

氏名(本籍)	久保内 達郎(北海道)
専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	工博甲第207号
学位授与の日付	平成25年9月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学資源学研究科(生産・建設工学)
学位論文題名	リード線溶接部における Sn ウィスカの発生メカニズムと防止法の検討
論文審査委員	(主査) 教授 神谷 修 (副査) 教授 渋谷 嗣 (副査) 教授 村岡 幹夫 (副査) 教授 麻生 節夫

## 論文内容の要旨

アルミニウム電解コンデンサは、大容量、等の優れた特徴があるため、家電製品から情報通信機器、産業用機器、自動車まで幅広い用途がある。アルミニウム電解コンデンサのリード線にはめっきされた鋼線とアルミニウム線を突き合わせ溶接した部品が使用されている。このめっきには従来、Sn と Pb の合金が使用されていたが、近年の環境問題に起因し Pb フリー化が進められている。Pb には Sn ウィスカを抑制する効果があり、Pb フリー化により Sn ウィスカが発生しやすくなった。Sn ウィスカとはヒゲ状に成長した Sn の結晶であり、脱落により電子機器に障害を発生させる危険性を有する。そのため、Sn ウィスカの防止方法は必要不可欠となっている。

多くの電子部品に使用されている一般的な Sn めっきについては、Sn ウィスカ発生メカニズムに関する多数の研究事例があり、各種の Sn ウィスカ防止方法が提案されている。しかし、リード線の溶接部に発生する Sn ウィスカに関する研究事例は極めて少ない。また、現在、実用化されている溶接部の Sn ウィスカ防止方法として、溶接部をアルカリ系液体で洗浄する方法があるが、完全な Sn ウィスカの防止には至っていない。このため、溶接部における Sn ウィスカの発生メカニズムの解明及び Sn ウィスカ発生を確実に防止する方法の開発は重要であると考えられる。

そこで本論文では Sn ウィスカ発生メカニズムを解明するため、リード線溶接部の内部組織の検討を行った。また、Sn ウィスカ発生部位の詳細な解析を行った。その結果、各種

の成分金属は溶接過程の溶融・凝固時に不定形な混合状態で分布し、Sn と Al の二元合金部から Sn ウィスカが発生することが確認された。Sn ウィスカが発生する条件として、Al 中に Sn 相が 3 次元網目状に形成され、その終端部が周囲の Al 内で閉塞しており、かつ、Sn 相が溶接部の表層まで連続する開口部分を有していることが必要であることを見出した。また、溶接部の切断面から Sn ウィスカが発生する現象を示し、Sn ウィスカの発生が溶接部の残留応力に起因する可能性が高いと考えた。この残留応力は溶接部が急冷凝固する際の Al と Sn の凝固収縮率の差から生じる Sn 相への圧縮応力であり、Sn ウィスカ成長の主たる駆動力と推定した。これらの結果より Sn ウィスカを完全に防止するためには溶接部から Sn を排除することが最も確実な方法であると考えた。

リード線は鋼線を芯材とする C P 線とアルミニウム線との溶接であり、一般的には接合が困難とされる組合せである。Sn めっきがない状態での溶接事例は無いため、溶接部の接合界面に対する Sn の影響について検討した。その結果、Sn めっきの有無に関係なく、溶接部の接合界面では Fe が Al 中に拡散し、両金属の金属間化合物層が形成されていることが確認された。これらの結果より溶接部から Sn を排除しても接合界面のマイクロ構造に影響がないと考えられた。

Sn めっきがない C P 線でリード線の溶接を行った結果、接合強度は Sn めっきがある C P 線と同等となるが、溶融金属が外部に広がり、コンデンサに適用できない溶接形状になった。そこで溶接機のリード線保持部分に溶接部の成形金型を設け、溶接の際に成形金型内部で凝固形状を制御する方法を検討した。溶接電圧を適切な条件に設定すると溶接部は成形金型の形状が転写され、Sn めっきがある C P 線と同等な形状と接合強度が得られた。これらの結果より溶接部からの Sn ウィスカ発生の防止を可能とする溶接方法を示した。

本論文の構成と内容を以下に示す。

第 1 章では本研究の意義、背景、電子機器産業における位置付け、及び従来研究との相違点について述べた。

第 2 章では実験方法について述べた。リード線の突合せ溶接機にはアークスタッド溶接方式を採用した実験装置を製作し使用した。溶接部には熱電対を接続し、溶接時の冷却速度を測定した。Sn ウィスカに対して行った各種の金属学的な解析や品質評価方法について述べた。

第 3 章では Sn ウィスカの発生メカニズムについて検討を行った。リード線の溶接部は主な金属成分として Fe, Cu, Sn, Al があり、溶接部では各金属が混在しており、分布状態は一定ではない。同一サンプルにおいて Sn ウィスカが発生する部位と発生しない部位の比較検討を行った。その組織的特徴から Sn ウィスカ発生組織をモデル化し、Sn ウィスカ成長の駆動力について推定した。Al—Sn 合金の casting モデルを作製し、Sn ウィスカ発生に対する冷却条件と Sn の分布状態の影響を調査した。溶接部に予熱を与え Sn ウィスカ発生への冷却条件の影響を調査した。「焼嵌め」のモデル式を応用し、Sn ウィスカ成長の駆動力として、凝固時に発生する Sn への圧縮応力を試算した。

第4章では溶接部の接合界面に対する Sn めっき有無の影響について検討した。Sn めっきがあるCP線とないCP線の溶接部の接合界面について、TEMで接合状態を観察し、電子線回折で金属間化合物の同定を行った。観察結果からマイクロ構造の形成モデルを構築した。

第5章ではSn めっきがないCP線を用いて成形金型の形状の影響と溶接部の成形挙動を示した。溶接部形状の制御要因として溶接電圧を変化させ、溶接部形状との関連性を調査した。また、接合強度について引張試験、90度折り曲げ試験及びX線による構造観察を行い、接合部の信頼性について検証した。成形金型の形状と熔融金属の充填状態との関係を検討し、成形金型の良好な形状を見出した。Sn が排除された溶接部の経時変化を観察するため、恒温恒湿環境に4000時間放置し、評価試験を行った。

第6章では本技術を実用化するにあたり、必要となる関連技術について概要を述べた。溶接部から Sn めっきを排除する方法として、CP線の溶接部に相当する箇所 Sn めっきを剥がす方法と Sn めっきがないCP線で溶接し、その後、Sn めっきを施す方法がある。

第7章ではこれまでの結果を整理し、リード線溶接部の Sn ウィスカの発生メカニズムと防止方法の検討について結論としてまとめた。また、本研究の今後の将来構想について示した。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、各種機械の事故防止のために電解コンデンサーのリード線溶接部に発生する Sn ウィスカの発生原因を解明して、防止法を検討してその有効性を検証したものである。

アルミニウム電解コンデンサーは大きな静電容量を有するなどの特徴を持ち、家電製品、自動車から産業機器まで幅広く使われている。リード線は Sn めっきされた鋼線と Al タブと呼ばれるアルミ端子とを溶接した部品である。この溶接部には、Sn ウィスカと呼ばれるひげ状の結晶が成長して脱落することにより電氣的短絡障害を起こすことが報告されている。このため、早急な対策が待ち望まれている。しかし、溶接部におけるウィスカの発生については研究そのものが少なく、未知の部分が多いため適切な防止法が施されていなかった。

本研究では、溶接金属における Al と Sn の混合領域において、微細な網目状の Sn が Al に囲まれているとき、両金属の凝固収縮差により Sn に圧縮の応力が発生して、ウィスカ発生の原因となっている事を明らかにした。その原因から考察して、ウィスカの防止方法としては、Sn と Al を熱処理で分離する、あるいは溶接金属部から Sn を取り除くことを示した。また、それらの防止法が有効である事を実証した。

本論文の構成を以下に示す。

第1章では本研究の背景と意義、電子産業における位置づけを示し、従来の研究との違いと、研究のオリジナリティーを示している。

第 2 章では、実験方法を示している。リード線の溶接法は一貫してアークスタッド溶接法を適用し、その冷却速度の計測法も示した。また、発生した Sn ウィスカの評価法と金属組織の観察法などを示した。

第 3 章では、Sn ウィスカの発生メカニズムについて検討している。Al と Sn 混合組織における微細組織の状況を観察する事により、両金属の凝固収縮率の差により Sn に圧縮応力が発生することを明らかにした。そして、焼嵌めに関する樋口の式から Sn の圧力を計算し、定量的に正しいことを検証した。また、本章において冷却速度を低下させると Al と Sn は分離してウィスカが発生しにくくなることを実証したことは、製造工程上が価値ある。

第 4 章では溶接部の接合界面に対する Sn メッキの有無について検討した。その結果、接合界面には Sn は存在せず、鉄とアルミの金属間化合物が形成されており、強固な強度が保たれていることが明らかとなった。つまり、リード線の溶接強度は Sn に依存しないことを示したことは Sn ウィスカ対策上で高い価値が認められる。

第 5 章では、Sn めっきの無い CP 線を使ってリード線の溶接を実施した。接合強度は高いのであるが、そのままでは溶接金属の形状が実用に適さないことが解った。そこで、特殊な金型を用いた溶接方法を開発することにより、適切な形状と強度を持ち、しかもウィスカが 100%発生しない接合を可能とした事は、画期的な成果であると判断される。

第 6 章では、Sn めっきを無くす、もしくは極端に少なくするための具体的な手法を示した。さらに、溶接後の対策をいくつか示した事は、実用上極めて価値がある。

第 7 章では、これまでの結果を整理するとともに、今後の構想を示した。

以上のように、本論文は、これまで問題となっていた Sn ウィスカの発生原因メカニズムを明らかにすると共に、ウィスカの発生成長を制御する方法を示してその効果を実証した。従って、博士後期課程論文としてふさわしいと判断される。