

氏名	近藤 正恒	こん どう まさ つね
授与学位	博士(工学)	
学位授与年月日	平成22年 3月25日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 材料システム工学専攻	
学位論文題目	薄板の抵抗スポット溶接における連続打点性の研究	
指導教員	東北大学教授 粉川 博之	
論文審査委員	主査 東北大学教授 粉川 博之 東北大学教授 川崎 亮 東北大学教授 丸山 公一 東北大学准教授 佐藤 裕	

論文内容要旨

地球の未来に向けて環境の保護が人類の21世紀最大の課題である。この地球温暖化問題を世界の知恵を結集して解決するためには、まず我々が身近なエネルギー消費を減らし、また資源の有効活用を進める循環型社会を構築することが重要である。現状のエネルギー消費量の中で、運輸部門の占める割合は大きい。運輸手段をエネルギー消費量の少ない方法へ転換することも重要で、現在の主要な運輸手段である自動車のエネルギー消費量を減少する技術開発は緊急の課題である。自動車では石油を原料とするガソリン燃焼の内燃機関から、電気自動車、燃料電池自動車等への転換が活発に技術開発されている。しかし、どんな駆動源に転換した場合でも、人が乗車する空間を構成するボデーの軽量化により燃料消費量を大幅に削減出来る。このボデーの軽量化に関して、防錆性確保の観点から薄板化を可能にする亜鉛めっき鋼板と、軽量材料の代表であるアルミニウム合金板の溶接技術が本研究のターゲットである。特にボデーの組立技術として最も低コストな抵抗スポット溶接では、これらの板を溶接する場合、連続溶接打点に伴って電極の先端が合金化し通電径が広がることにより、溶融ナゲットが得られなくなる問題が長年の未解決問題であった。本研究の目的は亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接において、生産ラインの連続稼働性を阻害する、この未解決の連続打点性低下の機構を解明することにある。以下に、本研究において各章で得られた主な知見および結果を示す。

第1章「緒論」では、世界のエネルギー問題を整理するとともに、ボデー軽量化に対する材料の考え方とボデー各部位への採用による軽量化効果をまとめた。またボデー組立工程を紹介し、抵抗スポット溶接がボデー組立技術として生産性の試算からコスト上有利であることを述べた。これらを踏まえ本研究の目的が、ボデー薄板化を可能に出来る亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接における、上記未説明問題の連続打点性低下機構の解明であることを述べた。

第2章「抵抗スポット溶接の連続打点性能を支配する因子」では、まず抵抗スポット溶接継手の強度が板と板の間に出来る基石状の溶融部、いわゆるナゲットの径で決まることを述べた。次にナゲット径を形成する物理現象を紹介し、ナゲット径の生成に対し、溶接中の通電径、すなわち電極先端の板と接する形状が大きく影響することを述べた。また、物理現象をもとに溶接中の溶接部の温度上昇の計算例を示した。これらをもとにした溶接部の温度上昇に関するシミュレーション技術の現状をまとめ、溶接中の電流と電極間電圧の測定値から電流の通電径を推算し、これをシミュレーションに取り込むハイブリッドシミュレーション技術について紹介した。この手法を用いた温度上昇の計算値は実測値とよく合い実用レベルにある。

第3章「亜鉛めっき鋼板における連続打点性と電極先端形状」では、亜鉛めっき鋼板の連続打点性に関して、日本の自動車で多用される合金化溶融亜鉛めっき鋼板を対象に、電極先端形状の変化を電極先端に生成した合金層の解析結果から明らかにした。亜鉛めっき鋼板のみを溶接打点する単独打点と、亜鉛めっき鋼板とめっきの無い裸鋼板をミックスして打点する混合打点について、電極消耗現象を詳細に調べた。また最近熱効率が交流に比べて優れることから、採用されることが多い直流を溶接電流とした場合の電極消耗現象を調査した。

第4章「アルミニウム合金板における連続打点性と電極先端形状」では、アルミニウム合金板の連続打点性に関して、電極先端の形状の変化を電極先端に生成した合金層を調べることにより明らかにした。アルミニウム合金板の抵抗スポット溶接については、その適用の経緯が航空機を端緒にしており、表面の窪みを嫌う為R（ラジアス）形の電極が使われたことから極端に連続打点性が悪いとされてきた。しかし自動車ボデーの鋼板の抵抗スポット溶接に使われる先端の尖ったDR（ドームラジアス）形電極と長通電時間を採用すれば、2000打点以上の連続打点性が得られることを述べた。また電極先端の合金化を避ける為、電極とアルミニウム合金板との間に厚さ0.1mmの純銅箔を挿入する電極保護装置の開発について紹介した。本保護装置は電極先端が常に新生面となることから5000打点以上の連続打点性が得られる。

第5章「電極先端の消耗機構」では、亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金板の電極消耗現象について、電極先端温度と生成した合金層を関連づけて消耗機構を分類し、電極先端合金層堆積型、電極先端合金層剥離型の二つに分けられることを明らかにした。電極先端合金層堆積型は溶接中の電極と供試板の合金化反応が進まない条件で、溶接後電極が供試板から離れる際に供試板の表面層の脆化金属間化合物相で割れ、合金層が電極側に剥離堆積するもので、電極先端が凸状に変形することから連続打点性が良い。これに対し電極先端合金層剥離型は、溶接中に電極と供試板の合金化反応が進み、溶接後電極が供試板から離れる際に電極先端に生成した表面層の脆化

金属間化合物相で割れ、合金層が供試板側に剥離するもので、電極先端が平坦又は凹状に変形することから連続打点性が低下する。またこの消耗機構の分類によって電極の初期の形状をどんな形状にしておけば連続打点性に有利かを考察した。直流の溶接では+極と-極で電極の消耗形状が異なるが、溶接中の通電径の考え方として電極の板への当り径を感圧紙で測定し、その両者の平均値を通電径とすることで連続打点性を推定する手法について述べた。

第6章「混合打点に発生する異形ナゲット」では、合金化溶融亜鉛めっき鋼板と裸鋼板をミックスして打点する混合打点で特徴的に現れる、リング状に溶融する異形ナゲットについてその生成原因を調べた。混合打点では裸鋼板を溶接打点する際に鋼板に付着したプレス油が焼成し、電気抵抗値の高い炭化した炭素系物質が電極中央に堆積する。これにより溶接電流が主に電極周辺から流れることにより、リング状に溶融部が出来る、異形ナゲットが生成することを明らかにした。またこの異形ナゲットは交流溶接だけに生成し、直流溶接では生成しない。この原因は直流溶接では一側電極は凹状に変形するが、+側電極は凸形状に変形し、通電初期では凸状部から電流が流れ、余り周辺に広がらずに流れることと、交流に比べ入熱効率が良いことから早期にナゲットが生成することにあると考えられる。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果をまとめた。亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接で電極消耗機構が「電極先端合金層堆積型」、「電極先端合金層剥離型」に分類できることを述べた。残された課題として、直流溶接時の電極消耗機構が未解明であること、消耗しない電極材料の実用化例がないことについて述べた。

本研究により得られた結果をまとめると以下のようになる。

抵抗スポット溶接の引張せん断継手強度は、板と板の間に出来る溶融部（ナゲット）径で決まるが、この溶融部（ナゲット）径の大きさは電流の通電径の4乗に比例し、通電径の影響を大きく受ける。通電径は電極先端形状そのものであるため、電極先端形状が抵抗スポット溶接では最も重要な因子となる。現在自動車ボデーに最も多く採用されている亜鉛めっき鋼板や、軽量代替材料であるアルミニウム合金板では電極と被溶接板の表面が溶接中に合金化し、その影響で電極先端形状が著しく変形する。今回この電極先端形状の変形と先端に生成する合金層の関係を明らかにし、電極の消耗機構が「電極先端合金層堆積型」と「電極先端合金層剥離型」に分類できることを解明した。

亜鉛めっき鋼板の抵抗スポット溶接に関する連続溶接打点性の今までの研究報告では、亜鉛めっき鋼板のみを連続的に溶接打点するいわゆる単独打点の研究が中心であったが、今回初めて亜鉛めっき鋼板と裸鋼板をミック

として連続溶接打点するいわゆる混合打点の連続打点性を明らかにした。

アルミニウム合金板の抵抗スポット溶接に関する連続溶接打点性の今までの研究報告では、表面の窪みを嫌う為 R（ラジアス）形の電極が使われて来たが、今回先端の尖った鋼板用の DR（ドームラジアス）形電極と長通電時間を採用すれば、2000打点以上の連続打点性が得られることを初めて明らかにした。

抵抗スポット溶接で観察されるリング状の異形ナゲットの生成原因として、亜鉛めっき鋼板の交流溶接の混合打点では、裸鋼板打点時の鋼板に付着した油の焼成による炭素系物質が電極先端に付着することが主な原因であることを明らかにした。また直流溶接では異形ナゲットが生成しないことを述べた。

以上の研究結果をもとに「薄板の抵抗スポット溶接における連続打点性」について今後の研究の展望を述べる。

本研究により抵抗スポット溶接の通電径を決めている電極先端形状変化について、未解明であった亜鉛めっき鋼板の混合打点やアルミニウム合金板について明らかにすることが出来た。しかし、この電極先端形状の変化は電極と被溶接板表面の合金化反応によって起っている為、現状技術ではこの合金化を止める有効な手段が見つかっていない。被溶接板と合金化し難い電極材料、コーティング等が今まで種々検討されてきたが、現時点でコスト的に見合う実用化技術は無く、依然としてボデー工場の連続稼働性を阻害している。

これに対し、電極を連続溶接打点のある周期ごとに研削し強制的に初期形状に整形する技術や、電極の変形を抑えるこれまでの技術開発から転換し、出来た溶融ナゲットの大きさをモニタリングして品質保証する技術開発が進められている。しかし、いずれも完成した実用技術にはなっておらず、今後の技術確立が期待される。

またこの分野で未解明として残されている研究課題としては、直流溶接での電極先端形状の変形、消耗機構がある。直流溶接は発熱効率が交流に比べ優れることから、近年生産ラインへ急速に導入されつつあるが、+電極が凸形状に-電極が凹形状に変形する原因は解明出来ていない。電極先端温度の実測定、シミュレーションへの極性効果の算入他研究の進展が大いに望まれる。

最後に、防錆鋼板として亜鉛めっき鋼板を中心に様々な化学成分の合金めっきが開発されており、抵抗スポット溶接の連続溶接打点性は電極先端の変形消耗機構で決まるが、この変形は電極と被溶接板のめっき成分の合金化反応で支配される為、新しい防錆性能の高いめっき鋼板の開発に今回の研究成果が有用な情報を与えることを期待したい。

論文審査結果の要旨

地球の未来に向けて環境の保護が人類の21世紀最大の課題である。この地球温暖化問題を世界の知恵を結集して解決するためには、現在の主要な運輸手段である自動車のエネルギー消費量を減少する技術開発が緊急の課題である。この方策としてボデーの軽量化が重要であり、防錆性確保により薄板化を可能にする観点から採用される亜鉛めっき鋼板と、軽量材料の代表であるアルミニウム合金板の溶接技術の改善が必須である。特にボデーの主要組立技術である抵抗スポット溶接でこれらの板を溶接する場合に、連続溶接打点に伴って健全な溶融ナゲットが比較的短時間で得られなくなることが長年の問題である。そこで本研究の目的は、この電極劣化機構を解明し、連続打点性を向上することにある。本論文は全7章から構成される。

第1章では、背景として世界のエネルギー問題を整理するとともに、ボデー軽量化に対する考え方と本研究の目的を述べている。

第2章では、抵抗スポット溶接の基礎として、継手強度と溶融ナゲット生成の物理現象を述べている。

第3章では、亜鉛めっき鋼板の連続打点性に関して、電極先端形状の変化を電極先端に生成した合金層を調査することで明らかにした。また亜鉛めっき鋼板のみを溶接打点する単独打点と、亜鉛めっき鋼板とめっきの無い裸鋼板をミックスして打点する混合打点について電極消耗現象を詳細に調べた。

第4章では、アルミニウム合金板の連続打点性に関して、自動車ボデー鋼板の抵抗スポット溶接に使われる先端の尖ったDR(ドームラジラス)形電極で長通電時間を採用すれば、2000打点以上の連続打点性が得られることを示した。

第5章では、電極消耗現象について、電極先端温度と生成した合金層を関連づけて消耗機構を分類し、電極先端合金層堆積型、電極先端合金層剥離型の二つに分けられることを明らかにした。また電極消耗機構から連続打点性に優れる電極初期形状を示した。

第6章では、合金化溶融亜鉛めっき鋼板と裸鋼板をミックスして打点する混合打点で特徴的に現れるリング状に溶融する異形ナゲットについて、その生成原因を明らかにした。

第7章は本研究の結果をまとめた総括である。

以上要するに本論文は、抵抗スポット溶接の連続打点性を電極先端の合金層生成を詳細に調べることにより明らかにしたものであり、材料システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文を博士(工学)の学位論文として合格と認める。