OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	環境対応車用パワーモジュールにおけるCu/Niめっき/Sn-Cu系はんだ接合部のエレクトロマイグレーションと高耐熱化の研究
Author(s)	門口, 卓矢
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/67138
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　（　門口卓矢　）	
論文題名	環境対応車用パワーモジュールにおけるCu/Niめっき/Sn–Cu系はんだ接合部の エレクトロマイグレーションと高耐熱化の研究

自動車業界ではCO_2排出量を低減するとともに、電気や水素などの石油代替エネルギーへの転換を目指している。このような社会が実現すると、すべての車両は電動パワートレーンをもつようになる。ハイブリッド自動車（HV）をはじめとする環境対応車には、パワーモジュールが搭載されている。パワーモジュールは、バッテリ電圧の昇圧、および直流から交流への電力変換の機能を持つ基幹部品であり、電力の低損失化、高出力化だけでなく、客室に十分なスペースを確保するための小型化も同時に要求される。小型化技術の1つに、パワーデバイスの高温動作化が挙げられる。パワーデバイスは、動作すると電力損失により自己発熱するが、高温動作化により、発熱密度を高めることができるため、小型化が可能となる。また、パワーモジュール内部には、パワーデバイスよりも小さいはんだ接合部が存在する。このはんだ接合部にも、パワーデバイスと同じ電流が加わるため、パワーモジュールで最も電流密度が高くなる部位である。今後、パワーモジュールの小型化に向けて、内部のはんだ接合部の小型化が進み、電流密度はさらに高くなる。パワーデバイスの接合には、Sn系のはんだ材が使用され、被接続材にはNiめっきで表面処理されている。このように、パワーモジュールの小型化は、電流密度増加によるはんだ接合部のエレクトロマイグレーション(EM)、および高温動作化によるNiめっきの消失といった、はんだ接合界面の劣化を加速させる。本論文では、環境対応車向けパワーモジュールに使用されるSn–0.7Cu系はんだとNiめっきの接合界面を研究対象とする。第一にEMによるはんだ接合界面の破壊メカニズムの解明、第二に、高耐熱接合界面の形成方法を提案する。

第一に、Sn–0.7Cu系はんだとNiめっきの接合界面のEMメカニズムを解明するために、実使用環境下に近い条件の電流密度10 kA/cm^{2}以下で、EMによって引き起こされる各元素の移動を調査した。無電解Ni–Pめっき/Sn–0.7Cu系はんだにおいて、150℃、7.5 kA/cm^2、および5.0 kA/cm^{2}の条件で実験した。破断箇所は、カソード側のNi_3SnP層とはんだ層の間であった。カソード側のNiめっき反応層であるPリッチ層(Ni_3P+Ni)の成長は、アノード側よりも速く、電流を印加しない場合に比べても速かった。カソード側では、はんだに対するNiめっき中のNi拡散の方向は、電子の方向と同じであったため、Ni流束が大きくなり見かけ上のNi拡散を加速させたといえる。また、Ni拡散の加速に伴い、Pリッチ層がCu電極に到達すると、Pリッチ層内にボイドが発生した。Pリッチ層内のボイドをSnが熱拡散により移動し、Cu電極と反応しCu_3Sn層、およびCu_6Sn_5層が形成した。さらに、カソード側のNi–Pめっき接合界面のSnは、熱拡散によるカソード側への移動と、EMによるアノード側への移動により、はんだボイドが形成し、破壊に至った。アノード側のPリッチ層の成長は、カソード側に比べて遅く、電流印加なしに比べても遅かった。アノード側のはんだに向かうNi拡散の方向は、電子流と反対方向であったためNi流束が小さくなり、見かけ上のNi拡散を抑制させたと結論できる。

電解Niめっき/Sn–0.7Cu系はんだにおいて、150℃、2.5 kA/cm^{2}の条件で、Sn結晶方位によるはんだボイド形成、Niめっき消失量を調査した。Sn結晶の*c*軸が電子方向に対して平行のはんだ領域では、カソード側の$(Cu,Ni)_3Sn_4$層付近にはんだボイドを形成したが、垂直のはんだ領域では、1000 hにおいてもはんだボイドは形成しなかった。カソード側において、Sn結晶方位が垂直領域に面したNiめっき消失量は、電流印加しない場合と同等であった。しかしながら、平行領域に面した領域のNiめっき消失量は、垂直領域に比べて約3倍大きかった。このように、Sn結晶の*c*軸と電子方向の関係は、はんだボイドの形成やNiめっきの消失量に大きな影響を与える事がわかった。今後のEM耐性向上へ向けて、EMによるはんだ接合部の破壊メカニズムを明らかにした。

第二に、Niめっき/Sn–0.7Cu系はんだの高耐熱接合界面の形成方法を提案する。従来のSn–0.7Cuはんだにおいて、Niめっき界面には、$(Ni,Cu)_3Sn_4$層が生成した。Sn–0.7CuはんだにCu_6Sn_5ボールを2.5 mass%添加することで、はんだの液相温度を上げずに接合界面に$(Cu,Ni)_6Sn_5$層が晶出し、Niめっき消失量をSn–0.7Cuはんだに比べて約半分に抑制した。Cuボール添加はんだはSn–3.0Cuはんだと同様にNiめっきの消失量を抑制した。また、200 ℃ 1000 hの高温保持試験においても、Cuボールを2.5 mass%添加したはんだの接合界面は、$(Cu,Ni)_6Sn_5$層を維持できており、Sn–0.7Cuはんだに比べてNiめっきの消失量を60%以上抑制した。このように、環境対応車用パワーモジュールのさらなる小型・高密度化に向けて、Cuボールを添加したSn–0.7Cuはんだは、環境負荷、資源保有量に問題なく、安価に入手可能な材料であり、耐熱性を向上できる接合材である。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　門口　卓矢　）

	（職）	氏　名	
論文審査担当者	主 査	教　授	菅沼　克昭　（産業科学研究所）
	副 査	教　授	平田　勝弘
	副 査	教　授	中谷　彰宏
	副 査	教　授	南埜　宜俊
	副 査	教　授	浅田　稔
	副 査	准教授	長尾　至成　（産業科学研究所）
	副 査	准教授	西川　宏　（接合科学研究所）
	副 査	教　授	山中　公博　（中京大学）

論文審査の結果の要旨

今日、自動車産業界では、CO_2排出量の大幅な低減のために電気や水素などの石油代替エネルギー動力への転換を目指しており、何れはすべての車両が電動パワートレインを持つようになる。ハイブリッド自動車（HV)、電気自動車（EV)、燃料電池自動車（FCV）などの環境対応車には、パワー・コントロール・ユニット(PCU)が搭載されており、その中でもパワーモジュールは、昇圧、および電力変換の機能を持つ基幹部品である。パワーモジュールは、低損失と高出力だけでなく、客室に十分なスペースを確保するための小型化も同時に要求される。このため、パワー半導体の電流密度は著しく増加し、高温動作を余儀なくされ、パワーモジュールの各種接続界面の信頼性の確保が課題となる。中でも、第一寿命設計に使われるダイアタッチのはんだ接合部の信頼性確保は重要である。本論文では、環境対応車向けパワーモジュールに使用される Sn-0.7Cu はんだと Ni-P めっきの接合界面を研究対象とし、はんだエレクトロマイグレーション（EM)、および、Cu 配線上の Ni 電極膜とはんだ間に生じる拡散現象を評価検討し、高耐熱接合界面の形成方法を提案し、以下の結果を得ている。

1. EM 現象が生じないと言われてきた電流密度 10 kA/cm^{2}以下の環境下においても、EM 現象による構成元素の拡散挙動への影響がある。
2. Ni-P 電極膜からの Ni 拡散は電子流と同じ方向に生じ、カソード Ni-P 電極の反応層成長はアノード側よりも速くなる。Ni 拡散で界面に生じる P リッチ層が Cu 電極に到達すると、P リッチ層内に亀裂が発生する。
3. カソード側では、Ni がアノード側への EM 輸送により欠乏し、界面付近でボイドを形成し、アノード側の P リッチ層の成長はカソード側よりも遅い。
4. EM によるはんだボイド形成挙動は、Sn 結晶方位依存し変化する。電子流方向に対し Sn 結晶の c 軸が平行である場合、カソード側界面のボイド形成が著しくなる。しかし、c 軸に垂直な場合はボイドを形成しないため、接続部位の寿命が長くなる。
5. Sn-0.7Cu はんだを Ni-P めっき接合界面では$(Ni,Cu)_3Sn_4$が生成し Ni-P めっき層が反応で浸食されるが、はんだに Cu ボールを含有させることで Ni-P めっき消失量を低減することができる。環境対応車用パワーモジュールのさらなる小型・高密度化に向けて、Cu ボールを含有した Sn-0.7Cu はんだは、環境負荷、資源保有量に問題なく、比較的安価に入手可能な材料であり、耐熱性を向上できる接合材である。

以上のように、本論文は電動パワートレインを有する環境対応車パワー・コントロール・ユニットで問題となる大電流と高温により生じる界面現象を解明し、それらに対する抑制策を提案している。よって本論文は、博士論文として価値あるものと認める。