

論文・解説

40

## テーラードブランクへのプラズマ溶接の適用 Application of the Plasma Welding to the Tailore-Welded Blanks

大西 渉<sup>\*1</sup> 猪 一郎<sup>\*2</sup> 山口 英毅<sup>\*3</sup>  
Wataru Ohnishi Ichiro Ino Hidetake Yamaguchi  
丸石 宏昭<sup>\*4</sup> 網 清一郎<sup>\*5</sup>  
Hiroaki Maruishi Seiichiro Tsuna

### 要 約

近年の自動車業界の大きな課題である燃費向上と衝突安全性の確保に向け、各自動車メーカーとも軽量でかつ強度、剛性が高いボデー構造を実現するため、様々な新工法の開発に取り組んでいる。マツダではこうした商品性の向上とコスト削減を両立させる新技術として、アテンザ以降、新型デミオ、RX-8などの新型車に多数枚の板材を接合した後に成形するマルチタイプのテーラードブランクを大幅に採用した。テーラードブランクの溶接法としてはレーザー溶接が一般的であるが、設備投資削減と生産性の向上に向けて、高速でロバストなプラズマ溶接技術の開発に取り組み、量産導入したので紹介する。

### Summary

In recent years, one of important issues is to improve fuel efficiency and collision safety. We have tackled the new construction method for developing body structure which has lightweight and high strength/stiffness. We has adopted the multi type Tailore-Welded Blanks which is formed after the welding process of several steel sheet, which has been employed in Atenza, New Demio, and RX-8. This is a new technology for consistent improvement of merchandise nature and cost reduction. Laser welding is a common method for welding the Tailore-Welded Blanks, but for farther equipment cost reduction and improvement of productivity. We have developed the high-speed and robust plasma welding and introduced into mass production. This paper introduces how to tackle the plasma welding technology.

### 1. はじめに

環境保全や衝突安全性に対する意識が高まる中、自動車メーカーはより軽量で剛性の高い車を市場投入することが求められており、このニーズに応えるべく様々な新工法の開発を進めている。車体領域においては、その中の1つである多数枚(4~5枚)のブランク材を接合したマルチタイプのテーラードブランク(Tailore-Welded Blanks; 以下TWB)をアテンザ、新型デミオに続き、RX-8においても採用した。

TWBは材質、板厚など特性の異なる材料をボデー強度と剛性上最も適した部位に配置することによるボデーの軽量化及び強度、剛性の向上と、部品を一体化することによる生産コスト削減を両立することが可能な工法である。一

般的にTWBの接合に用いる溶接方法を見ると、圧倒的にレーザー溶接の採用が多い。レーザー溶接は高エネルギー密度の熱源であるため、高速かつ極小ビードを形成できる反面、溶接前の板材の精度、溶接位置決め治具内での板材位置決め精度に対する要件が厳しい。したがってブランクング、溶接位置決め治具に大きな初期投資が必要となるとともに、ブランクング時の品質検査や溶接設備の維持管理などランニングコストにも大きな課題を抱えている。特に今回採用したサイドフレームレインフォースメントは多数枚のブランク材を溶接するマルチタイプのTWBであるため、大きな設備投資がかからず、生産効率が高い安定した溶接技術の構築が急務であった。そこでレーザーに比べて投資がかからず、熱源の幅の広いアーク溶接、中でもアークの絞り性の高いプラズマ溶接に着目し、技術開発を行った。

\* 1 ~ 5 車体技術部  
Body Production Engineering Dept.

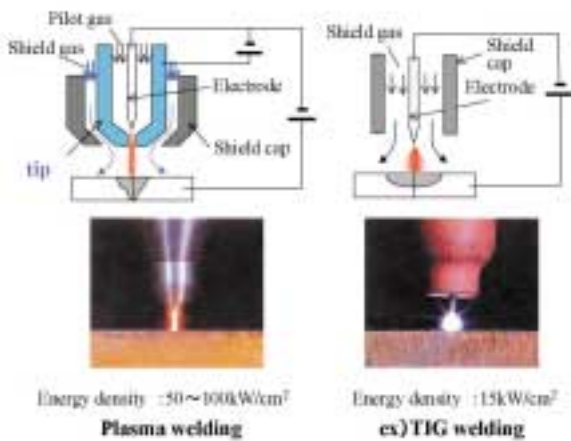


Fig.1 Plasma Welding Principle

プラズマ溶接の技術開発にあたっては、溶接速度の高速化と品質の安定化の両立を狙い、溶接及び溶接位置決め治具、板材それぞれについて適正化を実施した。本稿ではその中で溶接に関する取り組み内容を中心に報告する。

## 2. プラズマ溶接の特徴と課題

### 2.1 プラズマ溶接とは

プラズマ溶接はタングステンイナートガスアーク溶接（以下TIG溶接）などと同じ非消耗電極式に属すタングステン電極を用いたアーク溶接である。Fig.1にプラズマ溶接の模式図を示す。

プラズマとは気体が高温化し、イオンと電子に分離した電気伝導度の高い気体状態のことをいう。プラズマは周辺を冷却すると放熱しないように収縮する（サーマルピンチ効果という）特性を持っている。プラズマ溶接はこの特性を活かし、電極棒と母材との間に水冷した銅製のチップと2層のガスによりプラズマを冷却し、アークを収縮させてエネルギー密度の高い熱源として溶接するところが特徴である。したがって、TIG溶接などに比べてより高速でかつひずみの少ない溶接方法である。

### 2.2 プラズマ溶接とレーザ溶接の特性

Fig.2にプラズマ溶接とレーザ溶接の代表的な断面形状と硬さ分布を示す。プラズマ溶接は、レーザ溶接に比べてビード表面は滑らかであるがビード幅が広いことが分かる。そのため、溶接した材料（以下溶接材）の強度や耐食性、成形性に差があることが予測され基礎評価を実施した。その事例を紹介する。

#### (1) 強度

溶接材の強度を評価するため、引張り強さと疲労強度について調査した。590MPa級ハイテン材の板厚1.6mm同士を突き合わせて溶接し、JIS 5号試験片に加工して引張り試験と疲労試験を実施した。その結果をFig.3に示す。プラズマ溶接材の引張り強さについては母材やレーザ溶接材

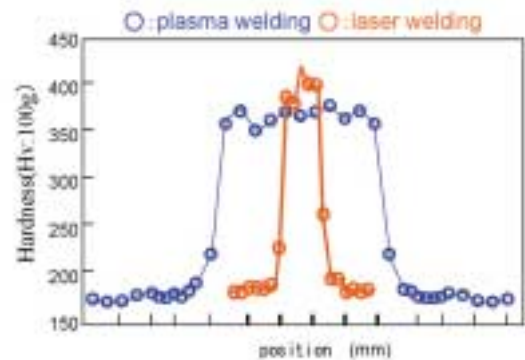
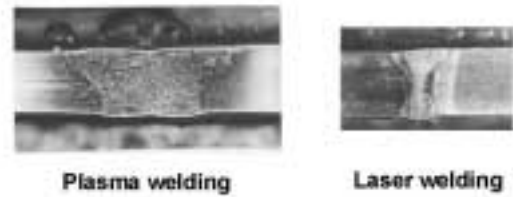


Fig.2 Sectional Distribution of Laser Welding and Plasma Welding

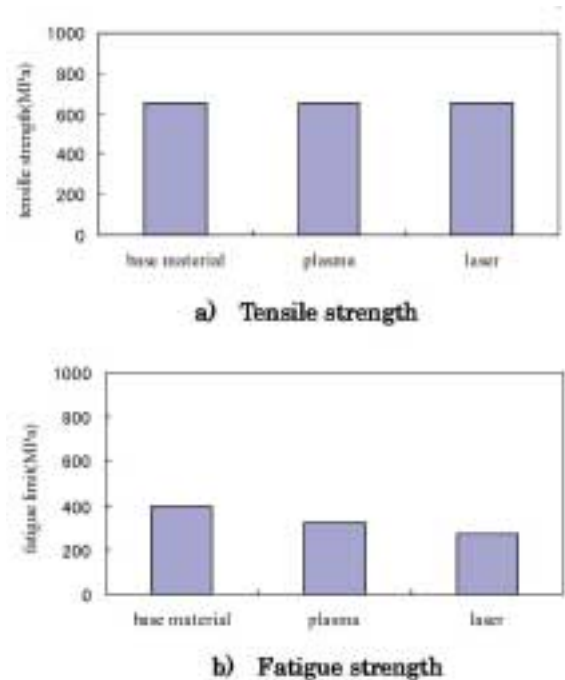


Fig.3 Tensile Strength and Fatigued Strength of Each Welding Material

と同等、疲労強度を観ると、母材に比べて20%程度低下するが、レーザ溶接材と同等以上のレベルにあることが分かった。

#### (2) 耐食性

板厚0.8mmと1.6mmの亜鉛メッキ鋼板を突き合わせ溶接し、脱脂、化成処理を行い、電着塗装を施した溶接材を用いて複合腐食試験を実施した。その結果をFig.4に示す。腐食深さはレーザ溶接材とプラズマ溶接材で大きな違いは

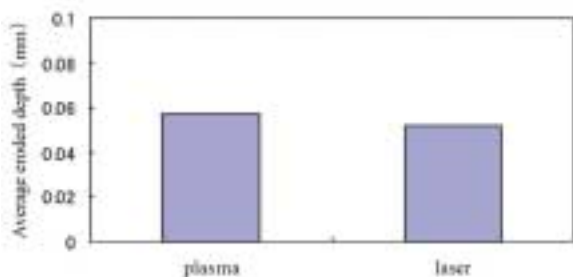


Fig.4 Corrosion Resistance Evaluation

なく、同等の耐食性能を有していることが分かった。レーザ溶接はビード幅が狭いため、亜鉛メッキの犠牲防食作用により耐食性が確保できる。一方、プラズマ溶接の場合は、レーザに比べるとビード幅が広いのでこの作用は少ない。しかし、ビードが滑らかであるため、レーザ溶接部の最小電着膜厚が1 μmであるのに対し、プラズマ溶接部は10 μmと塗膜の着きまわりが良く、耐食性が確保できたと考えられる。

(3) 成形性

プレス部品は様々な成形形態であるため、成形限界線図(以下FLD)を用いて調査した。590MPa級ハイテン材を突き合わせて溶接し、各変形モードになるように50mmから200mmの幅に試験片を切り出し、球頭張出し試験を実施しFLDを作成した。その結果をFig.5に示す。プラズマ溶接材はレーザ溶接材に比べるとビードの幅が広いので成形性が劣るものの実用性の面で問題を生じるレベルでないと判断した。

(4) 突き合わせ隙及び狙い位置に対する優位性

TWBは、ブランク材を突き合わせて溶接するため、ブランク材同士を突き合わせた時の隙が溶接不良(溶け落ち)の発生に大きく関係する。また、突き合わせ部に対する溶接トーチの狙い位置がずれると、突き合わせ部の溶接の溶け込みがずれて完全に接合されていない状態、いわゆる開先未溶接となる。

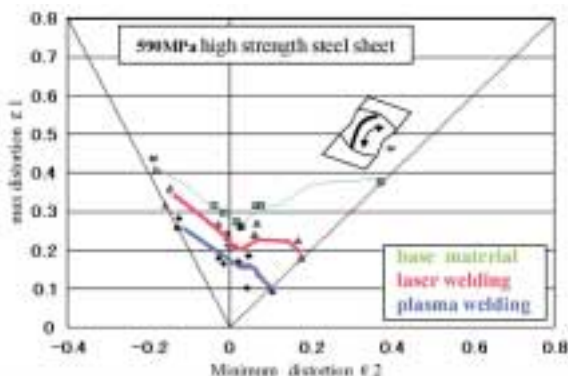


Fig.5 FLD Evaluation

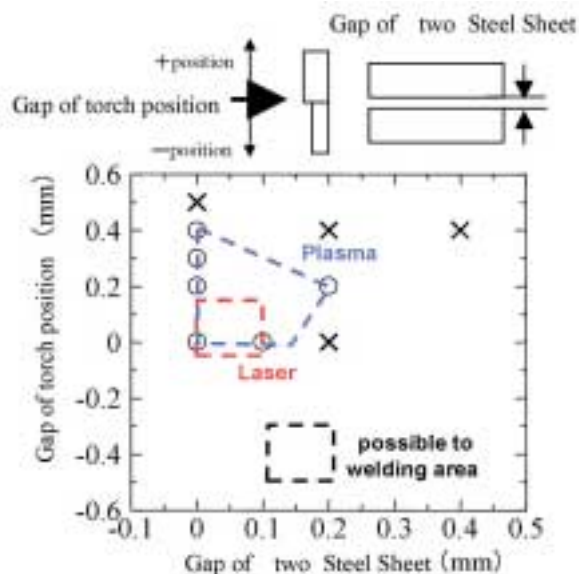


Fig.6 Comparison between Equipment of Laser and Plasma Welding

Fig.6は、レーザ溶接とプラズマ溶接において、突き合わせ時の隙と溶接トーチの狙い位置に対して溶接可能な範囲を比較したデータである。レーザ溶接に比べプラズマ溶接は突き合わせ隙と狙い位置ずれに対する許容値が広いことが分かる。高速条件下でもこの優位性を確保することが重要である。

### 3. プラズマ溶接技術の開発

#### 3.1 要求される溶接品質

プラズマ溶接技術の開発にあたり、まず第一にTWB接合部に求められる溶接品質基準を明確にした。溶接部に要求される性能は、強度や耐食性などボデーに要求される機能を満足すること、及びプレス成形時に溶接部で成形割れなど不良が発生しないことである。そこで、テストピースを用いて強度と成形性の試験を行い、仮の品質基準を作成した。その基準の下限レベルを試作車に織込み要求される全てのテストモードで評価した後、Table 1に示す各溶接品質に対して基準を決定した。その一例として溶接部と母材との境に生ずる窪み(以下アンダーカット)に関するテストピース試験の事例を以下に示す。

アンダーカットは応力集中源となるため、特に繰り返し応力に対する疲労強度の低下や成形時に割れるなどの性能劣化が予測される。そこで、まずアンダーカットと疲労強度の関係を調査した。板厚1.6mmと2.9mmの590MPa級ハイテン材をアンダーカットが発生するような条件で突き合わせ溶接し、疲労試験を実施した。その結果をFig.7に示す。アンダーカットが母材の板厚の5%発生すると疲労強度は低下し始め、以降はアンダーカットの増加に伴い比例

Table 1 Plasma Quality Datum

品質評価項目	状態	状態
溶接継ぎ手		溶接継ぎ手の幅が狭まっている
アンダーカット		母材と溶接部の間に隙が空いている
クラック		溶接部に亀裂がある
溶接不良		溶接部の溶け込みが浅い 溶接される部材の位置がズレて溶接が おこなわれている
溶接部		溶接部が歪みしている

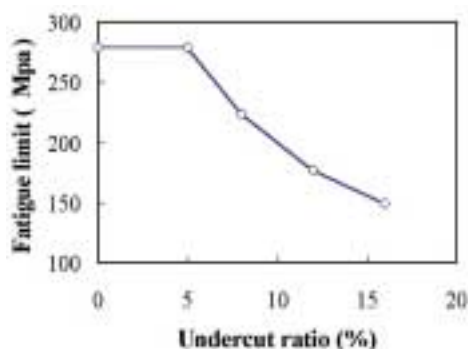


Fig.7 Relation between Undercut and Fatigued Strength

的に低下する傾向にあることが分かる。

次に、アンダーカットと成形性の関係についても、同様にサンプルを作製して、等2軸領域と平面ひずみ領域の2タイプで球頭張り出し試験を行い、調査した。その結果をFig.8に示す。等2軸領域の場合は、アンダーカットが増えても同じ成形高さを示しているが、平面ひずみ領域ではアンダーカット量が13%程度で成形性が悪くなることが分かる。

以上のように強度、成形性の2点から溶接部継ぎ手形状について各々品質基準を設定した。

### 3.2 高速化の検討

構築した技術を量産導入するにあたり重要なことは、当然のことながら安定した品質を低コストで保証することである。それをいかに高速条件下で達成するかが、今回の技術開発のポイントであった。

溶接速度を高速化するためには、1)電流値を上げ溶融部への単位時間当たりの入熱量を上げる、2)サーマルピンチ効果を促進しアークの電流密度を上げる、といった2つの方法が考えられる。しかし、Fig.9に示すように、1)の方法ではアークを絞る働きをする電極チップの穴径に対して限界電流があり、許容値を超えると電極チップが溶けて正常な溶接が困難となる。また、穴径を大きくし電流を上げ

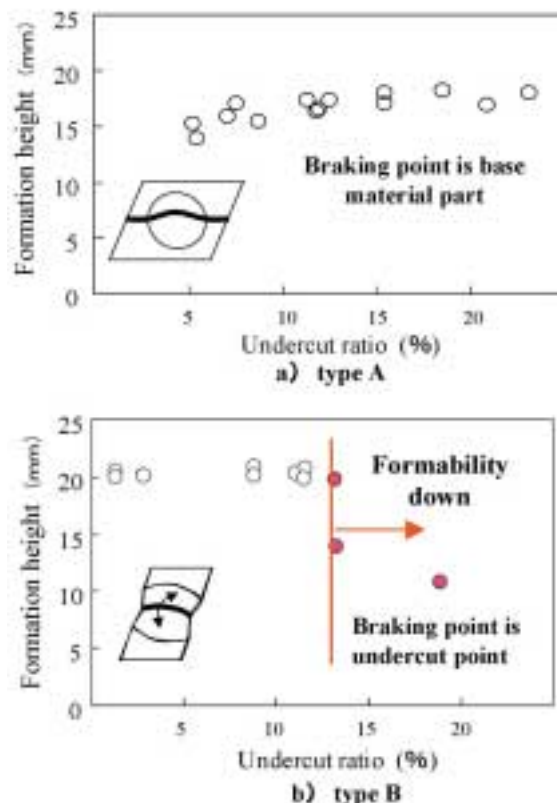


Fig.8 Relation between Undercut and Formability

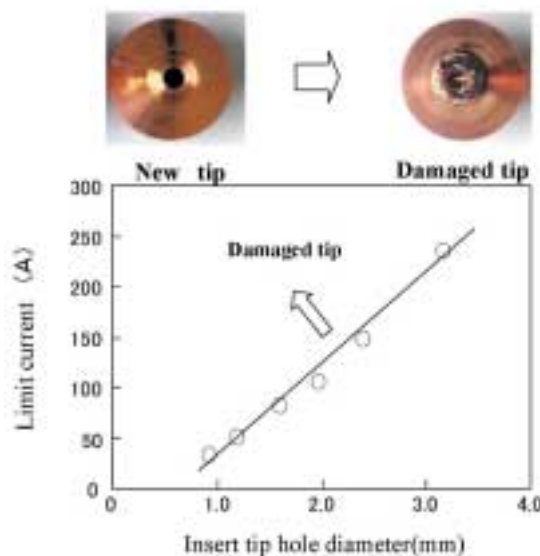


Fig.9 Limit Current Density to Insert Tip Hole Diameter

るとアークの絞りが弱くなるため、電流密度が下がり、溶け込みが浅くなる。したがって溶接速度の高速化の基本的な考え方として、2)のサーマルピンチ効果を促進しアークの電流密度を上げる方法を採用することとした。

サーマルピンチ効果を促進する方法として、まず電極チップの冷却効率を向上させることに取り組んだ。冷却効率

向上の施策として、熱伝導率の高い材質への変更、冷却水の流量変更などを試みたが、これだけでは十分な結果が得られなかった。そこで、パイロットガスとシールドガスの冷却効率を向上させることにより、高速化を実現する溶接方式の構築を進めた。

(1) パイロットガス流量の適正化

Fig.10にパイロットガス流量と溶接部形状との関係を示す。パイロットガス流量を上げると同じ電流値で溶接しても溶け込みが深くなり、パイロットガス流量を増加させることにより同じ電流値でもアークの電流密度を上げ高速化できることが分かる。しかし、Fig.11に示すとおりパイロットガス流量を上げるとアンダーカット量は増加し、また高速の方がアンダーカット量は増える傾向にあることが分かる。アンダーカットが発生した溶接部の断面形状を見ると、溶接部の中央部が盛り上がった形状をしている。このことから、溶接時にアーク直下の熔融金属が押し下げられ、その熔融金属が後方に盛り上がった状態で凝固していくため、アンダーカットが発生すると考えられる。したがって、パイロットガス流量を上げた場合は、熔融金属が押し下げられる割合が増し、アンダーカットが大きくなり、速度を上げた場合は、熔融池後方に盛り上がった熔融金属が自重で平滑になる前に凝固し始めるため、アンダーカットが大きくなると考えられる。パイロットガス流量を適正化する

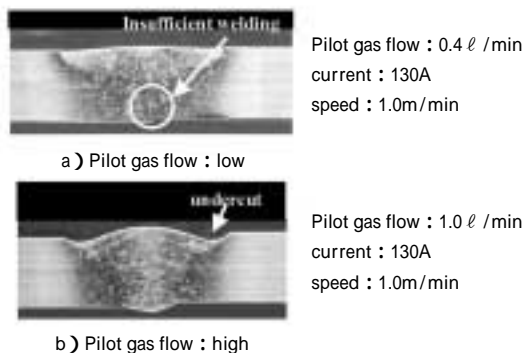


Fig.10 Relation between Pilot Gas Flow and Weld Shape

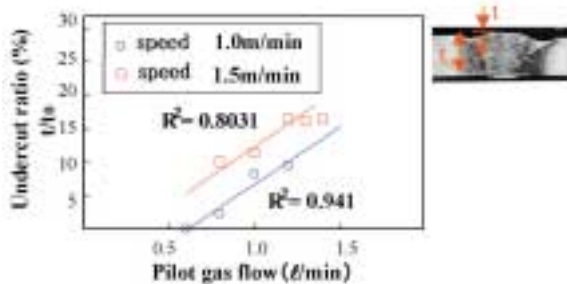


Fig.11 Relation among Undercut, Pilot Gas Flow Rate, and Weld Speed

ことで、前述の基準内に抑制できることが分かった。

(2) シールドガスのガス成分の適正化

シールドガスには通常アルゴンを用いるが、微量の水素を混合するとアークを絞ることができる。Fig.12にアルゴンガスのみで施工した場合と、アルゴンガスに水素ガスを7%混入した混合ガスで施工した時の溶接部形状を示す。シールドガスに水素を混ぜることで、溶け込みも深くなり、同じ電流値でもアークの電流密度を上げ高速化することができることが分かる。これは水素がアークの熱を吸収して解離するためサーマルピンチ効果が促進され、アークがより絞られるためと考えられる。しかし、一般的に水素は鋼に固溶するため、ブローホールなどの内部欠陥が発生する可能性がある。そこで、溶接した溶接材をX線試験して内部欠陥の有無を調査した。Fig.13は水素の混合比率と300mm当たりのブローホール数の関係を示したグラフである。混合比率が10%を超えるとブローホールが発生し始め、混合比率が25%になるとブローホールが急激に増加する。シールドガス中の水素ガスの混合比率を適正化することで、ブローホールを抑制できることが分かった。

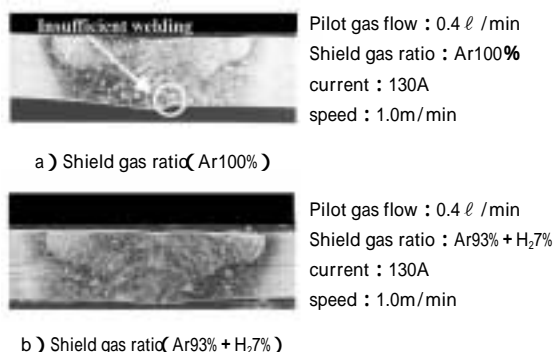


Fig.12 Relation between Shield Gas Element and Weld Shape

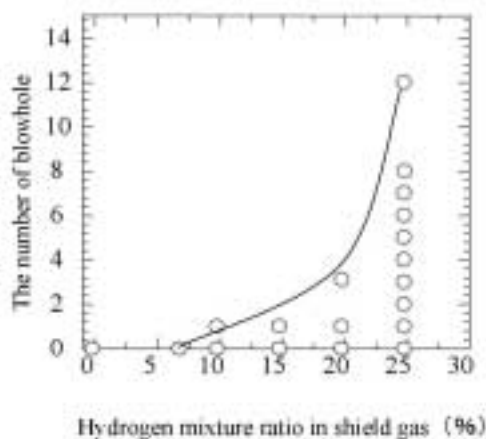


Fig.13 Relation between Hydrogen Mixture Ratio in Shield Gas and Number of Blowholes

以上のように、高速化するためには、パイロットガス流量とシールドガス中の水素の混合比率が重要であることが分かった。板組みなどに合わせて品質基準内になるように溶接条件を適正化し、条件管理を徹底することで、例えば、板厚が1mm程度の薄板の場合は速度2m/min、2mm程度の厚板の場合は速度1m/minの高速条件でも安定した品質を確保できるプラズマ溶接が可能となった。

#### 4. おわりに

一例としてRX-8に採用したTWBを紹介する。Fig.14に示す部品が、プラズマ溶接により5枚のブランク材を溶接し、プレス成形したサイドフレームレイフォースメントと呼ばれるサイドフレームの補強部品である。各溶接部ともに良好な溶接ができており、溶接不良率は1%以下で量産することができた。溶接ライン1本あたりに換算すると約0.2%となり、レーザ溶接と比較すると約1/5の不良率であり、大幅に生産性を向上することができた。

最後に、このプラズマ溶接技術の開発に当たり多大なご協力を頂いた、新日本製鐵(株)、住友金属工業(株)、日鐵溶接工業(株)に感謝の意を表します。

#### 著者



大西 渉



猪 一郎



山口英毅



丸石宏昭



網清一郎



Fig.14 Forming Panel of RX-8 Side Flame Rain