

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 坂井 徳幸  
 学位 博士 ( 工学 )  
 学位記番号 新大院博 (工) 第 468 号  
 学位授与の日付 平成 29 年 9 月 20 日  
 学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当  
 博士論文名 スクリーン印刷による微細電極形成時のペーストの流動特性に関する研究

論文審査委員 主査 教授・鳴海 敬倫  
 副査 教授・藤澤 延行  
 副査 教授・松原 幸治  
 副査 教授・新田 勇

博士論文の要旨

本論文は、太陽電池の表面電極形成に関連し、これらの微細電極を製造する技術として幅広く利用されている導電性ペーストのスクリーン印刷において、ペーストのレオロジー特性と印刷結果との関わりを明らかにしたものである。近年、太陽電池特性向上のために、太陽電池表面電極の細線化と高アスペクト化が望まれており、それを実現するスクリーン印刷技術の高精度化が要求されている。しかしながら、スクリーン印刷による電極形成に関する研究は少なく、未解明な点も多い。それは、スクリーン印刷の時のペーストの挙動を直接観察することが困難であることと、数多くの工程が瞬時に行われるために各々の工程に切り分けて解析することが難しいことが要因にある。そのため、これまでは主に回転粘度計によりバルク状態で測定された粘度物性と印刷後の電極形状との関係が検討されてきたが、これだけでは、スクリーン印刷の複雑で多くの工程をペーストがどのように流動しているのか確認できず、印刷技術の向上のためには不十分であった。

以上の点を踏まえ、本研究では、印刷工程の中で印刷形状に影響する「充填工程」、「版離れ工程」、「レベリング工程」に注目し、表面処理剤を変えた銀粒子から成る銀ペーストを使用して、ペーストの流動性の解明、版離れモデル実験、印刷実験等を行い、種々の観点から電極形成に影響する要因を明かにすることを目的としている。また、特に超細線印刷において、従来と異なる観点でのペーストの物性と印刷現象との対応関連も明らかにする事も目的としている。本論文は5章から構成され、その概要は以下の通りである。

第1章「緒論」では、研究背景と従来の研究報告についてまとめ、本研究の目的を述べている。また、本論文の構成についても示している。

第2章「スクリーン印刷用銀ペーストのレオロジー特性の系統的解明」では、まず本研究で用いた材料と銀ペーストの分散媒や分散質の組成を示している。次に、スクリーン印刷工程は幅広い変形速度で様々な流れ場でペーストが流動するため、多角的な観点でペーストの流動性を解析する必要があることから、本研究に用いた銀ペーストの流動状態をバルク（表面を有さない）状態と表面を有する状態に分けて、その変形特性の違いを明らかにしている。バルク状態での流動性については、幅広いせん断速度での粘度特性を解明し、

更に動的粘弾特性、降伏特性、伸長特性を明らかにしている。具体的には、粒子径や体積分率は統一されているが、表面処理による銀粒子の凝集性の違いによりペーストの流動性が異なり、低せん断速度域で若干の粘度の違いがあり、高せん断速度域になるとその違いが減る傾向にあることを示している。一方、表面を有する状態でのペーストの流動性については、ペーストの洩糸性、銀粉の吸油量、表面流動を調べ、吸油量の小さい銀粉が銀粉表面に十分な溶剤が存在するため良好な表面流動を示すことを明らかにしている。洩糸性についてはバルク状態の流動性と表面を有する流動性の両方が影響していることが予想されることを述べている。

第3章「版離れ工程におけるペーストの流動性と印刷結果への影響」では、印刷工程の中で最も電極形状に影響を与えると予想される版離れ工程のモデル実験と実機による微細線印刷実験を行い、ペーストの物性と、モデル実験結果や実際の印刷結果との関係を明らかにしている。印刷の版離れ挙動を再現したモデル実験では、版離れ後のペースト形状に違いが見られ、これは2章でのバルク状態での流動性の傾向とは一致せず、表面を有する流れでの流動性に対応していることを解明している。更に、実機と同等の印刷機を用いた実験では、一般的に形成されている電極幅より、狭い開口幅を持つスクリーンマスクで印刷実験を行い、開口幅  $50\ \mu\text{m}$  の印刷での電極形成結果は版離れモデル実験結果と対応することを明らかにした。すなわち、銀粉の吸油量が少なく、高い表面流動性のペーストが実際の印刷でも高い転写性を示すことを示している。しかし、更に微小幅の印刷の場合は、 $50\ \mu\text{m}$  開口幅で確認された表面流動性と印刷性の対応関係から外れ、考察することが困難になった。その原因を明らかにするためには、更なる検証が必要であることを述べている。

第4章「表面処理の違いによる充填工程、レベリング工程も考慮した印刷性への影響」では、まず、超微小幅印刷の場合、版離れ工程だけでなく、その前後の工程である充填工程、レベリング工程について考慮する必要があることを述べている。そして、充填工程、レベリング工程のモデル実験と、更にスクリーンマスクに対するペーストの滑り性や版抜け性について、ペーストの違いによる印刷性への影響について検証している。その結果、ペーストによるスクリーンマスクやワイヤーの付着性の違いが見られ、超微小開口幅印刷では、ペーストの流動性に加え、スクリーンマスクとのペーストの関係を考慮する必要があることを明らかにしている。

第5章「結論」では本研究の結果を述べ、印刷結果とレオロジー特性との関係性をまとめると共に、本研究の結論を述べている。

#### 審査結果の要旨

以上を要するに、本論文は、太陽光発電パネルなどへの印刷による微細電極形成技術に関連し、印刷されるペーストのレオロジー特性と電極形成結果の対応関係などを系統的に明らかにし、表面を有する場での流動性の重要性など、工学上有用な知見を得ている。また、これらの成果は、工業上のプリンテッドエレクトロニクス技術の発展に多大に寄与するものと考えられる。さらに、本研究結果は、非ニュートン流体力学、レオロジーの分野において新たな知見を与えるものであり、学術的な価値も高いと判断される。また、この研究成果は、学術雑誌に論文として掲載され、国際会議においても発表されている。

よって、本論文は博士（工学）の博士論文として十分であると認定した。