

衝突時の軸圧潰エネルギー吸収量向上のための MAG レーザハイブリッド溶接適用技術

MAG-Laser Hybrid Welding that Increases Amount of Axial Collapse Energy Absorption in Collisions

小 林 茂* 五 味 哲 也*
Shigeru KOBAYASHI Tetsuya GOMI

要 旨

衝突時の軸圧潰エネルギー吸収量を向上させる、MAG レーザハイブリッド溶接の適用技術を開発した。ギャップ部の溶接性に優れる MAG 溶接、貫通溶接性に優れるレーザ溶接、各接合手法の長所を活かし、従来レーザ溶接のみでは接合困難とされていた亜鉛メッキ材料同士の重ね溶接および、ギャップ部位の溶接時の課題を解決した。

また、本溶接技術を適用した HAT 形テストピースの落錘試験で得られた衝突時軸圧潰エネルギー吸収量がスポット溶接を適用した場合と比較して約 40%向上した。

ABSTRACT

A technology for the application of MAG-laser hybrid welding that enhances the axial collapse column energy absorption during a collision was developed. Taking advantage of the gap weldability that is a characteristic of MAG welding and of the penetrability characteristic of laser welding, this MAG-laser hybrid welding technology resolved issues that conventional laser welding could not readily address, such as lap welding Zn-coated materials together, and welding areas where there are gaps.

The axial collapse column energy absorption during collisions obtained in drop weight tests using hat-shaped specimens on which this MAG laser hybrid welding technology had been applied was approximately 40% greater than that absorption when spot welding had been applied.

1. はじめに

地球環境保護の観点から求められる省燃費化、車体の軽量化や衝突安全性に対する要求はますます増大している。衝突時のエネルギーを吸収する部材(フロントサイドフレーム等)に従来のスポット溶接に代えてレーザ溶接等の連続溶接を適用することで圧潰時のエネルギー吸収量が向上することが知られている。古迫⁽¹⁾らによればレーザを用いた連続溶接の適用で、スポット溶接と比べてエネルギー吸収量が15%程度向上することが報告されている。しかし、最適なレーザ溶接位置の検証および、ギャップ部(以下、GAP)や亜鉛メッキ材料の重ね溶接時に生じる、接合強度低下の課題については述べられていない。レーザ溶接の適用にはこれらレーザ溶接特有の課題を複数解決しなければならず、これらが連続接合の適用が広がらない主な要因となっていた。現在、衝突時のエネルギー吸収部材(フロントサイドフレーム)は複数のプレス

部品をスポット溶接等いわゆる点溶接で接合している。これらの骨格部品は衝突時の衝撃から乗員を保護するために、その衝撃エネルギーを吸収する機能が求められる。しかし、点溶接は接合部分が不連続になるため圧潰時に口開きが発生し、このロスにより吸収可能なエネルギー量が減少する。そのため素材の板厚を厚くしたり、より高強度な高張力鋼板を用いていたが、これらは重量の増加やコストの増大を招いていた。本研究では、MAG溶接とレーザ溶接それぞれの利点を活かした MAG レーザハイブリッド溶接とその適用技術を開発することで、衝突部材の GAP の接合にも対応でき、亜鉛メッキ鋼板の重ね溶接でも接合強度低下の少ない連続溶接を可能とした。また、圧潰時のエネルギー吸収量が従来のスポット溶接と比較し向上することが確認できた。本稿では、この MAG レーザハイブリッド溶接の適用技術を述べ、この接合技術を適用した HAT 形テストピースによる落錘試験結果について報告する。

*四輪R&Dセンター

2. MAG レーザハイブリッド溶接技術

2.1. レーザ溶接の課題

板厚増加に伴う重量増加、高張力鋼板の使用に伴う材料コストや加工コストの増加に対する方策として、HAT形状部材の接合を従来のスポット溶接からレーザー溶接等の連続溶接にして、圧潰時のエネルギー吸収量を増加する方法が検討されて来た。しかし、これら現行サイドフレーム部材の接合方法を従来のスポット溶接に代えてレーザー溶接を適用するには、解決しなければならないレーザー溶接特有の、次のような課題がある。

- (1) サイドフレームは錆環境で使われる部材のため通常は防食のため亜鉛メッキ鋼板が用いられている。重ね板組みの部位をレーザー溶接すると蒸気化した亜鉛メッキが接合部にブローホールとして残留する^{(2), (3)}(以下、本稿では蒸気不良という)。
- (2) レーザ溶接は母材金属を溶かした溶金で接合をおこなうためGAP(板間にスキ間がある)溶接では接合性が低下し、わずかな GAP(0.2 mm 以上)であっても接合強度が保てない^{(4), (5)}。

また、従来のスポット溶接に代えて、同じ部位をレーザー溶接に置き換えた場合でも、軸圧潰によるエネルギー吸収量は 15%程度⁽¹⁾しか向上しない。

2.2. 蒸気不良の発生メカニズム

Fig. 1 に2枚の重ね亜鉛メッキ鋼板をレーザー溶接し不良が発生する状態を示す。亜鉛メッキ鋼板を2枚密着させた部位にレーザー溶接をおこなうと、レーザーによる高熱で鋼板表面の亜鉛メッキが蒸気化しブローホールとなって接合界面内に残存し接合強度が低下する。また、接合部表面には亜鉛メッキの蒸気が大気中に放出された跡であるピットと呼ばれる多数の気孔が見られる。Fig. 2 にX線で確認したブローホール、Fig. 3 に表面に噴出したピットを示す。

ブローホールの発生を減少させる代表的な方法としては、2枚の板間に亜鉛メッキ蒸気を排出する小さなGAPを設けるために、事前にエンボス等の形状を設定し板間の密着を

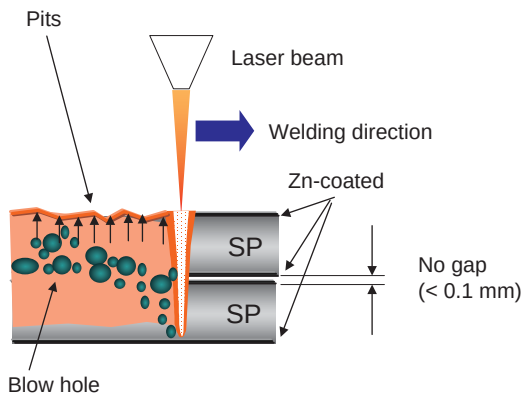


Fig. 1 Schematic defect generation model

防ぐ方法や、2枚の板の上板のみにあらかじめ出力の低いレーザーを照射し、その熱ひずみ変形で微小なGAPを発生させ蒸気を排出させる等の方法がある。しかし、いずれの方法も前工程での機械加工や、より多くの作業を必要とするため、簡易かつ確実な蒸気不良の対策とはいえない。

2.3. 蒸気不良発生防止テスト

そこで、GAPを利用して亜鉛メッキ蒸気を効率よく外部へ放出しつつ接合し、かつ圧潰時のエネルギー吸収量の増加も見込めるフランジ根元(R止まり部)の接合に着目した。GAPによる不良の発生がない接合をおこなうため、MAGとYAG レーザを組合わせた MAG レーザハイブリッド溶接技術^{(6), (7)}を用いて、HAT形状テストピースに溶接をおこないその効果を検証した。今回の実験に用いた装置構成を Fig. 4 に、溶接条件を Table 1 に示す。被溶接材の表面に深さ 2.0 mm で焦点を合わせた(DF: ディフォーカス)レーザーを先に、その後からアークが追従するレーザー先行の構成である。アークのねらい位置はレーザーの照射位置から 2.0-3.0 mm 後方(DL: レーザとアーク間の距離)にセットした。MAGアークの電源には近年急速に開発が進んでいる低入熱

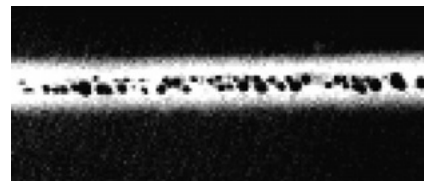


Fig. 2 X-ray inspection of blow hole

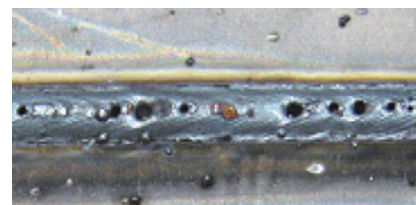


Fig. 3 Surface appearance of pit

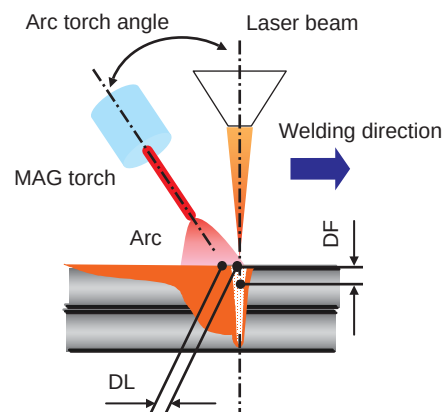


Fig. 4 MAG-Laser hybrid welding configuration

Table 1 MAG-Laser hybrid welding conditions

YAG-Laser power	3.5—4.0 kW
Focus radius	Φ0.6 mm
Defocus distance (DF)	—2 mm
Travelling speed	250 cm/min
Arc current (MODE)	250 A (CMT)
Arc torch angle	25°
Shielding gas	Ar+20%CO ₂
Distance of laser and arc (DL)	2.0—3.0 mm

アーク溶接電源(Cold Metal Transfer: * CMT)を用いた。
(*CMT:フローニクス社が開発した低入熱アーク溶接電源)

2.4. テスト結果

Fig. 5 は、今回テストに用いた HAT 形テストピースの全体図および、レーザのねらい位置を示すR止まり部付近の拡大図である。また、式(1)にブローホールの単位長さ当たりの残存率を求める測定方法と計算式を、Fig. 6にR止まりを中心にねらい位置を変化させた時の各溶接部のX線画像および、ブローホールの残存率を示す。スポット溶接による接合強度を下回るブローホールの残存率30%以上を接合不良とした。レーザのねらい位置を、R止まり(±0)からフランジ方向(−)側へ移動すると、残存ブローホールは急激に増加し、0.5 mm で既に 30%を上回る。レーザのねらい位置をR止まりからフランジと反対方向(+)側へ移動すると、R形状に沿ってGAPが増加するため、残存ブローホールは急激に減少し、1.0 mm で0%になる。しかし、1.0 mm を越えて移動すると今度は GAP が広がり過ぎ 1.5 mm では上板側に溶け落ちの穴が発生する。HAT形テストピースによるレーザねらい位置裕度は、R止まり部を原点とする

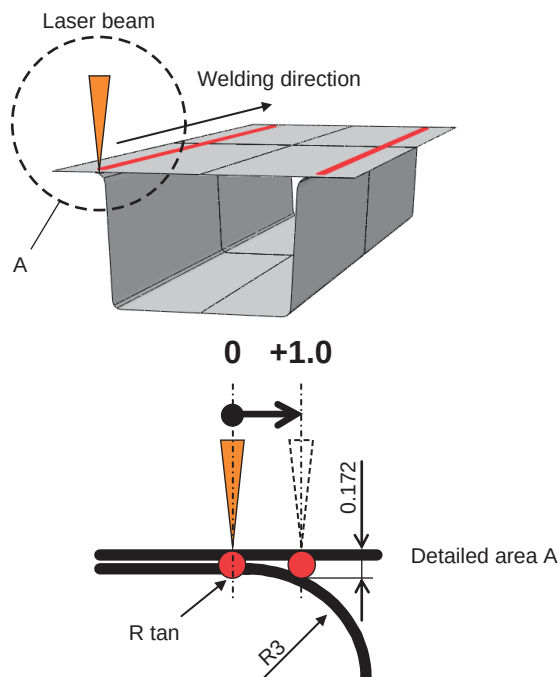
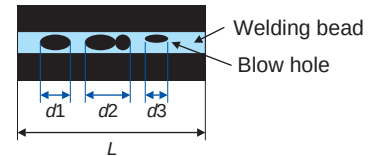


Fig. 5 Verification result of welding position

0.0 mm から 1.0 mm の範囲(Fig. 7)となった。また、最大 GAP 距離は、レーザのねらい位置(+)1.0 mm のとき 0.172 mmとなった。以上の結果から、蒸気不良の発生のないMAGレーザハイブリッド溶接の溶接条件および、適正な接合範囲が明確になった。Fig. 8に今回の実験に用いたMAGレーザハイブリッド溶接システムの装置外観を示す。



$$\text{Blow hole incidence} = \frac{\sum d_i}{L} \times 100 (\%) \quad (1) \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

Welding position (mm)	X-ray inspection of blow hole	Blow hole incidence (%)	Evaluation
-1.5		55.6	Defect
-1.0		60.9	Defect
-0.5		39.7	Defect
±0		15.4	Good
+0.5		6.3	Good
+1.0		0	Good
+1.5		0 *Burn through	Defect

Fig. 6 Measuring result of blow hole incidence

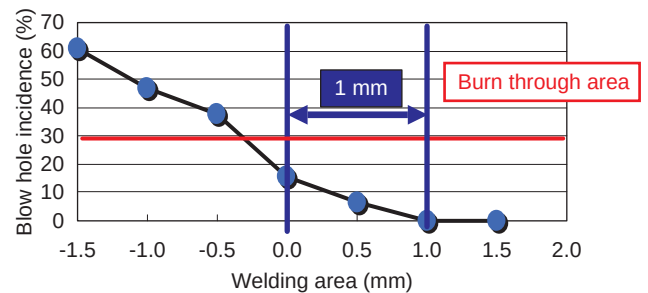


Fig. 7 MAG-Laser hybrid welding joinable area

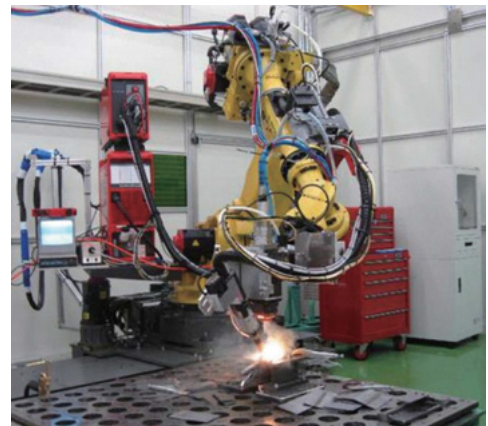


Fig. 8 MAG-Laser hybrid welding equipment

3. HAT 形テストピースを用いた効果の検証

MAG レーザハイブリッド溶接による連続接合の適用効果を検証するため CAE と落錘テストにより溶接位置、溶接方法の違いがもたらすエネルギー吸収量の差を比較した。

なお、CAE の計算には汎用陽解法ソルバ RADIOSS Ver4.4 による有限要素解析を使用した。

3.1. CAE による検証

Fig. 9 にスポット溶接および、連続溶接をそれぞれモデル化した、落錘テスト時の有限要素モデルを示す。有限要素モデルの形状は、縦 50 mm、横 70 mm、長さ 300 mm としメッシュピッチは 3 mm とした。下記(1)から(4)に、検証に用いた溶接条件(溶接方法と溶接位置)を示す。

- (1) フランジ中央へのスポット溶接(溶接間隔 30 mm)
- (2) フランジ端末への MAG レーザ連続溶接
- (3) フランジ中央への MAG レーザ連続溶接
- (4) フランジ根元(R止まり部)への MAG レーザ連続溶接

上記の有限要素モデルを用いて、接触時の速度 50 km/h でストローク量 150 mm まで圧縮したときのエネルギー吸収量を計算した。

Fig. 10 にスポット溶接時のエネルギー吸収量を 100% とした場合、連続接合の溶接位置を変化させた時のエネルギー吸収量の比較結果を示す。

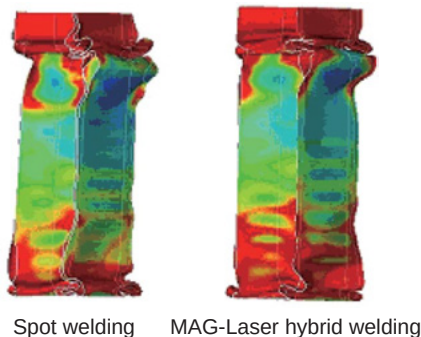


Fig. 9 Axial collapse FEM model

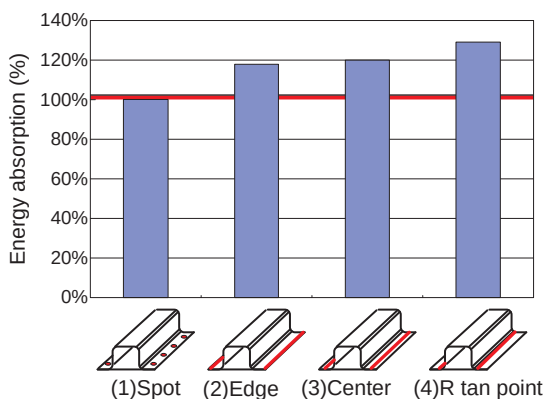


Fig. 10 Comparison of energy absorption between spot welding and MAG-Laser hybrid welding

Table 2 Drop weight test conditions

Item	Conditions
Drop weight	324 kg
Drop height	9.84 m
Crash speed	50 km/h

以上、HAT 形テストピースの CAE 解析結果からも、今回 MAG レーザハイブリッド溶接を適用した HAT 形状縦壁の根元(R止まり部)を連続溶接することが、最もエネルギー吸収量が高いことが確認できた。

3.2. 落錘テストによる検証

Fig. 11 に今回実験に用いた HAT 形テストピースの形状を示す。テストピースの形状および、溶接条件(溶接方法と溶接位置)は CAE 検証をおこなった有限要素モデルと同様(1)-(4)とし、軸圧潰試験をおこなうため HAT 形テストピースの両端に厚さ 10 mm の端板を全周 MIG 溶接で取り付けた。また、落錘テストの条件はテストピースへの接触時速度が 50 km/h、ストロークが 150 mm 以上となるように、圧子重量および落錘高さを Table 2 に示す値に設定した。

3.3. 落錘テスト結果

Fig. 12 にスポット溶接および、エネルギー吸収量の最も高い、縦壁の根元部を MAG レーザハイブリッド溶接した HAT 形テストピースの落錘テスト後のストローク 150 mm までの荷重(kN)－変位(mm)線図を示す。錐体落下直後のピーク荷重および、各ストローク量における荷重の大部分が MAG レーザによる連続溶接を施した方がスポット溶接を施したテストピースを上回った。Fig. 13 に落錘テスト後のテストピースの側面および、裏面の状態を示す。落錘後の画像を見るとスポット溶接を施したテストピースのフランジ側面は口を開いて複雑に折れ曲がっているのに対し、MAG レーザによる連続溶接を施したテストピースは口開きなく規則正しく折れ畳まれている。これらのスポット溶接、

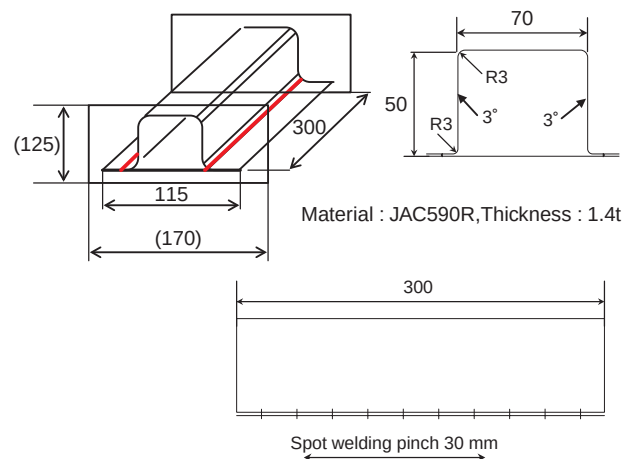


Fig. 11 Configurations of hat-shaped specimen for drop weight tests

MAGレーザハイブリッド溶接共に接合部に破断の発生は見られず、溶接状態は良好であった。

3.4. 落錘テスト結果考察

今回の落錘テストでエネルギー吸収量が向上した要因について考察する。スポット溶接の試験片はスポット間のフランジ部が口開きしており、それにより圧潰荷重が低下した可能性が高い。

このことは Karman の有効幅理論で説明される。

Karman の有効幅理論は式(2)によって表される。

$$P_{\alpha} = b_e \cdot t \cdot \sigma_r \quad (2)$$

$$b_e = (\pi^2 E k / (12(1 - \nu^2) \sigma_r))^{1/2} \quad (3)$$

なお $b_e > b$ の場合は、

$$P_{\alpha} = b \cdot t \cdot \sigma_r \quad (4)$$

なお、 P_{α} : 最高圧縮荷重、 b_e : 有効幅、 t : 板厚、 σ_r : 降伏応力、 b : 板幅、 E : 縦弾性係数、 ν : ポアソン比、 k : 周辺拘束条件によって決まる定数である。

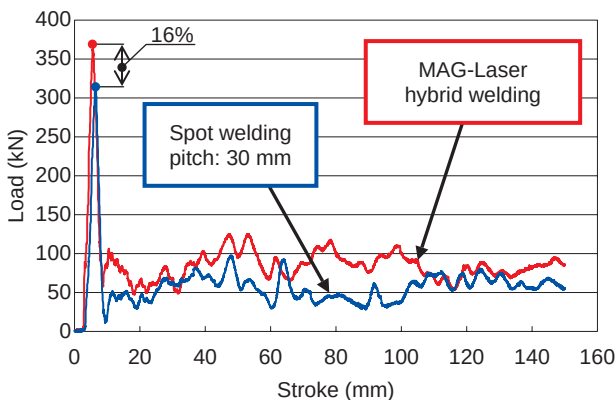


Fig. 12 Comparison of load-stroke curve in axial collapse column between spot welding and MAG-Laser hybrid welding

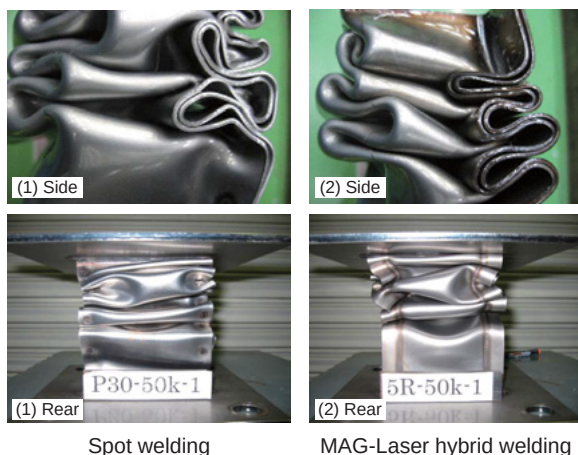


Fig. 13 Appearance of column after collapse test

両端角稜の場合 $k=4.00$ 、一端角稜・他端スポットの場合 $k=3.15$ 、両端スポットの場合 $k=2.40$ 、一端角稜・他端自由の場合 $k=0.61$ とされる。連続溶接を施すことにより、周辺拘束条件である角稜の拘束力が上がり圧潰荷重が上がることを示して⁽⁸⁾いる。MAGレーザハイブリッド接合部を角稜と仮定し、今回のHAT形テストピースに適用すると、MAGレーザハイブリッド溶接の最大圧潰荷重は、スポット溶接に対し16%向上すると予測した。実際の落錘テスト結果の最大圧潰荷重も16%向上しており、Karmanの有効幅理論との相関性は高い。しかしながら、第2波以降の最大荷重を比較すると28.7%向上し、平均荷重は46.6%向上しており、Karmanの有効幅理論の効率を上回っている。エネルギー吸収の多くはこの領域に依存しており、スポット溶接を施したHAT形テストピースはこの間で発生した口開きにより、MAGレーザハイブリッド溶接との荷重差が生まれ、全体のエネルギー吸収量の差として現れたと考える。

Fig. 14にエネルギー吸収量の比較を示す。従来のピッチ30 mmで接合したスポット溶接によるエネルギー吸収量を100%とした場合、R止まり部へのMAGレーザハイブリッドによる連続溶接で得られたエネルギー吸収量は、スポット溶接のテストピースと比較して+38.5%(レーザのみの連続溶接で得られる+15%程度⁽¹⁾と比較すると2.6倍)増加した。HAT形のテストピースにおいて、最もエネルギー吸収に寄与するフランジ角稜部を連続溶接で拘束することにより、従来の接合方法では得られなかった高いエネルギー吸収量の確保が可能になった。

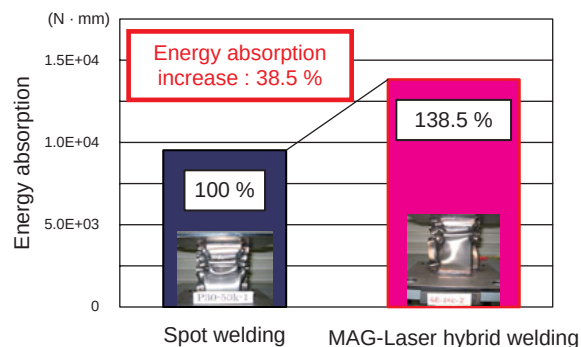


Fig. 14 Comparison of energy absorption between spot welding and MAG-Laser hybrid welding

4. まとめ

衝突時のエネルギー吸収部材であるサイドフレームを想定し、MAGレーザハイブリッド溶接技術とその適用手法を開発した。その結果、以下の性能向上を達成した。

(1)GAPの溶接性に優れるMAG溶接、貫通溶接性に優れるレーザ溶接、それぞれの特徴を有効活用したMAGレーザハイブリッド溶接技術とその適用技術の開発に

より、従来は接合ができなかったエネルギー吸収量の最も高い、R止まり部の連続溶接を可能にした。

- (2) レーザ溶接のみでは接合ができなかったR止まり部の連続溶接が可能になったことで、衝突時の軸圧潰エネルギー吸収量が、スポット溶接と比較して最大+38.5%(レーザのみの連続溶接と比較して2.6倍)向上した。

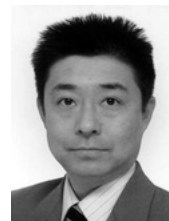
参考文献

- (1) 古迫誠志, 上西朗弘, 宮崎康信: 高強度鋼板の適用による衝撃エネルギー吸収能の向上, 新日鉄技報, 第385号, p.32-35(2006)
- (2) Seiji KATAYAMA, Masami MIZUTANI, Taishi TARUI and Kiyokazu MORI: YAG Laser Lap Welding Phenomena of Zn-Coated Steel Sheet and Monitoring of Reflected Beam. International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, p.151-158(2005)
- (3) Christin Kageler, Alexander Grimm, Andreas Otto, Michael Schmidt: Frequency-modulated zero-gap laser beam welding zinc-coated steel sheets in an overlap joint configuration, 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing Munich, June, p.1-8(2009)
- (4) 内原正人, 福井清之: 自動車用高張力鋼板のハイブリッド溶接, 溶接学会全国大会講演概要, 第75集, p.204-205(2004)
- (5) 池田倫正, 沖田泰明, 小野守章: 自動車車体組立用の新溶接技術, JFE 技報, No.16, p.40-45(2007)
- (6) Anna Fellman, Antti Salminen: A study of the phenomenon of CO₂-Laser Welding with filler and MAG Hybrid Welding, ICALEO, 303 p.117-122(2005)
- (7) C.Thomy, T.Seefeld, F.Vollertsen: Fiber Laser GMA Hybrid Welding of Thin Sheet Material 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing Munich, June, p.85-90(2007)
- (8) 綾紀元, 高橋邦弘: 車体のエネルギー吸収特性(第1報), 自動車技術会論文集, No.7, p.60-66(1974)

■ 著 者 ■



小林 茂



五味 哲也