

公開版

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「異種金属溶接技術とその実用スポット溶接機の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成31年4月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 ART-HIKARI 株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要	
1-1. 研究開発の背景	2
1-2. 研究目的及び目標	3
1-3. 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	6
1-4. 成果概要	7
1-5. 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 補助事業の具体的開発内容	8
2-0. 異種金属溶接の問題点と溶接条件の追求	9
2-1. 異種金属接合用電源装置の開発	10
2-2. 溶接トランスの小型・軽量化と応答性改善	12
2-3. 加圧制御の即応性向上	13
2-4. 異種金属用スポット溶接機の開発	15
2-5. 非破壊型溶接継手検査装置の開発	19
2-6. 溶接信頼性の確認	23
第3章 全体総括	
3-1. 補助事業の成果及びその効果	34
3-2. 補助事業の成果に係る事業化展開	36
第4章 用語の説明	38

第1章 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景

現在自動車産業では、“燃費競争”が大きなテーマになっている。

本研究開発報告は、「国産車の燃費向上に資すること」を目的に、「鉄とアルミを適材適所に用いて、車体の強度を保ちながらも軽量化を進める」為に、異種金属（鉄／アルミ）を抵抗溶接技術で接合するという、極めて難度が高い研究開発の成果について述べる。

さて、熾烈な“燃費競争”への対応として、国内でもハイブリッド車・燃料電池車・電気自動車などの開発が進む中、次のような開発テーマが取り上げられている。

- ①自動車の軽量化【燃費向上及び環境改善（CO₂など削減）に直結する課題】
- ②効率の良いバッテリー、水素燃料用の安全なタンクの開発
- ③車体の軽量化に向け、アルミニウム・チタン・マグネシウム等の採用

こうした自動車の軽量化において、車体を従来と同じ強度で作る為には、コストアップを抑え、個々の材料の特性を引き出すことが重要である。

即ち、マルチマテリアル化を進め、『既存技術の延長線を超える軽量化』に結びつけることが、切り札となる。

その為には“異種金属（鉄／アルミ）の接合ニーズ”が多くなると思われる。

表1に、車体の軽量化に向けて導入が進む“高張力鋼板（ハイテン）”と採用実績が増えている“アルミ材”の素材比較を示す。

表1 自動車“車体の軽量化”における鉄とアルミの素材比較

車体用素材	リサイクル	素材の問題など	生産に係る問題	現状
高張力鋼板（ハイテン）	○	・薄板化が限度に近づいて来た。 ・衝突破断の場合、傷害性の危惧。 ・走行時振動の高周波音で不快感。	・硬度が高くプレス成形が困難。	多用
アルミニウム	◎	・軽量化対策として、車体のアルミ化が、これからの課題。 ・アルミ溶接には大電流が必要。しかも溶接時、650℃で瞬間的に液体化するので、極めて難度の高い溶接技術が必要となる。	・鋼板とアルミの接合では、機械的締結が多い。 ・FSWやレーザーでは溶接対象の固定が必要。	採用進む

（注）FSW：摩擦攪拌接合

ところで、当初の自動車は車体が全て鉄鋼材だったので、溶接技術に大きな課題は無かった。環境規制が厳しくなり、軽量化対策として部分的にアルミが使われるようになったが、鉄とアルミの溶接ができないため、リベットやカシメなどの機械的締結で接合が行われてい

るのが実状である。

近年、鋼材とアルミニウム合金材との接合が、F SW（摩擦攪拌接合）に近いやり方で、ごく一部の車種の生産で実際に実施されているが、「接合時に界面に形成される金属間化合物により、接合強度が低下する」問題がある。その解決には、金属間化合物の厚さを10 μ m以下に抑える技術の追加が必要となり、溶接部に対応した装置設計も必要で、適用例が限定されていると思われる。

さらに、F SWやレーザー式溶接では、被溶接物（母材）を固定する必要がある為、工数や設備が増え、また、曲面部の溶接に対応ができないという問題もある。

【参考：スポット溶接機は、溶接対象物の精度が比較的ラフでも、追従や補正が利く。】

また、某自動車会社からは、次のような情報が公開されている。

『車体での接合に於いて、溶接部位は約4000点前後であるが、そのうちの90%以上が抵抗溶接である。』

『昨今、材料を適材適所に使ったマルチマテリアル車体が増えてきている。その中で、鋼板とアルミとの接合部位が増加している。』

現在はリベット等の機械的締結が主流である。しかしながら、重量増、コスト増、新設備等の課題があり、抵抗溶接による接合が可能になれば一層の進展が見込まれる。

（中略）抵抗溶接を活用した鉄とアルミとの異材接合方法にピアスメタル方式がある。それは鋼製のピアスメタルをアルミ板に事前にカシメておいて、ピアスメタルと鋼板をスポット溶接する方法である。……ただし、ピアスメタル位置にスポット溶接ガンを移動させる高精度制御技術が必要という課題もある。』

こうした情報からも分かるように、実用的な異種金属（鉄／アルミ）の抵抗溶接はまだ世の中には無く、生産技術の面から待望されていることが分かる。

1-2. 研究目的及び目標

《従来技術との比較》

次の表2に、『従来技術の課題』と本研究開発が目指す『新技術による解決方法』の要点をまとめて示す。

表2で分かるように、本研究開発は、自動車製造ラインの主要構成マシンであるスポット溶接機を進化させて、従来使われて来た生産方法の延長線上にあって、導入しやすく、安定した性能の『異種金属接合用スポット溶接機』を実用化することが目的である。

また、表2の末尾にもある様に、溶接の品質管理も改善が重要な課題である。

即ち、溶接部を生産ラインで検査する“実用的な方法”が、現状では少ない。

溶接結果の保証には、溶接部を断面カットしてナゲット径を測定する必要がある。

その実施方法は、溶接部近傍にタガネを打ち込み、部分破壊によって接合強度を検査するやり方が多く、数十台ごとに抜取り検査を行うのが普通である。

また、近年採用が大幅に進んだハイテン材に対しては、タガネを打ち込むと接合部が破断しやすいので、各社は懸命に別の検査手段を模索していると推定される。

この課題に対し、本研究開発では東京工業大学の知見も活用し、非破壊式センサーでナゲットの形状を可視化する技術の要素開発も取り上げた。

表2 従来技術の課題と新技術による解決方法

	従来技術	新技術
車体のアルミ化に必要な自動車の生産技術	①ハイテンとアルミの溶接ができないので、ネジやリベット等による機械的締結が主流である。 ②F SW（摩擦攪拌接合）やレーザー式もごく一部の生産ラインに導入されているが、設備が高価、溶接対象の固定が必要、曲面に不向きなど問題が多い。 ③ピアスリベット方式は、設備投資が高くつき、ピアスリベットの取り付けに高い位置精度が必要である。	①世界的にみても実用化が達成されていない『アルミ合金と鋼材（ハイテン）の異種金属溶接技術』を開発する。 ②使用実績が長い抵抗溶接技術を進化させた『異種金属用スポット溶接』を完成することで、生産方式を大幅に変更しなくても導入可能とする。 ③弊社がこれまで蓄積してきたアルミ溶接技術、溶接電源の高周波化技術、溶接トランスの画期的小型・軽量化技術などを駆使し、追求する。
従来技術の課題及び新技術による課題解決方法	①ネジやリベットによる機械的締結や、ピアスリベット式スポット溶接では、工数がかかり、タクトタイムが長くなるので生産効率が落ちる。 ②F SW、レーザー式やピアスリベット式溶接は、生産設備が高価で、生産ラインの変更も必要になる。溶接対象の固定が必要など、使いにくい。 ③オールアルミ化すれば、溶接は出来るが、車体の原価アップを招く。（欧米では、中大型車からオールアルミ化し同種金属溶接を採用。） ④溶接継手の検査が、タガネによる破壊検査などが多い。	①使い慣れているスポット溶接機なので、これまでのノウハウが活かせる。特に、生産ラインの大幅な変更が不要、比較的安価というメリットが大きい。 ②抵抗溶接の特長である「接合速度が速く、重量の増加が無く、消耗品も不要」を活かし、低コストで接合できる。 ③F SWなどに比べ、溶接対象の固定が不要で、曲線部の溶接も出来る。 ④ハイテンとアルミを適材適所で使い分け、設計・生産の自由度が上がる。それにより、軽量化効果が向上する。 ⑤溶接信頼性の確認を、非破壊検査方式で実現する。

《弊社の抵抗溶接機 製品化状況と開発目標》

弊社では、（前身のヒカリ工業の時代を含め）長年にわたり、技術的に難度の高いアルミ溶接技術の開発にも挑戦し、実用化の実績を挙げて来た。

例えば、国内はもとより世界的に見ても初めて、“車体のオールアルミ化自動車”の実現を、平成12年度にサポートした実績がある。

また、平成24年から3年間のサポインによる委託開発を受け、『アルミ材の連続溶接向けの、しかもロボットに搭載できる』抵抗シーム溶接機の開発に成功した。（図1参照）

これは、「溶接トランスを世界に類をみない程に小型・軽量化したこと」や「数万アンペアの溶接電流をきめ細かく制御する技術確立したこと」「溶接電極への加圧制御アルゴリ



図1. ロボット搭載型アルミ向け シーム溶接機

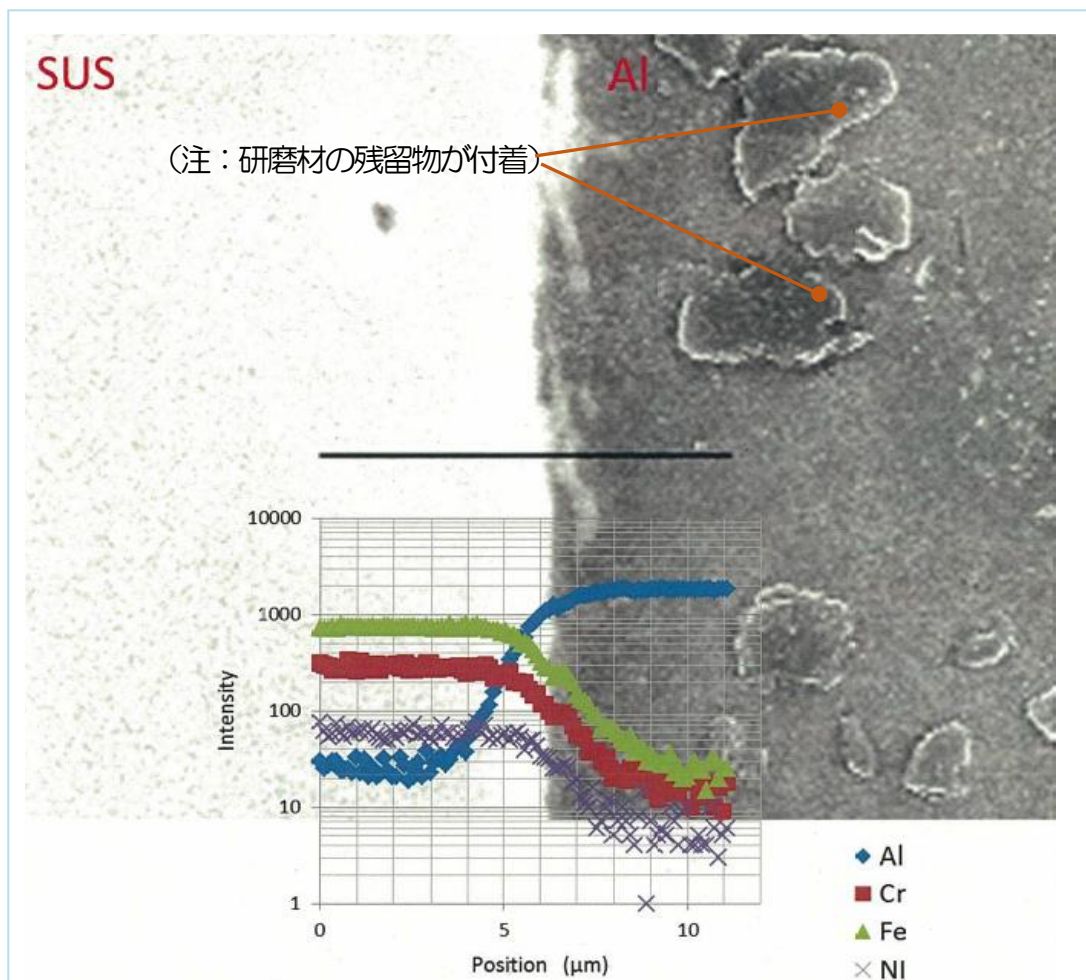
ズムを確立したこと」などの積み上げによるものである。

その開発により、アルミ向け抵抗シーム溶接機をロボットに搭載し、自動車生産ラインへ導入が可能になったことは、誰も予測していなかった技術革新であった。

また、弊社では異種金属の接合に取り組むべく、その為の下地作りも実施して来た。

図2は、弊社の抵抗溶接技術を駆使して、特定の溶接条件を設定し、鋼板（SUS材）とアルミ合金材の抵抗溶接接合を試した結果の電子顕微鏡写真である。

これは、東京工業大学原子力研究所の協力を得て、異種金属の溶接実験片をスライス、SEM（走査型電子顕微鏡）にて観察したもので、溶接境界における両金属の融合状態写真にアルミなどの成分割合の遷移状況を重ねて表示している。



図

図3 溶接近傍における SEM 画像と EDX 結果

多

図2において、左半分は鋼板（SUS材）で、右半分はアルミ合金材である。

その溶接接合の境界面を中央にして、アルミ・鉄・クロム・ニッケルの成分比率を測定分析し、その結果のグラフを重ね合わせて表示している。

図2で分かるように、溶接境界面において、両成分が徐々に（滑らかに）濃度変化を生じており、良好な接合を達成できていると確認できる。

【このSEMによる観察と溶接境界面における元素成分の遷移分析に基づき、東京工業大学の評価結果を得たことが、本研究開発の提案に結びついたものである。】

しかし、この技術を実用化するには、新規に制御アルゴリズム、スポット溶接機を構成する要素（溶接トランス、サーボモータと加圧力調整機構、スポット溶接ガンと姿勢制御機構、大容量電源装置、冷却システムなど）への新機能追加、小型化と改良開発、溶接条件の膨大な試行と試験、ロボットとの総合制御の確認、溶接継手の信頼性確認、サーボモータの性能向上など、山積する高度な技術開発課題を解決する必要があった。

以上をまとめると、本研究開発の目的は、溶接技術の中でも最大の難題の一つである「異種金属の接合」を抵抗溶接で実用化し、単に自動車製造分野にとどまらず、ものづくり業界に大きな進歩をもたらすことである。

しかも、（電磁誘導センサーで、試験体の深部まで透過させて内部異常を検知する）非破壊型検査装置を同時に開発し、オンライン検査の実現による、信頼性の高い耐久性のある接合の実用化をめざすことにした。

1-3. 研究体制

1-3-1. 研究開発の体制（兼研究組織）を図3に示す。

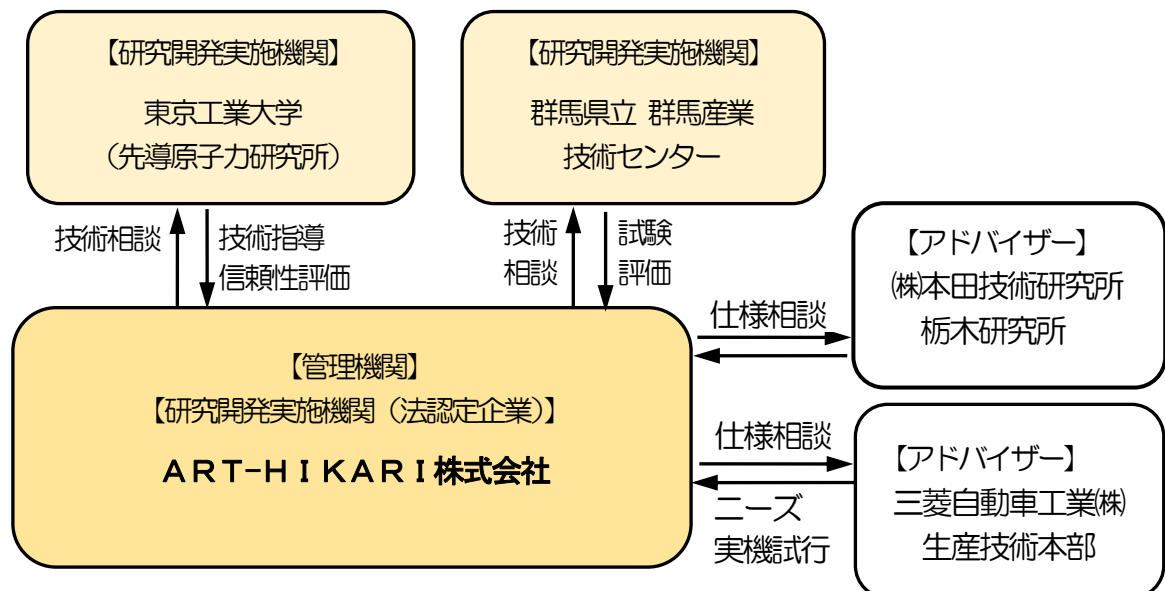


図3. 研究開発の体制図

国立大学法人 東京工業大学（科学技術創成研究院 先導原子力研究所）は、原子力研究で培った科学的知見や実績を駆使し、「電子顕微鏡観察や元素分析技術」により溶接部位（ナゲットなど）の信頼性評価を担当する。

また、電磁誘導センサーの研究開発においては、センサー感度の改良・検出信号の可視化などに対して、アドバイス（技術指導）を行う。

群馬県立 群馬産業技術センター は、試験分析機関である特徴を活かし、「ナゲット部の生成状態の観察や硬度測定などによる溶接品質の確認」「溶接サンプルの試料化加工（検体の作成）」を担当する。

1-3-2. 研究者氏名

事業体	所属	氏名	担当	備考
ART-HIKARI 株式会社	社長	古川 一敏	全般の指導・管理	PL
	副社長	吉川 誠也	試作全般の管理、溶接トランス	
	専務	数藤 修	溶接トランス、溶接機筐体	
	設計部長	山中 英雄	電源装置、溶接機筐体	
	研究員	岸 庸一	電源装置、サーボモータ	
	研究員	藤田 直幸	溶接トランス、サーボモータ	
	研究員	古川 高規	非破壊型溶接継手検査装置、溶接信頼性確認	
国立大学法人 東京工業大学	科学技術創成研究院 先導原子力研究所 准教授	吉田 克己	非破壊型溶接継手検査装置、溶接信頼性確認	SL
群馬県立 群馬産業技術 センター	材料解析係 係長	加部 重好	溶接信頼性確認	

1-3-3. 協力者（アドバイザー）

事業体	所属	氏名	川下ニーズ	備考
三菱自動車工業 株式会社	生産技術本部 ボデー生産技術部 エキスパート	藤井 康司	アルミとハイテンの接合ニーズ	
株式会社 本田技術 研究所	管理室 試作ブロック 技術員	古館 孝次	異種金属接合の技術	

1-4. 成果概要

上に述べた目的に向かって、3年間で実現できた成果の要点を以下に纏めて示す。

(1). 異種金属用スポット溶接機をロボットに搭載するため、従来品に比べて、一段と溶接トランスの軽量化・小型化を実現した。

また、溶接トランスの1次と2次巻線のさらなる近接化を進め、溶接電流の立ち上がり時間を短縮できた。

(2). スポット溶接機にVVP（垂直振動加圧）機能を付加した。

【注：VVPは、バーチカルバイブレーションプレッシャーの略で、弊社の略号】

異種金属溶接の場合、被溶接材（鉄板材とアルミ材）の合せ面に、電触（エレクトロコロ

ーション) 対策が必要で、絶縁物の薄い層が必ず存在する。

即ち、接着剤、メッキ皮膜や酸化皮膜などが存在するので、抵抗スポット溶接で電圧をかけても、絶縁層を破壊して電流が流れるまでに少し時間がかかる現象が発生する。

その解決策として、(溶接電極に振動を与える特許を出願済みだったので)「溶接電極への振動加圧制御」(垂直振動加圧：VVPと呼ぶ)を実際に試作開発した。

主な試作実施内容は、

- ①「溶接電極へ圧力を加える高速反応サーボモータ」に振動を発生させる機構を付加。
- ②「加圧制御装置(ドライバー)」に、サーボモータを振動させる制御を付加。
- (3)、「溶接トランス」や「高速反応サーボモータ」を構造的に強固にし、さらに「異種金属用ポータブルスポット溶接機」の筐体を鋳物一体構造にしたことで、VVPの振動に耐える、スポット溶接機全体の堅牢化を実現した。

このポータブルタイプは、1年目に溶接条件を追求した『定置型の異種金属用スポット溶接機』よりも、1/16以上の軽量化を達成した。

- (4) 3年の開発期間において、溶接条件を色々変えた溶接サンプルを多量に作り、SEM(走査型電子顕微鏡)などによる溶接信頼性解析や十字破壊強度の確認などを行った。

- (5) 高機能シミュレーションソフトを導入し、加圧力に対するたわみ応力解析などを実施した。これにより、多種多様な『各自動車会社向けスポット溶接機』を、即受注出来るような準備(3次元CAD設計、撓み解析など)を完了した。

- (6) 溶接部分(ナゲット)の検査に向け、『非破壊型溶接継手検査装置』の開発を目指し、「電磁誘導センサー」のプロトタイプとして「前方後円墳型」と「ペンシル型」を試作開発した。

センサー検出能力の向上に工夫を重ね、ペンシル形状の先端を細くして、ナゲット部を通る電磁波の電磁誘導エネルギーの密度をあげた。また、発信周波数を(1カ所で測定する度に)即座に多周波発振を繰り返し、検出信号のデータ収集の確実性を向上した。

こうしたナゲットの検出信号も、多数の溶接サンプルに対する測定データを蓄積した。

1-5. 当該研究開発の連絡窓口

会社名： ART-HIKARI 株式会社

住 所： 群馬県館林市大谷町2918番地 〒374-0054

役職・氏名： 取締役副社長 吉川 誠也

電 話： 0276-71-1180

FAX： 0276-71-1182

E-mail： yoshikawa@art-hikari.co.jp

第2章 補助事業の具体的開発内容

異種金属スポット溶接機の開発に取り組むために、まずその開発仕様の設定が必要である。

異種金属の抵抗溶接については、溶接条件などの基礎データが極度に不足しているので、まず、実験で基礎データを収集することから始めた。

そのため、溶接条件がどういう範囲に分布するかという基礎データを、実験的に収集できる(即ち、溶接条件範囲の追求が可能な)“スポット溶接機”を準備することが必要だった。

2-0. 異種金属溶接の問題点と溶接条件の追求

本研究開発のテーマは、「鋼材とアルミニウム材」という異種金属を溶接する技術の開発であり、被溶接材それぞれの融点が、1500℃レベルと650℃レベルと大きな差がある為に、溶接技術の難度が極めて高くなる。世界的に見ても実用的な溶接技術が見当たらない。

まず、アルミ材同士を抵抗溶接する場合に限っても、アルミニウムは電気抵抗が小さく、熱伝導率が大きいため、大きな溶接電流が必要となる。例えば、板厚1mmのアルミ材同士の溶接でも、2万6千アンペアの溶接電流が必要である。

また、被溶接材が硬い（鉄系の）場合は、電極への加圧力は一定で行われることも多いが、材質の柔らかいアルミニウム材の溶接では、640℃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現象があり、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とが、弊社のこれまでの研究で分かっている。

更に、溶融点が650℃のアルミ合金材と、溶融点が1500℃レベルの鋼材（ハイテンなど）との異種金属の接合では、溶接境界面の金属間化合物の厚みを数 μm レベルに抑えるという、極めて難しい課題の解決が必須である。

その理由は、この金属間化合物の厚みを10 μm 以下に抑えないと、接合強度が得られないことが知られているからである。即ち、溶接境界面における両金属の溶融厚さを2～8ミクロンメートル程度に均一化するという、神業に近い技術が必要となる。

また、アルミ材の溶接は、板厚が厚くなるほど大電流が必要になるという課題がある。

そのために、（スポット溶接でも）溶接電流を数万アンペア級に大電流化する必要があると予測すると共に、溶接電源装置の高周波化回路を高性能化し、また、溶接トランスの電流立ち上がり特性も向上させる必要があると考えた。

さらに、弊社が独自に蓄積してきた「溶接電流のタイミングとそれに対応する溶接電極間の加圧力の適正変化を制御して、溶接信頼度を上げる技術」や「電極への圧力制御の即応性」を更にレベルアップしなければならない。

こうした技術的な背景のもと、1年目に把握しなければならないのは、「どういう条件で溶接を実施すれば、異種金属の強固な接合が得られるか」という点の解明であり、『異種金属溶接向けスポット溶接機』が必要とする機能や仕様を特定することである。

そのために、溶接条件のパラメータとして「溶接電流」「通電・休止時間」「加圧力」「冷却水流量」「溶接電極形状」を取り上げ、これらのパラメータを振って、種々の溶接条件を実現できる『研究試験用スポット溶接機』（据置型）を用意した。

2年目では、1年目で特定した『異種金属溶接用スポット溶接機』向けの仕様に基づき、ポータブルタイプの『異種金属溶接用スポット溶接機』を試作開発した。

また、特筆すべき開発事項として、『VVP（垂直振動加圧）機能』も追加した。

上述のように、エレクトロ・コロージョン（電蝕）を起こさせない為には、実際の被溶接材料に、接着剤・絶縁塗料などを塗布する必要があるので、材料間の接触面で通電が始まるまでに時間がかかり、溶接1点毎に、溶接時間が延びてしまうことになる。

「生産ラインのタクトタイムを少しでも短くしたい」という川下ユーザの要望に応える為に、「溶接電極に加圧振動を加え、絶縁破壊を早めること」で、溶接時間の間延びを防ぐ

ことも必要であった為である。

こうした諸問題を解決するために、“ポータブルタイプの異種金属用スポット溶接機”の試作に当たり、電源装置、溶接トランス、加圧用サーボモータなどを、すべて新たに設計し、試作開発した。

3年目では、導入した『3D-CAD 及び3次元シミュレーションソフト』を駆使して、各社から発注が予測される、(各社それぞれの生産ラインに合わせた)多種多様な『異種金属溶接用スポット溶接機』を、3D-CADとシミュレーションソフト上に構築し、実際の引き合いに即対応できる態勢を作り上げた。

また、電源装置にロボットインタフェースを追加すると共に、ロボット搭載に向けて、溶接トランスの一層の小型・軽量化を行った。

以下に、『異種金属用スポット溶接機』に使用した、溶接トランス、サーボモータなどの構成部品の開発内容について述べる。

図4は、電源装置、溶接トランス、電極、加圧機構(サーボモータほか)など、抵抗スポット溶接機を構成する機能ブロックの構成図である

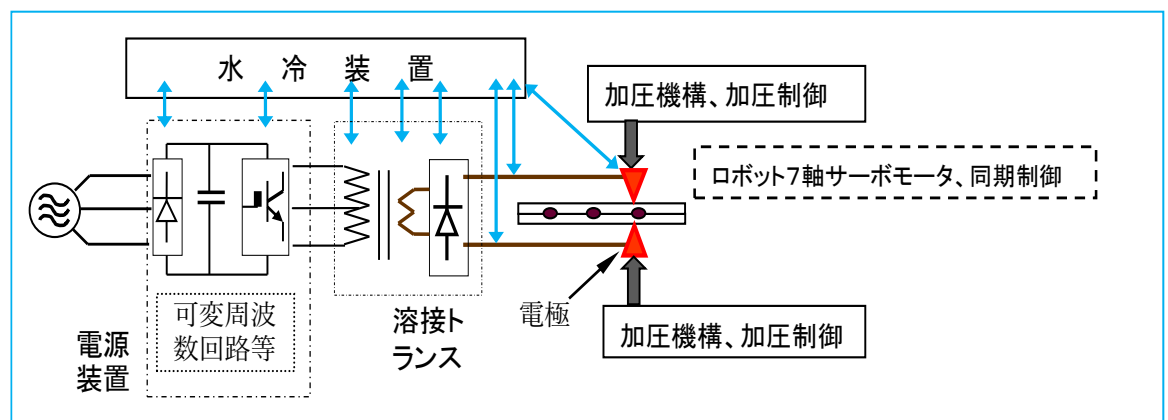


図4. 抵抗スポット溶接機の機能ブロック（構成）図

2-1. 異種金属溶接用電源装置の開発

「アルミニウム材」の溶接の場合には、溶接トランスから溶接電極に向けて、3万アンペアレベルの溶接電流を供給する必要がある。これを逆算すると、『異種金属溶接用電源装置』からは440V、960アンペアの電力を溶接トランスへ送ることになる。

この400V級の電圧から、インバータ回路により2次電圧を発生させ、整流回路を経て、溶接電極間に直流10V以下で数万アンペアの電力を供給する。

また、弊社溶接機の最大の特長であるFFHC（可変周波数熱量制御）回路を組み込むのは勿論のことである。

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）”方式の違いは、前者が「電流の波高値が一定でパルス幅を変化させる」のに対し、FFHC方式はパルス幅が一定で波高値を変化させているのが、大きな特長である。

インバータ電源の周波数を高くすると、幾つかのメリットが得られる。特に、「一般のインバータ電源では、波高値が一定の為電流を小さくすると電流の休止期間が長くなってしま

のに対し、FHC方式では「溶接電流を可変高周波化すると共に波高値を変化させて溶接電流値を制御している」ので、電流休止期間が短く、効率が良くなる。

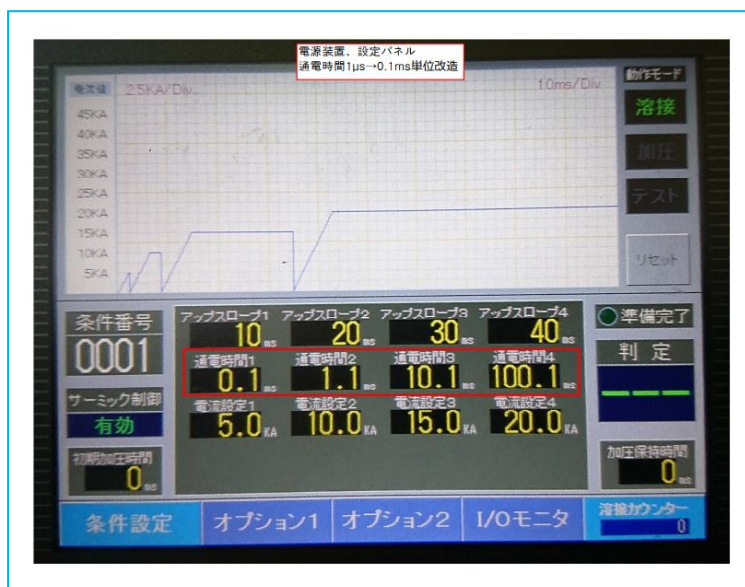
この特長を活かすために、インバータ電源の周波数の可変範囲を3～10kHzまで広げた。

今回の開発では、この高周波化を有効利用して、さらなる進歩を目指した。

異種金属の溶接では、「温度と加圧力のきめ細かい制御」が必須になり、溶接タイマーの設定単位を、従来のミリ秒からマイクロ秒の領域へと微少調整が出来るようにした。

1年目の『研究試験用スポット溶接機』では、操作画面のタイマー単位を μsec としたが、下位のゼロの入力に手間がかかるため、2年目の『異種金属溶接用スポット溶接機』（ポータブル型）では、タイマー設定が楽になる0.1msec単位に修正した。（図5参照）

図5 溶接タイマーの単位設定を
0.1ミリ秒に細密化した
操作パネル（赤枠内）



こうした改良により、温度と加圧力のきめ細かい調整が可能になり、異種金属溶接で重要な「金属間化合物の温度管理」が設定しやすくなり、二元合金を作る最適な温度条件の調整が可能となった。

即ち、溶融点が650℃のアルミ合金材と、溶融点が1500℃レベルの鋼材（ハイテンなど）との異種金属の接合において、両者の温度差による問題点「溶接境界面に生じる金属間化合物の厚みを数 μm 以下に抑える温度制御等」を克服することが可能になった。



図6. 異種金属溶接用電源装置の内部写真



図7. 電源装置の外観図

【インターフェイス追加】

また、VVP（垂直振動加圧）機能の付加に応じて、インターフェイス信号が増大したので、メイン基板の設計変更を実施した。

3年目では、ロボット搭載に備えて、ロボットインターフェイス信号も付加した。
異種金属溶接用電源装置の内部写真を図6に、その外観を図7に示す。

2-2. 溶接トランスの小型・軽量化と応答性向上

弊社の溶接トランスは、世界最小の小型・軽量化を達成しているが、大電流を必要とする「アルミ材を含む抵抗溶接用のスポット溶接機」向けに、1年目では、2次巻線の断面積を増やししながら、もう一段の小型化を図った。

即ち、トランスの2次巻き線の構造を徹底に解析し、考察と工夫を加えることにより、トランスの1次と2次の近接化を実現した。それにより、トランス効率の向上、2次電流の立ち上がり特性の改善を達成した。

【コア材の見直し、堅牢化】

2年目では、更なる効率向上と小型化を目指し、『先進材料採用によるコア材の見直し』『耐振動性を上げるための堅牢化』にも注力した。

【トランスの応答性向上】

溶接トランスの構造を見直し、改善を積み重ねることにより、1次と2次の電極間隔の近接化を達成した。

即ち、2次電流の立ち上がり【ゼロから波高値まで】を3msec(1000分の3秒)迄早くするという目標をほぼ実現した。

図8は、溶接トランスの強固化（強靱化）対応で、1次および2次巻き線をモールドで固める製作工程の一環を示している。

図8の左は、2次巻き線の強固化のために、「位置決め治具」を組み込んだ状態を示す。図8の右は、モールドの流し込み口を示す。

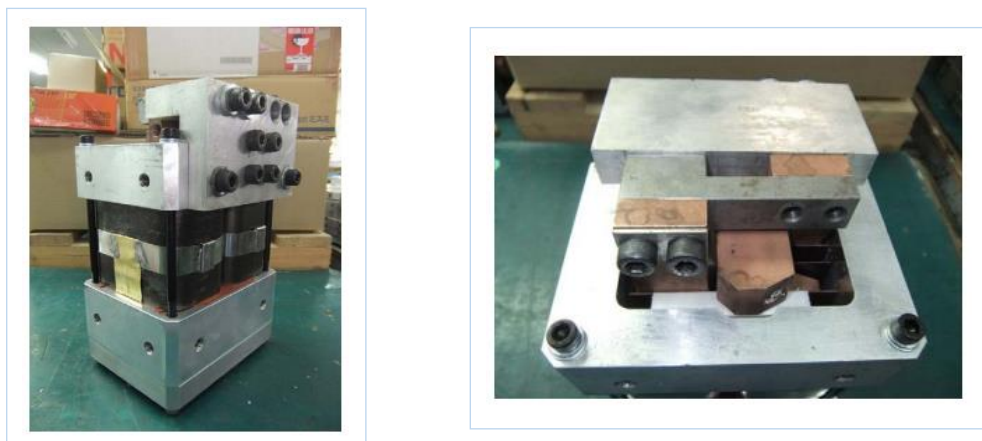
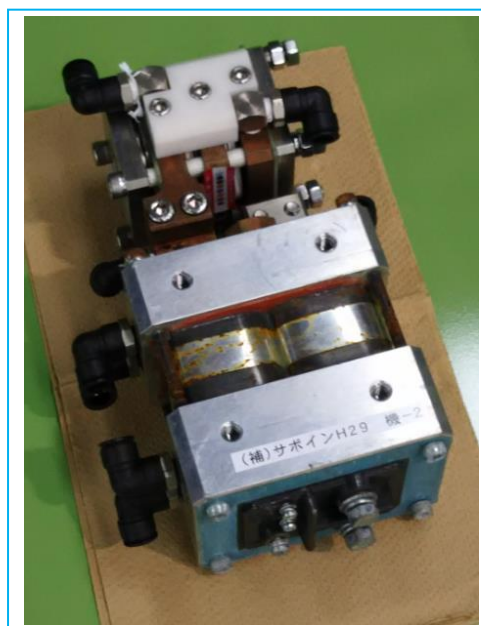


図8. 溶接トランスの2次巻き線用の位置決め治具組み込み（左）
と モールド材の流し込み口（右）

図9. 溶接トランスの小型・
軽量化 試作機



2-3. 加圧制御の即応性向上

2-3-1 高速反応サーボモータの開発

上述したように、材質の柔らかいアルミニウムの溶接では、650℃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現象があり、溶接電極への加圧を精度よく変化させる制御が必要である。

更に、異種金属溶接の場合、溶接境界面の金属間化合物の厚みを10 μ m以下に抑えることも必要である。

溶融点が650℃のアルミ合金材と、溶融点が1500℃レベルの鋼材（ハイテンなど）との接合では、この温度差への対応という課題も加わる為に、「温度と加圧力のきめ細かい調整」に挑戦した。

即ち、『異種金属用実用スポット溶接機』においても、電極の加圧制御はとりわけ重要な機能となり、今まで以上に『高速反応サーボモータ』の性能向上を目指した開発が必須であった。

今回はさらに反応速度を上げるために、性能向上を図った。

これまでの構造はそのままであるが、スピンドルの変位速度を早くした。また、モータコアの材質などを見直し、モータの性能や出力（回転トルク）も向上させた。

まず、高速応答を引き出すために、制御トルクの増強を行い、サーボモータの出力も、2年目に2.3倍にアップした。

最大加圧力：10キロニュートン、加圧到達時間：1 msec/kNという性能を実現した。

そして、最も大きな特徴は、VVP（バーカル バイブレーション プレッシャー）機能を根本から支えるキーポイントの要素製品であるサーボモータに、溶接電極を垂直に振動させる動きを発生・制御する能力を持たせたことである。

即ち、振動を発生させるための機構を作り込み、溶接電極がスムーズに高速で上下運動を行う（細かい振動を発生させる）機能を実現した。

これにより、絶縁被膜などを機械的に破壊する加圧動作を、溶接電流の印加と同時進行させ、溶接時間の短縮実現を達成した。

図10に、1年目に試作した『高速反応サーボモータ』と、更に性能向上を実現した、2年目開発の『高速反応サーボモータ』を並べて示す。



図10. 高速反応サーボモータの試作開発品（左：1年目、右：2年目）

2-3-1 加圧制御用ドライバーの開発

サーボモータの高性能化に伴い、加圧制御装置（ドライバー）の改良を実施した。

性能の目標を、圧力到達時間 1 msec/kN 以内の応答速度とし、パラメータの設定単位は、 0.1 msec 単位と高精細化した。

更に、2年目ではVVP機能の制御を組み込むための大改良を実施した。

VVP機能の付加に伴い、「電源装置」「高速反応サーボモータ」「操作設定用パソコン」とのインターフェイス信号が大幅に増加し、また、制御内容も従来のドライバーに比し、高度化と複雑化したので、ベース回路を搭載したプリント基板を作り直し、制御ユニットも新設計となった。

図11に、2年目で試作開発した、加圧制御装置の外観を示す。



図11. 加圧制御装置（ドライバー）

図1 2に、パソコン上の圧力到達時間のパラメータ設定操作画面を、図1 3に、加圧制御の応答時間測定画面を示す。

図1 4に、2年目で試作開発した加圧制御装置（ドライバー）の内部写真（写真左）と1年目の試作品の内部写真（写真右）をそれぞれ示す。

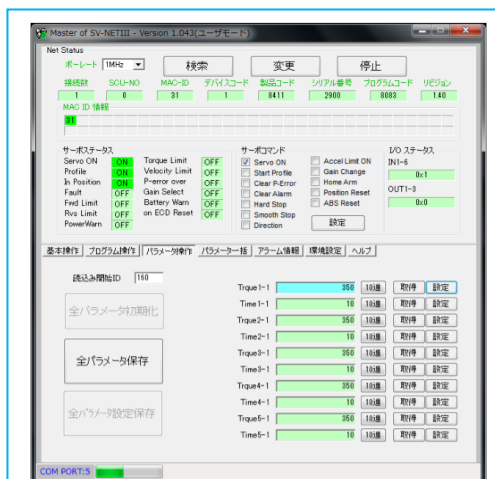


図1 2. 圧力到達時間の
パラメータ設定画面

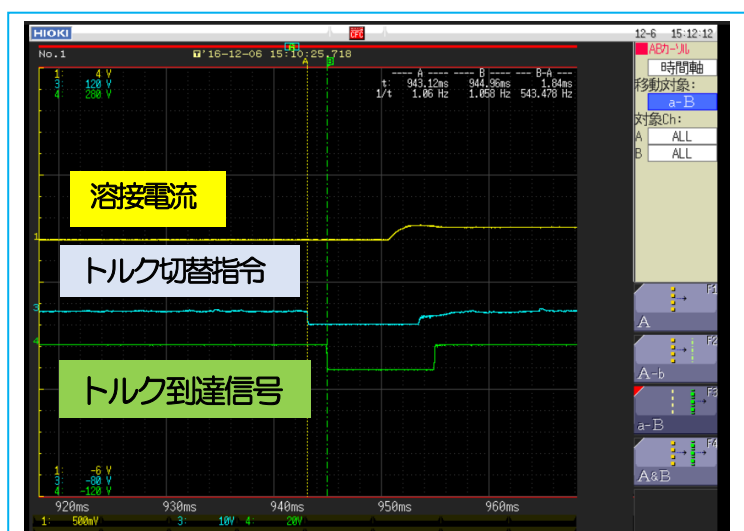


図1 3. 加圧制御の応答時間測定画面

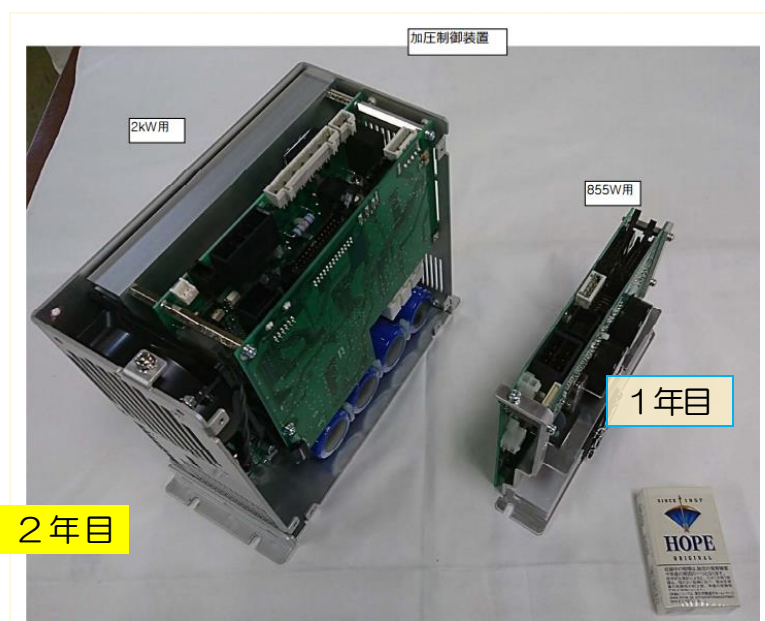


図1 4. 左は2年目で試作開発した加圧制御装置の内部 右は1年目の試作品

2-4. 異種金属用スポット溶接機の開発

2-4-1. ポータブル型『異種金属用スポット溶接機』の試作開発

『異種金属溶接用スポット溶接機』本体を構成する、「溶接トランス」、「高速反応サーボモータ」を含めて、『実装筐体』の堅牢化を実施した。

堅牢化の最大のポイントは、実装筐体を鋳物で一体化し、VVP（バーチャルバンプレスソフレッシャー）機能で発生する振動を、『実装筐体』で受け止める構造に、根本的に改良し

たことである。

上述した様に、「溶接トランス」、「高速反応サーボモータ」も強固な構造に改良したことがと相まって、溶接機全体の堅牢化が実現した。

図16に 2年目で試作開発を行った『ポータブルタイプの異種金属用スポット溶接機』の全体写真を示す。

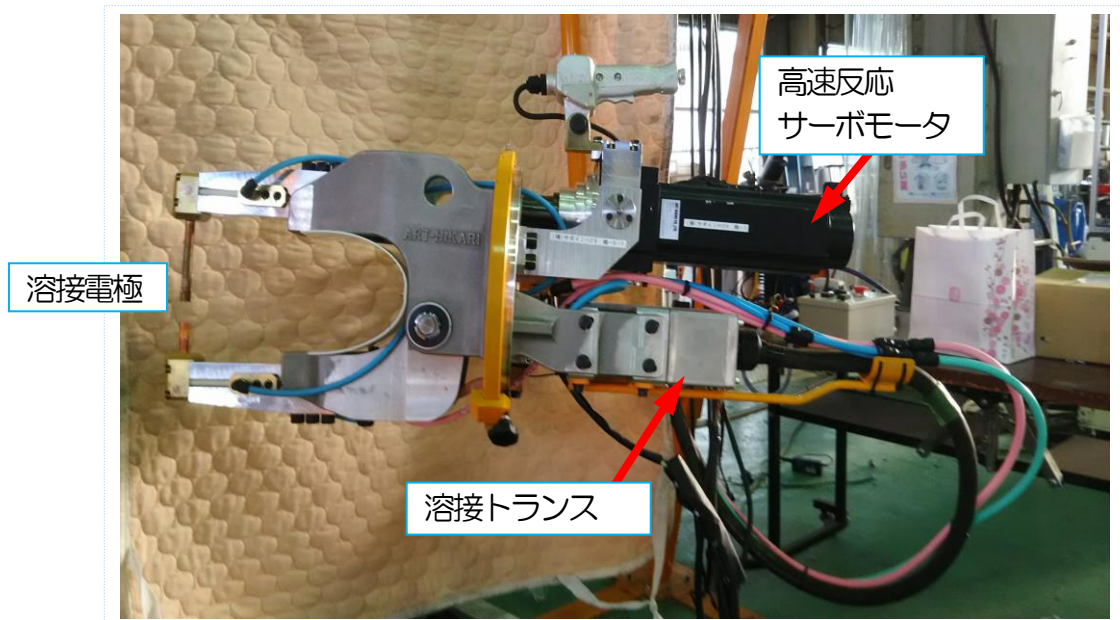


図15. ポータブルタイプ『異種金属用スポット溶接機』の実装筐体と全体の写真

2-4-2. 多様な異種金属向けスポット溶接機的设计実施

自動車メーカーはそれぞれで、組立ラインの設備が異なり、スポット溶接機もそれぞれ仕様や構造が異なる。

また、生産ラインで使用するためのロボット用の溶接ガンでは、（各社でロボットや生産ラインが異なるなどの理由で）10～15種類の異なる形状のガンが必要になるとの情報を自動車各社から得た。

そのような多種類の溶接ガンを試作・試験することは『経費と時間がばく大になる』ため、コンピュータでシミュレーションができるソフトの導入を行った。

導入したソフトで、『3次元のCAD、および撓み応力などの検証シミュレーション』をパソコンで行い、多種類の溶接ガンの設計・図面化を完了した。

製品開発の費用削減と期間短縮に、極めて大きい効果を発揮した。

【試作開発の実行】

本研究開発では、導入ソフトを、多様な異種金属用スポット溶接機の開発に使用した。

(1)スポット溶接機の シミュレーション、解析、要素作成などの機能を備えるソフトウエアを導入し、アセンブリモデルの作成、撓み応力検証、動的応動解析などを実施した。

図16～図18に設計例やシミュレーション画面を示す。

(2) 10種類前後の多種多様な“ロボット搭載型異種金属溶接用スポット溶接機”のCAD設計と動作シミュレーション等に適用した。

それまでの溶接サンプルによる溶接条件の追求・検証などで、『最適な溶接条件は、先端電極で加圧力500kgの負荷をかけ、17000～18000アンペアの溶接電流を流すこと』であった。

その条件で、シミュレーションソフトにより、ガンの撓み応力に問題がないかなどを確認した。

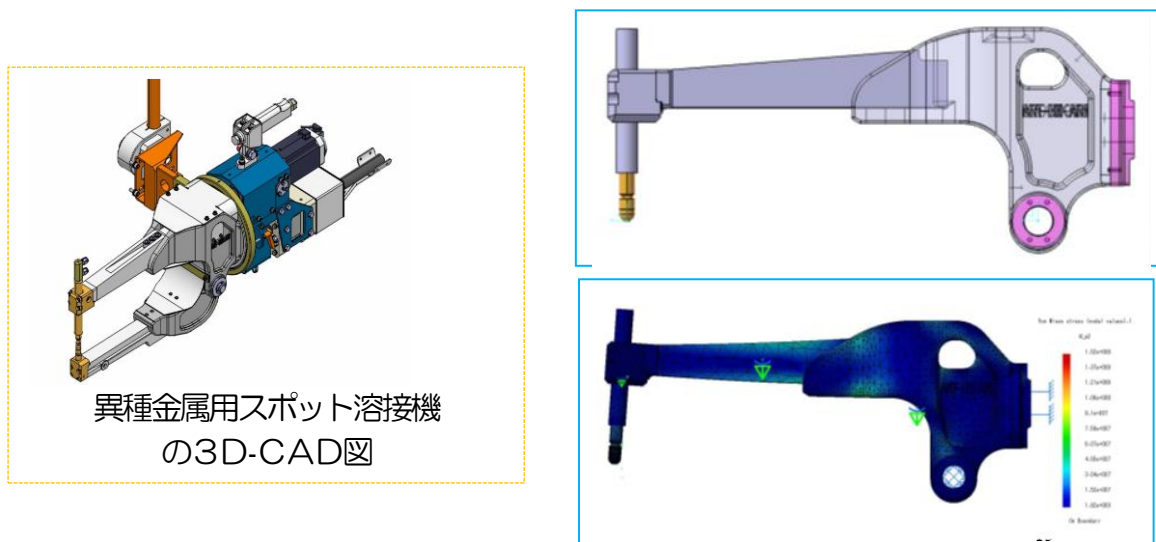


図16. 左：ポータブル スポット溶接機の3D-CAD図、及び、
右：上部側アームのアセンブリモデル図とその耐加圧たわみシミュレーション図

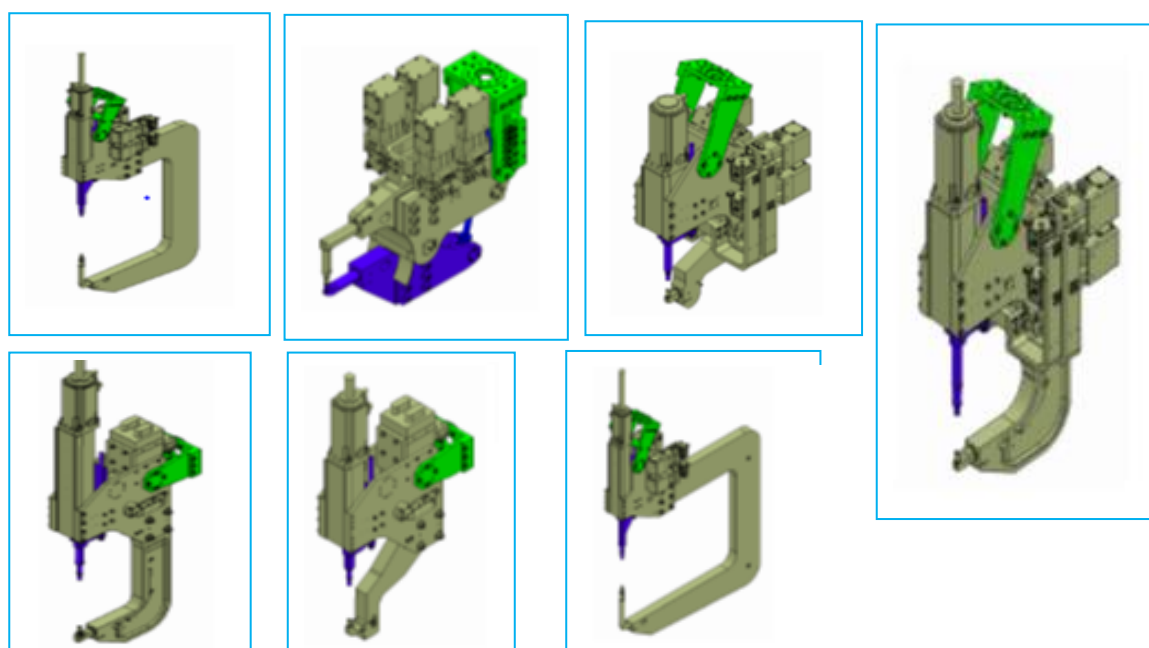


図17. 各社向け ロボット搭載型 異種金属用スポット溶接機のシェル要素モデル化、
ソリッド要素のモデル化、要素別解析

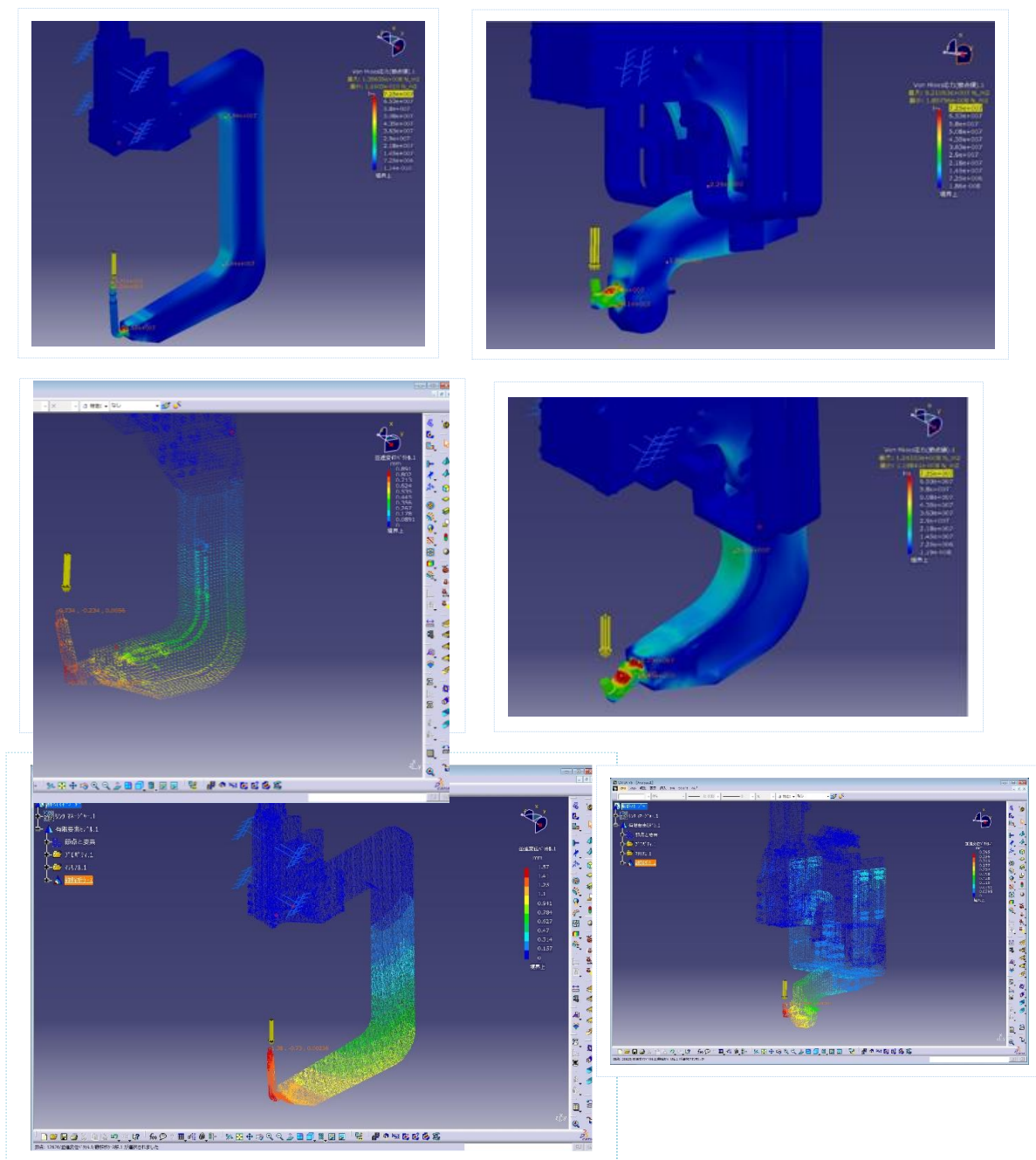


図18. 各自動車会社向けロボット搭載型 異種金属用スポット溶接機の加圧に対する応力解析例（たわみ応力など）

(3) A社、B社向けなど10種類ほどの『ロボット搭載型 異種金属用 スポット溶接機』の設計、多種類にわたる溶接ガンの設計とシミュレーションを行った。

その結果、全てのガンも最適溶接条件に対して力学的な問題が無いことが明らかになった。

2-5. 非破壊型溶接継手検査装置の開発 【東京工業大学の研究成果報告抜粋】

2-5-1. 抵抗溶接向け電磁誘導センサーの開発

自動車生産ラインでの検査工数削減を目指し、本研究開発では、電磁誘導方式（渦電流方式）を一歩進めた『磁束透過型誘導センサー』に着目し、非破壊方式での溶接継手検査方法の開発にも挑戦した。

幾多の困難が予想されるテーマであった。

電磁誘導センサー方式のセンサー部には、交流高周波を発信するコイルと反作用磁束を受信するコイルが必要である。

図19にセンサーと磁束による作用のイメージを示す。

発信信号は、正弦波で発信コイル部×から被溶接材（黄緑）に向かい、被溶接材を透過して、発信コイルに戻るループになる構造を工夫する。

被溶接材で発生した反作用磁束は、受信コイル部×を通過することによって、受信コイルに「不均一部でゆがんだ磁束に相似な電流信号」を発生させる。

初年度ではこの基本構造で、電磁誘導センサーのプロトタイプとして、前方後円墳型（図20の上段）を試作した。

図21に示すような振幅と位相を、ナゲットが無い状態のときの振幅と位相の波形とを比較し、ズレの大きさを検出することで、ナゲットの形状に比例したひずみを、信号としてとらえることになる。

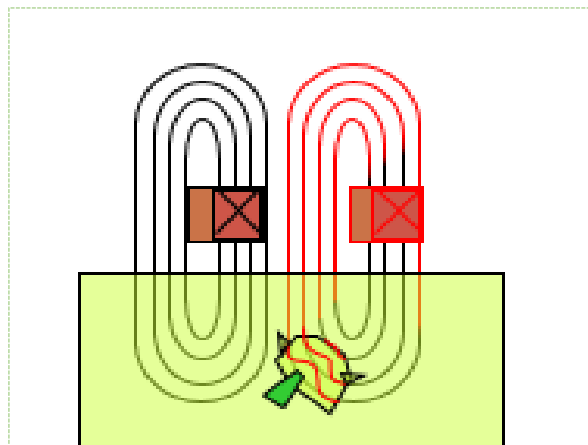


図19. 試作センサーの作用イメージ図



図20. 試作した電磁誘導センサー

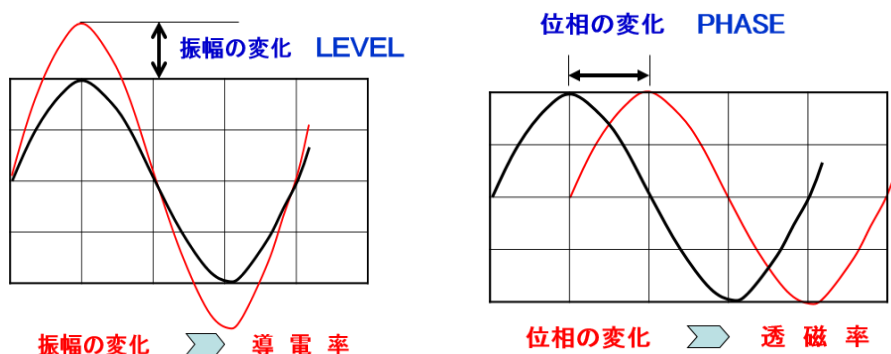


図21. センサーコイル（受信センサー）に誘起する電圧の振幅と位相

2-5-2. 受信信号の解析手法の検討

電磁誘導現象は、目に見えず理論的解析も困難である。従って、2年目ではセンサー部の構造の試行錯誤的な試作が必要となった。

現象の効率的な解析の実現には、受信信号のビジュアル化が必須となる。受信信号を波形で観測する方法もあるが、効率が悪く、記録とその整理の手間が膨大になってしまう。

そこで、受信信号を数学的处理により「振幅と位相」の複素平面へ転写し、受信信号の「振幅と位相の変化」を同時に図示し、受信信号の変化をより分かり易い図象（データ）として見られる方法を考案、実施した。

一般的な電磁誘導センサー方式では、周波数を変化させながら、最も感度のよい周波数を探し、試験体のキズなどの検出精度を上げる。

その信号波形を、「振幅と位相」の複素平面に描けば、信号が一つの点としてとらえられるので、多くの検出信号が一画面で見やすく表現できる。

2年目では、最適な周波数で定点検出するのではなく、発信周波数を数キロヘルツ単位で、10kHz～100kHzまで自動的に切り替えて連続検出を行う制御を組み込んだ。

そうした、数キロヘルツ毎の周波数における点の振幅と位相の変化を検出すると、溶接継手の検査部分（溶接ナゲット）の変化が見やすくなり、効率的な記録も可能となる。

2-5-3. 異種金属溶接ナゲットの検出実験

図22は、鉄／アルミの「異種金属溶接サンプル」の平面図である。

図22において、赤丸のC0点は、異種金属（鉄／アルミ）をスポット溶接したポイントを示す。

X軸、Y軸方向に十文字に広がる☆印は、鉄／アルミ板材の溶接をしていない部分を、電磁誘導センサーで、比較の為に検査した測定点で、それぞれにU1～U4、L1～L7、D1～4等と番号を付してある。

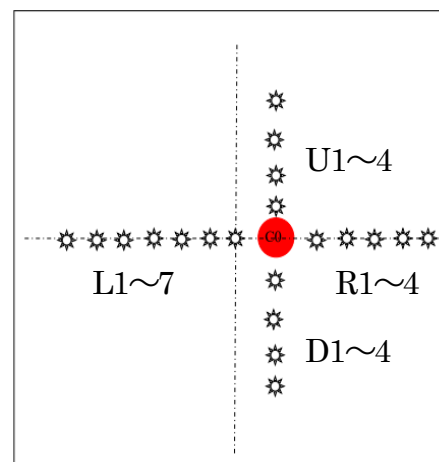


図22 溶接サンプルの測定点

次の図23は、図22の溶接サンプル

の各ポイントに対し、図20下段のペンシルタイプの電磁誘導センサーで得た“振幅の検出データ”を表示している。

図23において、「図22のC0で示す溶接ポイント」の検出データは青色で示し、C0と注記を付けてある。

他の色の点は、溶接の影響がない（元の素材のままの）U1～U4、L1～L7などのポイントの検出データがプロットされている。

この“検出データ”の図で分かるのは、『溶接ポイントC0の青色の点が、他の測定点のデータと比較して有意差がある』と認められることである。

即ち、溶接ナゲットがあるポイントは、検出信号の「振幅や位相」に、溶接の無いポ

イントとの差が検出できることを意味している。

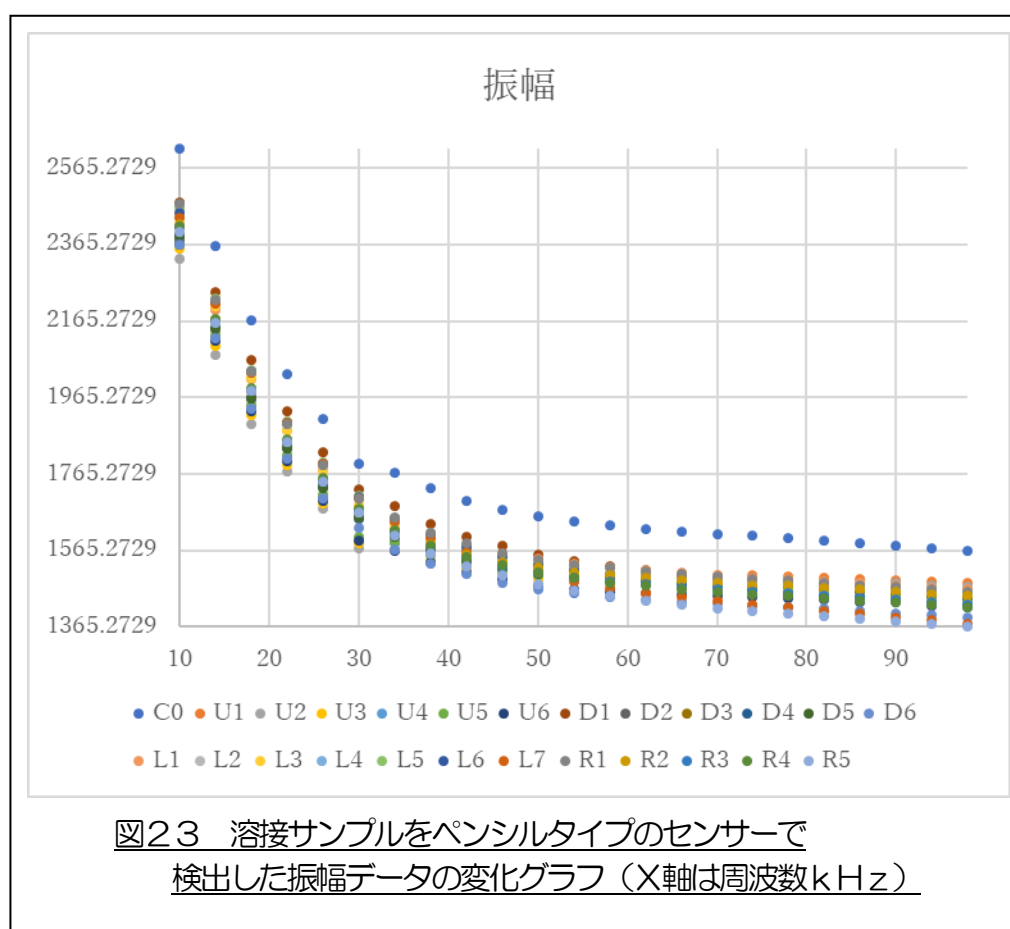
なお、図23において、C0ポイントが23個あるが、これは発信周波数を10kHzから4kHzごとに自動的に切り替え検出し、102kHzまで繰り返した検出データを、各測定点に個別の色を割振り、それぞれをプロット表示している。

2年目の電磁誘導センサーの試作品（図20下段）では、更に電磁誘導センサーの性能向上を目指し、電磁誘導センサーの磁界が通るループで、磁界がナゲット部分に集中的に集まるような構造を検討した。

また、ペンシル形の先端では、受発信コイルの直径を出来るだけ絞り込んで尖った形状にし、電磁エネルギーの密度を上げる工夫を施した。

図23の、「ペンシルタイプ」を用いた、『異種金属溶接サンプルに対する、ナゲット検出実験データ』を見れば分かるが、「ペンシルタイプ」でも、溶接ナゲット部（図の青い丸のプロット）と溶接の無い部分（その他の色のプロット）とに有意差が認められる。これは、ナゲット検出の可能性が高まったことを意味する。

【同様に、位相データの変化の様子も図示出来るが、紙面の都合で割愛する。】



2-5-4. 実験結果と今後の試行内容

- （1）本研究開発の期間中に、電磁誘導センサーの構造や形状に検討を加え、試作・改造を2、3回行って、多数の測定データを得た。

大きな収穫は、「異種金属溶接のナゲット部検出」の目標に対し、ナゲット部の検出信号とその他の部分（素材状態部分）の検出信号とに、有意差を得ることが出来たことである。（ナゲット部の形状データを抽出できる可能性がある。）

- (2) 試行錯誤の中で、電磁誘導信号の強さを上げる方法を追求した。発信コイルに流す電流を強くし、磁束密度を上げる事になるが、用いる周波数の範囲や、単一周波数から複数周波数発射という複合検出方式も検討した。

また、ナゲット部の形状検出の可否を確認する為に、ナゲット部を0.1 mm 幅でセンサーを動かし、検出データの蓄積も行った。

- (3) また、電磁誘導センサーをペンシルタイプにすることで、実際の生産現場で使い易くするための形状に一步近づいたが、さらにスリムで且つ小型化する方策を探らねばならない。

- (4) 電磁誘導センサーの信号をピックアップするアンプは、汎用的な標準品を使用した。今後の製品化試作には、アンプから信号を取り出す端子の付加や、周波数範囲の拡大も必要で、専用アンプの開発も必要になる。（ソフトウェアの開発含む）
なお、デジタル信号をプログラムで変換しているので、ナゲットのデータが忠実に表示されるのか、慎重な検討も必要である。

- (5) 今後も、溶接強度と検出信号に相関関係があるか等、物理的な視点でも検出データを追及したい。

それには、溶接条件が種々変化した溶接サンプルを作り、より詳細な測定データを積み上げて解析を行うことを実施する。

- (6) このような「電磁誘導センサーのナゲット検出信号」の収集は、溶接サンプルが1個だけでも、ナゲットエリア全体を0.1 mmピッチでデータを記録すると膨大になる。
また、多様なナゲット形状が存在するので、溶接条件のパラメータを組み合わせて溶接サンプルを多数作り、そのナゲット形状データを集めるが、人手では無理となる。

そのため、卓上型のロボットを使って、検出信号データを自動収集し、またその解析を行うことを進めている。



図24. 卓上ロボットを使って
電磁誘導センサーの
検出信号を収集

2-5-5 高速溶接継手検査装置の開発

電磁誘導センサーからの信号を増幅し、モニタ装置（パソコン等）に取り込み、ナゲットの形状を表示するシステムが必要であるが、本研究開発では、汎用性のある機材を代替え使用した。

今後、専用の増幅器の設計・製作やソフトウェア開発を行う予定である。

2-6. 溶接信頼性の確認

2-6-1. 溶接継手の評価

異種金属溶接技術とその実用スポット溶接機の研究開発に当たり、群馬産業技術センターは各種の溶接条件（パラメータ）を振って接合された『（アルミニウムと鉄の）異種金属溶接サンプル』に対し、平行引張試験・十字引張試験を実施した。（機械的強度の確認）

また、溶接根（ナゲット）をカットし、その断面の金属顕微鏡観察なども担当した。

以下、群馬産業センターの評価結果の一部を転載する。

【2-6-1 A】異種金属溶接の機械的強度の確認

（1）溶接条件について

表3の溶接サンプルNo.①を基準条件とし、電流値、通電時間、第2加圧を変化させた溶接サンプル（試験片）をART-HIKARIから提供を受けた。

具体的な設定条件を表3に示す。

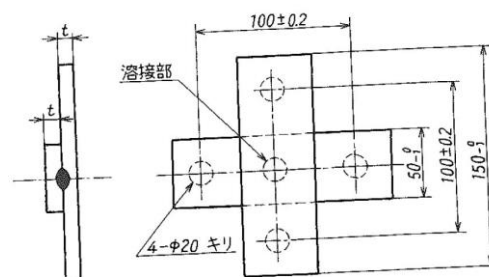
表3. 異種金属溶接サンプルの溶接条件

上板 板厚：1.2 t		上電極径：16 φ-DR		UPスロー		第1通電		第2通電	
下板 板厚：1.2 t		下電極径：16 φ-300R		7' 時間		電流値		電流値	
No.	加圧コントロール	加圧力		スライ	時間	(ms)	(kA)	(ms)	(kA)
		設定値	電極圧						
		(0.01A)	(kN)	(Hz)					
①	第1加圧	600		0	200	17	300		
	第2 "	400							
	第3 "	600							
②	第1加圧	600		0	200	15	300		
	第2 "	400							
	第3 "	600							
③	第1加圧	600		0	200	19	300		
	第2 "	400							
	第3 "	600							
④	第1加圧	600		0	200	17	150		
	第2 "	400							
	第3 "	600							
⑤	第1加圧	600		0	200	17	450		
	第2 "	400							
	第3 "	600							
⑥	第1加圧	600		0	200	17	300		
	第2 "	300							
	第3 "	600							
⑦	第1加圧	600		0	200	17	300		
	第2 "	600							
	第3 "	600							

十字に配置して引張試験を行う溶接サンプルは、JIS Z3137 抵抗スポット及びプロジェクション溶接継手の十字引張試験にもとづく試験片を作成した。

JIS に規定された寸法を図25に示す。

図25. 十字引張試験片の寸法
(JIS Z3137 より抜粋)

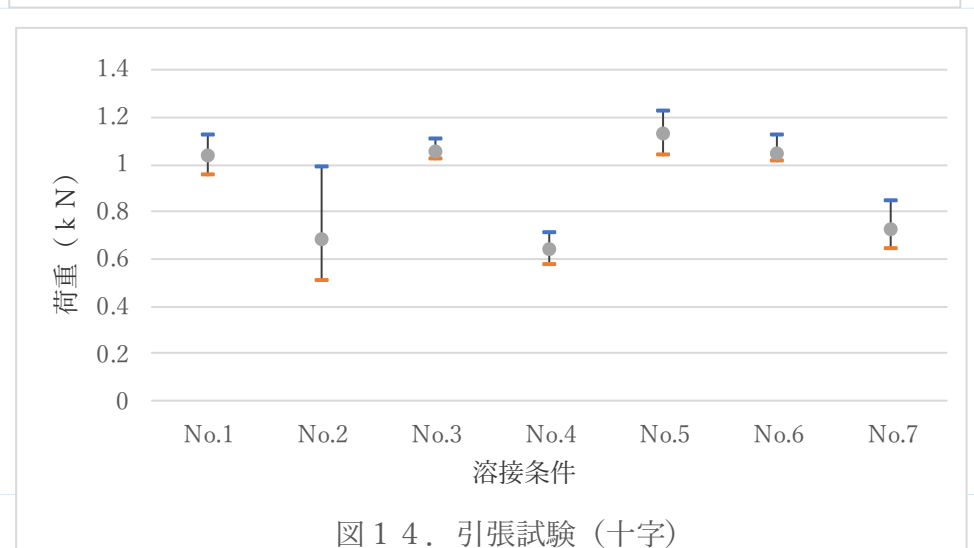
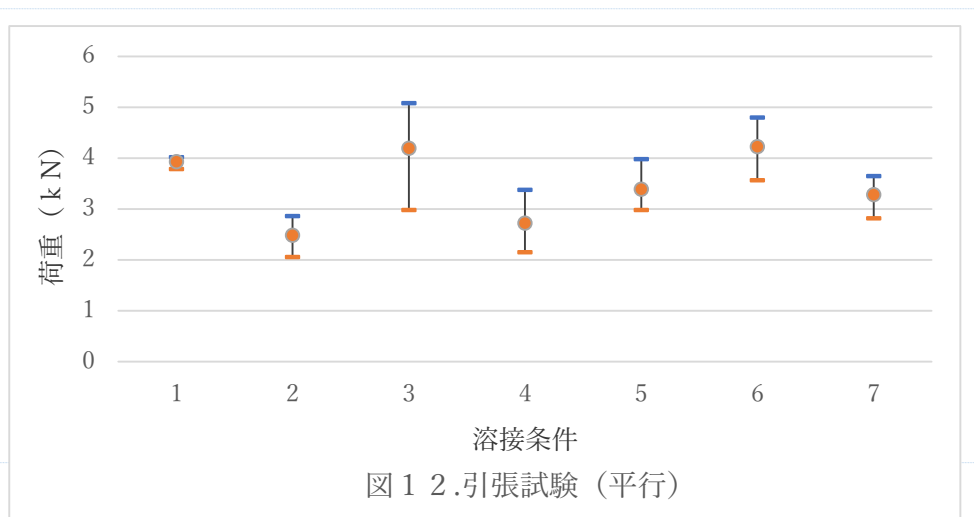


十字引張試験片を治具にセッティングし、万能材料試験機に取り付けた。(図26)



図26. 十字引張試験の様子

平行引張試験の結果を図27に、十字に溶接した試験片を用いて引張試験を行った結果を図28に示す。(いずれの溶接条件においても溶接サンプル数：n=3)



また、引張試験終了後に引き剥がした溶接部を観察した。その結果の一部を図29に示す。

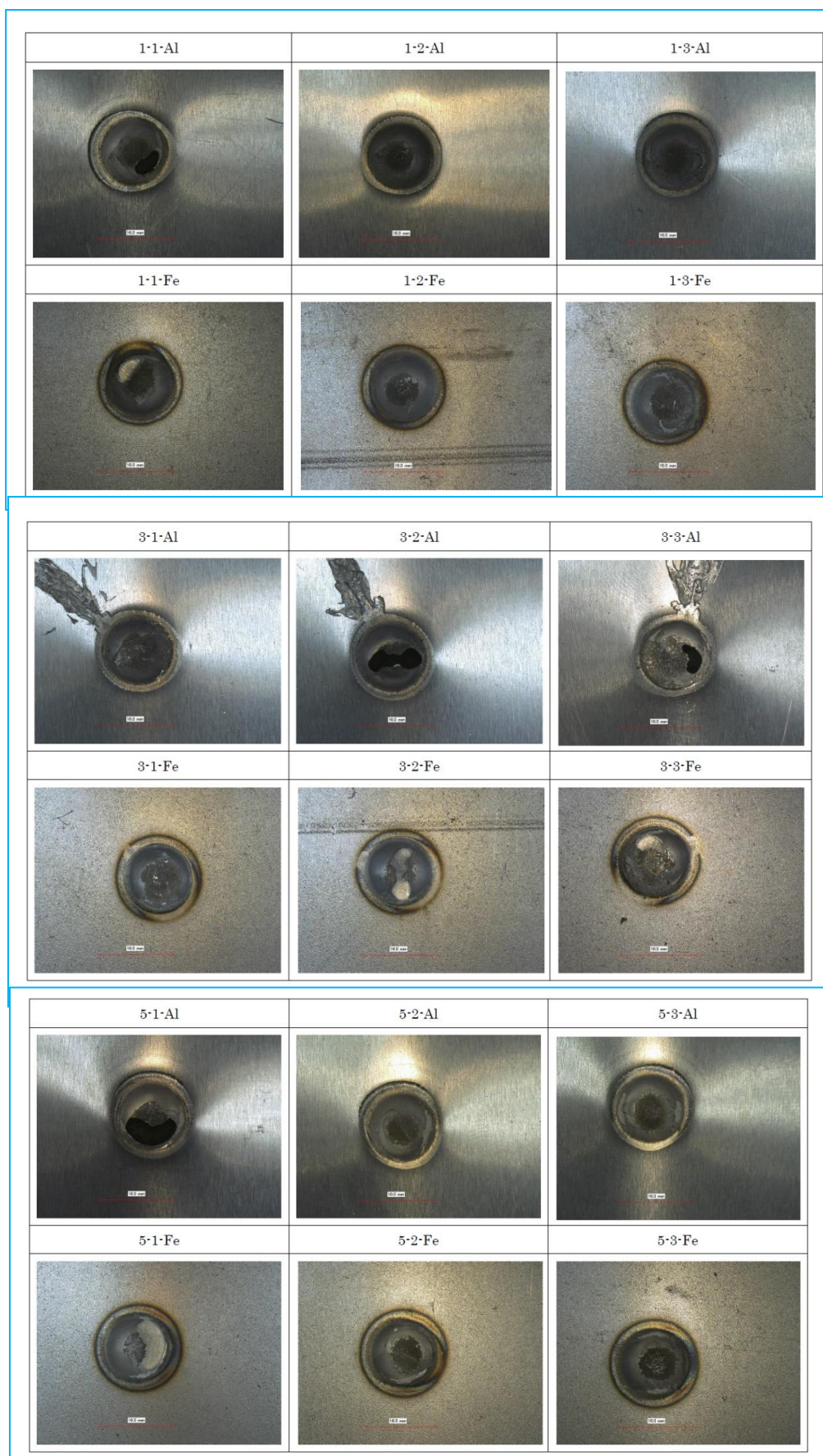


図29. 十字引張試験で引きはがした後、溶接部を観察した写真
上から溶接サンプル No. ①〈基準条件〉、③〈電流強〉、⑤〈通電時間長〉

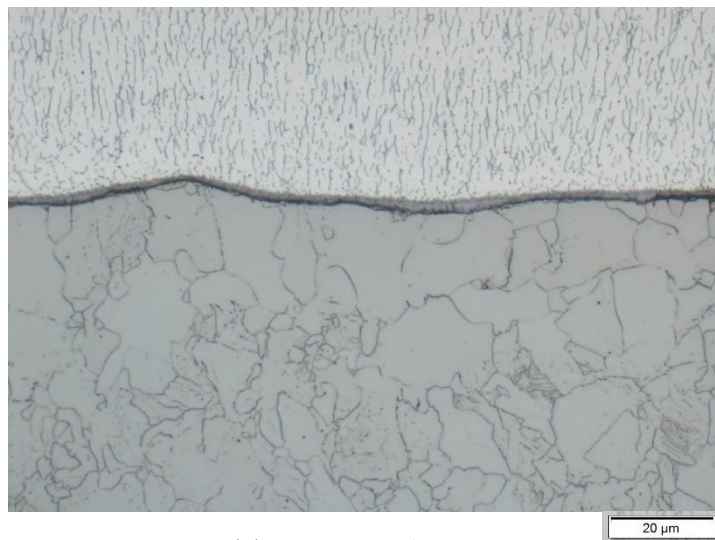
【2-6-1 B】溶接部材料の金属組織観察

上述の結果より、引張強度が高く溶接部にチリが発生していない条件であるNo. 5が今回の実験の中で最も良い条件であると判断した。強度試験に用いた試験片は破壊されているため、同じ溶接条件の試験片を再度作成し、断面を観察した。その結果を図30に示す。

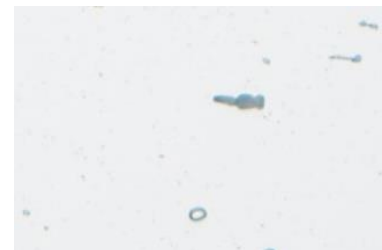


図30. 溶接条件 (No. 5) の金属組織観察

溶接部を拡大し、中央部と端部の金属組織の比較を行った。その結果を図31に示す。



(a) 中央部の金属組織



(b) 端部の金属組織(Al)



(c) 端部の金属組織(Fe)

図31. 溶接条件 (No. 5) の金属組織拡大観察

【2-6-1 C】異種金属溶接部材料の硬さの分布測定について

溶接部の強度はAl (Al)とFeの界面の合金層の形成状態によって異なると考えられる。そのため、図31のAl (Al)とFeの界面の硬さを測定しようと試みたが、当センターで保有するナノインデントーション装置では、合金層の硬さを狙って測定することができない仕様であった。

そのため、溶接部が他の部分の硬さと変化がないかをマイクロビッカースを用いて測定を行うこととし、今回の溶接条件のうち最適と考えるNo. 5の中央部の断面の硬さ分布を測定した。その結果を図32に示す。

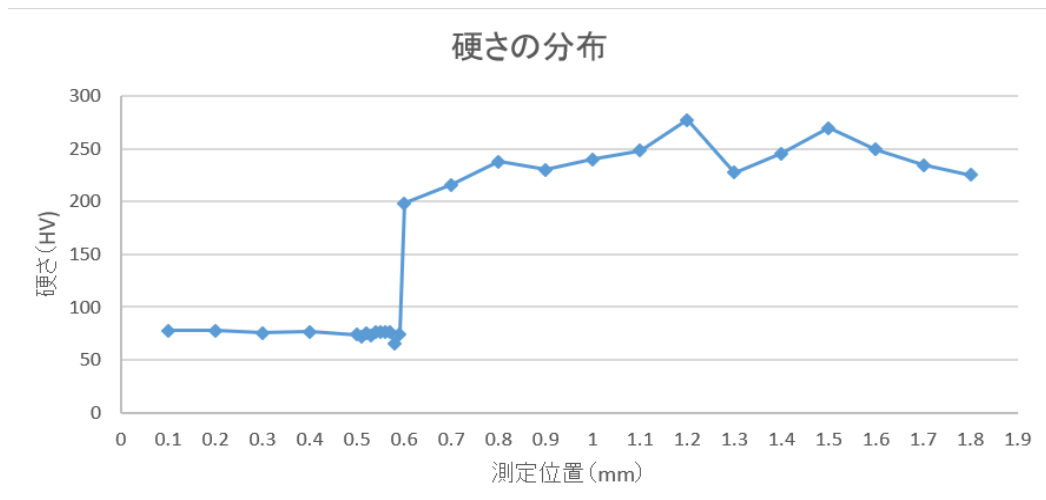


図32. マイクロビッカースによる硬さの測定結果（中央部）

【2-6-1 D】考察【報告の抜粋】

『溶接片を平行に配置し、剪断方向に引っ張った場合、基準の溶接条件よりも電流を上げるか、第2加圧を下げるかで強度が増すことが分かった』など、群馬産業技術センターの考察を詳細報告書にまとめ、ART-HIKARIに提出した。

なお、3年目では、観察試料の作成を、群馬産業技術センターが行った。

これは、ナゲットから観察試料をどう切り出すかが観察精度の向上に結び付くことと、本研究では、信頼性分析を東京工業大学、ART-HIKARI (株)及び当センターの3者で行うので、観察試料の作製に均一性を保つ前提が必要となったことによる。

そういう意味で、試料作成の実績が多く、作成技術にもノウハウを有する当センターが最適と判断され、担当した。

試料作成の手順は、溶接継手のナゲットの精密な切断、樹脂埋込み、低温乾燥・樹脂硬化、観察面研磨となるが、均一性と化合物状態の維持に細心の注意を払った。



図33. 1年目で使用した定置型スポット溶接機

2-6-2. 溶接継手の評価

本研究では、ART-HIKARIが、開発を進めて居る“異種金属（鉄/アルミ）抵抗溶接”技術で作成した『溶接サンプル』について、東京工業大学 先端原子力研究所 吉田研究室が、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた溶接部組織解析及び元素分析など高度な手法を駆使し、『溶接信頼性の評価』を行った。

図33に、1年目で溶接サンプルを作成した『定置型異種金属用スポット溶接機』の外観を示す。左側の薄茶色の機械がそれであり、寸法が1m×0.6m×1.5mと大きく、重さも1トンを超えている。

【2-6-2 A】研究開発の方法

1年目で、異種金属溶接の溶接条件が絞り込まれ、その確定した仕様で2年目に、異種金属溶接用のスポット溶接機が試作開発された。

(その外観を図34に再録)

重量は60kgと約16分の1に軽量化、サイズも自動車製造ラインで使用可能となる大きさまでに、コンパクト化された。

この新規開発のスポット溶接機で、鉄とアルミを溶接した溶接サンプル(テストピース)を受け取り、解析を行った。

以下に、溶接信頼性解析の結果を述べる。

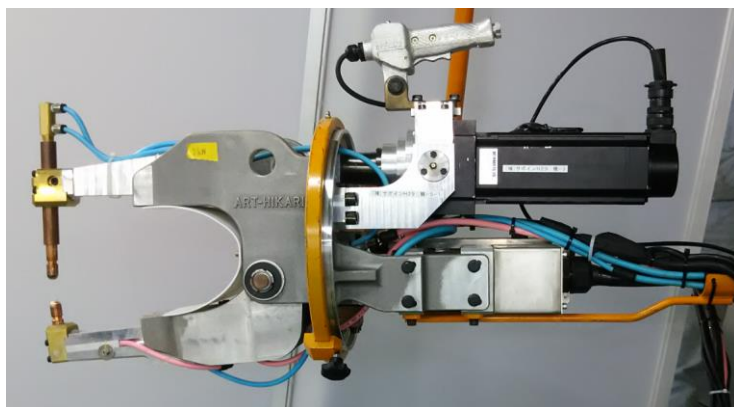


図34. ポータブルタイプ 異種金属用スポット溶接機

【2-6-2 B】SEM(走査型電子顕微鏡)を用いた溶接部組織解析 及び EDS(エネルギー分散型X線分析)を用いた元素分析

東京工業大学において、走査型電子顕微鏡(SEM)により溶接部の組織解析及びエネルギー分散型X線分析(EDS)を用いた元素分析を行った。

図35に、アルミ/鉄の溶接部組織のSEM写真を示す(観察倍率1万倍)。

アルミ/鉄界面には剥離、亀裂等は見られず、抵抗溶接により良好な接合が得られていることがわかる。

また、アルミ/鉄界面には2ミクロン程度の層が形成されており、この層が鉄及びアルミ材へ互いに入り組んだ組織になって居ることがわかった。

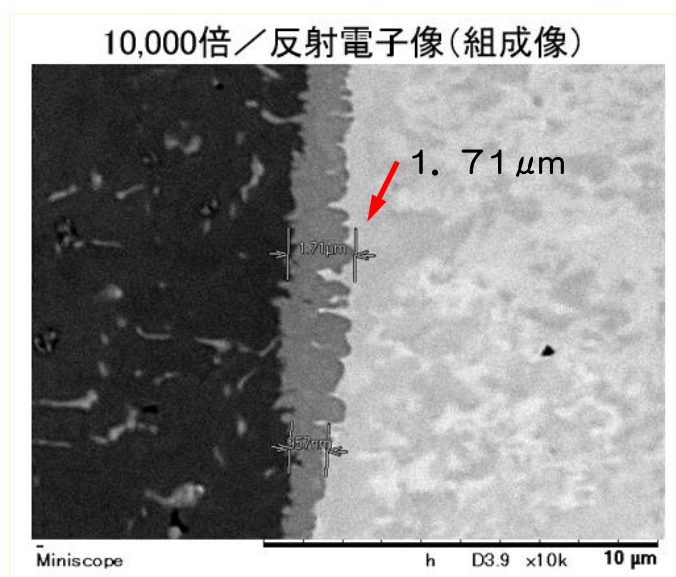


図35. アルミ/鉄の溶接(接合)部組織のSEM写真

この層(接合面)について、EDS(エネルギー分散型X線分析)を用いた元素分析を行った。

図36に、EDSによるアルミ/鉄溶接部の元素マッピング、図37にアルミ/鉄溶接部の点分析の結果をそれぞれ示す。

こうした元素分析の結果からも、アルミ／鉄溶接界面に生成した層は鉄及びアルミの金属間化合物であり、鉄がアルミ材に入り込み、アルミが鉄に入り込んでいることが確認できた。



図36. EDSによる鉄／アルミ溶接界面の元素マッピング

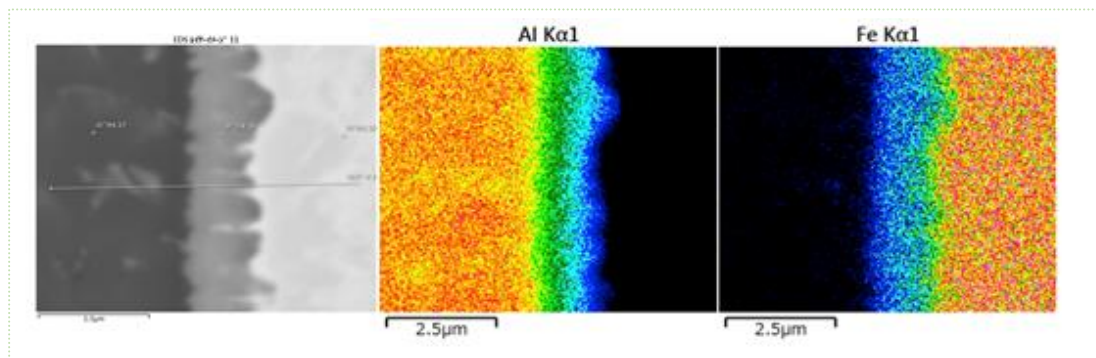


図37. 鉄／アルミ溶接部の点分析の結果

以上の結果から、鉄（融点：1538℃）とアルミ（融点：652℃）の融点は異なるが、抵抗溶接によりアルミ／鉄界面に金属間化合物が生成しており、良好な異種金属の接合ができているものと考えられる。

【2-6-2 C】2年目の信頼性分析データ

2年目において、「新規開発の（ポータブル型）スポット溶接機」でも同じ信頼性が得られるかを確認した。

2年目の信頼性分析データの代表例を図38、図39、および図40に示す。

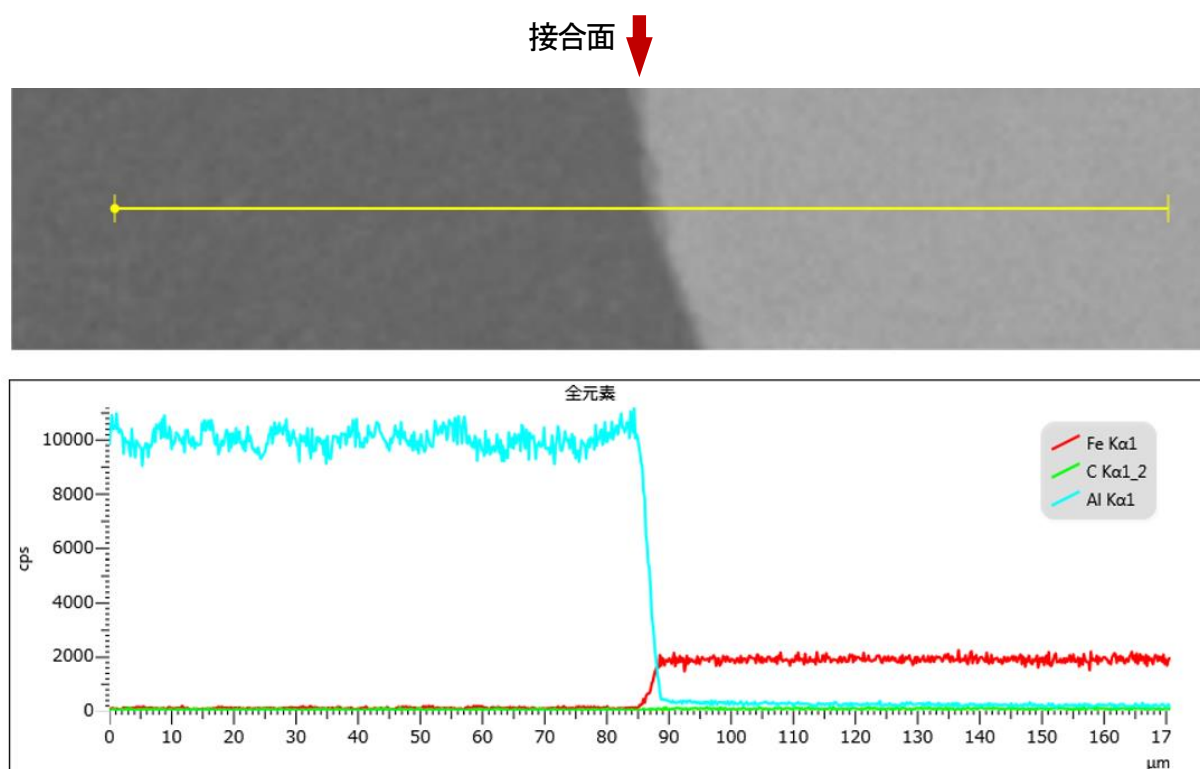
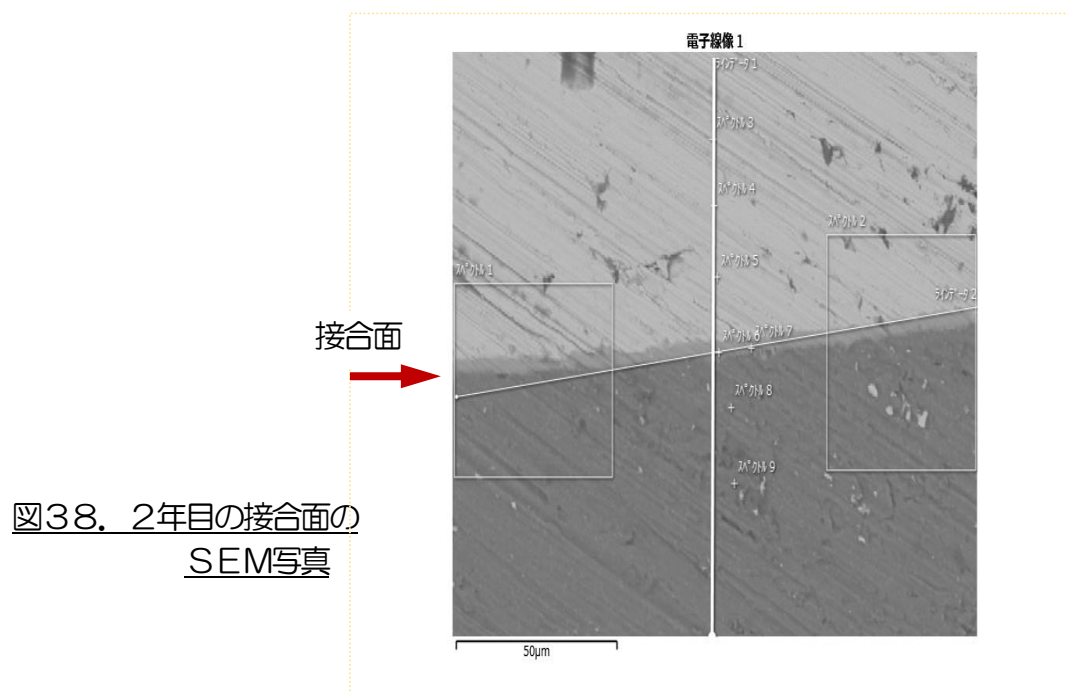


図39. 接合面におけるアルミ(青色)と鉄(赤色)の成分率の遷移状況
溶接電流19kAの例

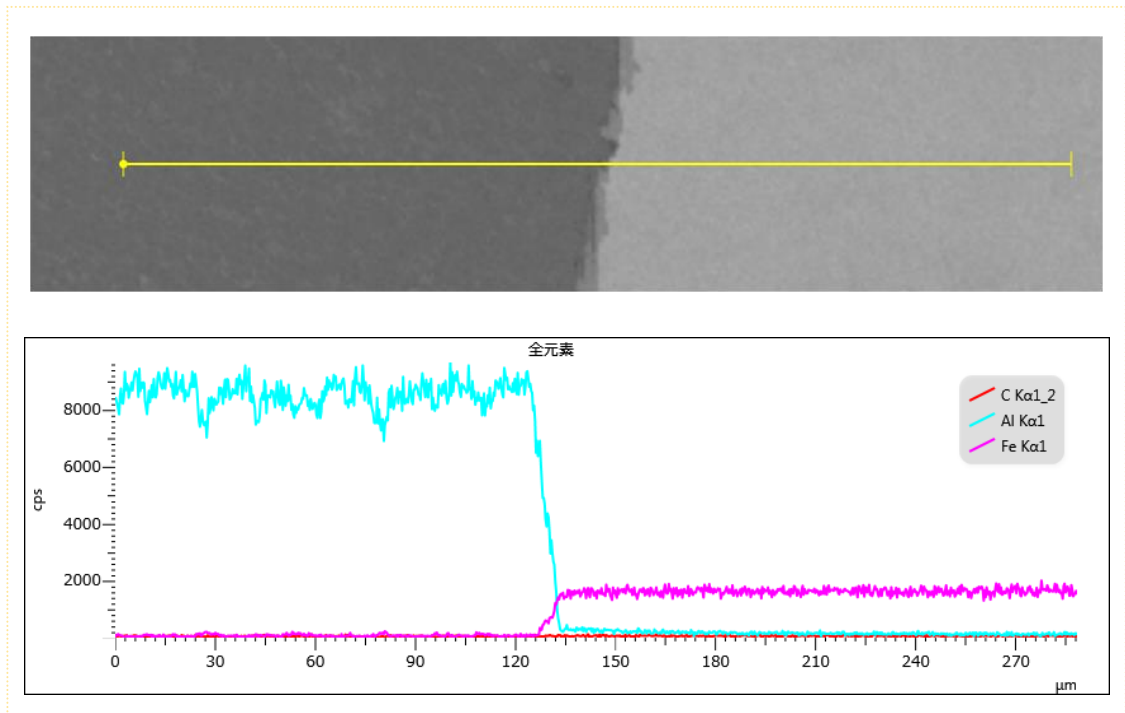


図40. 溶接電流16kAの溶接サンプル：アルミ／鉄接合面SEM写真
および EDSによるX線元素分析データ

【2-6-2 D】解析・分析結果の考察【東京工業大学の研究成果報告抜粋】

2年目の溶接サンプルにおける元素成分の遷移状況も、図39、図40で分かるように、アルミ／鉄の成分がそれぞれ、接合面の境界で互いに溶け込み、なだらかに増減している。

これは、アルミ材と鉄材がそれぞれ、互いに混ざり合い、しかも接合面の2～8μmという極めて薄い厚さの範囲で浸透が完了していることを意味している。

この結果から、1年目の定置型スポット溶接機で追求した溶接条件は、新規に開発したポータブル型異種金属用スポット溶接機でも再現している。

即ち、今回製作した『より軽くよりコンパクトで、実用的に生産ラインで使用可能な異種金属用スポット溶接機』でも、溶接条件出しの為に作った“定置型スポット溶接機”の結果と変わらないことを確認できた。

SEMおよびEDSを用いた信頼性分析の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 異種金属溶接では、接合面の金属間化合物の厚みが、10μmを超えると接合がもろくなり、剥がれやすいことが知られている。

本報告書の「図39（溶接電流19kA）」「図40（溶接電流16kA）」の例でも分かるように、接合面の厚みが8μm以下に納まっており、溶接片の引張試験においても溶接強度が十分に強かったことから言っても、ART-HIKARI(株)の『異種金属溶接用スポット溶接機』は、最も望ましい接合面を形成していると言える。

- (2) 元素分析の結果から、鉄／アルミ溶接部に生成した層は鉄とアルミの金属間化合物であり、鉄がアルミ材に入り込み、アルミが鉄に入り込んでいることが確認できた。

即ち、鉄（融点：1538℃）とアルミ（融点：652℃）という、『融点の異なる金属材料の接合』が、試作したスポット溶接機により、『鉄／アルミの境界面に金属間化合物が生成』されることによって、『良好な異種金属の接合になっている』ものと判断して良い。

2-6-3. 溶接強度、接合面化合物などについての考察（総合まとめ）

以上に述べた、東京工業大学と群馬産業技術センターの“溶接信頼性評価”を受けて、ART-HIKARIの知見も加え、溶接サンプルの信頼性評価を増やした。

そのデータの一部と『溶接条件の追求結果』について以下に述べる。

【溶接条件の追求 その1】

異種金属用スポット溶接機を使って、溶接電流・通電時間などのパラメータの組合わせを20種類選んで、それらに対応する溶接サンプルを、各7枚ずつ作成した。

各7枚の溶接サンプルの中、各6枚のそれぞれを、平行引張強度試験に供した。

そうした「溶接条件」対「引張強度」のデータをまとめ、関係性を考察した。

図41はその一例で、通電時間を300msec（青色線）、350msec（橙色線）、400msec（灰色線）と変えても、溶接電流18000アンペア付近で、最高の強度が得られている。

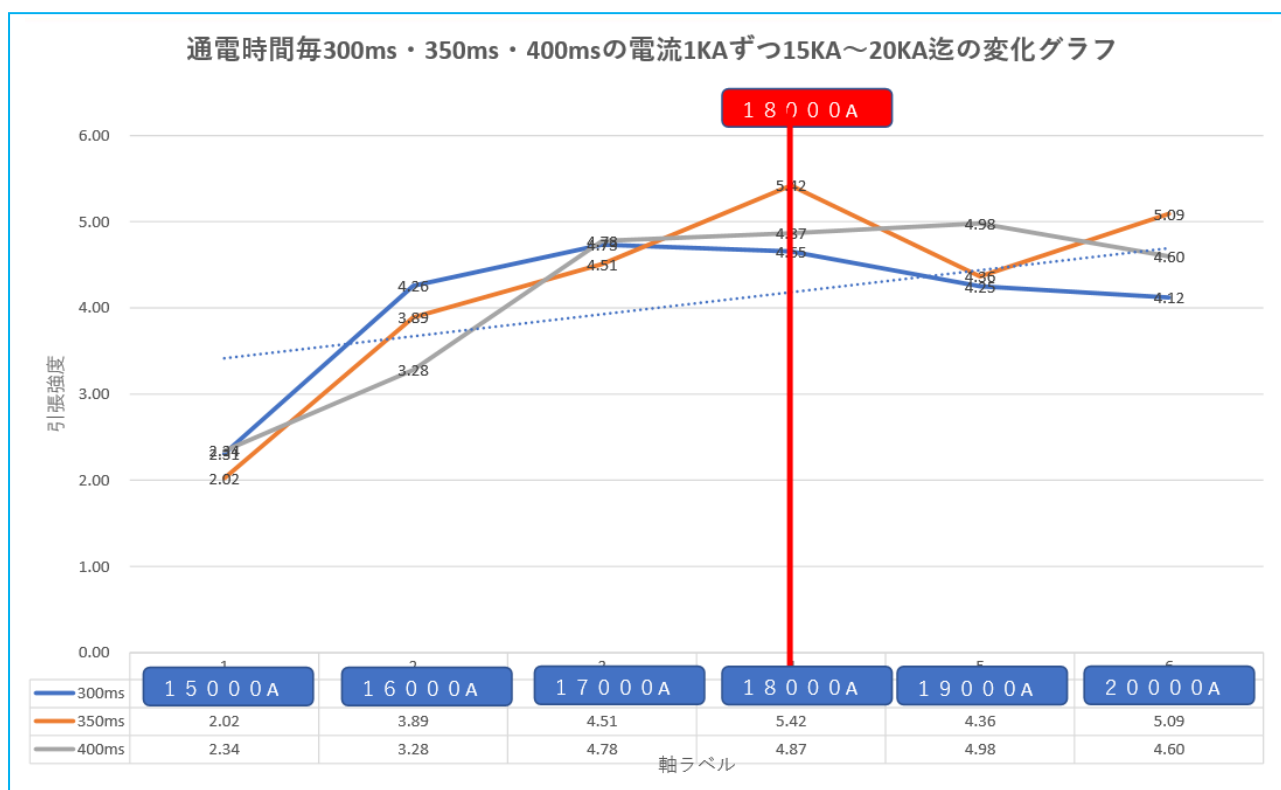


図41. 溶接電流（横軸）を15kA、16kA、17kA、18kA、19kA、20kAとし、通電時間を300msec、350msec、400msecと振った場合の平行引張強度試験結果のグラフ表示（サンプル数n=6）

【溶接条件のまとめ】（その1）

溶接条件のパラメータを振って、20種類の溶接条件に対する溶接サンプルの観察・考察から、次のことが判明した。

- ①今回の実験にて、電流を上げて行くに従って、強度が上がって行く。
- ②電流2万アンペアでオーバーヒートによる強度限界になった。
- ③16kA～18kAクラスの大電流で、通電時間250～300msecあたりが良い溶接条件であった。（18kA付近が強度のピークだった）

【溶接条件の追求 その2】

図42は、溶接電流16kA、通電時間300msecの溶接サンプルの接合面のSEM観察写真と元素（鉄／アルミ）成分の比率の遷移変化グラフを、ほぼ対応した位置に合わせて表示している。

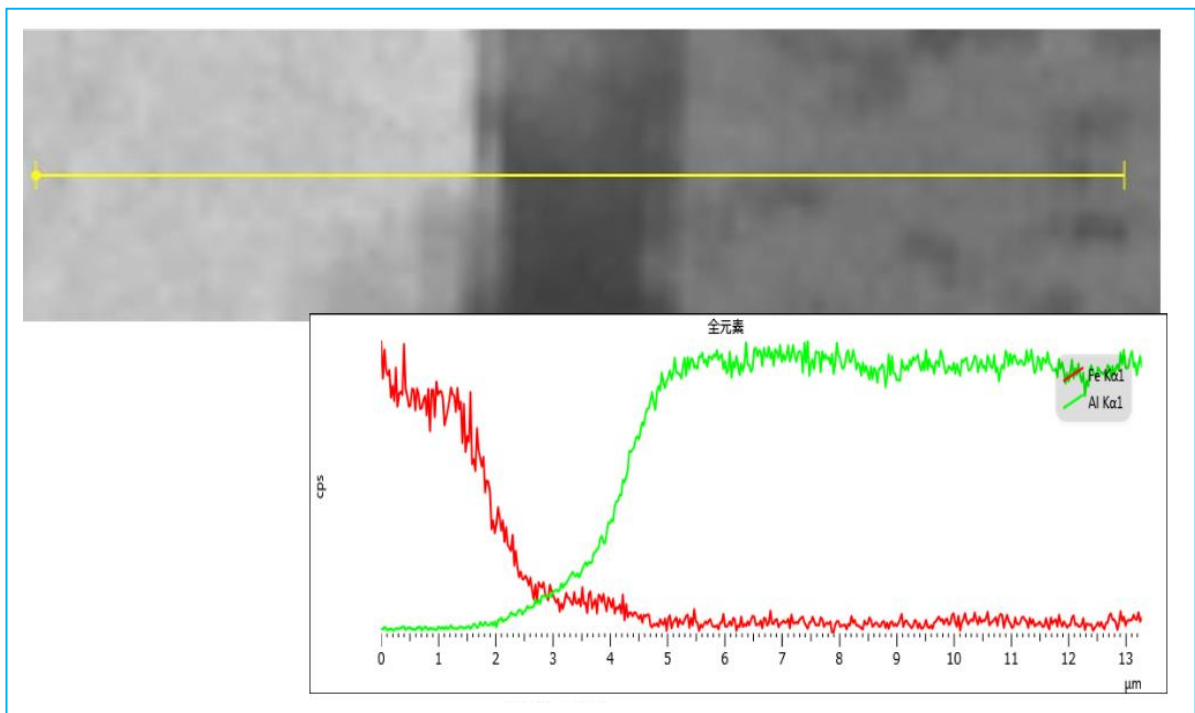


図42. 溶接電流16kA、通電時間300msecの溶接サンプルの例
上段は接合面の拡大撮影写真（黄色線は、元素成分の測定ライン）
下段は、測定ラインに沿った元素成分の比率の遷移グラフ

これら、図42などから、溶接サンプルは次のように評価できる。

【溶接条件のまとめ】（その2）

本研究開発において、SEMおよびX線分析器（EDS）を使用して、鉄とアルミの接合状況を確認した。

鉄とアルミの金属間化合物は、2ミクロンメートル程度から多くても7ミクロンメートル迄の厚みに収まっていた。

金属間化合物の線分析をしてみると、鉄とアルミが交差するように混じって居ることが測

定された。

鉄とアルミという、融点が違う金属材料の溶接にも拘わらず、上手く金属間化合物が出来ており、引張試験結果も「アルミの強度までになっていた」ことで、『異種金属の接合が、抵抗溶接技術で実現出来た』ことが証明された。

第3章 全体総括

3-1. 補助事業の成果及びその効果

3-1-1. 補助事業の取り組み内容とその成果

(1) 補助事業の具体的な取組内容

自動車産業の喫緊の課題である「軽量化」を更に進める為には、マルチマテリアルを適材適所に使えることが最良の手段となる。

そうした業界ニーズの中でも、ハイテン（鋼材）とアルミ材の異種金属溶接技術は、世界的にみても実用化が達成されていない。

本研究開発では、自動車生産技術を牽引して来た「抵抗スポット溶接」を、同種金属溶接だけではなく、異種金属溶接でも可能とし、日本の自動車産業の優位性確保に資することを目的とした。

具体的には、次のような開発を実行した。

1. 異種金属（鉄／アルミ）溶接条件の徹底的追求
2. 異種金属溶接用電源装置の試作開発
3. 溶接トランスの小型・軽量化と応答性向上
4. 溶接トランスの強固化
5. サーボモータ性能向上による加圧制御の即応性向上
6. VVP（垂直振動加圧）機能を実現するために、ポータブルスポット溶接機全体、および構成要素の堅牢化対策を実施。
7. 高機能シミュレーションソフト導入により、多種多様な『各自動車会社向けスポット溶接機』を、加圧力に対するたわみの動的応動解析を含め、3D-CAD設計を完了して、即受注可能な準備を完了
8. 非破壊型溶接継手検査用『電磁誘導センサー』の試作開発と検出データの解析
9. 異種金属溶接信頼性の確認

(2) 主な研究開発の成果

3年間にわたる研究開発の成果の要点を、次ページの表4に示す。

特筆すべきは、異種金属の抵抗スポット溶接に成功したことであり、その溶接信頼性の確認にも、十分意を用いた。

表4 平成28～30年度における研究開発の成果

	開発項目	研究開発の目的・目標	研究開発の成果
	異種金属接合用電源装置 受電400Vをインバータ変換し、溶接トランスに供給。各種インターフェイス、モニターも内蔵。	(1)インバータ制御の高周波化と制御の細密化 ・INV回路の性能向上 ・モニター・制御時間単位の細密化 ・VVP(垂直振動加圧)機能のインターフェイス追加【注：VVP=バッチ加圧パイプレーションプレッシャーの略】	・制御回路動作の細密化を達成 ・インバータ制御周波数 3～10kHz ・通電・休止時間などを0.1msec単位で設定可能に改良 ・VVP機能インターフェイスを付加
異種金属溶接用スポット溶接機本体	異種金属接合用溶接トランス 電源装置からの交流電力を直流に変換。数万アンペの大電流を電極に供給。	(2)溶接トランスの小型・軽量化と応答性向上 ・2次巻線の構造 大幅改良 ・2次(溶接)電流の立上り時間を短縮 ・トランスの構造堅牢化による耐振動性向上	・2次電極の一体構造化、電極間の近接化による、性能向上と構造強化を達成 - 出力電流：2万アンペア、重量：20kg ・溶接電流立上り時間：1msec／5000Aに高速化
	高速反応サーボモータ 溶接電極に直結、回転トルクを加圧力に変えて伝達。	(3)加圧制御の即応性向上とVVPの実現 ・加圧制御用ドライバーおよびサーボモータの能力向上と性能改良 ・VVP(垂直振動加圧)機能の追加【注：VVP=バッチ加圧パイプレーションプレッシャーの略】	・VVP対応機構を組み込み：①サーボモータ出力を2kWに増強、②サーボモータのシャフトにスラスト機構組込み ・サーボモータのトルク増強と加圧力可変制御の高速化(加圧到達時間1msecを達成)
	異種金属用スポット溶接機 溶接トランス、サーボモータを内蔵。溶接電極、冷却水チューブ他。	(4)異種金属用スポット溶接機の開発 ・ポータブルタイプスポット溶接機(VVP機能付き)試作 ・自動車生産ライン向け多種多様なスポット溶接機の3D-CAD設計とたわみ応力シミュレーションを実施。開発機動力を大幅に向上	・トランスの強化とポータブルスポット溶接機の鋳物化により、スポット溶接機筐体の堅牢化を実現(VVP対応) ・自動車会社の仕様別に、スポット溶接機8種について、即受注が可能な設計データを蓄積
	非破壊型溶接継手検査装置	(5)抵抗溶接のナゲット向け電磁誘導センサーの開発 ・溶接ライン設置に向けた設置構造、性能向上検討 ・電磁誘導センサーの試作と検出性能実験	・ペンシルタイプの電磁誘導センサー試作(ナゲット部を通る電磁エネルギーの密度アップ) ・発信信号の複数周波数の瞬時連続自動切替え。 ・ナゲット部と(溶接しない)素材部の検出信号に有意差を得た
	溶接信頼性の確認	(6)溶接継手評価、溶接信頼性評価 ・溶接継手の機械強度測定 ・溶接継手の硬度測定 ・顕微鏡による組織観察 ・溶接部の組織解析 ・溶融接合の挙動解析	・電子顕微鏡観察と元素分析による溶融接合の組織評価⇒接合面で(鉄/アルミの)元素成分が互いになだらかに融合遷移 ・金属間化合物の厚み制御が数μmの仕上がりであることを確認 ・異種金属溶接継手の引張強度および十字破壊強度を測定、ほか。

3-1-2. 補助事業の効果

1. 自動車は、走行安定性の面から車体の下部は強度が必要であり、ハイテンの採用が続くと思われるが、軽量化には部分的な、または全面的なアルミへの置き換えが選択肢になる。

そのハイテン（鋼材）とアルミ材の接合が、従来多用されてきた『抵抗スポット溶接機』と同じ技術の系統で実現できた。

それにより、他の手段による異種金属接合方式と比べ、生産性の維持・向上、生産設備費用の低減、現状生産ラインのノウハウ活用などで、今後大きなメリットが得られる。

2. 異種金属溶接技術が実用化されたので、ハイテンとアルミが適材適所で使用可能になる。従って、自動車会社における車体設計の自由度が格段に上がり、車の軽量化のステップアップに道を拓いた。
3. 『非破壊型溶接継手検査装置』の実用化の可能性が出てきた。実用化への開発継続が必要ではあるが、溶接部の結果検査が生産ラインで実施できるようになれば、車の安全性確保・生産性向上に結びつく。

3-2. 補助事業の成果に係る事業化展開

3-2-1. 補助事業の成果に係る事業化展開

(1) 異種金属接合用スポット溶接機

【製品開発の効果】

「ハイテンとアルミ合金の抵抗溶接の実用化を、初めて達成した」ことで、次のようなメリットがもたらされた。

- ①これまで自動車の生産ラインで重用されて来たスポット溶接機のレベルアップであり、生産ラインの変更が比較的軽微で済む。
- ②抵抗溶接なので、重量の増加が無く、接合（溶接）速度も速い。
溶接対象の精度が多少悪くても、また曲線部分でも接合が可能である。
- ③他の接合方式などに比べても、抵抗溶接機は低コストである。
また、溶接時に消耗品（溶接ワイヤー等）が不要である。
- ④他の産業（ものづくり）への波及効果が期待できる。

【事業化の根拠】

自動車のモデルチェンジには、数年かかるのが通常であり、車体骨格の基本構造まで変更するとなると、7～8年も想定される。

今回の開発終了後は、例えば、「ルーフがアルミで、側面がハイテンで作られるバンタイプにおける異種金属溶接接合」といった、現にあるニーズへの適用から売り込む。

また、日経 Automotive 2015 年5月号に、『アルミカー復権の衝撃』特集が掲載され、米欧日の軽量化に向けた「アルミ材の車体への使用戦略」が紹介されている。

その中で、『ボディを軽量化するメリットは、環境対策だけではない。軽量化によって燃費を改善し、走行性能を高めれば、クルマの商品力強化につながる。アルミ合金の採用で欧米に先行を許していると、日本の自動車メーカーは国際競争力を失う恐れがある』

との警告を提言しているが、その対策の手助けに結びつけて行きたい。

現在、アルミ化に後れを取っているが、日本の自動車メーカーでも前向きの動きが出て来ており、弊社の技術に注目して来訪する自動車メーカーが増えている。

【その他波及効果】

現在の産業界では、異種金属の接合を『抵抗溶接で実用化できる』とは、誰も予想していなかった。

それほどに革新的技術の開発であるゆえんは、溶接境界面に生ずる金属間化合物を安定して10ミクロン以下に抑えることで、「溶接というより分子間結合に近い接合」を具現する技術開発が必要だったからである。

従って、ものづくりに新しい構造の製作方法を提供することになる。例えば、「鋼材やステンレスを使っている構造物や製品の一部」をアルミに置き換えて、軽量化を達成するなどの道が開けて来る。

時間はかかるかもしれないが、自動車工業以外にも、産業機械・建築構造物・電池・航空宇宙などにも応用をPRして行く。

(2) 非破壊型溶接継手検査装置

【製品開発の効果】

今回開発に挑戦した『非破壊型溶接継手検査装置』は、従来行われている「タガネによる破壊強度確認」などとは異なり、次のようなメリットをもたらす。

- ① 比較的安価にシステム化できる。
- ② 非破壊で溶接部を検査することができる。(製品を傷つけない)
- ③ 生産ラインに組み込み、オンラインで検査を行うことの可能性が出てくる。

自動車生産に限らず、同一品を連続生産するようなラインで、金属製品の瑕疵(傷、気泡、サビ、異質物など)の検出に応用できる可能性もある。

溶接以外の用途にもニーズが高いと予測している。

【事業化の根拠】

自動車の生産ラインにおける、スポット溶接は、「抜取り検査で、タガネを溶接部の近傍に打ち込み、破壊力の確認で接合強度を見る」方法が多いと言われる。

また、超音波方式もあるが、やはりオフラインで、接合面を磨くなどして強度を確認することになる。

これに対し、今回開発した方式は、流れ生産の中で検査が出来る可能性もあり、しかも非破壊型センサーなので、製品を傷つけることもない。

産業界は、自動機械やロボットを使った無人生産でコストを下げないと、海外メーカーにも負けることは自明で、今回の開発が検査工数の削減につながることをPRするなどして、導入業種や採用企業の開拓を進めて行く。

まだ 継続開発が必要であり、設備としては 用途ごとの設計が必要になるが、今後の品質管理改善や生産効率向上に寄与できることは間違いない。

4-2. 用語の説明

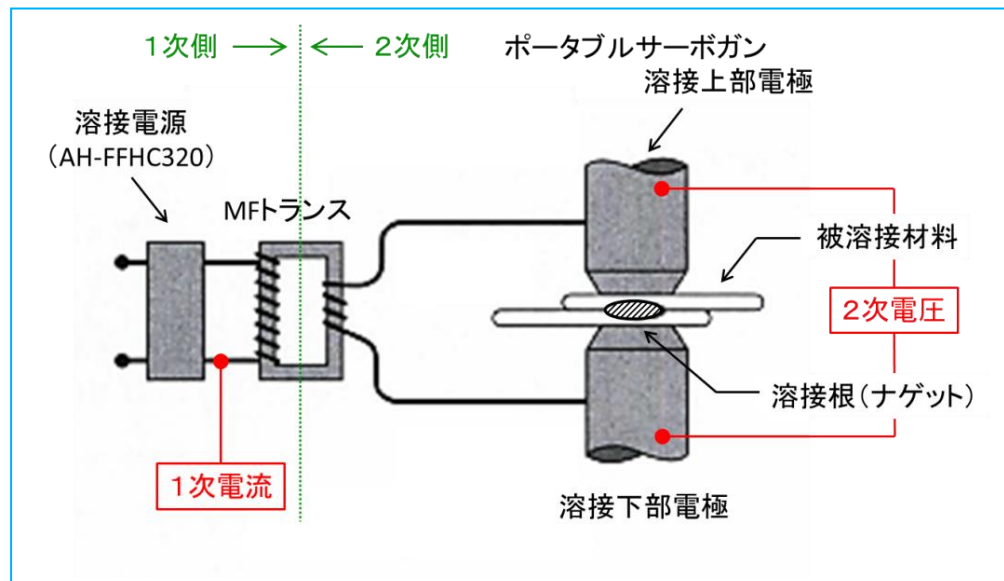
- 抵抗溶接……重ね合わせた被溶接材(金属板材、鋼管など)に、両サイドから電極を押し当て、電極間に大電流を流し、溶接面の接触抵抗にジュール熱を発生させ、その熱で被溶接材を溶解させ、それと同時に加圧することによって接合する溶接方法。

【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する。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（点）溶接、シーム（線）溶接などがある。

- 抵抗スポット溶接機……その構成要素の概念図を示す。



- FFHC（可変周波数熱量制御）……Flexible Frequency Heat Control
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のインバータで行い、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で、トランス電流の立ち上がり特性を改良し、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。

- VVP（垂直振動加圧）……Vertical Vibration Pressure

ART-HIKARI(株)で開発した、抵抗溶接時に、被溶接材接触面に溶接電流が流れるタイミングを早める為の制御方法の呼称。

異種金属溶接の場合、被溶接材（鉄板材とアルミ材）の合せ面に、電触（エレクトロロコロジー）対策が必要で、絶縁物の薄い層が必ず存在する。

そのため、抵抗スポット溶接で電圧をかけても、絶縁層を破壊して電流が流れるまでに少し時間がかかる現象が発生する。その解決策として、「溶接電極への振動加圧制御」（VVPと呼ぶ）を実際に試作開発した。

- SEM……Scanning Electron Microscopy（走査型電子顕微鏡）

SEM（走査型電子顕微鏡）は、真空中で細く絞った電子線で試料表面を走査し、その時試料から放出される二次電子等を検出してモニター上に試料表面の拡大像を表示する電子顕微鏡である。

電子線の波長は光より遥かに「短い」ので、より小さな対象物を分離して見る事が出来る。従って、電子顕微鏡は光学顕微鏡と比較して、遥かに高い分解能力が得られる。

また、反射電子像は、試料の組成分布を反映した像となる。
- EDS（又は EDX）……Energy dispersive X-ray spectrometry
（エネルギー分散型X線分析）

SEM（走査型電子顕微鏡）にX線検出器を装着して、元素分析を行う事を可能にした装置。

走査型電子顕微鏡が、試料形状の観察だけでなく、その試料にどんな元素がどの程度含まれているかを調べるX線分析装置としても活用出来るようになる。
- マイクロスコープ

溶接ナゲット形状などの“拡大観察”を、普通の部屋や現場で比較的容易に出来るようにしたのが、マイクロスコープ（デジタル顕微鏡）である。

①マイクロスコープは、接眼レンズの代わりにカメラを搭載し、モニタ上に拡大像を映し出すので、「複数の人が同時に観察」でき、情報共有が可能。

②マイクロスコープは、被写界深度（ピントの合う幅）が深いので、凹凸のある対象物の全体を、正確に素早く観察が可能。

③ズームレンズを採用しているので、容易に倍率を変更が可能。
- CAD……Computer Aided Design（コンピュータ支援設計）
- CAE……Computer Aided Engineering

実物を作る前に設計の妥当性、性能試験、最適形状や最適条件を検討して、製品の問題点の洗い出しを行う作業、またはそのツール
- FSW……Friction Stir Welding（摩擦攪拌接合）
- ハイテン……High Tensile Strength Steel（高張力鋼、高抗張力鋼）

引張り強度が、おおむね490MPa程度以上のものから、約1,000MPa以下のものを高張力鋼と呼ぶ。近年は1,000MPa以上のものもあり、これは**超高張力鋼**とも呼ばれる

以上