

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 17 日現在

機関番号：56203

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709071

研究課題名(和文) 電場と磁場の同時印加による太陽電池用均一径シリコン球の製造およびその結晶性制御

研究課題名(英文) Production of Mono-Dispersed Particles for Spherical Silicon Solar Cell by Applying Electromagnetic Pinch Force and Electrification of Capillary Jet

研究代表者

嶋崎 真一 (SHIMASAKI, Shin-ichi)

香川高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：00447145

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,900,000円

研究成果の概要(和文)：球状シリコン太陽電池に供するための金属シリコン粒子を製造するための技術開発を行った。溶融金属をノズルより滴下させて液柱が液滴に分断し、落下中に凝固させることで金属粒子が得られる。等しいサイズの粒子を製造するためには、液柱を等間隔で分断することと、落下中の液滴が互いに衝突しないことが重要である。

本研究では、溶融金属の液柱の周囲に配置した高周波コイルに間欠的に交流電流を印加することにより、液柱に一定間隔でピンチ力を作用させ、液柱を等間隔で分断することに成功した。さらに液柱分断時に高電圧を印加することにより液滴を帯電させ、静電反発力により落下中の液滴同士の合体を防止する技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：Manufacturing process of mono-dispersed silicon balls for spherical solar cell was investigated. A capillary jet of molten metal was issued from a nozzle at the bottom of a crucible, and the jet was split into droplets. The droplets were solidified during falling and metal particles were obtained. In order to produce mono-dispersed particles, there are two important points: (1) splitting the jet at the same interval, (2) to prevent the droplets from colliding with each other during falling. An electromagnetic pinch force was applied intermittently to the capillary jet to generate a regular periodic variation on the surface, resulting in mono-dispersed droplets. The droplets were electrically charged by a high electric voltage applied to an electrode surrounding the jet. The coulomb repulsive force acting on the charged droplets prevents them from coalescence.

研究分野：金属生産工学

キーワード：球状シリコン太陽電池 材料電磁プロセッシング 液ジェット 金属粒子

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化に伴う二酸化炭素ガスの排出制限や、電気エネルギー需要の逼迫などを背景にして、太陽電池が大きな注目を集めている。球状シリコン太陽電池は、直径 1mm 程度のシリコン球とアルミニウム製の反射鏡からなる太陽電池であり(図 1 参照) (a) 熔融シリコンから直接球を製造するため生産性が高い、(b) シリコンの切削工程が無く、集光構造のため原材料が少なく済み、製造コストが低い、(c) 基板にアルミニウムを採用しているため可撓性がある、といった特徴がある。特に切削工程を省略できることから、従来の結晶系シリコン太陽電池に比べて単位発電量当りのシリコン原材料使用量が 1/5 以下になるとされており、その実用化と普及に大きな期待が寄せられている。しかし高品質なシリコン球を効率的に製造する技術が確立されていないため、未だ普及には至っていないのが現状である。

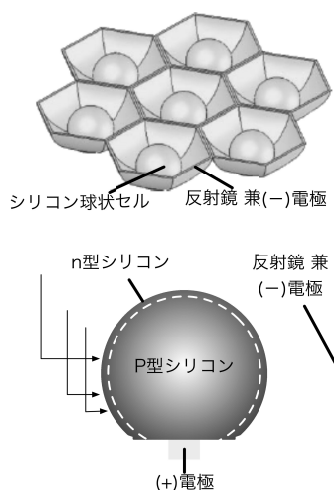


図 1 集光型球状シリコン太陽電池 (Minemoto et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90** (2006), 3009 より一部改変)

(2) 研究代表者は、当時ガリウムを用いたモデル実験を行い、液体金属ジェットに対して電磁力を間欠的に印加することによって、ジェットを均一なサイズの液滴に分裂させる技術の開発を行っていた。ジェットの周囲にコイルを配置して高周波電流を印加すると、ジェット内部に誘導磁場と誘導電流が誘起され、フレミングの左手の法則に従ってローレンツ力が発生する。このローレンツ力によって、ジェット表面へ間欠的に擾乱を発生させて、ジェットを均一な間隔で液滴に分断する(図 2 参照)。しかし、ガリウムは融点が約 30℃ と低く凝固試験を行うには不向きであり、固体金属粒子の回収実験を行うことができなかった。

(3) さらに金属球製造会社と共同で、シリコンによる実験を行う設備を構築し、金属シリコン球の製造実験を電磁力間欠印加法によ

ってジェットを均一な滴に分断できることを確認したが、液滴を凝固させるまでの落下時に滴同士が合体してしまい、結果として単分散のシリコン球を得ることができなかった。また、熔融シリコンが凝固するまでに必要な落下距離は 10m 以上であり、実験室規模の装置では固体球の回収が困難であることも課題として残されていた。

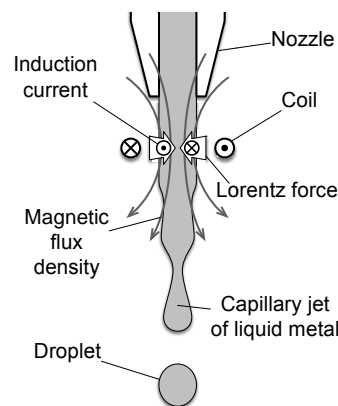


図 2 電磁力間欠印加法による液体金属ジェット分断の概念図

2. 研究の目的

(1) 以上のような背景を受けて、本研究においては、球状シリコン太陽電池に供するための単分散金属シリコン粒子の製造法の開発を目的とした研究を行った。特に以下の三点を具体的な開発目標として掲げた。

- ・ 液滴同士の合体防止方法の開発
- ・ シリコン粒子製造に対応した装置の設計指針の提案
- ・ シリコン球の結晶性を制御する技術の検討

3. 研究の方法

(1) 液滴を帯電させることにより、液滴同士に静電反発力を作用させる機構を考案した。液滴の帯電方法の検討、その理論モデルの確立と実験との比較を行った。

(2) 液滴の帯電量と合体頻度の関係を観察し、合体を防止するために必要な帯電量をモデル化することを試みた。

(3) 液滴を帯電させるための電極の最適な形状を数値計算で検討した。

(4) シリコンを用いた予備実験を行い、パイロットプラントを設計・設立するための問題点の洗い出しを行った。

4. 研究成果

(1) 高電圧を印加した円筒形電極内に液体ジェットを侵入させると、ジェット表面が帯電する。この状態のままジェットが液滴に分断すると、電荷を帯びたままの液滴が生成される。この現象は古くは Schneider ら (*J. Appl. Phys.*, **38** (1967), 2605.) によって研究されており、帯電量の評価式が提案されている。本研究においては、これらの結果を

参考にして、物性値が異なる水、グリセリン水溶液、メタタングステン酸ナトリウム水溶液、液体金属ガリウムなどの各種液体に対して帯電実験を行い、一滴あたりの帯電量を計測した。実験に際しては、印加電圧、電極形状、ジェットの太さなどをパラメータとしている。得られた結果の一部を図3に示す。図より、計算された帯電量は実測値とよく一致しており、理論モデルによって液滴の帯電量を評価することが可能であることが確認された。

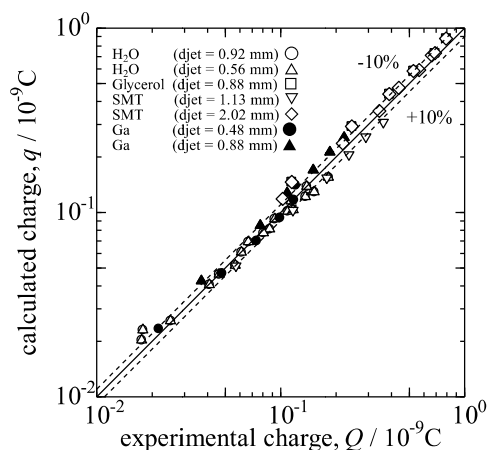


図3 液滴帯電量の実測値と計算値の比較

(2) 帯電させた液滴が落下する様子を高速ビデオカメラで撮影し、その合体頻度を計測した。液滴の運動エネルギーが、滴間に作用する静電ポテンシャルエネルギーを上回った時に液滴が合体すると考え、液滴合体を支配するパラメータとして q^2/m を提唱した。ここで q は液滴の帯電量[C]、 m は液滴の質量[g]である。各種の液体について、この指標を横軸に、縦軸に合体頻度をとったグラフを図4に示す。 q^2/m が大きくなるにつれて、合体頻度が小さくなっていることが分かる。どの液体についても、おおむね $q^2/m > 20 \text{ C}^2/\text{g}$ であれば液滴同士の合体はほとんど発生しないことが分かる。これは、実際のシリコンを用いた装置に対する重要な設計指針となる。

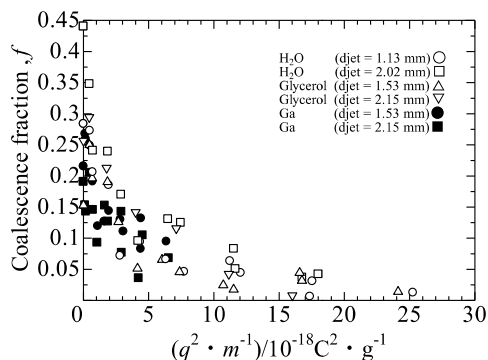


図4 液滴帯電量の実測値と計算値の比較

(3) 液滴を帯電させるためのデバイスの形

状を検討した。このデバイスは、電磁力を集中させる機能を合わせて持つものでなければならない。そのため、円筒形を複数に分割し、かつ内面に電磁力集中部の突起を有することになる。電磁場解析を行い、様々な形状を検討したところ、図5に示すような形状が最適であるとの結論が得られた。図5は二分割されたデバイスのうち半分の写真であり、この部品を二つ組み合わせて上部中央の小さい穴からシリコンジェットを通過させる。

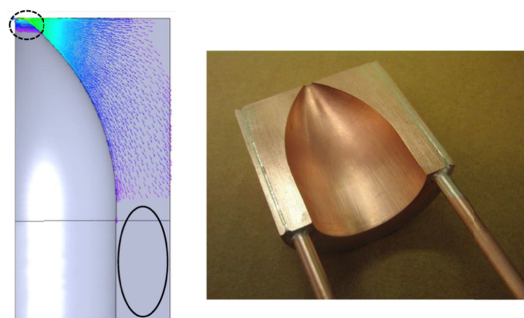


図5 電極兼電磁力集中デバイスの数値計算結果(左)および銅製の試作品の写真(右)

(4) 図5の装置を用いて実際に溶融シリコンを溶解・噴出する装置を作製(図6)し、電極兼電磁力集中デバイスを用いて溶融シリコンジェットの分断・帯電を試みた。ここで得られた結果は、金属球製造会社によるパイロットプラントの設計に生かされることとなった。

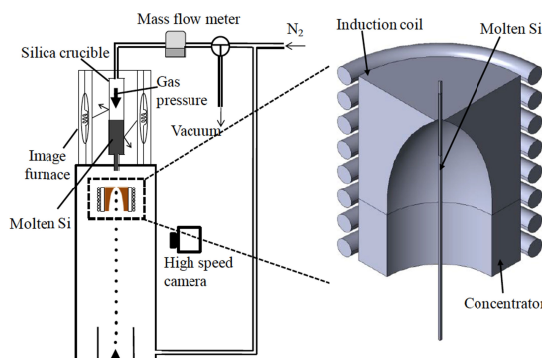


図6 溶融シリコンを用いた試験装置

(5) 14m のパイロットプラント装置の設計および試作を行い、実際に溶融金属を滴下・凝固させて金属粒子試料を得た。しかし電極に高電圧を印加すると、雰囲気ガスの絶縁が破れてすぐに放電が始まってしまう、高電圧を印加することが極めて困難であった。温度が高くなると、ガスの電離が起こりやすくなることや、高温の金属から熱電子放出が起こっているためであると考えられる。雰囲気ガスをアルゴンから窒素に変更する、装置の絶縁が破れている付近を冷却する、電極の形状を放電が起こりにくくするなどの対策を取り、2.2kV までの電圧を印加することができるようになった。印加電圧と合体頻度の関係を図7

に示す。電圧が高くなるにつれて合体頻度が低くなっていることが確認出来る。計算上は約2.5kVの電圧印加で合体が完全に防止できると評価されており、予測とよく一致している。

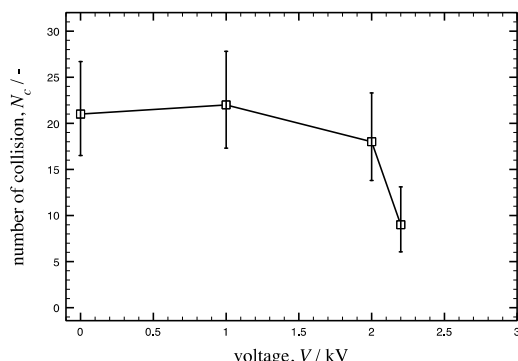


図7 溶融シリコンにおける印加電圧と合体頻度の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計1件)

1. K. Matsumoto, Y. Toya, S. Shimasaki, and S. Taniguchi, “Electrification of Droplet by Applying High-Voltage for Spherical Silicon Solar Cell”, 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (EPM2015), October 12-16, 2015, Cannes (FRANCE).

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 球状シリコンの製造方法及び製造装置
 発明者: 谷口尚司, 嶋崎真一, 皆川晃広, 中島隆一, 加藤洋史, 小笠原常資, 小柳隆志
 権利者: 株式会社ネクストソーラー, デジタルパウダー株式会社
 種類: 特許
 番号: 特開 2015-030650
 出願年月日: 平 25.8.6
 国内外の別: 国内

[その他](計4件)

1. 科学技術振興機構(JST)および新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)主催、文部科学省および経済産業省共催の「イノベーション・ジャパン 2014~大学見本市」にて展示“球状シリコン太陽電池用の均一径金属シリコン粒子の高速製造”, 2014年9月11-12日.

2. 嶋崎真一, “電磁力間欠印加による溶融Siジェットからの太陽電池用均一径Si球の高速製造”, 公益財団法人JFE21世紀財団大

学研究助成技術研究報告書,(2013),203.

3. 福島県および公益財団法人福島県産業振興センター主催の「第2回 福島復興 再生可能エネルギー産業フェア 2013(REIFふくしま)」にて展示“電磁力を応用した球状シリコン型太陽電池用単分散粒子の高速製造”, 2013年11月6-7日.

4. 嶋崎真一, “金属球を高精度につくる-球状シリコン太陽電池の製造に向けて-”と題して講演, 第2回 福島復興 再生可能エネルギー産業フェア 2013(REIFふくしま), 郡山, 2013年11月6-7日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

嶋崎 真一 (SHIMASAKI, Shin-ichi)
 香川高専・機械電子工学科・准教授
 研究者番号: 00447145

(2)研究分担者

なし。

(3)連携研究者

なし。

(4)研究協力者

BOJAREVICS, Valdis
 University of Greenwich(UK)・Department of Mathematical・Reader