

特集：RX-8

15

## アルミ材新接合技術の開発

### Development of New Welding Technology for Aluminum

村上 士嘉\*<sup>1</sup> 山下 浩二郎\*<sup>2</sup> 妹尾 安郎\*<sup>3</sup>

Kotoyoshi Murakami Koujiro Yamashita Yasuo Senoo

橘 昭男\*<sup>4</sup>

Akio Tachibana

#### 要約

マツダは、「Zoom-Zoom」に現されるブランドイメージのもと、お客様に喜びや感動を与える車造りを目標に、新しい車の開発に取り組んでいる。その中で我々は、操ることの楽しみを味わえ地球環境にも配慮した車を開発するとともに、その車を生産する設備、工程においても環境に配慮した物造りを実践している。塗装領域では、揮発性有機化合物及び二酸化炭素排出量を大幅に低減する新塗装技術、パワートレイン領域では、使用する切削液を大幅に削減したセミドライ加工等に取り組み、成果を上げている。車体領域では、RX-8のボンネット及びリヤドアに採用されたアルミ材の接合において、水及びエアを一切必要とせず、接合に使用する直接エネルギーは摩擦熱のみで加工を行うことが可能な最も環境に配慮した接合技術を開発し、RX-8の生産設備として展開した。

#### Summary

Mazda has been developing new products based on the brand image "Zoom-Zoom", aiming at development of vehicles that deliver pleasure and emotion to customers. Under this situation, we practice creating production facilities, process that consider the global environment in addition to providing low emission vehicles for fun to drive. Through these activities we have obtained good results, for example, "Development of new environmentally friendly coating technology to reduce Volatile Organic Compounds and CO<sub>2</sub> Emissions" in painting area and "Adoption of a semi-dry machining process to reduce the amount of lubricant required" in a powertrain area. In a body production engineering area, we have developed welding technology for an aluminum engine hood and a rear door of RX-8. This technology uses only friction heat energy for welding without any use of cooling water and air. With special consideration given to environment, it has been introduced into production facilities of RX-8.

#### 1. はじめに

現在、各自動車会社においては低燃費、エミッション低減、動力性能の向上等、顧客満足度向上を目的としたボデー軽量化技術に関する開発が盛んに行われている。マツダのDNAの一つである「反応の優れたハンドリングと性能」を実現すべく、RX-8でも動力性能の向上を狙い、種々の軽量化技術を折り込んでいる。ここでは、その中の一つである鋼板のアルミ材への置換について紹介する。

マツダは、国内メーカーの中で先駆けてボンネット等の自

動車部品へアルミ材を適用している。しかし、アルミ材はその特異な材料特性に起因し非常に溶接が困難な材料であり、生産現場における品質の維持管理において課題を抱えていた。

この度、我々が開発しRX-8に適用した接合技術は、これまでの課題を解消し低設備投資、且つ高接合品質を容易に享受でき、アルミ材の接合において優位性の高い技術である。我々はこの技術開発を単なる自社の成果のみを考えたものにはせず、本接合技術を用いたロボットシステムの構築を図り、アルミ材を使用している製造業において効果が

\* 1 ~ 4 車体技術部  
Body Production Engineering Dept.

得られるよう、社外メーカより本システムの販売を開始した。以下に、本開発に関する取り組みを紹介する。

## 2. 開発のねらい

### 2.1 アルミ材の溶接特性

Table 1 に示すとおり、アルミ材は鋼材に比べ非常に電気を通しやすく熱を伝えやすい材料である。抵抗溶接において電気伝導度が高いことは、材料を溶融させるために必要となるエネルギーが大きくなることであり、熱伝導度が高いことは、材料内を伝わって放熱される熱量が増加することを示している。更に、熱膨張係数及び凝固収縮率に関しても鋼材に比べ大きいため、溶接に伴い急激な膨張収縮が発生し、歪みや割れの要因となっている。つまり、アルミ材は鋼材に比べ溶融接合に非常に不向きな材料であるといえる。

### 2.2 アルミ材の溶接設備

上記にも述べたとおり、抵抗溶接にてアルミ材の接合を行うには、その高い熱及び電気伝導度のもと放熱を抑え材料を溶融させるのに必要な発熱を生み出すため、瞬間的に大きな電流を流し瞬時に溶融させることが重要である。ただし、溶融後急激に冷却を行うと材料の膨張収縮により接合部及び熱影響部に割れが発生する。このため、溶融後低電流を流すことにより除冷することが必要である。

従って、接合において上記の条件を満たし加工を行うために使用する溶接機は大型化及び専用化となるため設備投資は増大し、アルミ材の適用において大きな負担となる。

また、急激な発熱を行うことにより消耗品である電極等の損耗も激しく、加えて非常に大きなエネルギーを使用するため生産コストも増大する。

### 2.3 要求されるシステム像

開発に着手するにあたり、狙うべきポイントとしては

- ・溶融を伴わない接合技術の開発 拡散接合等
- ・溶接に使用する付帯設備の削減 投資削減
- ・溶接に使用するエネルギーの削減 生産コスト削減

であり、すべての項目に関しその要求を満足し、効果を得

る工法及びシステムを構築することが目標である。また、マツダにおいては、すでにロードスター、RX-7など、アルミ材を使用している車両があるため、これらの既存車両への適用も考慮し、設計要件及び生産要件に大きな変更を与えないシステムを開発することが必要である。

## 3. 接合法の開発

### 3.1 摩擦点接合

#### (1) 新接合法の特徴

上述したアルミ接合における各課題を解決する新しい接合法として摩擦点接合 (Spot Friction Welding; 以下 SFW) を開発した。この接合法は、Fig.1 に示すとおり回転させた接合ツールと、ショルダー (Fig.2) とほぼ同径の下部受け具を接合ツールに対向する位置に配置し、上下より一定の加圧下で材料を把持することにより単位面積あたりの圧力を増加させる。これによって接合ツールと材

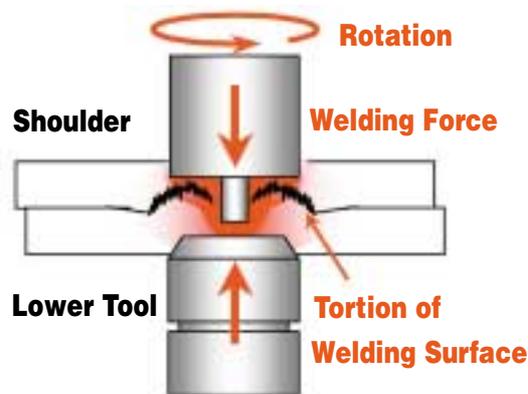


Fig.1 Tools for Spot Friction Welding

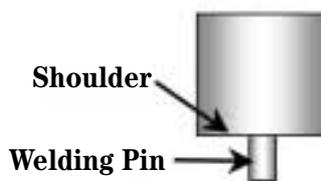


Fig.2 Welding Tool

Table 1 Comparison of Material Parameter

項目	アルミニウム合金	鋼	溶接性との関係
溶融熱量	質量当り	0.80	1
	体積当り	0.33	
熱伝導度	4.0 ~ 5.0	1	・溶接入熱の与え方 例えばスポット溶接では大電流短時間通電とする
電気伝導度	3.0 ~ 5.0	1	
熱膨張係数	2.0	1	・溶接歪みの発生 溶接施工方法による対策
凝固収縮率	1.5	1	・溶接割れの発生 溶加材や溶接速度の選定
酸化性	・酸化しやすい ・強固な高融点の酸化皮膜形成		・融合不良, 介在物の発生 酸化皮膜除去, アークのクリーニング作用や溶接部のシールドの適用 ・酸化皮膜によるスポット溶接時の電極の損耗 酸化皮膜除去, 溶接条件の検討
固液間での水素溶解度の差	9.0	1	・ブローホール発生 水素源の除去
割れ感受性	・合金成分に依存		・凝固割れ, HAZ割れの発生 母材, 溶加材, 溶接速度及び層間温度の選定

料間により大きな摩擦抵抗を発生させ材料を急激に軟化し、界面を接合ツールの旋回により大きくなじり結合力を発生させる接合技術である。これは単に抵抗を増加させるだけではなく、接触径を小さくすることにより放熱を抑え、蓄熱効率を上昇させる効果をも生み出すものであり、従来の抵抗溶接に比べ生産効率を落とすことなく短時間で接合を可能としている。以下にて、その詳細説明を行う。

## (2) 接合メカニズム (SFW)

SFWでは、上下に配置されたツールにて一定の加圧力で材料を把持することにより瞬間的に接合ピンを材料内に圧入しショルダー面を接触させている。このことにより、接合初期よりショルダー面の旋回による発熱が得られ材料は急速に軟化し、その材料特性に示すように膨張しようとする。加圧を受ける下部受け具を、ショルダーとほぼ径等にしたことにより単位面積あたりの圧力は上昇し、得られた膨張力はこの増加した圧力により接合部内に保持されることとなる。この内部圧の上昇が接合ピンと材料間の抵抗を更に上昇させ、接合ピン周辺の塑性流動を促進する。しかし、重ね継ぎ手の点接合においては、接合を行う材料の接触面（界面）と接合ツールの接触部は接合ピン周辺部のみで、突合せ継ぎ手の連続接合における界面全面に渡る接触とは異なり塑性流動による攪拌にて十分な接合強度を得るのは困難である。SFWにおいては、蓄熱効率の上昇により加圧保持領域全体の軟化状態を促進させ、ピン周辺部及びショルダー下部の塑性流動と内部圧の上昇により流動部周辺の界面を大きくなじり、更にその結合状態を緻密にすることによって接合強度を発生させている。

つまり、SFWは塑性流動 (Fig.3 c部) と界面のねじり (Fig.3 b部) による圧接力の向上によって接合を行う接合法である。Fig.3及びFig.4は、その接合状態を示したものである。

## (3) SFWの課題

SFWでは、接合ツールの動作制御を位置制御ではなく

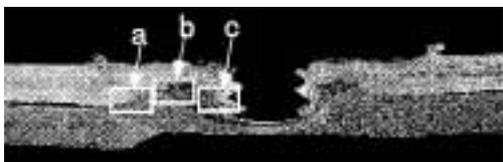


Fig.3 Cross Section of SFW

Area a

Area b

Area c



Fig.4 Enlarged View of SFW

加圧力制御（トルク制御）にて行っているため、板厚減少による母材の強度低下が発生する。制御パラメータをコントロールすることにより、板厚減少が進まない接合初期での強度確保が本接合における重要な課題である。

## 4. 接合装置の開発

### 4.1 接合ガンの開発

SFWは、接合ツールを旋回させた状態でそのツールと対向する位置に配置された下部受け具との間に一定の加圧力を保持しながら材料を把持することにより接合を行う技術である。よって、その接合ガンに要求される機能としては、

- ・安定した旋回駆動が行える
- ・安定した加圧駆動が行える
- ・両方の駆動を同期させ高精度で制御可能とする
- ・容易に3次元形状のワークに対しアクセスできる

ことである。

加圧駆動においては、従来より使用している抵抗溶接ガンの制御能力向上を目的とした剛性向上、及び摺動抵抗の低減にポイントを絞って開発を行い、旋回駆動においては、上記の加圧駆動に対し影響を与えることなくツールに旋回力を伝達する構造、及び旋回中心がズレない工夫（軸受けの配置、スプラインの共振対策、旋回振動の低減、接合ツール固定方法など）にポイントを絞って開発を行った。また、その加工動作の利便性について従来より使用している抵抗溶接の溶接ガンとほぼ同形状とすることにより、生産要件に影響を与えることなく展開が行えるように配慮した。

### 4.2 SFWロボットシステムの開発

3次元形状のワークに対し加工を行うにあたっては、製品形状に影響を受けることなく施工可能となる汎用性が重要である。従来より使用している抵抗溶接においてはこの汎用性を得るため、多関節ロボットを用い複数の製品を1台のロボットにて加工が行えるよう考慮して設備展開が行われている。本接合システムにおいても例外ではなく、多関節ロボットを用いたシステム構成をベースに開発に着手した。

その開発における留意点は、付帯設備を削減するため、加圧軸及び旋回軸をロボットの一軸として同期制御することにより、ロボット以外の溶接設備を一切必要とせずシステムを構築することである。本システムの開発においては、



Fig.5 Robot System of SFW

ロボット本体のハード及びソフト領域の開発要素が大きい  
ため、ロボットメーカーである川崎重工業株式会社と共同で  
システムを開発した。

本システムは、接合に用いる直接エネルギーが摩擦熱のみ  
であるため、Fig.5に示すとおり冷却水ホース、エアホ  
ース、溶接ケーブル等は一切なく2軸分のモーターハーネスの  
みがアーム上に配置される非常にシンプルなシステム構成  
となる。これは、単に付帯設備を削減することによる初期投資  
の低減を可能とするばかりではなく、量産における保守  
費用の面でも大きな効果を生むこととなる。また、電極等  
の消耗品についても一切発生しない（接合ツール及び下部  
受け具については接合による摩耗は発生しない）こと、及び水、  
エア、溶接電流等のエネルギーを使用しないで接合を行  
うことにより生産コストの面でも大幅な削減を実現して  
いる。

本システムは、従来工法に比べ大幅にその接合コストを  
削減し、エネルギー消費を抑え環境にやさしい設備として構  
築している。

#### 4.3 制御能力

接合ガンにてワークを把持する際、付加する加圧力はそ  
の姿勢による駆動部にかかる重力の影響により変化する。  
本システムにおいては、姿勢変化に対する補正機能や加圧  
制御ロジック及び制御パラメータの設定、調整手順に関し、  
徹底した評価検証を実施し制御能力の向上を図った。その  
結果、加圧制御能力については、ガン下向き～上向き間全  
ての姿勢においてFig.6に示すとおり $\pm 50$ N以内のバラツ  
キに抑えるまでの制御能力を実現している。また、加圧時  
ワークに与える負荷についても、上下ツールの同着性能及  
び開放時のしゃくり量は $\pm 0.3$ mm以内、加圧保持位置に関  
しては $\pm 0.1$ mm以内に抑えている。この非常に高い制御能  
力によって接合品質の安定確保を実現している。

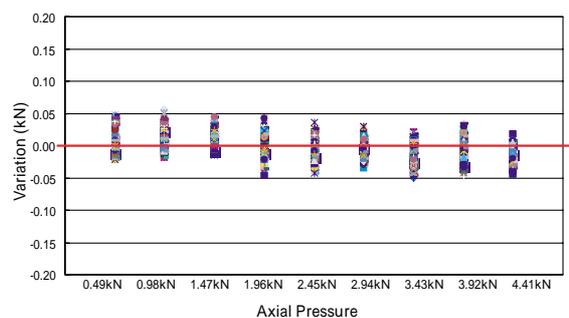


Fig.6 Control Capability of Welding Force

## 5. 接合特性

### 5.1 各接合条件の影響

#### (1) SFWの接合条件

SFWで使用する接合条件は、加圧力、回転数、接合時  
間の三つである。量産での加工において接合品質を容易に  
安定確保するためには、各接合条件を変化させたときの影  
響を定量的に評価しその接合特性を把握した上で最適接合  
条件の設定を行うことが重要となる。

#### (2) 加圧力の影響

回転数を一定の条件にて固定し、加圧力を変化させた場  
合の引張り試験結果についてFig.7に示す。引張り強さは、  
設定加圧力を上げることに伴い上昇し、最大引張り強さが  
得られるのに要する時間は短縮している。しかし、設定加  
圧力が低い場合は最大引張り強さが得られた後、接合時間  
を延ばしても得られる引張り強さに変化はないが、設定加  
圧力を上げると最大引張り強さが得られた後、接合時間の  
経過とともに引張り強さの急激な低下が確認されている。  
加圧力を上昇させることは、ツールと材料間の抵抗が上昇  
し接合初期に得られる発熱量を増加させ材料の軟化を促進  
させる効果があるといえる。

本システムにおいて接合中のツールは、常に定加圧力を  
保持するよう制御しているため、設定加圧力が高い場合得  
られた抵抗は材料の状態変化にほぼ影響を受けず保持され  
る。よって、得られる引張り強さは上昇し、最大引張り強  
さが得られるのに要する時間も短縮する。また、その高い  
抵抗を保持した状態にて加圧を付加し続けることにより急  
激な板厚減少が発生し、最大引張り強さ発生後の強度低下

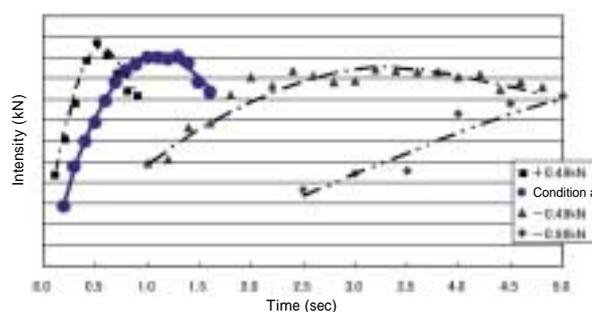


Fig.7 Effect of Welding Force

を起こしていると考察される。

接合時間を固定した場合についてFig.7に示す検証結果を考察してみると、同一の接合時間において加圧力が0.49kN変化しただけでも得られる引張り強さは大きく変化している。つまり、加圧力が引張り強さに大きく影響を与えるパラメータであることを示す。

### (3) 回転数の影響

加圧力を固定し、回転数を変化させた場合の引張り試験結果についてFig.8に示す。引張り強さは、ある一定の設定回転数までは上昇するが、その設定回転数以上の回転数を設定した場合得られる引張り強さは低下し一定値にて保持してしまう特徴がある。ただし、得られる引張り強さの立ち上がりは、設定回転数の上昇に伴い短縮している。

SFWにおける引張り強さは、塑性流動とその周辺部の界面のねじり状態にて決定されるため、回転数を上昇させた場合単位時間あたりの発熱量が増加し短時間で材料が軟化され、軟化した材料はツール回転数の上昇に伴い塑性流動速度が上昇し流動部周辺の界面をより大きく緻密にねじることによって得られる引張り強さを上昇させその立ち上がり時間を短縮している。しかし、塑性流動は加圧力によって付加されるツールと材料間の抵抗によって発生するものであるため、抵抗を固定（加圧力を固定）した場合塑性流動速度は回転数の上昇に伴い上限なく上昇するのではなく、付加された抵抗によってその上限速度が決定される。

よって、Fig.8に示すとおり一定の回転数まではその回転数に伴い塑性流動速度が上昇し引張り強さが上昇するが、付加された加圧力に対し上限値以上の設定を行うと、設定回転数に対し塑性流動が追従できなくなりツールと材料間にて滑りが発生し引張り強さの上昇が停止する。

この接合特性に関し、Fig.7及びFig.8を用いて説明を行う。Fig.7に示す条件a（印の特性カーブ）と、Fig.8に示す+500rpm（印の特性カーブ）の接合条件は全て同一であり、先に述べたとおり加圧力に対し回転数の設定値が高く材料内での塑性流動に滑りが発生しているものである。この状態にて、回転数を変化させず加圧力を0.49kN上昇させたのがFig.7の+0.49kN（印の特性カーブ）である。加圧を上昇させることにより抵抗の上昇が得られ、滑りの発生を抑制し塑性流動を行うことにより引張り強さ

が上昇していることが確認できる。

### 5.2 接合条件の設定

上記にて述べた、その接合特性を十分に踏まえた上で各特性をバランスさせることにより様々な外乱によるバラツキを吸収し安定した接合品質を確保するための接合条件の設定が、SFWにて接合を行う際の重要なポイントである。下記にその適用例を示す。

材料の表面抵抗の変化（成型油、防錆油、傷等）に対しては、ショルダー面の滑りによる発熱量の減少が予測される。よって、使用する接合条件は加圧力に対し回転数の設定を高くし初期発熱を上昇させることによりショルダー面の抵抗を安定させ、接合時間を長めに設定することによりその処理に要する時間のバラツキを吸収させる。この条件設定において重要なのは、回転数の設定を上げ故意に塑性流動の滑りを発生させることにより、最大引張り強さ到達後の板厚減少を抑え接合時間延長による引張り強さの低下を抑止しておくことである。

このように他の外乱（板間隙、ツールの温度上昇、時効硬化、加工硬化等）に対しても、その状況に応じた条件設定を行うことにより対策が可能である。

### 5.3 接合品質

#### (1) 引張り強さ

SFWでの引張り強さは、使用する接合条件に大きく影響を受けることはもとより、接合ツール形状（ショルダー形状及び径、接合ピン径及びピン長等）に起因するところが多い。ノーマルなフラット面ショルダーを有する接合ツールにて、接合を行った時の引張り試験結果をFig.9に示す。1.0mm 2枚重ね及び1.0mm×2.0mmにおいては2.0kN～2.3kN、1.6mm×2.0mmでは3.2kN程度の引張り強さが得られている。この引張り強さは、ツール形状を変更することにより更に上昇させることも可能である。

また、6000系同士の接合においては、融点付近まで温度を上昇させ接合を行うため、ベークハード効果により接合後1～3日程度自然放置することで得られる引張り強さが上昇する傾向があることが確認されている。（上昇率は10～20%程度）

#### (2) 耐食性

SFWにおける耐食性評価については、Fig.10に示すとおり

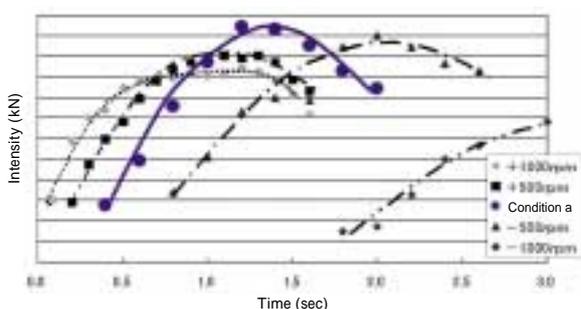


Fig.8 Effect of Rotation Speed

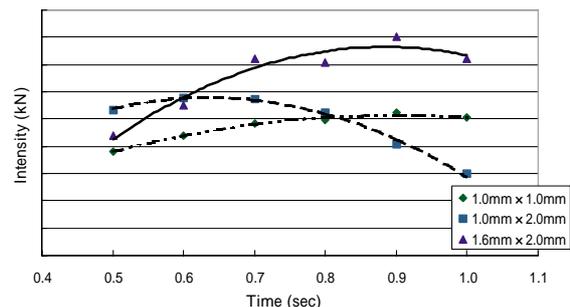


Fig.9 Tensile Strength



Fig.10 Evaluation Corrosion Protection

り、従来の抵抗溶接と比較しても同等以上の耐食性を有していると言える。

## 6. 環境に対する配慮

### 6.1 接合装置

環境対策の究極の目標は「設備を使用しないこと」「エネルギーを使用しないこと」であり、本開発においては、徹底した機能評価を繰り返し実施することにより各装置の性能や特性を十分に把握し、その性能を損なうことなく各装置を構成することに配慮してシステムの構築を図っている。

その取り組みにおいて一例を挙げると、接合ガンの開発においては単に加圧駆動を行うユニットに旋回駆動を付加するのみではなく、その構造設計を行うにあたり徹底した動作抵抗（摺動抵抗）の削減を図りエネルギー使用量を低減させ、その旋回部の制御においては専用の制御ユニットを起すのではなくロボットの一軸として制御を行うようにし付帯設備の追加を抑制している。また、これらのことにより接合ガンの動作性能（加圧力、回転数）を低下させないように、その制御ロジック及び補正機能に修正を加え対策を施している。

### 6.2 接合条件

環境に対する配慮を行っているのは、システムのみではなく接合条件の最適化による使用エネルギーの削減に関しても対策を実施している。例えば、材料の急激な形態変化を抑制するため接合条件を低めに設定し接合時間を延ばすことにより接合を行う場合、発熱量を抑え軟化の進行を遅らせることによって歪みの低減は図れるが、それに反し接合時間が延び放熱される熱量も増加するので使用エネルギーは増加してしまう。この場合、単位時間あたりの発熱量を増加させ接合時間の短縮を図るため接合条件を上げることにより使用エネルギーを低下させることが有効となる。ただし、瞬間的な発熱により歪みの発生においては不利となるため材料の剛性等に適した接合条件の最適化が重要である。

### 6.3 エネルギー消費

Fig.11に接合中の電流使用量を示す。使用する電流は約1/2000（図中SFWは縦軸スケールを1000倍している）、電力は約1/80に抑えられている。抵抗溶接とは異なり接合ツールが材料に接触した時点から接合が開始されるため、電流の使用時間は増加しているが使用量そのものが非常に小さいため大きな効果が得られている。また、接合時間への影響についても抵抗溶接の場合、加圧安定までの時間及

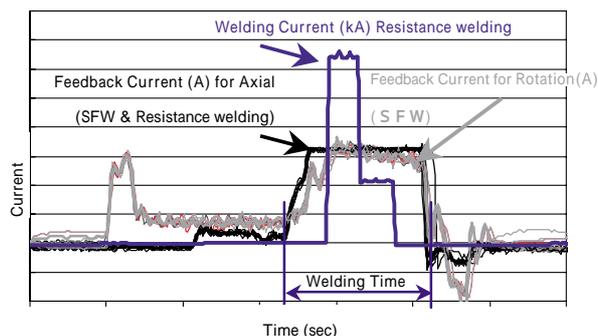


Fig.11 Energy Usage through Tooling

び加圧保持時間等が付加されるため生産効率の低下に影響は与えていない。

## 7. おわりに

現在、技術者に求められる技術開発の姿は、単に要求される品質や機能のみを満足させるだけのものではなく、それを使用する環境にまで十分な配慮がなされたものでなければならない。SFWは、設備投資、生産コスト、生産性、接合品質、環境保護等あらゆる面において非常に優位性の高い接合技術であり、上記に示す技術開発のあるべき姿を示すべき物である。我々は、この技術を更に改良しポデーを構成する大半の部品へ適用すべく、材料及び継手構造などに対しロバストな接合技術へと高め、低設備投資で安定した接合品質を容易に享受でき、また環境に配慮したやさしい生産設備としての完成度を高める技術開発に今後も継続し取り組みを行っていく。

最後に、ロボットシステムの開発に対し協力して頂いた川崎重工業株式会社殿、及び本接合ガンの開発に対し協力して頂いた株式会社井上製作所殿に感謝の意を表します。

### 著者



村上士嘉



山下浩二郎



妹尾安郎



橋 昭男