OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	亜鉛めっき鋼板を用いた鋼とAl合金の異種材料接合技術の確立と自動車車体への適用
Author(s)	宮本, 健二
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/50510
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　宮本　健二　）	
論文題名	亜鉛めっき鋼板を用いた鋼とAl合金の異種材料接合技術の確立と自動車車体への適用

論文内容の要旨

本研究は、自動車車体の軽量化を実現するために、亜鉛めっき鋼板のめっき中のZnとAl合金中のAlとの反応を利用することによって、大気中にて鋼とAl合金の高い強度を有する異種材料接合継手を得ることを目的とした。亜鉛めっき鋼板のめっき中のZnを用いることにより、リベットやロウ材といった新たな中間材を必要としないため、コストアップにつながらない。さらに、従来のAl合金用抵抗スポット溶接機をそのまま流用できるため、新規の設備投資を必要とせず、コスト面での優位性も得られる。

本論文は全7章で構成されており、その内容を以下に示す。

第1章では、鋼とAl合金の異種材料接合の技術動向を俯瞰するために調査を行い、各種工法を適用した鋼とAl合金の異種材料接合の継手特性をまとめた。また、各種接合工法の特質を明らかにし、車体用接合工法としてそれら工法を用いる場合の利点と課題をまとめた。その際、継手形状の自由度、継手強度、コストの観点から工法の検討を行い、抵抗スポット溶接に絞り込んだ。さらにインサート金属を用いることによる接合性向上を試みた事例を明らかにし、その中から特に亜鉛めっき鋼板のZnに着目し、現状の技術レベルと課題を示した。

第2章では、拡散接合を用いて、亜鉛インサートが鋼とAl合金の異種材料接合の継手特性に及ぼす効果を継手強度、Al-Fe金属間化合物層の生成状態、破壊形態から体系的に検討した。Al合金中のAlと亜鉛めっき中のZnとのAl-Znの共晶反応を利用することで、大気中にてAl合金表面の酸化皮膜を低温で効果的に除去し、均一なAl-Fe金属間化合物層を生成することが可能であることが確認できた。また、冶金的な接合がなされることで、継手強度が向上し、Al合金母材で破断する良好な破断モードが実現できた。さらに、GI材とAl合金、GA材とAl合金の組み合わせについて、拡散接合による急冷試験片を作製し、亜鉛めっき種が接合プロセスの進行状態に及ぼす影響を明らかにするための詳細観察を行った。プロセス進行中にAl-Zn液相が生成するGI材とAl合金の接合継手に対して、GA材とAl合金の接合継手は固液混合相（Al-Fe（Zn）金属間化合物、Al（Zn固溶）、Zn（液相））が生成するため、その排出が困難であり、その残存の結果、厚いAl-Fe金属間化合物層が生成しやすく接合性が劣ることがわかった。

第3章では、GI材とAl合金、GA材とAl合金の組み合わせに対して、抵抗スポット溶接による本接合コンセプトの適用を試みた。GI材とAl合金継手の接合界面を観察することで、Al-Znの共晶反応によりAl合金表面の酸化皮膜が低温で除去され、薄くて均一なAl-Fe金属間化合物層が生成するといった基本原理が発現することが確認された。また、そのような冶金的な接合の実現により、継手強度が向上した。GA材とAl合金継手の接合界面を観察することで合金化亜鉛めっき層（$FeZn_8$）にAlが拡散することで生じるZnの液相によりAl合金表面の酸化皮膜が除去され、Al-Fe金属間化合物層の生成することが確認されたが、生成するAl-Fe金属間化合物層厚さはGI材とAl合金の場合に比べて厚く、不均一であった。これは、第2章で確認された、めっき種による接合進行プロセスの差異に起因すると推測された。めっき種違いによる各々の接合進行プロセスの状態に応じて、電極形状と接合プロセス条件を検討することで継手強度向上を試み、GI材とAl合金、GA材とAl合金の各々の組合せについて、高強度化のために有効な接合条件の方向性を明らかにした。GI材とAl合金の場合は、被接合材の板厚減少を抑制しながら、広い領域で均一な電流密度分布が得られるR形電極の適用が継手強度の向上のために効果的であることがわかった。GA材とAl合金の場合は、接合プロセス進行中に生じる固液混合相を効率的に排出するために、排出性が高いDR形電極を適用し、高加圧で接合することが継手強度の向上のために有効であることがわかった。さらに、ナゲット断面中のAl-Fe金属間化合物層厚さが2μm以下の領域を有効接合長さと定義し、有効接合長さと継手強度の関係を調べることで、それら関係には明確な相関があることがわかった。

第4章では、本接合コンセプトを車体部材に適用する際に問題となる、鋼中のFeとAl合金中のAlのイオン化傾向の差によって生じる電食に対する耐食性を確保するために、被接合材の間にシール剤をはさんで接合し、接合部周囲からの水分の遮断を可能とするシールスポット溶接を提案した。抵抗スポット溶接継手、シールスポット溶接継手の双方

を複合サイクル腐食試験（Cyclic Corrosion Test（CCT））に供することで、シールスポット溶接継手の電食防止機能が確認できた。シールスポット溶接の場合は溶接電流の通電経路が制限されるため電気抵抗の増大、発熱量の増加が生じる。その結果、被接合材の板厚減少、継手強度の低下が生じやすい。そこで、継手強度の向上をねらいとし、溶接電極間の電流、電圧を計測することで、接合界面に発生する熱量を求め、シールスポット溶接条件の適正化を行った。シールスポット溶接時に接合界面において発生する熱量を管理することで、Al合金の板厚減少が抑制され、継手強度を向上させることができた。また、抵抗スポット溶接、シールスポット溶接の逐次観察試験片を作製し、抵抗スポット溶接、シールスポットの接合プロセス進行過程の観察を行った。今回検討した接合条件下では、抵抗スポット溶接の場合、40msでAl-Zn反応を開始、80msでAl-Fe金属間化合物層を生成しているのが確認された。一方、シールスポット溶接の場合、40msでAl-Zn反応を開始、80msでAl-Fe金属間化合物層を生成、160msでシール剤が接合界面から消失しているのが確認された。シールスポット溶接の場合は、抵抗スポット溶接の場合と異なり、継手強度の低下につながるシール剤を消失させるための追加の通電時間が必要であることがわかった。さらに、抵抗スポット溶接、シールスポット溶接の接合界面をTEMによって観察し、生成する反応層の状態を明らかにした。抵抗スポット溶接の場合と同様、シールスポット溶接部の接合界面にはAl-Fe金属間化合物層が形成されており、その組成は$FeAl_3$と推測された。シール剤に関しては、TEMレベルの観察でも接合界面での残存が確認されず、冶金的なダイレクト接合部が形成されていることが確認された。

第5章では、車体性能要件、生産要件、品質保証といった観点で、自動車車体への適用性評価を行った。車体性能要件としては、静的引張特性に加え、疲労特性、高速引張特性、低温・高温引張、耐食性に関する評価を行った。生産要件としては、被接合材間のギャップ、抵抗スポット溶接電極の傾き等の製造上のばらつきに対する裕度、塗装工程における鋼とAl合金の線膨張係数差により発生する熱応力の継手強度への影響、板組み展開性（板厚違い、鋼種違い、三枚重ね）に関する評価を行った。品質保証としては、使用環境温度に対する接合界面構造の安定性について検討した。本評価結果から、車体性能要件、生産要件、品質保証のいずれの観点からも、本接合コンセプトによる接合継手が要求された特性を満足し、実用化に耐え得ることがわかった。

第6章では、亜鉛めっき鋼板を用いた抵抗スポット溶接による異種材料接合技術として本接合コンセプトの展開を試みた。試みた内容としては、共晶系亜鉛合金インサートを用いた抵抗スポット溶接による鋼とAl合金の異種材料接合、および亜鉛インサート、共晶系亜鉛合金インサートを用いた抵抗スポット溶接による鋼とMg合金の異種材料接合の二つについて検討した。共晶系亜鉛合金インサートを用いた抵抗スポット溶接による鋼とAl合金の異種材料接合については、共晶系亜鉛合金インサートを用いることにより、抵抗スポット溶接による鋼とAl合金の異種材料接合の接合性のさらなる改善を試みた。共晶系亜鉛合金インサートを用いることで、Al合金表面の酸化皮膜の除去過程の、より一層の低温化が可能となり、接合界面における薄くて均一なAl-Fe金属間化合物層の生成領域を拡大し、その結果、接合継手特性の向上を実現できた。亜鉛インサート、共晶系亜鉛合金インサートを用いた抵抗スポット溶接による鋼とMg合金の異種材料接合については、亜鉛インサートを用いることにより、Mg合金表面の酸化皮膜を低温で除去、さらに完全二相分離の系である鋼のFeとMg合金のMgに対し、Mg合金、およびめっきの添加元素であるAlを利用することで、Al-Fe金属間化合物層、Al-Mg金属間化合物層を生成させ、冶金的な接合を実現できた。さらに、疲労特性を評価し、本接合コンセプトによる接合継手が車体への適用時に要求される疲労特性も満足することが確認された。

最後に、第7章において自動車車体用として開発した亜鉛めっき鋼板を用いた鋼とAl合金の異種材料接合技術について総括した。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　宮本　健二　）		
	(職)	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	廣瀬 明夫
	副 査　教授	平田 好則
	副 査　教授	才田 一幸

論文審査の結果の要旨

本論文では、自動車車体の軽量化の実現を目的とし，亜鉛めっき鋼板を用いた鋼と Al 合金の異種材料接合コンセプトを提案し、亜鉛インサートが鋼と Al 合金の接合性に及ぼす影響、防食機能を有するシールスポット溶接、自動車車体への適用性についてまとめている。亜鉛めっき中の Zn と Al 合金中の Al と共晶反応に着目し、共晶反応の利用により大気中にて Al 合金表面の酸化皮膜を除去、薄くて均一な Al-Fe 金属間化合物層を形成し、冶金的な接合が可能であることを明らかにしている。また、鋼中の Fe と Al 合金中の Al のイオン化傾向の差によって生じる電食に対する耐食性を確保するために、被接合材間にシール剤をはさんで接合を行い、接合継手強度と耐食性の双方を確保できる接合継手が得られることを明確にしている．さらに、自動車車体の接合継手の要求される車体性能要件、生産要件、使用環境下における接合界面構造の安定性について評価し、それら要件に対し、本接合継手が実適用に耐え得る，良好な特性を示すことを明らかにしている．得られた知見の詳細は以下のとおりである。

［亜鉛インサートが鋼と Al 合金の異種材料拡散接合の継手特性に及ぼす効果］

拡散接合を用いて、亜鉛インサートが鋼と Al 合金の異種材料接合継手特性に及ぼす効果を継手強度、Al-Fe 金属間化合物層の生成状態、破壊形態から体系的に評価している。その結果、Al 合金中の Al と亜鉛めっき中の Zn との Al-Zn の共晶反応を利用することで、大気中にて Al 合金表面の酸化皮膜を低温で効果的に除去し、均一な Al-Fe 金属間化合物層を生成することが可能であることを明らかにしている。また、冶金的な接合がなされることで、継手強度が向上し、Al 合金母材で破断する良好な破断モードが実現できることを明確にしている。さらに、GI 材と Al 合金、GA 材と Al 合金の組み合わせについて、拡散接合による急冷試験片を作製し、亜鉛めっき種が接合プロセスの進行状態に及ぼす影響を明らかにするための詳細観察を行っている。その結果、GA 材と Al 合金の場合は、プロセス進行中に Al-Zn 液相が生成する GI 材と Al 合金の場合に対して、固液混合相（Al-Fe（Zn）金属間化合物、Al（Zn 固溶）、Zn（液相））が生成するため、その排出が困難であり、その残存の結果、厚い Al-Fe 金属間化合物層が生成しやすく接合性が劣ることを明確にしている。これらより、亜鉛インサートが鋼と Al 合金の異種材料接合の接合性の向上に寄与することを提示している。

［抵抗スポット溶接による鋼と Al 合金の異種材料接合］

GI 材と Al 合金、GA 材と Al 合金の組み合わせに対して、抵抗スポット溶接による本接合コンセプトの適用を試みている。その結果、GI 材と Al 合金継手の接合界面を観察することで、Al-Zn の共晶反応により Al 合金表面の酸化皮膜が低温で除去され、薄くて均一な Al-Fe 金属間化合物層が生成するといった基本原理が発現することを明らかにしている。また、そのような冶金的な接合の実現により、継手強度が向上することを明確にしている。GA 材と Al 合金継手の接合界面を観察することで合金化亜鉛めっき層（$FeZn_8$）に Al が拡散することで生じる Zn の液相により Al 合金表面の酸化皮膜が除去され、Al-Fe 金属間化合物層の生成することを明らかにしている。その際に生成する Al-Fe 金属間化合物層厚さは GI 材と Al 合金の場合に比べて厚く、不均一であることを明確にしている。めっき種違いによる各々の接合進行プロセスに応じて、電極形状と接合プロセス条件を検討することで継手強度向上を試み、GI 材と Al 合金、GA 材と Al 合金の各々の組合せについて、高強度化のために有効な接合条件の方向性を検討している。その結果、GI 材と

Al 合金の場合は、被接合材の板厚減少を抑制しながら、広い領域で均一な電流密度分布が得られる R 形電極の適用が継手強度の向上のために効果的であることを明らかにしている。GA 材と Al 合金の場合は、接合プロセス進行中に生じる固液混合相を効率的に排出するために、排出性が高い DR 形電極を適用し、高加圧で接合することが継手強度の向上のために有効であることを明確にしている。さらに、ナゲット断面中の Al-Fe 金属間化合物層厚さが 2μm 以下の領域を有効接合長さと定義し、有効接合長さと継手強度の関係を調べたところ、それら関係には明確な相関が見られることを明らかにしている。これらより、抵抗スポット溶接によって、本接合コンセプトが適用可能であることを提示している。

［抵抗スポット溶接による鋼と Al 合金のシールスポット溶接］

本接合コンセプトを車体部材に適用する際に問題となる、鋼中の Fe と Al 合金中の Al のイオン化傾向の差によって生じる電食に対する耐食性を確保するために、被接合材の間にシール剤をはさんで接合し、接合部周囲からの水分の遮断を可能とするシールスポット溶接を提案し、抵抗スポット溶接継手、シールスポット溶接継手の双方を塩水噴霧試験（Cyclic Corrosion Test（CCT））に供している。その結果、シールスポット溶接継手の電食防止機能を明らかにしている。シールスポット溶接の場合は溶接電流の通電経路が制限されるため電気抵抗の増大、発熱量の増加が生じる。その結果、被接合材の板厚減少、継手強度の低下が生じやすい。そこで、継手強度の向上をねらいとし、溶接電極間の電流、電圧を計測することで、接合界面に発生する熱量を求め、シールスポット溶接条件の適正化を行っている。その結果、シールスポット溶接時に接合界面において発生する熱量を管理することで、Al 合金の板厚減少が抑制され、継手強度を向上させることが可能であることを明確にしている。また、抵抗スポット溶接、シールスポット溶接の逐次観察試験片を作製し、抵抗スポット溶接、シールスポットの接合プロセス進行過程の観察を行っている。その結果、今回検討した接合条件下では、抵抗スポット溶接の場合、40ms で Al-Zn 反応を開始、80ms で Al-Fe 金属間化合物層を生成しているのを確認している。一方、シールスポット溶接の場合、40ms で Al-Zn 反応を開始、80ms で Al-Fe 金属間化合物層を生成、160ms でシール剤が接合界面から消失しているのを確認している。シールスポット溶接の場合は、抵抗スポット溶接の場合と異なり、継手強度の低下につながるシール剤を消失させるための追加の通電時間が必要であることを明らかにしている。さらに、抵抗スポット溶接、シールスポット溶接の接合界面を TEM によって観察し、生成する反応層の状態を明らかにしている。その結果、抵抗スポット溶接の場合と同様、シールスポット溶接部の接合界面には Al-Fe 金属間化合物層が形成されており、その組成は $FeAl_3$ と推測されることを明確にしている。シール剤に関しては、TEM レベルの観察でも接合界面での残存が確認されず、冶金的なダイレクト接合部が形成されていることを確認している。これらより、シールスポット溶接を用いることで接合継手強度と耐食性の双方を確保できることを提示している。

［抵抗スポット溶接による鋼と Al 合金の異種材料接合継手の自動車車体への適用性評価］

車体性能要件、生産要件、品質保証といった観点で、自動車車体への適用性評価を行った。車体性能要件としては、静的引張特性に加え、疲労特性、高速引張特性、低温・高温引張、耐食性に関する評価を行っている。生産要件としては、被接合材間のギャップ、抵抗スポット溶接電極の傾き等の製造上のばらつきに対する裕度、塗装工程における鋼と Al 合金の線膨張係数差により発生する熱応力の継手強度への影響、板組み展開性（板厚違い、鋼種違い、三枚重ね）に関する評価を行っている。品質保証としては、使用環境温度に対する接合界面構造の安定性について検討している。その結果、本評価結果から、車体性能要件、生産要件、品質保証のいずれの観点からも、本接合コンセプトによる接合継手が要求された特性を満足し、実用化に耐えうることを明らかにしている。これらより、本接合コンセプトによる接合継手が車体への適用の際に要求される諸特性を有していることを提示している。

以上のように、本論文は自動車車体の軽量化の実現するための鋼と Al 合金の異種材料接合、その車体への適用性を明らかにするものであり、学問的に価値が高い。加えて、鋼と Al 合金の異種材料接合の接合性のさらなる改善のための共晶系亜鉛合金めっき鋼板を用いた鋼と Al 合金の異種材料接合、亜鉛めっき鋼板、共晶系亜鉛合金めっき鋼板を用いた鋼と Mg 合金の異種材料接合に展開しており、車体用異種材料接合の適用範囲拡大に大きく貢献すると評価できる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。