

自動車シャシー用溶接技術の開発

Development of Welding Technologies for Automotive Chassis

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)
松田 広志	MATSUDA Hiroshi	JFE スチール	スチール研究所	接合・強度研究部	主任研究員 (部長)・博士 (工学)
松下 宗生	MATSUSHITA Muneo	JFE スチール	スチール研究所	接合・強度研究部	主任研究員 (課長)・Ph. D.
山本 俊佑	YAMAMOTO Shunsuke	JFE スチール	スチール研究所	表面処理研究部	主任研究員 (副課長)
安藤 聡	ANDO Satoru	JFE スチール	スチール研究所	表面処理研究部	主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
池田 倫正	IKEDA Rinsei	JFE スチール	スチール研究所	接合・強度研究部長	博士 (工学)

要旨

自動車シャシー部品の溶接継手に要求される疲労強度および耐食性の向上あるいは高効率化を満足できる新溶接技術について紹介する。低 CO₂ ガスシールドアーク溶接は、溶接ビード止端部形状の改善と溶接スラグの低減に効果があり、高い耐食性および腐食環境下での高い継手疲労強度を実現できた。プラズマ・アークハイブリッド[®]溶接は、重ね隅肉溶接における溶接ビード止端部を平滑化することにより、極めて高い継手疲労強度を達成できた。レーザ・アークハイブリッド溶接は、高速・高効率の溶接で、重ね継手のシートギャップ管理精度を緩和することが可能で、閉断面構造のシャシー部品への適用が期待できる。

Abstract:

New welding technologies which can satisfy the requirements of high fatigue strength, high corrosion resistance and high productivity for the welded joints of automotive chassis parts are introduced. Low CO₂ gas shielding arc welding was effective to improve the weld toe shape and to reduce the welding slag, which realized high corrosion resistance and high fatigue strength of welded joint in corrosion environment. Plasma-arc hybridTM welding achieved very high fatigue strength of welded joint by flattening weld toe shape in lap fillet welding. Laser-arc hybrid welding with high speed and high productivity enabled to mitigate the sheet gap control accuracy and is expected to apply the chassis parts with closed section structures.

1. はじめに

自動車の燃費向上のための車体軽量化のニーズはシャシー(足回り)部品においても例外ではなく、近年はシャシー部品にもより高強度のハイテン材が使用されるようになり、その使用比率も増加する傾向にある。シャシーは車体重量を支え、走行中の繰返し荷重変動を吸収する役割を担うため、剛性および耐久性が特に重要となり、ボディに比べて板厚が大きい熱延鋼板が多用される。シャシー部品の製造には主に重ね隅肉継手の形態でガスシールドアーク溶接が適用されているが、溶接継手に対する要求特性としては疲労強度が最重要となる。溶接継手の疲労特性については、使用する鋼板の強度を高くしても溶接ビード部への応力集中が原因となって溶接継手の疲労強度が向上しないことが知られている。そのため、ハイテン材を使用したシャシー部品の溶接においては、溶接継手の疲労強度の向上が最大の課題であるといえる。

また、シャシー部品は走行中に路面からの水分飛散を受け錆が発生しやすい環境に曝されるため、耐久性という観点では耐食性(防錆性)も重要となる。シャシー部品は耐食性の保証のために塗装が施されるが、ガスシールドアーク溶接部は溶接ビード表面に付着するスラグなどによって塗装性が低下し、結果としてシャシー部品の耐食性を低下させることが問題視されている。

以上述べたように、シャシーに適用される溶接技術には、溶接継手の疲労強度および耐食性を向上させることが強く望まれている。継手の疲労強度および耐食性が向上されなければ、ハイテン化による薄肉化のメリットが得られず、部品の軽量化も実現することが困難となる。ここでは、従来のガスシールドアーク溶接に比べて溶接継手の疲労強度、耐食性を向上させることが可能な溶接技術として、低 CO₂ 組成のシールドガスを使用する低 CO₂ ガスシールドアーク溶接技術およびプラズマ・アークハイブリッド[®]溶接技術を紹介する。また、シャシー部品の構造変更に対応する高効率・高品質の溶接法として、レーザ・アークハイブリッド溶接技術の開発について言及する。

2017年12月4日受付

2. 低 CO₂ ガスシールドアーク溶接技術

2.1 低 CO₂ ガスシールドアーク溶接技術が解決しようとする課題

先に述べたように、シャシー部品のガスシールドアーク溶接では継手の疲労特性と耐食性の向上についてのニーズが大きい。溶接継手の疲労特性は溶接ビード止端部での応力集中の影響が支配的なため、ハイテン化によって継手の疲労強度向上効果は得られにくい。また、腐食による板厚減少は鋼板強度によらず生じるため、腐食減厚量を考慮して鋼板を選定する場合、ハイテン化によって薄肉化を図ることが困難になる。溶接部では、溶接ビードおよびその止端部に付着するスラグが塗膜欠陥の原因となり、その欠陥を起点として腐食が進行する。継手の疲労強度は溶接ビード止端部の応力集中により低下するが、実車の使用環境では腐食による鋼板の減厚により疲労強度はさらに低下することが懸念される。これらの課題に対して、活性ガス (CO₂) の混合比率を低減したガスシールドアーク溶接法である低 CO₂ ガスシールドアーク溶接法の適用を検討し、溶接ビードの止端部形状改善および耐食性向上を図り、実使用におけるシャシー部品の疲労特性を大幅に向上可能なアーク溶接技術を開発した^{1,3)}。

2.2 シールドガス組成による溶接ビード形状の変化¹⁾

写真1に、シールドガスとして通常のMAG溶接で使用されるAr-20%CO₂混合ガスとCO₂混合比率を低下させたAr-5%CO₂混合ガスを使用した場合の重ね隅肉溶接継手(板厚2.3mm, 400MPa級熱延鋼板)の断面マクロ組織を示す。シールドガスの低CO₂化により溶接ビード止端部形状は平滑化することが分かる。図1にレーザ変位計による溶接ビ-

ド表面形状の測定結果とFEMによる平面曲げ荷重負荷時の応力分布計算結果を示す。FEM解析は、測定結果で得られた形状でモデルを作成(溶接部を含めてすべて均一な鋼と仮定し物性値としてヤング率206000N/mm², ポアソン比0.3, 密度7.85g/m³を付与)して実施した。図1は荷重247N負荷時における応力分布である。この図から、応力集中は溶接ビード止端部近傍に生じるが、シールドガスのCO₂混合比率を20%から5%に低減することによって止端部は平滑化され、止端部に作用する最大引張応力が11%低下することが分かる。

2.3 アーク溶接部の腐食挙動に及ぼすシールドガス組成の影響²⁾

写真1で示した溶接継手に、自動車ボディおよびシャシーの一般的な塗装として行われる化成処理および膜厚20μmの電着塗装を施し、腐食試験(塩水浸漬→乾燥→湿潤サイクルの繰り返し)を行った。写真2に腐食試験中の溶接部表面外観を示す。Ar-20%CO₂シールドガスの場合、溶接ビードおよびビード止端部に塗膜欠陥が存在し、その欠陥から錆が発生し塗膜下で腐食が進展する。この塗膜欠陥は、断面観察結果から溶接時に付着するスラグに起因することが判明している。一方、Ar-5%CO₂シールドガスの場合、溶接ビード周辺に塗膜欠陥は観察されず、腐食の進展は極めて軽微となる。

図2にAr-20%CO₂シールドガスでの溶接ビード止端部近傍における平均腐食深さの変化を示す。この図に示すように腐食深さの大きい箇所はビード止端部近傍に存在する。図3に、腐食試験における溶接部の最大腐食深さの時間変化を示す。Ar-20%CO₂シールドガスの場合、30サイクルまでは腐食深さは増加せず、この期間は止端部近傍の塗膜下で腐食が進展しているが鋼の腐食深さが検出されるレベル

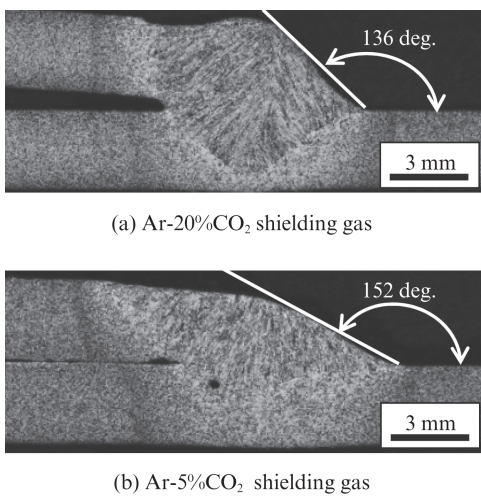


写真1 重ね隅肉溶接部の断面マクロ組織
Photo 1 Cross-sectional macrostructures of lap-fillet welds

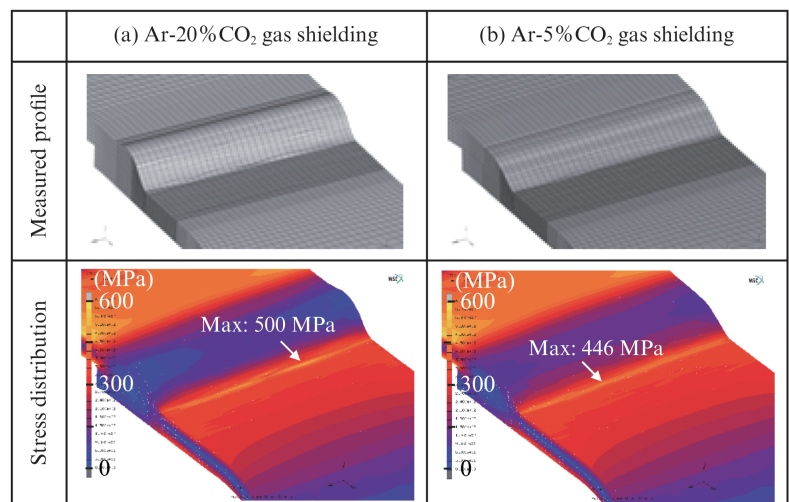


図1 溶接部周辺の応力分布計算結果
Fig. 1 Calculated stress distributions around weld part

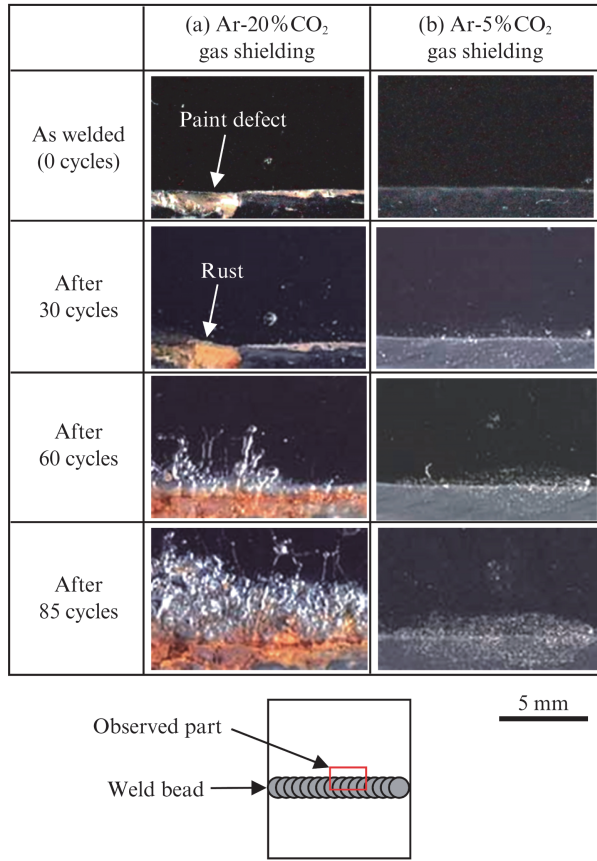


写真2 腐食試験中の溶接部外観の変化

Photo 2 Change in weld part appearance during corrosion test

ではなく、塗膜の防錆機能が持続していると考えられる。30 サイクル以降では、無塗装(裸)の試験片とほぼ同じ速度(図3のグラフの傾きが同じ)で腐食が進む。これはビード止端部近傍においてスラグを起点とした塗膜下腐食が進行し、早期に塗膜がはく離して防錆機能が失われたためであると考えられ、塗装による防錆効果がほとんどないレベルまで耐食性が低下したことを示している。一方、Ar-5% CO₂ シールドガスの場合、塗膜欠陥の原因となるスラグが付着せず、下地の鋼の腐食は認められなかった。

以上の試験結果から、アーク溶接部の耐食性の低下は、溶接ビードおよびその止端部周辺に付着した溶接スラグによって塗膜欠陥が発生し、塗膜欠陥を起点として塗膜下で腐食が進展し、塗膜が剥離した部分で裸材と同様の状態で下地の鋼の腐食が進行するために起こると考えられる。スラグ生成の原因となるCO₂ガスの組成を低減したAr-5% CO₂ ガスシールドアーク溶接法では、塗膜欠陥がほとんど発生しないため、腐食環境下でも塗膜の防錆機能が持続され、耐食性が向上したと考えられる。

2.4 アーク溶接継手の疲労特性に及ぼすシールドガス組成の影響³⁾

腐食試験により実使用環境で5年、10年および15年経過

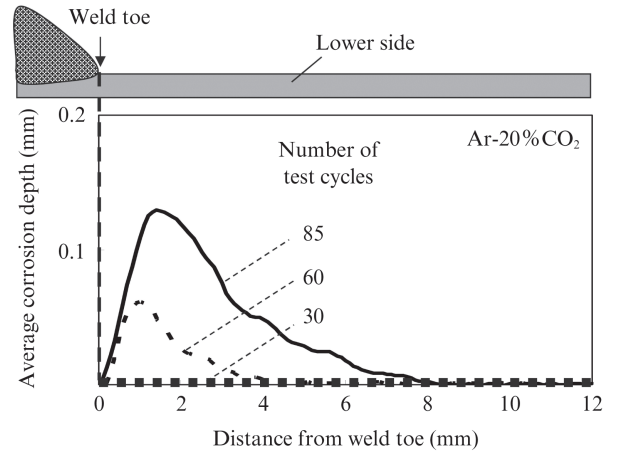


図2 溶接ビード止端部近傍における平均腐食深さの変化
Fig. 2 Change in average corrosion depth near weld toe

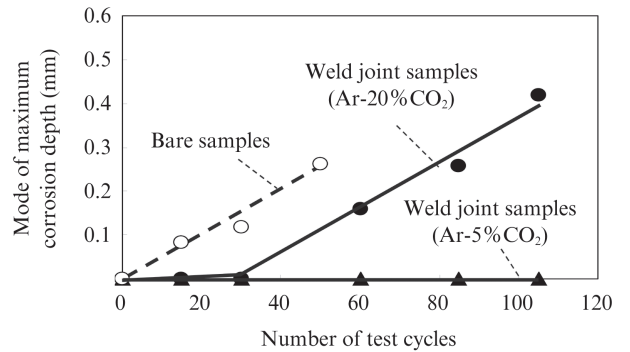


図3 腐食試験時における最大腐食深さの変化

Fig. 3 Change in maximum corrosion depth during corrosion test

に相当する腐食後溶接継手を作製し、シェンク式平面曲げ疲労試験機を用いて完全片振りの疲労試験を実施した。図4に溶接継手の疲労試験結果を示す。Ar-20% CO₂、Ar-5% CO₂ いずれのシールドガスの溶接方法においても、腐食前と5年経過相当の腐食後の溶接継手で疲労強度はほとんど変化せず、シールドガスによる差異もなかった。これに対し、10年および15年経過相当の腐食後の疲労強度は、Ar-20% CO₂ シールドガスでは大きく低下するのに対し、Ar-5% CO₂ シールドガスではほとんど低下しなかった。この差異は、前述したようにシールドガス中のCO₂混合比率を低減したことにより溶接スラグの生成が抑制され、溶接ビード止端部周辺の腐食減量すなわち継手表面形状および板厚の変化が低減されたことによるもので、低CO₂ガスシールドアーク溶接法は腐食後の継手疲労強度低下抑制に大きな効果があるという結果が示された。

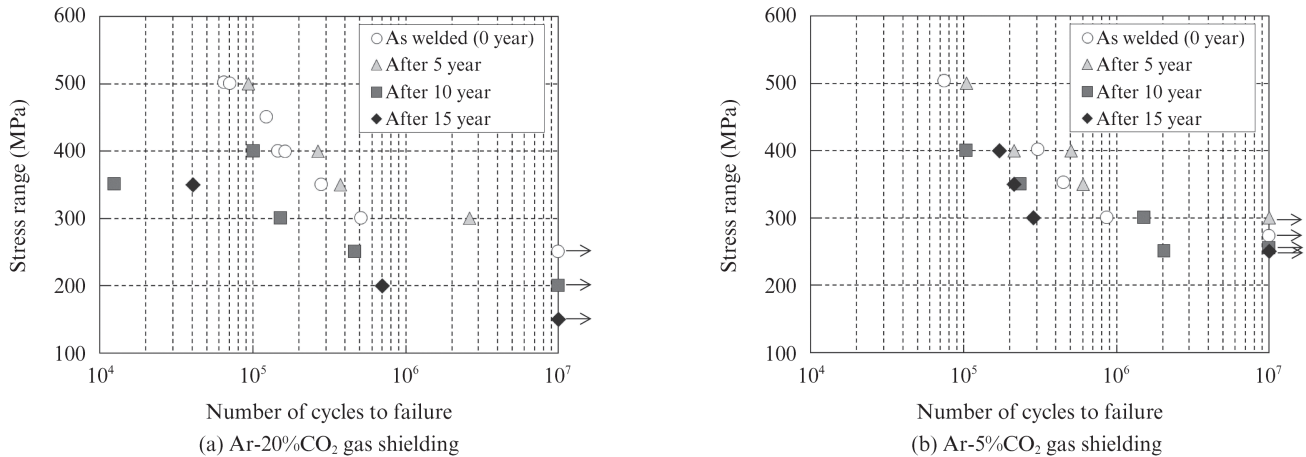


図4 腐食試験前後の継手疲労強度の変化

Fig. 4 Change in fatigue strength of welded joints before and after corrosion resistance test

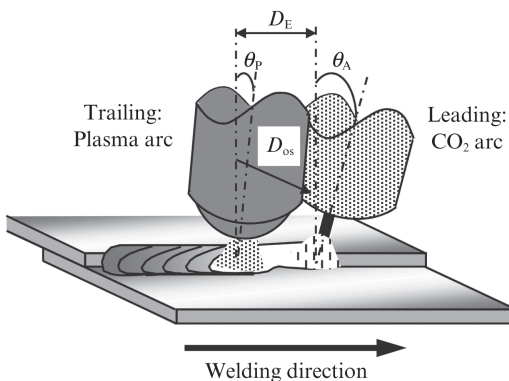


図5 プラズマ・アークハイブリッド®溶接の電極配置
Fig. 5 Electrodes setting of plasma-arc hybrid™ welding

3. プラズマ・アークハイブリッド®溶接技術

3.1 プラズマ・アークハイブリッド®溶接技術が解決しようとする課題

溶接継手の疲労強度は、溶接ビード止端部の形状改善による応力集中の低減によって向上し、ビード止端部の形状改善には低CO₂ガスシールドアーク溶接法の適用が有効であることを述べた。ただし、低CO₂ガスシールドアーク溶接よりもさらに溶接ビード止端部を平滑化することができれば、より高い継手疲労強度を得ることが期待できる。そこで、

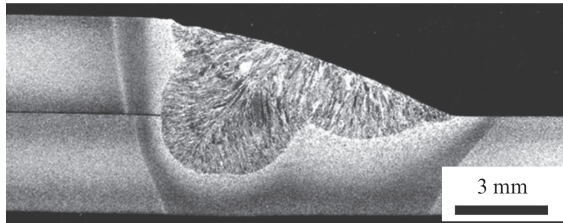
より平滑な溶接ビード止端部を得るための溶接方法として、プラズマアーク溶接と炭酸ガスアーク溶接を複合化したプラズマ・アークハイブリッド®溶接技術を開発した⁴⁾。

3.2 プラズマ・アークハイブリッド®溶接によるビード形状改善効果⁴⁾

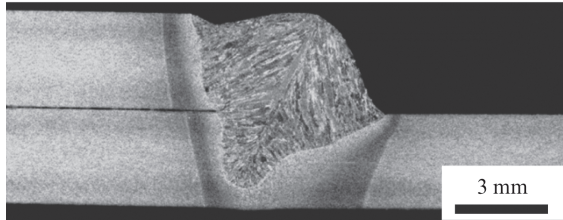
重ねすみ肉溶接継手(板厚3.2mm, 780MPa級熱延鋼板)におけるプラズマ・アークハイブリッド®溶接とMAG溶接(Ar-20%CO₂シールドガス)およびCO₂アーク溶接(100%CO₂シールドガス)のビード形状比較を行った。図5はプラズマ・アークハイブリッド®溶接の概略図である。先行するCO₂アークに対してプラズマアークが追従する形式とし、CO₂アークはREM添加ワイヤ(J-STAR®溶接用ワイヤ)を使用した正極性(EN)、プラズマアークも正極性(EN)の組合せとする。また、CO₂アークとプラズマアークの位置関係として、適切な電極間距離(D_E)および先行CO₂アーク溶接の溶接線中央とプラズマアーク溶接電極のオフセット量(D_{OS})を設定し、トーチ角としてCO₂アーク溶接ワイヤおよびプラズマアーク溶接電極にそれぞれ異なる角度θ_Aおよびθ_Pを付与する。表1に比較を行ったプラズマ・アークハイブリッド®溶接、MAG溶接およびCO₂アーク溶接の溶接条件を示す(記号PAH, MAG, CO₂はそれぞれプラズマ・アークハイブリッド®溶接、MAG溶接、CO₂アーク溶接を示す)。それぞれの溶接条件は、板厚3.2mmの重ね隅肉溶

表1 プラズマ・アークハイブリッド®溶接および従来アーク溶接の溶接条件
Table 1 Welding conditions of plasma-arc hybrid™ welding and conventional arc welding

Mark	Leading: Arc welding						Trailing: Plasma arc welding						D _E [mm]	Travel speed [mm/min]	Heat Input [kJ/mm]
	Welding wire	θ _A [deg.]	Shielding gas	Polarity	Current [A]	Voltage [V]	θ _P [deg.]	D _{OS} [mm]	Shielding gas	Polarity	Current [A]	Voltage [V]			
PAH	YGW11	30	CO ₂	EN	250	27	30	4	Ar	EN	180	23	25	850	0.77
MAG	YGW15	30	Ar-20%CO ₂	EP	320	28	-	-	-	-	-	-	-	1 200	0.45
CO ₂	YGW11	30	CO ₂	EP	220	20	-	-	-	-	-	-	-	600	0.44



(a) Plasma-arc hybrid™ welding



(b) MAG arc welding

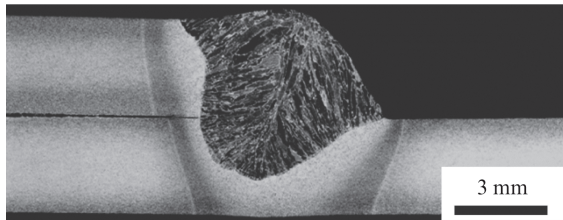
(c) CO₂ arc welding

写真3 溶接部の断面マクロ組織

Photo 3 Macrostructures of cross-sections of welds

表2 各溶接法による溶接ビード止端部形状

Table 2 Weld toe shape for each welding process

	Curvature radius: ρ [mm]	Flank angle: θ [deg.]	Stress concentration factor: K_t
PAH	0.97	161	1.2
MAG	0.46	143	1.5
CO ₂	0.41	125	1.7

接において上限と考えられる溶接速度での最適条件を選んだ。

写真3および表2にそれぞれ、プラズマ・アークハイブリッド®溶接、MAG溶接およびCO₂アーク溶接における重ね隅肉溶接部断面マクロ組織、およびそれらのマクロ組織のビード表面形状からビード止端部の曲率半径、フランク角および応力集中係数を計測・計算した結果を示す。プラズマ・アークハイブリッド®溶接では、適切な設定でCO₂アーク溶接とプラズマアーク溶接の溶込みが重畳されることにより、他のアーク溶接に比べて表面幅が広くかつ平滑なビード形状が得られることが分かる。ビード止端部形状から計算される応力集中係数の比較では、プラズマ・アークハイブリッド®溶接はMAG溶接およびCO₂アーク溶接の0.7~0.8倍に低減されており、ビード止端部形状の平滑化による継手疲労強

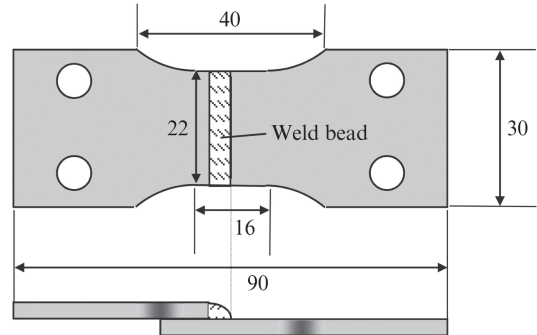
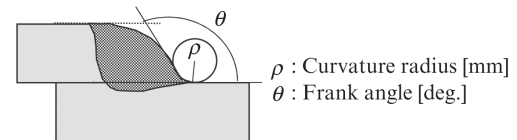


図6 溶接継手の疲労試験片

Fig. 6 Fatigue test specimen of welded joint

度の向上が期待できる。

3.3 プラズマ・アークハイブリッド®溶接による継手疲労強度向上効果⁴⁾

表1に示した溶接条件で作製したプラズマ・アークハイブリッド®溶接継手、MAG溶接継手およびCO₂アーク溶接継手から図6に示す継手疲労試験片を加工し、シェンク式平面曲げ疲労試験機を用いて完全片振りの疲労試験を実施した（繰返し数の上限は200万回まで）結果を図7に示す。疲労強度は、CO₂アーク溶接、MAG溶接、プラズマ・アークハイブリッド®溶接の順に高くなり、疲労限（200万回以上の耐久性を示す応力振幅）で比較すると、プラズマ・アークハイブリッド®溶接はCO₂アーク溶接の190 MPaに対して約2倍の375 MPaとなった。以上の結果から、プラズマ・アークハイブリッド®溶接を適用して溶接ビード形状を平滑化することにより、継手疲労強度の格段の向上が可能であることが確認できた。

4. レーザ・アークハイブリッド溶接技術

4.1 レーザ・アークハイブリッド溶接のメリット

シャシー部品には、平板の重ね溶接構造以外に閉断面構造と呼ばれる円あるいは多角形の断面形状を有する鋼管状の部品も使用されている。今後、より厳格化するシャシーの軽量化と剛性および疲労強度などの特性を両立させるというニーズに対しては、高張力鋼板による閉断面構造の採用が有効であると考えられる⁵⁾。閉断面構造部品を平板から製造するには、シーム部を突合せあるいは重ね継手の状態で溶接する必要があるが、ガスシールドアーク溶接では溶込み深さが得にくく高速・高能率の溶接が困難であり、レーザ

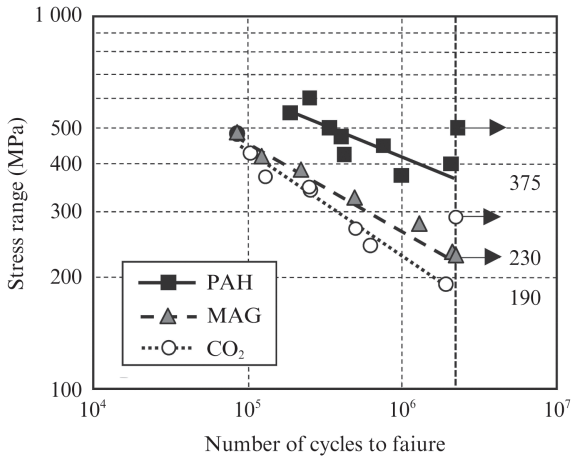


図7 溶接継手の疲労試験結果

Fig. 7 Fatigue test results of welded joints

溶接では溶接欠陥を防止するための突合せあるいは重ねギャップ精度管理が困難という課題がある。そこで、高速・高能率の溶接が可能でかつギャップ精度の緩和が期待できるというメリットを有するレーザー・アークハイブリッド溶接に着目した。

4.2 重ね継手におけるレーザー・アークハイブリッド溶接の溶接性および継手特性⁶⁾

重ね溶接継手（板厚 1.4 mm, 590 MPa 級合金化溶融亜鉛めっき鋼板）において、重ね面のギャップ（シートギャップ）を 0~1.0 mm の範囲で変化させてレーザー・アークハイブリッド溶接を行った。レーザー・アークハイブリッド溶接は、図8に示すようにレーザービーム（Nd: YAG レーザ）が先行し、

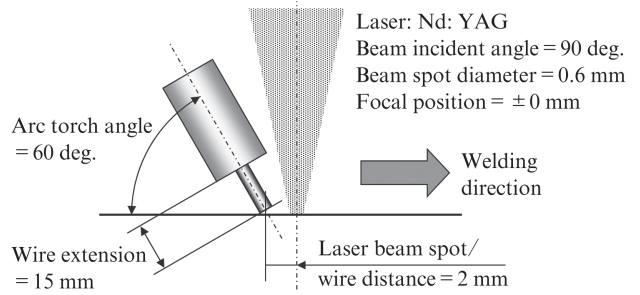


図8 レーザ・アークハイブリッド溶接のセッティング

Fig. 8 Settings of laser-arc hybrid welding

表3 レーザ・アークハイブリッド溶接の溶接条件

Table 3 Welding conditions of laser-arc hybrid welding

Laser power (kW)	3.5 (sheet gap ≤ 0.6 mm) 4.0 (sheet gap ≥ 0.8 mm)
Arc current (A)	80, 160, 240
Welding speed (m/min)	2.5
Shielding gas	Ar-20%CO ₂
Welding wire	JIS Z 3312 YGW12 (dia.=0.9 mm)

MAG アークが追従する形式とした。溶接条件は表3に示すとおりとし、シートギャップ量の変化に応じてレーザー出力およびアーク電流を調整して溶接を行った。溶接継手の強度は、図9に示す幅 30 mm の引張せん断試験片により評価した。

主な条件の溶接部断面マクロ組織を写真4に、各溶接条件におけるシートギャップ量と引張せん断強さの関係を

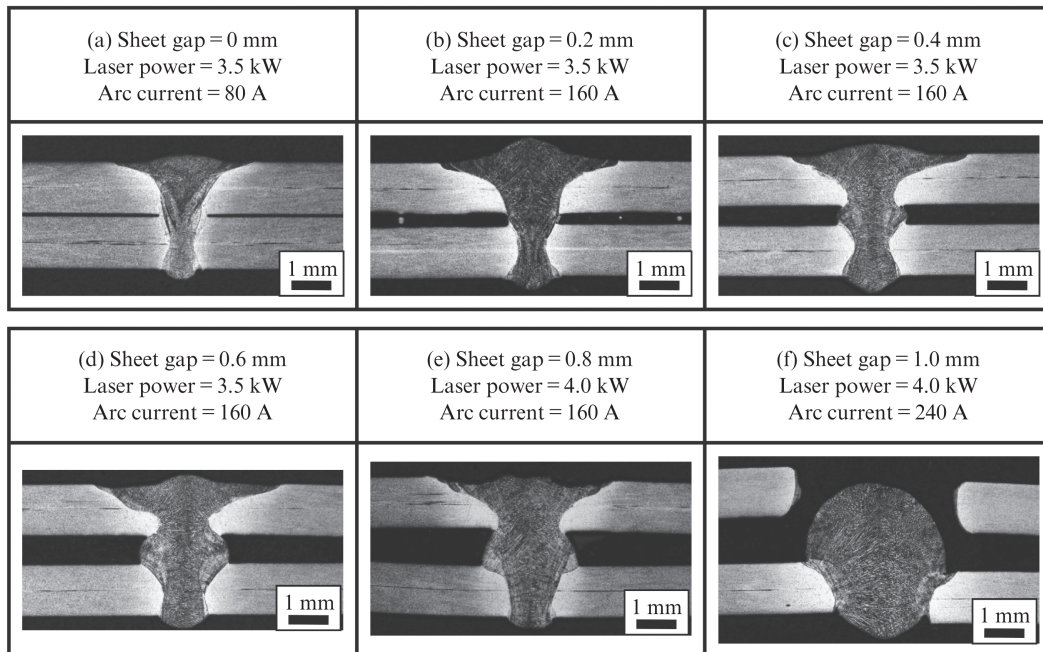


写真4 主な溶接条件におけるレーザー・アークハイブリッド溶接部の断面マクロ組織

Photo 4 Cross-sectional macrostructures of laser-arc hybrid welds in typical welding conditions

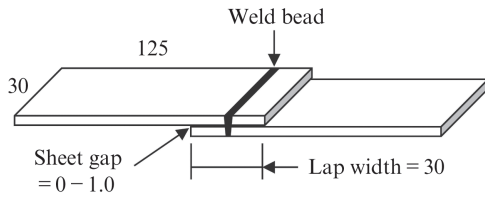


図9 引張せん断試験片の形状

Fig. 9 Dimension of tensile shear test specimen

図10に示す。レーザービーム単独の溶接では0.2 mm程度のギャップで穴あき、溶落ち欠陥が発生するが、レーザー・アークハイブリッド溶接では板厚の50%に相当する0.8 mmまでのシートギャップで欠陥のない溶接が可能であった。アーク電流80 Aではシートギャップ0.6 mm以上でアンダーフィル、溶落ちが発生するため、シートギャップの増加に合わせてアーク電流を高くして溶着金属量を増加させるように調整する必要がある。継手の引張せん断強さは、シートギャップ0 mmでは垂鉛めっきの蒸発に起因するブローホールが発生するため溶接ビードでの破断となり、シートギャップ0.2~0.8 mmの継手よりも低くなった。シートギャップ0.2 mmで溶接金属破断、シートギャップ0.4 mm以上で溶接金属近傍の熱影響部もしくは母材部での破断となるが、継手の引張強さはシートギャップ0.2 mm以上でギャップの増加に伴い低下する傾向にある。この強度低下は溶接ビード表面のアンダーフィルによるものと考えられるが、低下の度合いは小さくシートギャップが大きい場合でもある程度以上の継手強度が確保可能である。

以上のように、レーザー・アークハイブリッド溶接では高速・高能率の溶接として重ね継手のシートギャップ精度緩和が可能であり、シャシーの閉断面構造部品の製造に適した溶接であることが示唆された。

5. おわりに

自動車シャシー部品の溶接継手に要求される疲労特性および耐食性の向上、および高能率化を可能とする溶接技術として、低CO₂ガスシールドアーク溶接、プラズマ・アークハイブリッド[®]溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接の検討を行い、以下の効果を実現する溶接技術を開発した。

- (1) 活性ガス(CO₂)の混合比率を抑えた低CO₂ガスシールドアーク溶接法により、溶接ビード止端部の平滑化とスラグ発生低減が可能であり、耐食性と実使用環境における疲労特性の大幅な向上が達成できた。
- (2) プラズマ・アークハイブリッド[®]溶接法により、重ね隅肉溶接継手の溶接ビード止端部形状を平滑化でき、継

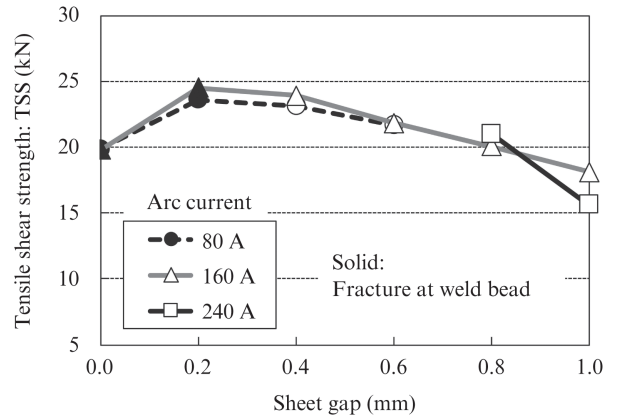


図10 レーザ・アークハイブリッド溶接重ね継手の引張せん断試験結果

Fig. 10 Tensile shear test results of laser-arc hybrid welded lap joints

手の疲労強度を格段に向上させることができた。

- (3) レーザ・アークハイブリッド溶接法は、アーク溶接に比べて高速・高能率の溶接が可能であり、継手のギャップ精度管理も緩和可能というメリットを有し、閉断面構造部品の溶接への適用が有望であることが示唆された。

参考文献

- 1) 片岡時彦, 池田倫正, 上田聡, 中澤嗣夫. 溶接学会全国大会講演概要. 2014, no. 95, p. 50-51.
- 2) 山本俊佑, 鈴木幸子, 安藤聡, 池田倫正, 片岡時彦, 上田聡, 中澤嗣夫. 溶接学会全国大会講演概要. 2015, no. 97, p. 304-305.
- 3) 池田倫正, 山本俊佑, 安藤聡, 片岡時彦, 上田聡, 中澤嗣夫. 溶接学会全国大会講演概要. 2015, no. 97, p. 306-307.
- 4) 松下宗生, 片岡時彦, 池田倫正, 遠藤茂. 溶接学会論文集. 2012, vol. 30, no. 1, p. 77-85.
- 5) 樋貝和彦, 新宮豊久, 山崎雄司. JFE 技報. 2012, no. 30, p. 25-31.
- 6) 木谷靖, 池田倫正, 大井健次. 溶接学会全国大会講演概要. 2013, no. 93, p. 10-11.



木谷 靖



松田 広志



松下 宗生



山本 俊佑



安藤 聡



池田 倫正