### 平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

### 「ロボット搭載型高機能シーム溶接機の開発」

# 研究開発成果等報告書 平成27年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 ART-HIKARI株式会社

## 目 次

第1草	研究開発の概要	
1-1.	研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2.	研究体制	5
1-3.	成果概要	6
1-4.	当該研究開発の連絡窓口	7
*** • **	10	
第2章	本論	
2-0.	3年間における「研究開発の概要」	8
2-1.	高周波可変電源装置の実装改良	9
2-2.	溶接トランスの小型・軽量化と応答性改善 …	10
2-3.	冷却装置の小型化と効率化	13
2-4.	· — · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	14
2-5.		15
2-6.	給電ハウジングの信頼性向上	16
2-7.	シーム溶接機の動作確認	16
2-8.	溶接信頼性の確認	20
o <del></del> -	FD-T VOR	
第3章	用語の説明	22
第4章	全体総括	23

### 第1章 研究開発の概要

#### 1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

### 1-1-1. 研究開発の背景

自動車の軽量化は、燃費向上(省エネ)に直結する喫緊の課題であり、各自動車会社を初め、素材メーカーも技術革新にしのぎを削っている。

軽量化に有効な≪自動車のオールアルミ化≫は、ヨーロッパ勢(アウディ、ベンツ、BMW、ロールスロイス、フェラーリ、ジャガー等)が大幅に採用している。





図1 ロールスロイス社のアルミ車体例

図2 メルセデス・ベンツ社のアルミ車体例

(撮影:ヨーロッパ自動車ショーにて、弊社役員が撮影)

アメリカでは、ピックアップ・トラックでのアルミ車体化も見られる。

こうした欧米車のアルミ車体は、アーク溶接とリベット留めにて製造されるため、構造枠組みを作ってから外板系をかぶせるフレーム構造を取ることが多い。従って、(生産性の制約から)比較的高級車での採用が進んで居る。

これに対し、モノコック構造と呼ばれる方式の方が、より軽量化しやすく、デザイン性の向上も得やすいが、接合がアーク溶接では生産性が上がらない。

一方、日本における**車体のオールアルミ化**は、ホンダ初代NSX(1990~2005年)が、<u>ART</u> —HIKARI(株)【以下弊社】のスポット溶接機にて、(世界的に見ても)初めて実現し、画期的な 記録を打ち立てた。

しかし、日本ではオールアルミ化がそれほど進んでいない。その理由は、(<u>連続容接ではない</u>)スポット溶接に頼らざるを得ないので、接合強度の問題でアルミ材が思うほど薄くならず、十分な軽量化効果が得られないこと、また、連続容接が可能なシーム溶接機の場合、現状では、(溶接トランスなどが重すぎてロボットに搭載できないので)流れ生産ラインに導入が不可能という課題を抱えている為である。

日本における車体オールアルミ化は、これからの検討課題と言える。

さて、最近、車体骨格の軽量化用として注目されている素材について、自動車メーカーへのヒアリングや新聞報道などからみた比較を次ページ表1に示す。

#### 表1 自動車の軽量化に資する車体骨格素材の比較

	高張力鋼板(ハイテン)	アルミニウム	炭素繊維
現 状	実用化し、更に硬度化	一部車種のみに採用	試作検討段階
特長	・大手鉄鋼メーカーが注 カレ、薄板化が進む	<ul><li>・重量が鋼鉄の1/3</li><li>・アルミ合金の種類が豊富</li></ul>	<ul><li>重量が大幅に軽くなる</li></ul>
生産にかかわる問題	・ 硬度が高くプレス成形が 難しい	・連続溶接が可能な、ロボット搭載型の溶接機が無い	・成形に時間がか かる
素材及びその他の問題	<ul><li>・衝突時、刃物になる危険性がある</li><li>・走行時、振動で高周波音生じ不快感</li></ul>	<ul><li>大電流が必要、熱伝導率が 早いなど、アルミは溶接が 難しい素材である</li></ul>	<ul><li>・車体骨格への実用 化は極めて困難</li><li>・素材が高価</li></ul>
リサイクル	0	©	×

こうした背景の下、川下企業である本田技術研究所などから、<u>生産ラインに導入可能なロボット</u> 搭載型で、アルミ材の**連続接合**ができる溶接機を開発して欲しい、と強い要請が来ている。

- こうした開発目的に対し、弊社のシーム技術が最も近い位置にあると判断している。その理由は、弊社のシーム溶接機が、既に次の課題をクリアしていることが大きい。
- ●シーム溶接で20m/分という、世界的にも唯一の高速接合を実現している。
- ②電源周波数の高周波化などに依り、鋼鉄系材料向けではあるが、既に、溶接トランスを<u>ロボッ</u>トに搭載出来るまで小型軽量化している。(次ページ 表2参照)
- ❸「トランス2次側の直流出力化」と「溶接電流のきめ細かい制御」により、シーム溶接の消費電力を従来に比べ半減するなど、省エネも進んでいる。
- ④アルミ材は、極めて溶接難度が高いが、定置式シーム溶接機では○.1 mmの薄板までシーム溶接の実績がある。

#### 1-1-2. 研究開発の目的

本研究開発は、上述のように、自動車会社のニーズを踏まえ、弊社の実績をベースに、『ロボット搭載型高機能シーム溶接機の開発』を実施、軽くてリサイクル性が高いアルミを自動車の骨格に適用する道を拓くことを狙う。

次ページ表2に、他社および弊社のシーム溶接機の「製品化状況」と、「本開発の目標(概要)」 との対比を示す。

アルミ材向けには、「本開発の目標」欄に示すように、『溶接電流を3万5千アンペアまで大きくする』『溶接トランスを50kgまで軽量化する』『溶接電流をきめ細かく制御するために溶接電源の可変周波数を1万ヘルツまで上げる』など、技術の一層の高度化が必要である。また、溶接円盤電極の送行制御や電極の加圧制御を高精度化し、溶接品質の向上を図ることも必要である。

### 表2 シーム溶接機の現状レベルと今後の開発目標

	他社シーム溶接機	弊社のシー	弊社のシーム溶接機	
	<mark>アルミ∶×</mark> ロボット∶×	現状定置式	現状ロボット式	本開発の当初目標
被溶接材料	鉄、ステンレス、チタ ン等	アルミ(厚さ 0.1~ 1.5mm)、鉄、ステンレ ス、チタン等	鉄、ステンレス、チ タン(アルミは不 可)	アルミ(厚さ 0.05~ 2mm)
溶接電流	鉄系 20kA	アルミ ~35kA	鉄系 ~20kA	アルミ ~35kA
電源 周数数	50Hz (又は60Hz)	∼1 kHz	3kHz	最高 <mark>3~10kHz</mark>
トランス 重量	鉄系向 250~400kg	鉄系向 250~400kg 別に向 400~600kg	鉄系向け 〜50kg (20kA迄)	別心付 ~50kg (35kA迄)

### 1-1-3. 研究開発の目標

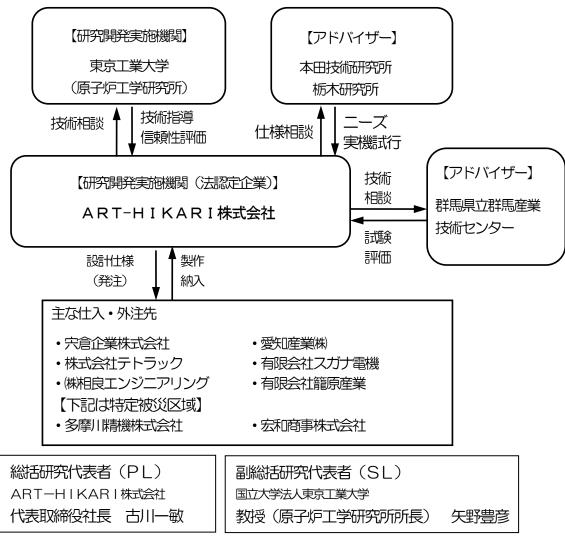
初年度(平成24年度)において策定した当初の開発目標は以下の通り。

自動車業界から熱望されている、アルミ材向けの<u>連続溶接が可能で、溶接スピードが早く、</u> ロボットに搭載できる抵抗シーム溶接機の開発を行う。溶接難度が高いアルミ材に対して、電極の 圧力制御に即応性を持たせるなど、溶接信頼性を向上する。

- 【1. 電源装置の高周波化と大容量化】
  - 【1-1】制御周波数10kHzまで可変化(3~10kHzまで可変)
  - 【1-2】インバータ電源の大容量化
- 【2. 溶接トランスの小型・軽量化と応答性改善】
  - 【2-1】溶接トランスの小型・軽量化(50kgまで軽く)
  - 【2-2】出力電流3万5千アンペアまで大電流化
    - ≪注:3年目で、目標値を出力電流4万アンペアに格上げした。≫
  - 【2-3】トランスの応答性改善(電流の立ち上がり5msec(1000分の5秒) 迄早く)
- 【3. 冷却装置の小型化と効率化】
  - 【3-1】水冷機構用モータの改善(超薄板ステンレスのキャンで密閉したモータの実用化)
  - 【3-2】水冷機構用ポンプの小型化(ポンプとキャンドモータの一体化)
- 【4. 送行制御の完全同期化】
  - 【4-1】ロボットのサーボモータ制御の改良(レゾルバなどの検出機構を付加)
  - 【4-2】フィードバック制御機能の付加
- 【5. 加圧制御の即応性向上】
  - 【5-1】高速反応サーボモータの開発
  - 【5-2】加圧制御用ソフトウェアの開発
  - 【5-3】加圧イコライジング機能開発(電極の向きが変っても、両電極への圧力を均等化)
- 【6. 溶接信頼性の確認】
  - 【6-1】溶接継手の評価
  - 【6-2】溶接信頼性の評価(溶接部とよりでは、溶をはないできょうです。

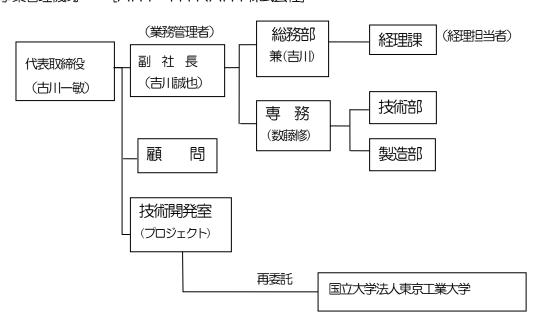
### 1-2. 研究体制

### 1-2-1. 研究組織



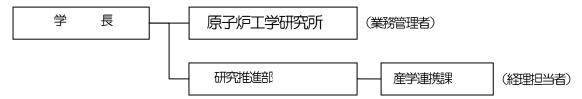
### 1-2-2. 管理体制

### ①事業管理機関 [ART-HIKARI株式会社]



### ② 再委託先

### [国立大学法人東京工業大学]



### 1-2-3. 研究者氏名

### 【事業管理機関】

(研究員)

### ART-HIKARI株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
古川 一敏 (再)	代表取締役社長	123456
吉川 誠也 (再)	取締役副社長 兼総務部長	123456
数藤 修	取締役専務	235
山中 英雄	技術部長	2345
加藤 秀明	技術部員	12346
桝本 武雄 (再)	顧問 兼経理課長	14

### 【再委託先】

国立大学法人東京工業大学(研究員)

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
矢野 豊彦	原子炉工学研究所 所長・教授	236
吉田 克己	原子炉工学研究所 助教	236
渡邉 紀志	原子炉工学研究所 研究員	236

### 1-2-4. 協力者氏名

氏名	所属・役職	備考
古舘 孝次	株式会社本田技術研究所栃木研究所 完成車試作ブロック副チーフエンジニア	アドバイザー
加部 重好	群馬県立群馬産業技術センター 機械係 独立研究員	アドバイザー

### 1-3. 成果概要

		具体的	な開発仕様	開発の
	開発目標(仕様など)	25年度迄の達成内容	26年度の開発内容	達成度
電源装置	高周波可変電源装置の実 装改良(電源装置の高周 波化と大容量化)	・トランス1次側への 出力 960A	<ul><li>トランンス1次側への 出力 1,280A (IGBT容量アップ等)</li></ul>	100

		具体的	開発の	
	開発目標(仕様など)	25年度迄の達成内容	26年度の開発内容	達成度
トランス	溶接トランスの小型・軽量化と応答性改善	・温度上昇対策要 ・2台並列使用。 35kA ・50kg以下	<ul> <li>・温度上昇許容値以内</li> <li>・2台並列使用、</li> <li>40kA</li> <li>45kg</li> <li>立上り5msec以下</li> </ul>	100
冷却裝置	冷却装置の小型化と効率化	<ul><li>キャンで密閉したモータの基本試作</li><li>ポンプとの一体化試作</li></ul>	・製品化への改良を検討	90
走行制御	ロボットとの協調性強化による走行精度の向上	・走行制御の機能向上 ・フィードバック制御 の付加		100
加压制御	加压制御の即応性向上	<ul><li>高速反応サーボモータの開発</li><li>制御装置・ソフトの開発</li></ul>		100
	イコライジング機構の付加		<ul><li>・溶接機のフローティング 機構を組み込み</li><li>・制御ソフト組み込み</li></ul>	100
シーム溶 接機の動 作確認	<ul><li>・溶接式験における各種 測定装置の整備</li><li>・シーム溶接機の動作お よび性能試験</li></ul>	<ul><li>・溶接機向け仕様の口 ボット購入</li><li>・多機能シーム溶接機 の組立</li></ul>	<ul><li>特殊大電流計など整備</li><li>基本仕様の確定</li><li>ロボット搭載および性能</li><li>試験、動作確認の実施</li></ul>	100
)g'a+++/==±∓	溶接継手の評価		• 溶接ナゲット部分の組織 分析評価を実施	100
溶接信頼性	溶接信頼性の評価		・ナゲット部分の断面形状を抽出し、ナゲットの長軸直径の平均値などを求め、溶接信頼性を評価	100

### 1-4. 当該研究開発の連絡窓口

住所: 〒374-0054 群馬県館林市大谷町2918番地

名称: ART-HIKARI株式会社 役職・氏名:取締役副社長 吉川 誠也

Tel: 0276-71-1180 Fax: 0276-71-1182

E-mail: yoshikawa@art-hikari.co.jp

### 第2章 本論

### 2-0. 3年間における「研究開発の概要」

自動車車体のオールアルミ化を推進するため、生産ラインに導入可能なロボット搭載型で、アルミ材を連続容接するシーム容接機を試作開発した。

3年目の具体的研究項目の成果(概要)は以下のとおり。

① 電源装置の高周波化と更なる大容量化:

平成25年度では、溶接トランスへの1次電流を640Aから960Aまで流せるように電源容量を増大し、平成26年度では、1次電流を1280Aまで流せるように、最近入手可能となった大電流パワー半導体素子を採用し、更なる電源容量アップを実施した。

それと共に、プリント配線基板を再度見直し、制御機能変更への対応を容易にした。

② 溶接トランスの小型・軽量化と更なる大電流化:

初年度において、溶接トランス2台合計(1セット)で50kgという小型・軽量化を実現した。

しかし、鉄芯の温度上昇過大という問題が残り、平成25年度では、根本的な温度上昇対策(巻線の形状変更、鉄芯量の減少、鉄芯材の薄板化、ダイオード接続方法変更)を実施し、改造を行った。

平成26年度では、溶接電流を40kAまで引き上げるべく再設計し、小型・軽量を維持しながら、更なる大電流化のニーズに対応した。

具体的には、再近入手可能となった12000Aという大電流ダイオードを組み合わせ、巻線や水冷流路などにも工夫を疑らし、40kA向け溶接トランスを試作開発した。

また、多機能シーム溶接機にをロボットに搭載した状態で、2次(溶接)電流値の追従性の試験を行い、40kAといった大電流になっても、通電開始5msec以内に40kAに到達できる、早いウち上り特性が得られたことを確認した。

③ イコライジング機構の付加:

ロボット搭載に際し、溶接機のフローティング (ワークに溶接機の自重が掛らないように) が可能な取付け構造を工夫した。重力の変化を検知する信号と溶接機の向きとを計算し、自重をゼロにするように制御してバランスを取る制御用ソフトウェアも、基本部分を開発した。

④ シーム溶接機の動作確認:

詳細性能式験に必要な測定用機材の不備を補充した。

また、試作完成した『ロボット搭載型高機能シーム溶接機』について、動作確認や詳細性能試験を実施した。

さらに、ロボットシーム溶接機の各機器(トランス部、ダイオード部、給電ハウジング部、溶接電極部など)の発熱量を、冷却水温度上昇式験を実施し調査した結果、2次電流値35kAの大電流条件下において、総発熱量は約43kWあることがわかった。その内訳は、ダイオード部:43%(18.32kW)、溶接電極部:29.7%(12.66kW)、トランス部は、22.1%(9.41kW)などであり、ダイオード部が総発熱量の大部分を占めている。

その際、多機能シーム溶接機全体を除熱するために必要な冷却材(水)の流量確定した。

⑤ 給電ハウジングの信頼性向上:

更なる溶接電流の大電流化(40kA)に対応して、回転給電機構部の軸径を長くし、導電部 (ブラシ)の接触面の増大を実現した。

⑥ 溶接信頼件の確認:

アルミ溶接のナゲット(溶隔部分)の組織分析は、金属顕微鏡で拡大写真を撮り確認したが、

自動車で使用が想定される板厚ではいずれも良好であった。

アルミニウム板(1枚あたり板厚 t=1.5, 2.0, 2.5mm)を2枚重ね、シーム溶接したときの溶接ナゲットについて評価を行い、強度的観点から溶接信頼性を有していることを確認した。

図3に、本開発のシーム溶接機の構成図を示し、以下各機能ブロックにおける開発の具体的内容を述べる。

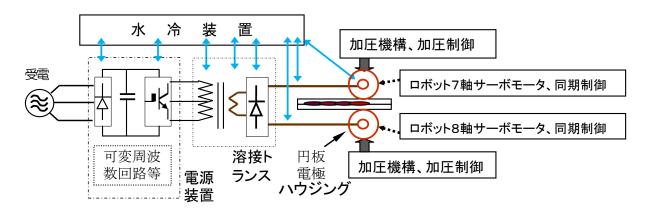


図3. 本開発のシーム溶接機の構成図

### 2-1. 高周波可変電源装置の実装改良(電源装置の高周波化と大容量化)

### 2-1-1. 制御周波数3~10kHzまで可変化

溶接電流の電源周波数を高周波化することにより、溶接トランスの鉄心(コア)を減らした。 また、アルミ材の溶接時に、大電流の通電と休止(冷却)時間を極めて短い時間幅で制御する ことが可能になり、信頼性の高い接合が得られる。それと共に、効率の良い加熱になる(熱の蓄積 効率が上がる)ので、消費電力の削減も進んだ。

更に、電源周波数が高い方が、溶接電流の許容値の中を広く取れることが究明できた。 こうした効果を実際に得るために、3~10kHzまで電源周波数の可変範囲を広げた。

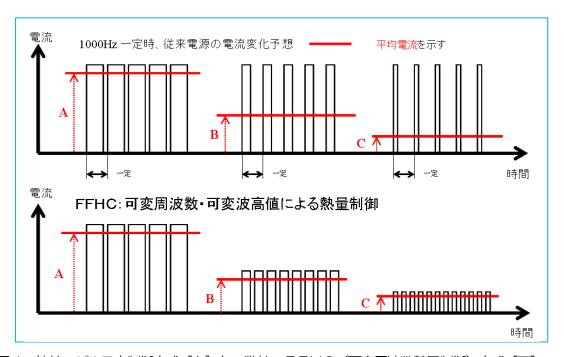


図4 他社のパルス中制御方式 [上] と 弊社のFFHC(可変周波数熱量制御)方式 [下]

前ページ図4に、一般的なインバータ(波高値一定、パルス巾制御)電源と弊社の"FFHC (可変周波数熱量制御)"方式の違いを示す。

即ち、弊社では、図4に示すように、溶接電流の可変高周波数化と共に<u>波高値を変化させて</u>溶接電流値を制御しているのが、大きな特長である。

そのため、電流値が大きくても立ち上りが早くなり、高周波化で溶接電流のON(加熱)OF F(休止)の時間巾が細かく規程できるようになった効果と相まって、溶接の発熱部分(接触抵抗が大きい部分)における蓄熱を効率良く制御することが可能となり、溶接の信頼性が大幅に向上した。

こうした特長を持つ弊社独自の方式を、FFHC(可変周波数熱量制御)方式と名付けている。

### 2-1-2. インバータ電源の大容量化

平成26年度(3年目)では電源装置の更なる容量アップを図り、溶接トランスへの1次電流 (従って電源装置からの出力)を、600V,1280Aまで(従来は960Aまで)流せるように大電流化を実現した。

このために、平滑コンデンサーの容量を増やし、また、半導体 I GBTの容量アップも行って 1 280Aの大電流に対応できるようにした。

電源装置での周波数設定は、「タッチパネル方式に依るデジタル設定方式」への変更を維持し、操作性の向上も実現している。

図5に、試作開発した電源装置の外観を示す。



図5 大容量(出力1280A、600V)可変高周波電源装置

ただ、平滑コンデンサの占有体積が大きく、また、溶接トランスへの供給電流に対応して導線 が太くなったこともあり、巾寸法が3割くらい大きくなった。

平滑コンデンサについては、耐圧600Vクラスが商品化されておらず、そのため耐圧400 V品を直列に使用せざるを得ず、コンデンサの数が倍になってしまう。今後、部品メーカの情報も確認しながら改良を目指すなど、電源装置の小型化も改良を進めて行く。

### 2-2. 溶接トランスの小型・軽量化と応答性改善

### 2-2-1. 溶接トランスの小型・軽量化

溶接トランスは、精度の高い型部品、モールドで固めた巻線や冷却水の流路を作り込んだ要素部品などで構成されるため、設計変更や構造の改良には、大変な手間(時間と経費)が掛か

### る。それだけに、他社がまねの出来ない、ノウハウの塊となっている。



図6改良した小型溶接トランス

#### 1 電磁鋼板素材の選定

電磁鋼板素材を種々検討して鉄損を減らし、積層電磁鋼板の量の削減を実施し、低損失性能のカットコアを用いた。

3年目は、コアの作り方、冷却水路やその組み方を見直し、更なる軽量化を進めた。

② コア枠の小型化

従来の構造を見直し、トランスの寸法をギリギリまで抑え込み、2年目から3年目で、冷却水の流路経路や形状を見直し、除熱効果が十分得られるようにした。

③ 太くなる2次側電線の組み込み法の改善

初年度で、大電流化(35kA)に対応して、溶接電流が流れる2次側コイル(ブスバー)の 断面積を増やす必要があり、2次コイルの断面積が、1000mm<sup>2</sup>と太くなっている。 2年目から3年目で、巻線の形状を変更(コイル径を小さく)し、巻き数比を微妙に調整し、 更に小型化した。

### 4 トランスを2台に分割

ロボットアームの可搬重量は、アームに搭載するトランスなどのバランス(マウントからの偏 芯量の調整)で、軽減効果が得られる。そのため、重量物のトランスを2台に分けた方がバランスを取りやすい。(シーム溶接機の重心を、マウントの軸に近づけることが出来る)初年度から2年目で、そうした観点から、溶接トランスを2台並列で使う方式にして、トランス1台の重量を25kgに抑えた上で、2台使用でも合計50kgとする方式を採用、小型・軽量化の実現に成功した。

3年目では、トランス1台の重量を22. 5kgに抑え、2台使用でも45kgへと軽量化した。

### 2-2-2. 出力3万5千アンペアまで大電流化【3年目で4万アンペアに格上げ】

出力電流の大容量化については、以下の開発を行った。

⑤ 冷却方式の改善

トランスの枠、半導体部品や導線(ブスバー)に冷却用の細いパイプを通し、水を循環させ冷却を図っている。

初年度から2年目では、出力電流用整流ダイオード部の冷却水流路を増やし、小型化しても冷却効果が落ちないように改良した。

また、特殊含浸樹脂の使用により、絶縁グレードF種(155℃)での使用が可能になった。 3年目は、冷却水流路を組み換え、2次コイルを貫通する水冷パイプも太くし、また、冷却板の締め付け方法の精度向上を図り、冷却効果の増大を実施した。

### ⑥ 半導体(整流ダイオード)の実装方法

溶接トランスの2次側に、整流用ダイオードを使っているが、実装構造を見直し、2年目では、 ダイオード用冷却(放熱)板の材質・形状を再検討し、温度上昇を抑えた。

また、ダイオードの接続方法も変更した。

3年目は、ダイオードを7000Aモジュールから、近年入手し易くなった12000Aモジュールに変更するとともに、ダイオードモジュールの冷却水流路を組み換えた。

### ⑦ 出力(溶接)電流4万アンペアを実現

電源周波数が高くなるほど、鉄心への電磁誘導による発熱が多くなる。また、シーム溶接では、使用率(通電と休止時間の和と通電時間との比率)を50%近くに上げることもあるので、発熱が更に増えるが、上で述べた冷却方法等に改良設計を行い、2年目までの総合対策にて出力(溶接)電流3万5千アンペアを実現した。

3年目は、12000A大容量ダイオードなどの採用で、溶接トランスの出力電流を4万アンペアまで増大することに成功した。(図7参照)

以上の内容であるが、小型・軽量化で且つ4万アンペアを実現できた要点は、「トランス鉄芯の軽量化追求」「インバータ回路の可変高周波数化」「トランス2次側冷劫水量の増加」「半導体の容量アップ」などが大きく寄与したと言える。

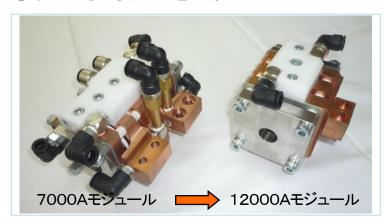
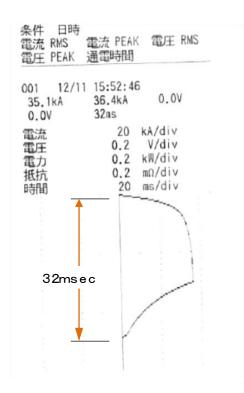


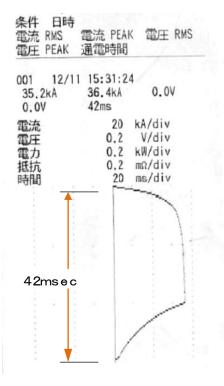
図7 溶接トランス出力側のダイオードモジュールの大容量化

### 2-2-3. 溶接トランスの応答性改善

また、溶接トランスの2次電流値の出力確認講験も実施した。

溶接トランスの出力として、35kAを流したときの、波形の時系列変化を、トロイダルコイル(M370)で検出した記録を 図8に示す。トランス使用率50%(<u>加熱時間30ms</u>)に対して、<u>出力加熱時間は32msであり、電流は5ms以内に35.1kA(100%)に立ち上っている</u>ことが確認できる。また、トランス使用率50%(<u>加熱時間40ms</u>)に対して、<u>出力加熱</u>時間は42msであり、電流は5ms以内に35.2kAに到達していることが確認できる。





(a) トランス使用率50%(加熱時間30ms)

(b) トランス使用率50%(加熱時間40ms)

図8 35kA を入力したときのトロイダルコイル (M370) による時系列結果

### 2-3. 冷却装置の小型化と効率化

### 2-3-1. 水冷機構用モータの改善

シーム溶接機では、水タンクを用意し、外付けのポンプで、シーム溶接機のトランス、半導体、銅ブスバー、電極などに水を循環させている。

冷却水を循環させる、ポンプとモータは、水槽の外に両者を連結して置くか、ポンプを水槽内に、モータを水槽外に置くか、のどちらかになる。そのため、補機である水冷装置が設置スペースを広くとるという問題がある。

その対策の一つとして、モータの、コイルを内蔵する<u>ステータや</u>シャフトと一緒に回転する<u>ロータを、それぞれステンレスの超薄板のキャンで密閉</u>、水槽内で運転できるモータを設計・試作し、水冷装置のコンパクト化を図るものである。

こうしたモータが存在しないのは、モータのステータ(固定子)とロータ(回転子)の隙間(ギャップ)が、電気的な効率向上のため、0.2~0.3mm程度に抑える必要があり、ステータやロータの密閉に使うステンレス板が、厚み30~50 μmという超薄板になり、連続接合する手段が無かった為である。

こうした極めて難しい、超薄板の連続溶接が可能な"シーム溶接機"の開発に、弊社が成功しており、今回の開発でその成果を水冷システムの改善に結びつける事をめざした。

モータを水中で使えるように、モータのステータ(固定子)とロータ(回転子)をそれぞれ厚

み30~50 μmという超薄板で密閉するために、初年度では、腐食に強い(炭素含有率が少ない)ステンレスの超薄板で、ステータとロータを密閉する技術を開発した。

具体的には、(1) ロータ・ステータを密閉する、 φ80 くらいの円筒形の超薄板ステンレスパイプの製作、(2) その超薄板ステンレスパイプを、ステータ内径やロータ外径に密着させる技術、(3) コイル部などに充填する、絶縁性・熱伝導性・耐熱性に優れたモールド材の選定、

(4) ロータの内径には、回転シャフトが嵌合されているが、ロータ外径側を覆う超薄板ステンレスパイプとそのシャフトでロータを密閉する方法など、いくつもの壁を乗り越えることが必要だった。

こうした問題点を一つひとつ対策して、試行錯誤を繰り返し、下記図9に示すように、ステータ、およびロータを超薄板ステンレスの缶で密閉する構造を試作開発した。



図9 ステータに 厚み50 μmの超薄板製 ステンレスパイプを装着した状態



図10 水中運転が可能な モータ・ ポンプー体品の試作品

### 2-3-2. 水冷機構用ポンプの小型化

2年目の試作開発では、前項の、水中で運転できるモータと、ポンプとを一体化する可能性を 探ることに重点を置いた。

ポンプの構造には、各種の方式が実用化されているが、今回の開発では、ポンプ部分も出来るだけ簡素で、コンパクトにし、図10に示す試作品を製作した。

しかし、水冷機構用モータを水槽内に置くには、溶接部の腐食信頼性道験が必要である。そう した腐食道験の実績がある(ノウハウを有する)企業との連携も考え、更に製品化に向けて試 作開発を続けて行く必要がある。

#### 2-4. 送行制御の完全同期化

### 2-4-1. 送行サーボモータ制御の機能向

ロボット式シーム溶接機では、ロボットに7軸と8軸を追加し、その軸に搭載したサーボモータで円盤電極を回転し、電極への走行(回転速度)指令を実行する。

接合が困難なアルミ材を溶接可能にするためには、走行指令による回転位置と実際位置を完全に一致させ、瞬期分の溶接タイミングと同期を取ることが必要である。

特に、瞬時の通電と休止を繰り返すうちに、円盤電極が少しずつ摩耗すること等により、(対局する円盤電極でワークを挟みこみながら走行する際に)両電極の位置に微妙なずれが生じる。 今回目標にしているアルミ溶接では、40kAという大電流になるので、特に精度の高い走行位置制御が要求される。

従って、2年目の試作開発において『電極磨耗に対応する電極軸位置補正機能』を付加した。

### 2-4-2. フイードバック制御機構の付加

ロボット式シーム溶接機円盤電極の摩耗検出は、対向する二つの円盤電極の動作位置のストロークの差を取ることによって検出する方式とした。

そのストローク差をフィードバックする事によって、対をなす両円盤電極の交点の位置を精密に補正するので、円盤電極の摩耗度に応じた補正が可能となった。

また、自動車の窓枠部分を溶接する場合などでは、湾曲部が存在する。湾曲部の溶接では、外側と内側の円盤電極に対して、送行位置の差が生じる。この内輪・外輪の差を演算によって補正するプログラムを開発して、円盤電極のスリップ等の解消(位置精度向上)を図ることが出来た。

### 2-5. 加圧制御の即応性向上

### 2-5-1. 高速反応サーボモータの開発

材質の柔らかいアルミニウム材を溶接する場合は、640°C辺りで軟化状態を経ないで瞬間的に 固体から液体に変わるため、溶接電極への加圧を精度よく変化させる制御が必要となる。

このため、高速反応サーボモータと高速応答機構を設計し、加圧制御指令に瞬時に反応できる加圧機構を試作開発する必要があった。

電極への加圧力を変化させるサーボモータは、中空構造として、その中空にスピンドルをネジ機構で組み込み、サーボモータの回転がスピンドルのせり出しとして高速航答が可能な構造とした。

高速反応の性能として、加圧到達時間の目標を1msec/kNとした。

初年度の試作中空サーボモータの確認 講像では、加圧到達時間が2.1 msecとなり、目標値に対して未達となった。

2年目では、サーボモータ出力の検討やスピンドルンのピッチの見直しを進めた。

また、応答速度(加圧到達時間)の実測にでは、加圧制御装置とFFHC電源装置で、加圧指令(トルク切換え信号)から実際にロードセルにトルクが加わる応答時間を実測する方法で行った。

上述のように、中空サーボモータのスピンドルの動きを、ロードセルで検出したが、ロードセルの場合積分時間が加算されるので、試験結果のデータは実際の応答時間よりも長くなっている。

1 k N加圧力を上げる状況においては、 応答性能が発揮されるが、1 k N加圧力を 下げるという状況では、意図した加圧力に 追従しなかった。

したがって、加圧力の上げと下げで、定数を設ける必要があるという事が分かった。



図11 中空サーボモータの試作機外観

そうした問題点への対応を含め、加圧用中空サーボモータ専用に、独自のドライバ(制御装置) を開発した。ロボットのドライバで制御していたのに比べ、独自の専用ドライバできめ細かい動きを設定できるようにした。

### 2-5-2. 加圧制御用ソフトウェアの開発

前項の制御に向けて、加圧制御用ソフトウェアを開発した。

### 2-5-3、イコライジング機能の開発試作

自動車のドア窓枠部分の溶接では、シーム溶接機の向きが真下だけではなく、横向き、上向きなど複雑な動きが必要となる。

そうしたシーム溶接機の向きの変化に対応し、特に窓枠部の溶接でワーク(被溶接材)が3枚重ねになるときは、各ワーク間の接触断がバランスしないので、安定した溶接が困難となる。その為、回転円盤電極とワーク(被溶接材)との位置バランス(間隙の均等化)の確保や溶接部への加圧力の調整が必要となる。

3年目で初めて、こうしたイコライジング(溶接間隙の均等化)機能を実現するべく、ワークに 溶接機の自重が掛らないようにする技術の開発に取り組んだ。

ロボット搭載に際し、溶接機のフローティングが可能なスプリング機構を、シーム溶接機を(ロボットに)懸架する部分に組み込んだ。

自重を検出するセンサー信号と溶接機の向き(ロボット側で計算できる)とを計算し、自重をゼロにするように制御しバランスを取った。

その制御用の基本ソフトウェアも、開発した。

ただ、予算的に十分な費用がかけられなかったことやアルゴリズムの見直しも必要なことから、本来の機能実現には、今後も研究開発が必要である。

### 2-6. 給電ハウジングの信頼性向上



図12 小型・軽量化を達成した給電ハウジング

2年目で、内部ブラシの形状と配置を工夫して、ケースを細くした。ハウジングの長さ寸法が短くなったことで、軽量化を実現した。

3年目で、回転ブラシの長さと配置を工夫して、給電部の拡張を図り、4万アンペアの大電流が、 溶接トランスから回転円盤電極へ導電できる構造に、改良変更した。

### 2-7. シーム溶接機の動作確認

### 2-7-1. 多機能シーム溶接機の基本仕様

まず、試作開発した『ロボット搭載型高機能シーム溶接機』(組立て品)を、350kg可搬型ロボットに搭載した状態を図13に示す。

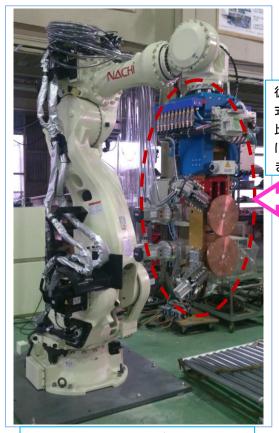


図13 開発した『ロボット搭載型 高機能シーム溶接機』(最大出力電流 4万アンペア)をロボットに取り付けた状態。溶接機重量は約320kg



図14 従来の定置式シーム溶接機。 (最大出力電流4万アンペア) 重量は約2500kg。

図14に示した、従来の定置式のシーム溶接機は、最大出力電流が同じく4万アンペア仕様で、その重量は約25000kgであるが、図13の『ロボット搭載型高機能シーム溶接機』単体の重量は約320kgと、軽量化比率は1/7に及んでいる。溶接機の形状も大幅に小型化を達成している。

表3に、多機能シーム溶接機本体の主な仕様を、次ページの表4に、電源装置(溶接コントローラ)の主な仕様を示す。

表3 『ロボット搭載型高機能シーム溶接機』本体の基本仕様

	項目	<b>仕</b> 様	備考
	定格容量	280kVA (使用率50%の場合)	
溶接能力	最大短絡電流	40, 000A	
	溶接トランス(台数)	AH-MF-R140 (2台)	
電極形状	電極径	$\phi$ 250mm (直径の組合せ自由)	
	厚み * 断面形状	ワーク材質に合わせ統制可能	
電極回転速度		11. Om/分(電極径φ250mm時)	
加圧機構、駆動方式		サーボモータ	
シーム溶接機本体重量		313kg	

表4 『ロボット搭載型高機能シーム溶接機』の電源装置(溶接コントローラ)基本仕様

項目		<b>仕</b> 様	備考
	電流制御方式	FFHC(波高値 & 周波数制御)	
溶接制御	最大出力電流	1, 280A	
	溶接条件登録件数	240	
外形寸法	幅 * 高さ * 奥行	465 * 597 * 630[mm]	
冷却水流量		5L/分 (水温5~30℃)	
重量		108kg	

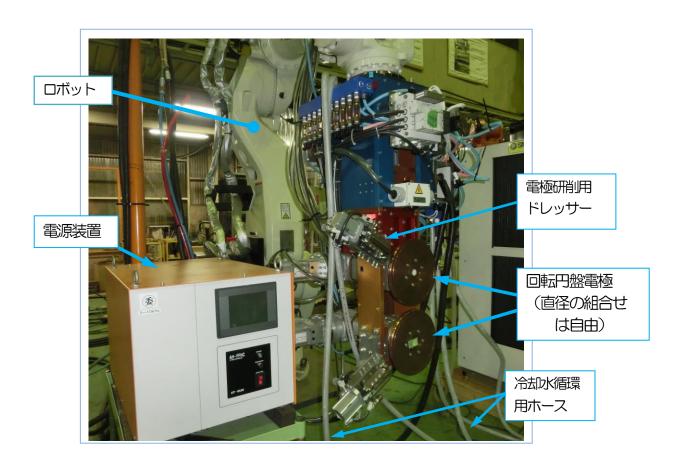


図15 高機能シーム溶接機をロボットに搭載し、動作・性能確認 に向けて、電源 記線や各種ホース類接続した状況

### 2-7-2. 多機能シーム溶接機の基本特性の試験データ

本試作開発の最大の目標である「溶接(2次)電流4万アンペア」の特性確認 環、加圧力特性 試験など、基本仕様を確認するための試験を実施した。

また、トランスの温度上昇試験、シーム溶接機各部の冷却水流量特性試験なども実施した。紙面の都合で、代表的なデータを、以下に示す。

(1) 溶接トランスの2次(出力) 電流特性 環境 円盤電極の間隙 抵抗値を μΩレベルに調整し、 2次電流の特性 環境を行った。 (次頁 図16)

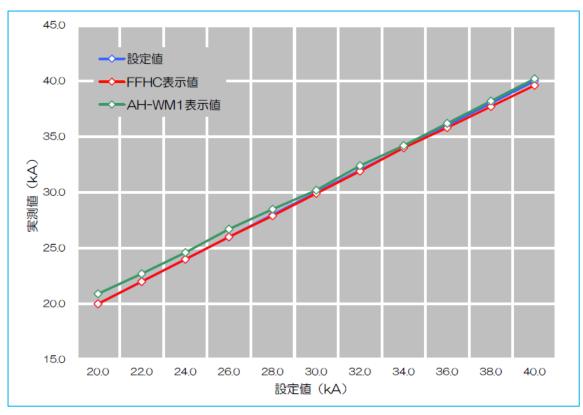


図16 溶接トランス2次電流特性 確認 護データ

### (2)加圧力特性試験

溶接時の円盤電極に加える圧力の設定値と圧力の実測値の関係は、下図の通りであった。

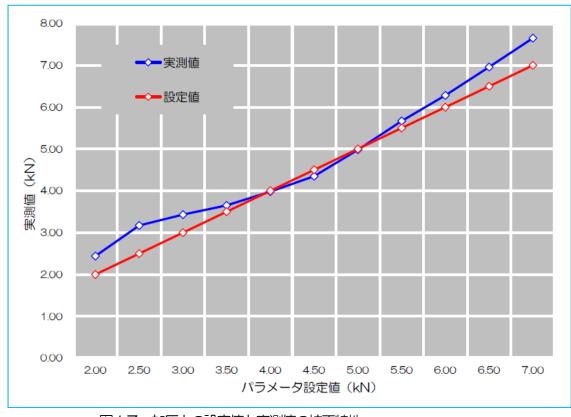


図17 加圧力の設定値と実測値の校正特性 (加圧力は、サーボモータのトルクを調整して発生させる)

### (3) 円盤電極周速特性試験

速度設定値11m/分までは一致し、それ以上の速度では11.4mに制限される。

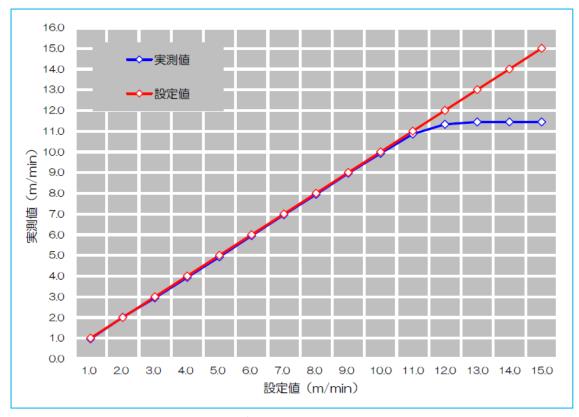


図18 溶接速度設定値と実測値の関係

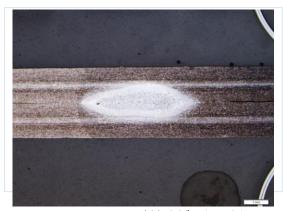
### 2-8. 溶接信頼性の確認

### 2-8-1. 溶接継手の評価

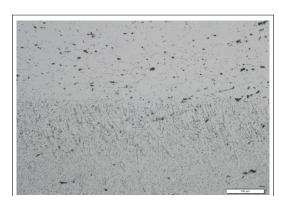
試作開発したシーム溶接機のアルミ溶接に対する性能確認を行うべく、アルミのシーム溶接片を7種14枚作成し、群馬産業技術センターにて、溶接部(ナゲット)の組織分析を行った。 図19、図20に、組織分析写真の一例を示す。

この写真の溶接テストピースの材質は、アルミニウム材で、 厚さ1.5mmを2枚重ねてシーム溶接を行った。

溶融疑固の痕跡が殆ど見えない、きれいな仕上がりで、良好な溶接状態であると判断している。



<u>図19 アルミのシーム溶接ナゲットの断面</u> 写真(倍率:12.5)



<u>図20 ナゲット断面の拡大写真</u> (200倍に拡大)

### 2-8-2. 溶接信頼性の評価

開発したロボット搭載型シーム溶接機を用いて、アルミニウム板(1 枚あたり板厚 t=1.5, 2.0, 2.5mm)を2枚重ね、シーム溶接したときの溶接ナゲットについて評価を行った。

画像処理により抽出した溶接ナゲットから、溶接信頼性を検証するために、溶接ナゲットの幾何学的形状について調べた結果を表了に示す。各板厚(t=1.5, 2.0,2.5mm)に対する溶接ナゲットの等価直径、また、溶接ナゲットを楕円と近似した場合の長軸直径、短軸直径の平均と標準偏差を示している。

スポット溶接では、一般的に、溶接信頼性は、溶接ナゲット径(長軸直径)が板厚 t の  $5\sqrt{t}$  または  $4\sqrt{t}$  以上あれば問題無いとされている。

シーム溶接では、このような明確な判断基準はないが、線溶接なのでスポットより接合強度が上がることから、溶接信頼性は、溶接ナゲット径(長軸直径)が板厚 t の $3\sqrt{t}$  以上あれば問題無いと考えられる。(表5には、各板厚 t に対する  $5\sqrt{t}$  または  $4\sqrt{t}$  について、溶接信頼性の参考直径として明記している。)

こうした試験の結果から、ロボット搭載型シーム溶接機は、大電流を必要とするアルミニウム板のシーム溶接において、板厚 t=1.5, 2.0,2.5mm の範囲において、4√t を満たすことが確認され、強度的観点から、溶接信頼性を有していることがわかった。

表5 板厚の異なるアルミニウム板のシーム溶接におけるナゲット径の比較

±5.00 +	ナゲット	ナゲット	ナゲット	参考值	参考値
板厚 t	等価直径	長軸直径	短軸直径	$5\sqrt{t}$	$4\sqrt{t}$
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1.5	Ave(2.48)	Ave(4.49)	Ave(1.40)	C 19	4.00
1.5	Std(0.15)	Std(0.66)	Std(0.28)	6.12	4.90
2.0	Ave(3.48)	Ave(5.38)	Ave(2.22)	7.07	<b>F</b> CC
2.0	Std(0.16)	Std(0.14)	Std(0.23)	7.07	5.66
2.5	Ave(3.94)	Ave(6.13)	Ave(2.56)	7.01	6.20
	Std(0.12)	Std(0.08)	Std(0.25)	7.91	6.32

なお、表5において、Ave: 平均、Std: 標準偏差である。

#### 溶接信頼性の纏め

開発したロボット搭載型シーム溶接機を用いて、アルミニウム板(1枚あたり板厚 t=1.5, 2.0, 2.5mm)を2枚重ね、シーム溶接したときの溶接ナゲットについて評価を行った結果、溶接ナゲット径は、4√tを満たすことが確認され、強度的観点から、溶接信頼性を有していることがわかった。

### 第3章 用語の説明

• 抵抗溶接……重ね合わせた被溶接材(金属板材、鋼管など)に、両サイドから電極を押し当て、電極間に大電流を流し、溶接面の抵抗にジュール熱を発生させ、被溶接材を溶解させ、それと同時に加圧することによって接合する溶接方法。

【被溶接材同士の接触面が、電極の間で最も抵抗値が高くなり、その接触部に、

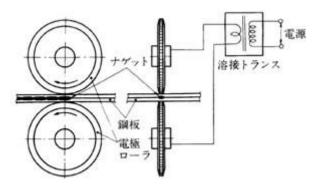
Q=0.  $24 I^2 R t$  で表わされるジュール熱が発生、その熱で接触部の金属を溶かして接合する。】

この方法を応用した溶接法に、スポット溶接、シーム溶接などがある。

• シーム溶接……抵抗溶接の一方式。電極の構造が、下記概要図のように、ローラ電極(円板状の電極)になっている。

電極の両方、または片方が回転電極なので、電極が回転しながら被容接体を挟み込み、抑えつける状態で進み、加圧・通電・休止を瞬時に繰り返すことによって連続的に容接接合を行う。 数万アンペアの溶接電流が、

50Hz以上のサイクルで オンオフを繰り返し、板厚が 薄くなるほど高周波化が 要求される。



#### シーム溶接の概要図→

#### • FFHC (可変周波数熱量制御) ……

ART-HIKARI(株では、溶接電流の制御を、波高値可変・高周波可変制御方式で開発し、FFHC(可変周波数熱量制御)と称している。

溶接電流の波高値可変化で、トランス電流の立ち上がりの遅れをカバーし易くなり、溶接電流の高周波化で、溶接スピードの高速化や溶接電流のオンオフのタイミングの高精度制御を実現し、難しい条件でも、高品質な溶接を提供している。

【なお、弊社独自の方式であることから、ART-HIKARIのAHを頭に付けて、カタログなどでは、AH-FFHCと呼んでいる。】

### 第4章 全体総括

- (1) これまで、アルミ材の線溶接(連続溶接)は、他社でもあまり例が無く、弊社でも定置式で何とか需要にこたえるのが精一杯だった。 その主な理由は、アルミ材の板厚が2~3mmになると、溶接電流に3~4万アンペアという大電流が必要なため、溶接トランスが数百kgと重くなり、ロボットに搭載することは、誰も不可能と思い込んでいた為である。
  - その隘路に果敢に挑戦し、「電源の可変高周波化」「トランス鉄芯の軽量化追求」「冷却方式の改良」など、創意工夫とノウハウの積み上げで、溶接トランスを45kgまで軽量化することに成功した。
- (2) 更に、シーム溶接機の構造を徹底的に見直し、給電ハウジング(溶接トランスの2次側から回転給電ブラシなどを経由し、回転円盤電極に至る給電構造)の軽量化、冷却水の一時貯蔵タンクの構造・配置や張り巡らされた冷却水系統の検討などについても、試作を繰り返し、シーム溶接機の総重量も320kgレベルに抑えるという、画期的な成果を得た。
  - こうした幾多の技術的な困難を乗り越え、自動車製造ラインに導入可能な『ロボット 搭載型シーム溶接機』の試作開発を成就させた。
- (3) アルミニウムは、電気抵抗が小さく、熱伝導率が大きい為、本来大きな溶接電流が必要となる。 更に、シーム溶接の場合は、連続するナゲットでの分流が大きく、円板電極の接触面積も広い 為、スポット溶接の数倍も大きな電流が必要となる。 シーム溶接のこうした技術的な課題を乗り越えて、4万アンペアという大電流を供給する溶接 トランスを、50kgクラスに軽量化したメーカーは世界的に見ても存在しない。
- (4) 今回の開発で、従来の自動車製造ラインで使われているスポット溶接機と、同じ抵抗溶接の範疇である<u>シーム溶接機がロボットに搭載できる</u>ようになり、点溶接と線(連続)溶接を自由に組み合わせる製造ラインが、従来のやり方の延長線上で出来るようになった。これまで不可能と思われた大きな夢を、極めて実用的なレベルに引き寄せたと言える。
- (5) ただ、今後自動車メーカーから要求されるであろうニーズに向けて、更なる改良の積み重ねにも努力を続けて行く必要がある。 また、パワー半導体の熱損失の低減、冷却水の流路構成の改良、シーム溶接機の更なる軽量化、などの試作開発を継続していく必要がある。
- (6) 自動車の車体のモデルチェンジには、数年かかるので、スポットとシームのラインナップが揃ったことで、遅れている車体のアルミ化への舵切りを促して行きたい。シーム溶接は、FSW(摩擦溶接)のようにワークの押さえ治具が要らないことや使い勝手に優れているので、なかなか進まなかった車体のオールアルミ化に、大きく寄与できるものと考えている。
- (7) 軽量化や接合についての技術(材料では炭素繊維、接合技術ではFSWや接着剤等) の進化にも注意を払い、幅広い協調性を持って、総合的な日本の車作りの優位性確保 に貢献して行きたい。

以上