな形状で容易に溶接が行なえ、部品形状および必要特性に合わせて溶接線形状を選択することが可能である。

2.2 リモートレーザー溶接による 980 MPa 級高張力鋼板重ね溶接継手の特性

リモートレーザー溶接は抵抗スポット溶接に比べて溶接時間を大幅に短縮できるというメリットがあるが、継手特性についての検討はまだ十分に行なわれていない。そこで、抵抗スポット溶接でしばしば問題とされる高張力鋼板のはく離強度（十字引張強さ）を確認するリモートレーザー溶接試験を行なった。

板厚1.6 mmの980 MPa級高張力鋼板（JFS A 2001, JSC980Y）を使用し、写真1に示したリモートレーザー溶接システムにより写真2に示すように十字引張試験片（JIS Z 3137に準拠）の重ね部中央に直径3~12 mmの円形の溶接線となる貫通溶接を行なった（写真2は直径8 mmの試験片外観）。レーザー溶接条件は、レーザー出力4.0 kW、溶接速度2.5 m/minで、溶接部の断面マクロ組織は写真3に示すとおりとなり、重ね面の溶接金属幅は約0.8 mmであった。

図3にリモートレーザー溶接継手の十字引張試験結果を示す。図中に比較として、溶融ナゲット径5.4 mmの抵抗スポット溶接継手（一般的に要求されるナゲット径 $4\sqrt{t}=5.1$ mm, t :板厚 (mm))の十字引張強さを併せて示す。リモートレーザー溶接継手の十字引張試験破断位置は、すべて溶接金属近傍の母材であった。破断位置の断面観察例を写真4に示す。

リモートレーザー溶接継手の十字引張強さは、溶接線直径の増加に伴い増加し、抵抗スポット溶接のナゲット径と同じ溶接線直径となる継手では、およそ1.5倍程度の強さになる

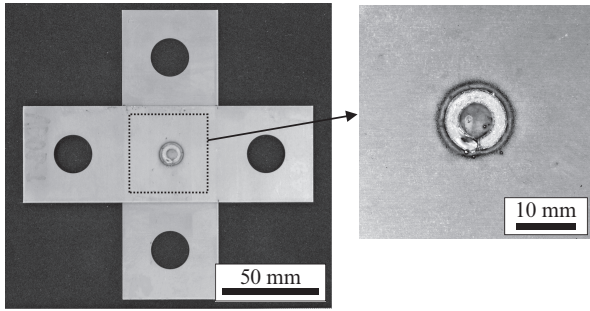


写真2 十字引張試験片の外観（溶接線直径=8mm）

Photo 2 Appearance of cross tension test specimen (Weld line diameter=8 mm)

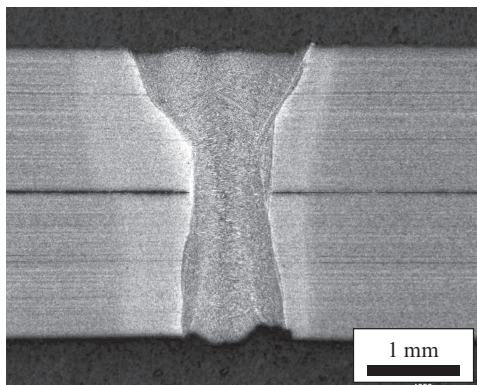


写真3 リモートレーザー溶接部の断面マクロ組織

Photo 3 Macrostructure of cross section of remote laser weld

と見込まれる。このことから、リモートレーザー溶接では980 MPa級の高張力鋼板の継手において、抵抗スポット溶接よりも狭いフランジ幅あるいは溶接サイズで同等以上の引離強度が得られると考えられる。

図4に抵抗スポット溶接およびレーザー溶接における溶接部断面図を模式的に示す。十字引張試験時の破断発生位置は重ね面の溶接金属部あるいはその近傍であるが、抵抗スポット溶接とレーザー溶接ではその位置の形状が異なる。加圧しながら通電によって溶接ナゲットを形成する抵抗スポット溶接では、溶接ナゲット近傍の重ね面にコロナボンドと呼ばれる固相接合領域が存在する。そのため、図4(a)に示したように重ね面の溶接ナゲット境界は非常に鋭い切欠きとなり、大きな応力集中が起こると考えられる。特に、980 MPa級鋼のような高張力鋼板では、溶接ナゲット近傍の熱影響部は硬化が著しいため、この応力集中により低い荷重で引離破断が起こりやすくなる。一方、レーザー溶接では、コロナボンドのような固相接合領域が存在しないため、図4(b)に示したように重ね面の溶接金属部の切欠きは抵抗スポット溶接ほど鋭くなく、応力集中の程度が低くなるため、低い荷重で引離破断が起こりにくい状態になっていると考えられる。よって、レーザー溶接は、抵抗スポット溶接に比べて容易に溶接サイズを拡大させることができることに加え、応力集中が起こりにくい溶接部形状となることから、は

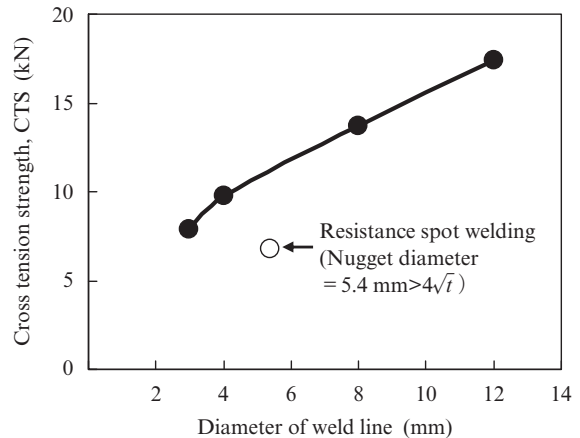


図3 980 MPa級薄鋼板リモートレーザー溶接継手の十字引張試験結果

Fig. 3 Cross tension test result of remote laser welded joints of 980 MPa grade steel sheet

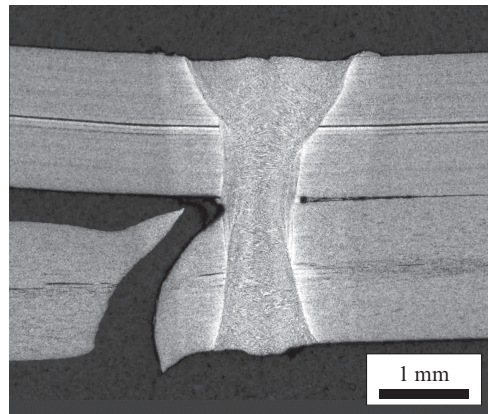


写真4 十字引張試験後の破断部断面マクロ組織例

Photo 4 Example of macrostructure of fracture part after cross tension test

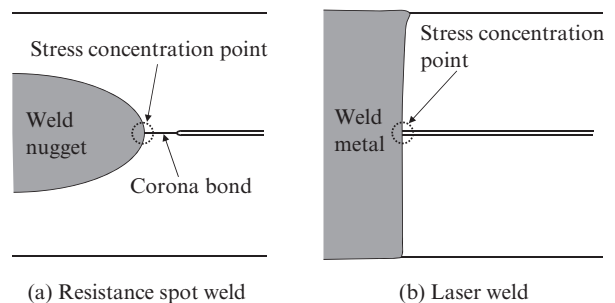


図4 抵抗スポット溶接とレーザー溶接の十字引張試験における破断部の比較

Fig. 4 Comparison of fracture parts in cross tension test between resistance spot weld and laser weld

く引離強度に対して有利な溶接方法であるといえる。

以上の結果から、リモートレーザー溶接は、単に効率的な溶接法であるのみではなく、抵抗スポット溶接で問題となる高張力鋼板継手の引離強度など、継手特性の向上にも優

位性があるということが示唆された。

3. フレーム部品への連続溶接適用による剛性向上

3.1 フレーム部品へのレーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接適用のメリット

自動車車体の軽量化のためには、使用する鋼板を高張力化して板厚を低減することが有効であるが、板厚の低減による剛性低下が懸念される。部品としての剛性は、鋼板特性以外に溶接状態の影響も大きく、抵抗スポット溶接のような点状の溶接に比べてレーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接のような連続溶接が剛性に対して有利であると考えられる。レーザー溶接は、高速・低入熱の溶接方法で、抵抗スポット溶接に比べて狭いフランジ幅での溶接が可能であり、連続溶接化に加えてフランジ削減による軽量化効果も期待できる。レーザー・アークハイブリッド溶接は、アーク溶接を重畳させることにより溶接部に溶着金属を添加でき、レーザー溶接よりも大きなギャップで溶接が可能となるため、継手の精度要求が緩和される。

(株) エイチワン殿では、フレーム部品の軽量化と剛性向上を両立させるために、フレームのフランジ部分に連続溶接を適用することを検討され、レーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接の適用とフランジ溶接箇所の調整による剛性向上効果を明らかにするため、JFE スチールとの共同研究としてハット型試験片による剛性試験を実施した。

3.2 ハット型試験片による連続溶接適用剛性試験

フレーム部品フランジ部の溶接において、抵抗スポット溶接に対する連続溶接としてのレーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接適用による剛性向上効果を検証するため、図5に示す形状のハット型試験片のねじり剛性試験を実施した。このハット型試験片の両側フランジ重ね部を、抵抗スポット溶接（溶接ピッチ：35 mm）、レーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接（全長 800 mm 連続）の3

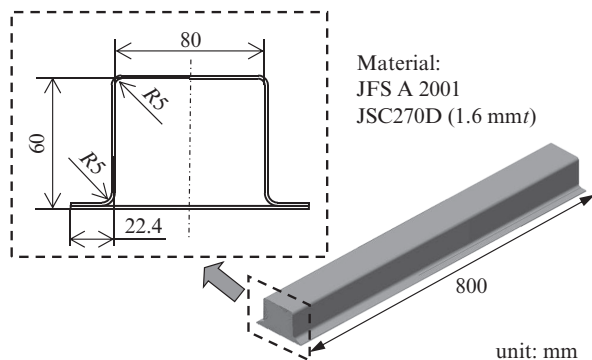


図5 ねじり剛性試験用ハット型試験片
Fig. 5 Hat shape test piece for torsional rigidity test

種の溶接法により溶接した。溶接位置は、図6に示すように、フランジ中央部、角部止まり位置、角内部（角部止まり位置から4 mm 内側）の3種とし、抵抗スポット溶接はフランジ中央部のみ、レーザー溶接はフランジ中央部と角部止まり位置、レーザー・アークハイブリッド溶接は角部止まり位置と角内部の試験片を作製した。表1にレーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接の溶接条件を示す。レーザー・アークハイブリッド溶接は、図7に示すようにレーザービームが先行する形式とした。写真5に、レーザー溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接によるフランジ溶接部の断面マクロ組織を示す。レーザー・アークハイブリッド溶接は、角部止まり位

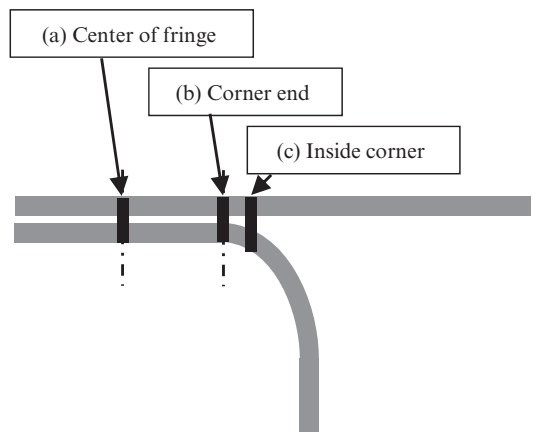


図6 ハット型試験片フランジの溶接位置
Fig. 6 Welding positions at fringe of hat shape test piece

表1 レーザおよびレーザー・アークハイブリッド溶接の溶接条件

Table 1 Welding conditions of laser and laser-arc hybrid welding

	Laser beam welding	Laser-arc hybrid welding
Laser power (kW)	3.0	3.0
Arc current (A)	—	160
Welding speed (m/min)	2.0	2.0
Shielding gas	Ar	Ar-20% CO ₂
Welding wire	—	JIS Z 3312 YGW12 (dia. = 0.9 mm)

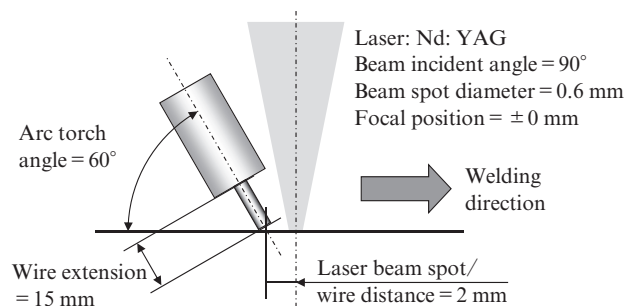


図7 レーザ・アークハイブリッド溶接の模式図
Fig. 7 Schematic illustration of laser-arc hybrid welding

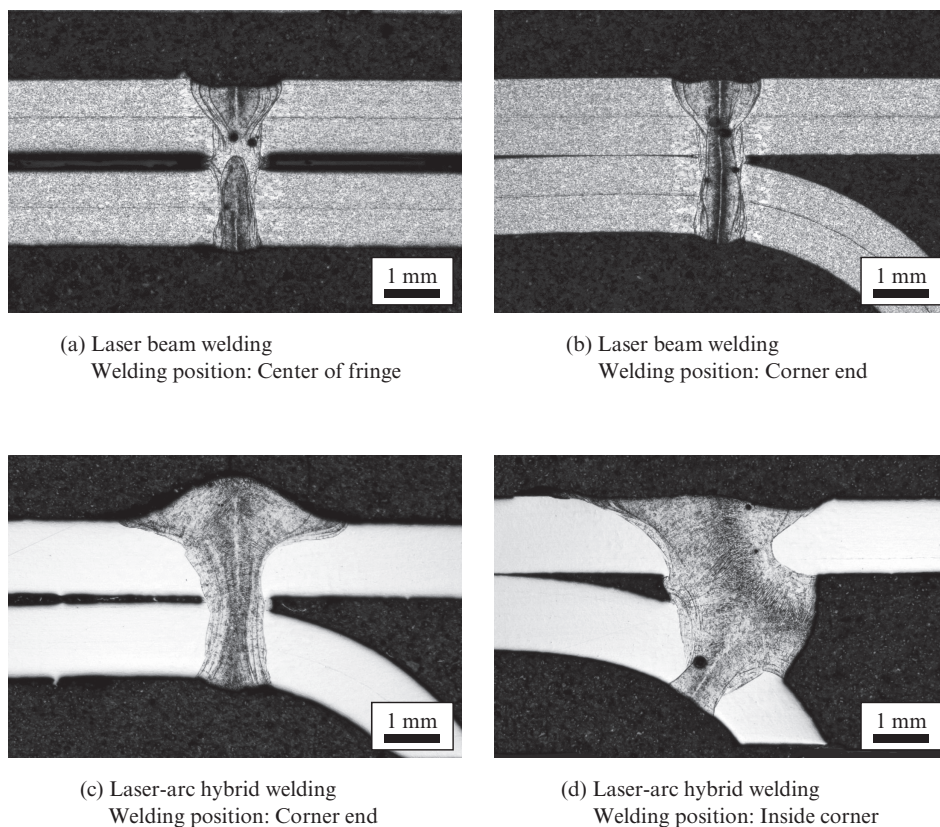


写真5 レーザおよびレーザー・アークハイブリッド溶接部のマクロ組織

Photo 5 Macrostructures of laser and laser-arc hybrid welds

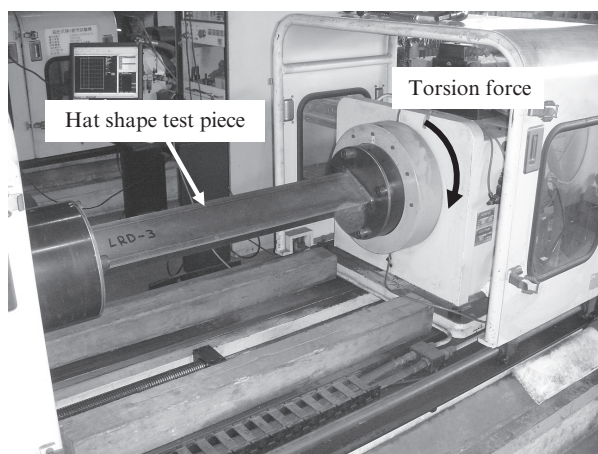


写真6 ねじり剛性試験の状況

Photo 6 Appearance of torsional rigidity test

置ではレーザー溶接よりも溶融幅が広くなり、また角内部では重ね部の隙間に溶着金属が充填されることにより欠陥のない溶接部となった。

作製したハット型試験片を写真6に示すねじり剛性試験に供し、ねじり荷重負荷時の角度-トルク曲線の傾きから剛性値を算出し、抵抗スポット溶接による試験片(溶接ピッチ: 35 mm, 溶接位置: フランジ中央)の剛性値を1とした際の各試験片の剛性値の比率を剛性比として図8に整理した。

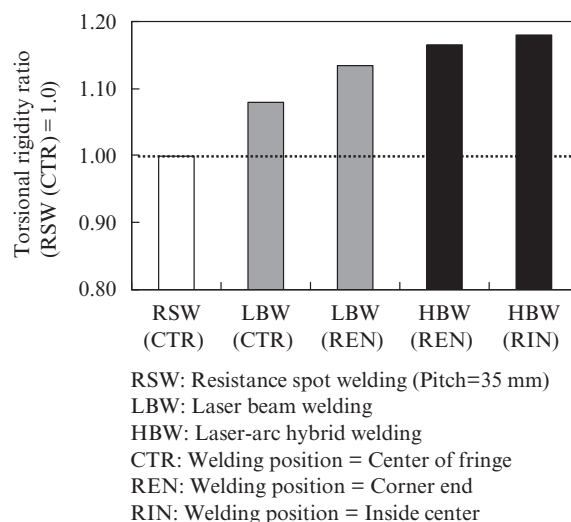


図8 ねじり剛性試験結果

Fig. 8 Torsional rigidity test results

この結果から、抵抗スポット溶接から連続レーザー溶接に置き換えることで約8%の剛性向上(RSW (CTR)とLBW (CTR)の比較)があり、さらに溶接位置を角部止まり位置とすることで約13%の剛性向上(LBW (REN))があることが明らかになった。また、レーザー・アークハイブリッド溶接を適用し角部止まり位置および角内部を溶接することにより、抵抗

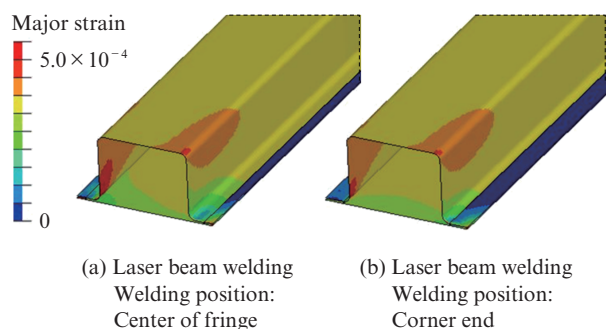


図9 ハット型試験片のフランジ部における主応力分布のCAE解析

Fig. 9 Computer Aided Engineering (CAE) analysis of major strain distribution at fringe area of hat shape test piece

スポット溶接よりも約16~18%の剛性向上があることが明らかになった。

図9に、フランジ中央部をレーザー溶接した試験片(LBW (CTR)) および角部止まり位置をレーザー溶接した試験片(LBW (CTR)) におけるフランジ部の主応力ひずみ分布をCAE (Computer Aided Engineering) 解析により求めた結果を示す。角部止まり位置を溶接した(b)では、フランジ中央部を溶接した(a)に比べ、フランジ中央部から角部止まり位置の範囲の変形が抑制されており、その結果縦壁部に生じるひずみが低減され、試験片のねじり剛性が向上したことが分かる。

以上のことから、フレーム部品のフランジ部の溶接において、連続溶接を適用するとともに溶接位置を選択することで剛性を向上させることが可能であり、鋼板の高張力化・薄肉化と溶接方法の組合せによって軽量化と剛性向上を両立させる可能性が示唆された。

4. おわりに

自動車車体の軽量化ニーズは今後ますます厳格化する傾向にあり、軽量化と車体強度および剛性を両立させるためには、各種の高機能高張力鋼板を有効に活用するとともに溶接技術を開発することが重要である。本報告では、抵抗ス

ポット溶接に代わる溶接法として、リモートレーザー溶接および連続溶接としてのレーザー溶接、レーザー・アークハイブリッド溶接の最近の研究開発事例を紹介した。レーザー溶接はこれまで設備が高価であることが実適用の障壁となっていたが、リモートレーザー溶接のような機器の発展による効率化や高張力鋼板による部品の連続溶接化のニーズ拡大などを背景に、今後自動車車体の溶接への普及が進むことが期待される。JFE スチールでは、レーザー溶接に関する新技術の開発および実用化を推進し、自動車ユーザー各社での高張力鋼板の適用拡大による車体軽量化および安全性向上への貢献に注力したいと考えている。

フレーム部品への連続溶接適用による剛性向上について、共同研究として各種試験の実施に協力いただき、また本報告への記載を許諾いただいた株式会社エイチワン武部洋行主任、杉原文彦主任補および関係各位殿に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 池本公一, 杉浦宏明, 東和男, 有馬幸一, 高砂俊之. 塑性と加工. 1991, vol. 32, no. 370, p. 1383-1390.
- 2) 森清和, 伊藤之修, 西島直哉, 浪形誠, 坂元宏規. 日産技報. 1994, no. 35, p. 121-126.
- 3) 白井雅人. レーザ加工学会論文集. 2002, no. 55, p. 1-6.
- 4) 樽井大志, 森清和, 長谷川隆久. レーザ加工学会論文集. 2005, no. 64, p. 46-51.
- 5) Loeffler, Klaus. レーザ加工学会論文集. 2005, no. 64, p. 1-6.
- 6) 空田和彦. レーザ加工学会論文集. 2007, no. 68, p. 147-150.
- 7) 吉川暢広, 樽井大志, 森清和, 坂本剛. レーザ加工学会論文集. 2010, no. 73, p. 53-56.



木谷 靖



大井 健次



玉井 良清