

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560138

研究課題名(和文)結晶系太陽電池ウェハ加工用ダイヤモンドワイヤ工具の高速作製法の開発とその加工特性

研究課題名(英文)Development of high speed plating of diamond wire tool for solar battery wafers and slicing characteristics of diamond wire tool

研究代表者

諏訪部 仁 (SUWABE, Hitoshi)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：40202139

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：結晶系太陽電池ウェハーのスライシング加工には、マルチワイヤソーが用いられている。本方法には遊離砥粒方式と固定砥粒方式があり、ダイヤモンド砥粒を固着したワイヤ工具を利用した固定砥粒方式が注目されている。

本申請課題では、固定砥粒方式のワイヤソー切断において、ワイヤコスト低減、切断性能の向上や切断代の減少を目指して、ダイヤモンドワイヤ工具の高速作製法の開発並びに固定砥粒方式の加工精度等の加工特性に与える影響因子を実験的に検討し、高能率切断の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The multi-wire saw is a major slicing method to manufacture the silicon wafers for the solar battery. This multi-wire saw processing method comes in two types of free and fixed abrasive methods. Nowadays, the fixed abrasive method is paid attention for one of high speed and high accuracy slicing.

This study aims for the decrease of wire cost and kerf-loss and the improvement of slicing characteristics. The high speed plating method to make the diamond wire tool is developed and the relations between the influence factor of the diamond wire tool and slicing characteristics are clear in this report.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：スライシング加工 ワイヤソー

### 1. 研究開始当初の背景

近年の世界の太陽光発電市場の急拡大に伴い、太陽光発電に関する技術開発の取組みについてもまさに世界規模で熾烈な開発競争が繰り広げられている。日本は太陽光発電システムの導入量・生産量において長らく世界一を誇っていたが、欧州を中心に行われている導入普及政策により、市場の中心は欧州へ移り、生産量においても中国・台湾等の新興メーカーの台頭が顕著で日本の地位は相対的に低下している。こうした背景を踏まえて、我が国の太陽光発電システムの導入規模を2020年に現状の20倍に増加させ、現下の世界競争に打ち勝っていくための競争力を高めるため、太陽電池の更なる低コスト化・高効率化に資することを目的に太陽光発電システム次世代高性能技術の開発を行うことが急務となっている。

図1は太陽電池製造能力推移予想と結晶系、薄膜系シリコンの比率予想を示したグラフ(ディスプレイサーチ社提供)である。同図に示すように今後10年の太陽電池生産の中心になるのは結晶系シリコンであると予想されている。結晶系太陽電池に用いられるシリコンウェハはインゴットからウェハに切断する工程が必要不可欠であり、この工程には図2に示すようなマルチワイヤソーと呼ばれる切断法が用いられている。このマルチワイヤソーはワイヤを加工部の多溝滑車に数百回巻き付け高速走行させな

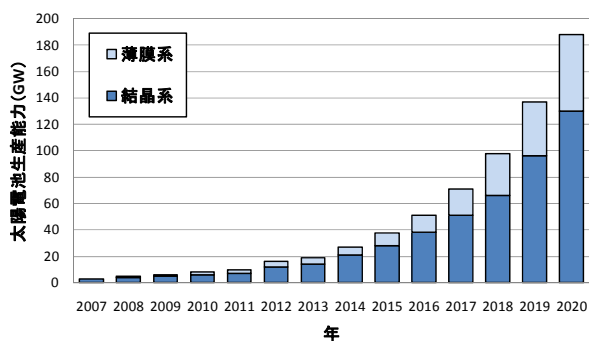


図1 今後の太陽電池予想

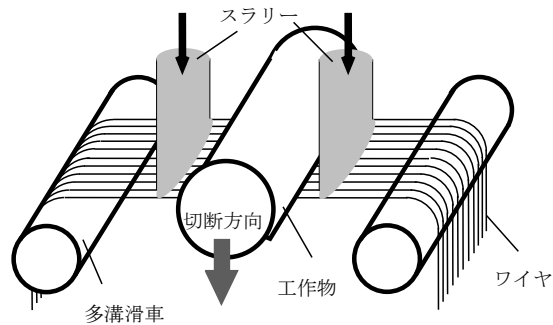


図2 マルチワイヤソーのモデル

がら、SiC 砥粒 (GC 砥粒) と加工油脂を混合した加工液 (以下スラリーと呼ぶ) を高速走行するワイヤ上に供給し、加工部に運搬させることによって多量のウェハを同時に切断する遊離砥粒方式である。

最近ではこの遊離砥粒方式に対して、太陽電池の発電効率の向上と生産コストの低減を目指してピアノ線にダイヤモンド砥粒を電着した固定砥粒方式が注目され始めている。この固定砥粒方式は文献欄に示すように申請者らのグループの論文以外はすべて産業界からの報告のみで、一般に遊離砥粒方式の2~3倍程度の切断能率を向上できると言われているが、実際に使用すると、ワイヤコスト、ワイヤ断線、加工精度等の数多くの問題が山積している。

### 2. 研究の目的

本申請課題では、最近次世代のウェハスライシング技術として注目を集めるダイヤモンド砥粒を固着したワイヤ工具を利用したワイヤソースライシング法においてワイヤコスト低減、切断性能の向上や切断代の減少を目指して、ダイヤモンドワイヤ工具の高速作製法の開発並びに固定砥粒方式の加工精度等の加工特性に与える影響因子を実験的に解明し、カーフロス低減を可能ならしめる高能率切断の可能性を明らかにすることを計画している。そして、これらの結果を踏まえて、遊離砥粒方式と固定砥粒方式の利害得失を明らかにすることによ

て、切断代を極限まで減らしつつある太陽電池基盤のみならず大口径化した LSI 用シリコンウェハ並びに LED 基板の高精度スライシングに重要な示唆を与えるものと期待する。

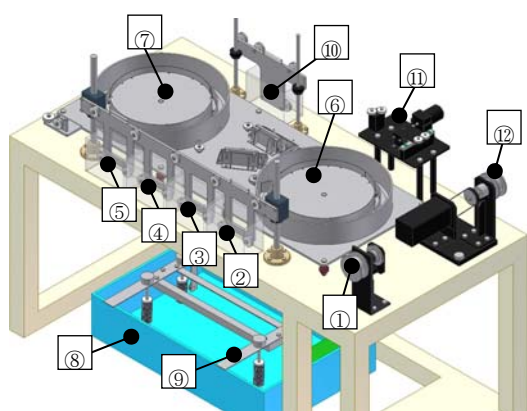
本科学研究費補助金の申請期間中には、次の4項目を優先的に検討する計画であった。①ダイヤモンド砥粒をφ0.120mm以下のピアノ線に高速で電着する技術の開発、②ダイヤモンドワイヤ工具の砥粒突き出し量や固着量が加工に与える影響、③スライシング加工で利用する加工液や工作物固定用の接着剤等の特性が加工に与える影響、④スライシング加工中の加工液の挙動が加工に与える影響

### 3. 研究の方法

#### 3. 1 ダイヤモンドワイヤ工具の作製方法

図3にダイヤモンドワイヤ工具を作製するために開発したワイヤ工具作製装置を示す。本装置のサイズは、スペースを考慮して実験テーブル(1800mm×900mm)の大きさに収めるように設計し、限られたスペース内でどれほどワイヤ工具の高速作製が可能となるのかを追求できるようにした。

本装置は前処理工程、砥粒電着工程、後メッキ工程、後処理工程と大きく4つの工程から構成されている。まず前処理工程で



- ① 芯線ポビン    ② 脱脂槽        ③ 水洗槽
- ④ 活性化槽    ⑤ 水洗槽        ⑥ 1stドラム
- ⑦ 2ndドラム   ⑧ 後メッキ浴   ⑨ 後メッキ装置
- ⑩ 水洗槽      ⑪ ワインダー   ⑫ 回収ポビン

図3 ワイヤ工具作製装置

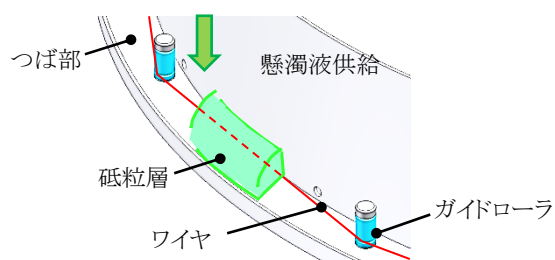


図4 砥粒電着部の詳細

は、①芯線ポビンより引出されたワイヤを②脱脂槽で脱脂洗浄をし、③水洗槽で薬液を洗い流す。そして④活性化槽で活性化処理を行い、⑤水洗槽でワイヤ表面を洗浄する。

砥粒電着工程では、前処理を終えたワイヤが、回転ドラム型の砥粒電着部である⑥1stドラム、⑦2ndドラムにそれぞれ1周ずつ巻かれ、ダイヤモンド砥粒の電着が行われる。このように、砥粒電着部を2つ設けることによって、1800×900mmのスペース内に約2600mmの電着距離を確保することが可能となった。砥粒電着部の詳細を図4に示す。同図に示すように、ドラムにはつば部が外周全域に渡って存在する。このつば部にはガイドローラが設けられており、ワイヤが一定の位置を走行することが可能となる。つば部にはメッキ液に砥粒を分散させた懸濁液を供給することによって懸濁液中の砥粒が堆積し、その砥粒層内をワイヤが走行する。そして、ドラムを回転させると、ワイヤと砥粒層が、同時に移動し電着が行われる。しかし、ワイヤの移動速度とドラムの移動速度が等しいと、ガイドローラに接触しているワイヤの一部だけが電着されない。そのため、ワイヤの移動速度にはドラムの移動速度と若干の速度差を設けている。

後メッキ工程では、砥粒電着部から出たワイヤが、図3中の装置の下部に設置された⑧後メッキ槽へ移動し、メッキが施され砥粒の突き出し量を調整することによって、砥粒の保持力が向上する。⑨後メッキ装置

表1 電着実験条件

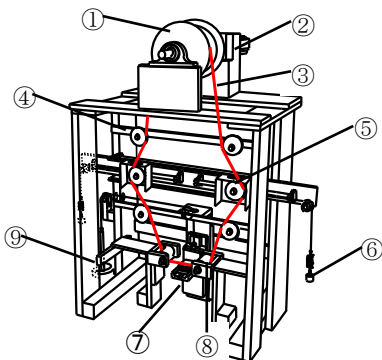
pH		4.0~4.3
メッキ液温度		343 K
芯線	材料	ピアノ線
	直径	120 $\mu\text{m}$
砥粒径		10~15 $\mu\text{m}$
砥粒電着距離	1stドラムのみ	1.3 m
	1st, 2ndドラム	2.6 m
電流密度	1stドラム	1.4~3.8 $\text{kA}/\text{m}^2$
	2ndドラム	2.2~2.5 $\text{kA}/\text{m}^2$
ワイヤ工具作製速度		2 m/min

は4本の多溝滑車から構成されており、ワイヤの巻き数を変化させ、メッキ時間を調整することによってメッキの析出量を調整できるようになっている。後処理工程では、後メッキ工程を終了したワイヤを⑩水洗槽において洗浄し、⑪ワインダーを介することによって⑫回収ボビンにワイヤ工具が整列し、巻き取られる。

表1に電着実験条件を示す。

### 3. 2 切断実験の方法

本実験で使用した切断加工機は研究室で試作した装置で、装置の概略図を図5に示す。同図に示すように、ダイヤモンドワイヤ工具はガイドプリー④とワイヤ張力調整部⑤と多溝滑車⑧を介して巻き付ける。ワイヤ張力は錘⑥を付加したカウンターバランスを利用して一定の張力がかけられるようになっている。そして加工荷重はバランスウェイト⑨に錘を付加し加工部を上昇さ



①2 連ドラム ②サーボモータ ③ワイヤ工具  
④ガイドプリー ⑤ワイヤ張力調整部 ⑥錘  
⑦加工部 ⑧多溝滑車 ⑨バランスウェイト

図5 切断加工機

表2 切断条件

工作物	材質	ソーダガラス
	寸法	50×40×10mm
ワイヤ工具	線径	120 $\mu\text{m}$
	砥粒径	10~20 $\mu\text{m}$
ワイヤ張力		19.6N/Wire
加工荷重		1.96N
ワイヤ走行距離		12m
ワイヤ走行速度		100m/min
加工液		軽油
加工時間		15min/回

せて付加する。ワイヤ工具の走行は装置上部のドラム①がサーボモータ③により、正転と逆転を繰り返すことで往復走行して切断加工できる。表2にダイヤモンドワイヤ工具の切断試験条件を示す。尚、ワイヤ走行速度はワイヤ寿命を早めるために、100m/minで行った。

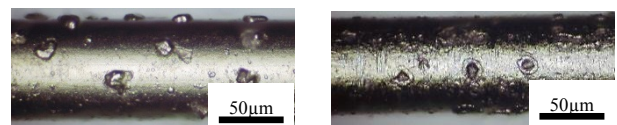
### 4. 研究成果

#### 4. 1 ダイヤモンド砥粒を高速で電着する技術の開発

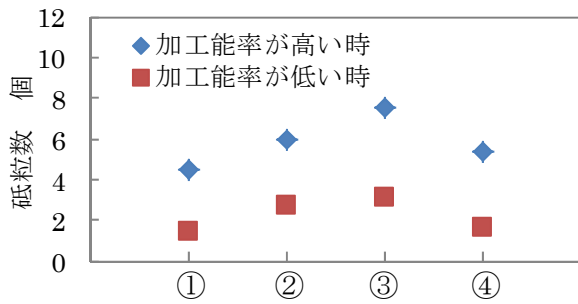
本実験では、 $\phi 120 \mu\text{m}$ のピアノ線を用いたワイヤ工具の高速作製化を図るために、電着用砥粒を用いたワイヤ工具の試作を行った。図6にワイヤ工具の表面写真を示す。同図(a)は加工前のワイヤ工具で、(b)は加工後のワイヤ工具である。この結果より、本申請課題で試作したワイヤ作製装置は加工に耐え得るワイヤ工具を作製できることが明らかとなった。また、1 畳分のスペースで、毎分2mの電着速度を実現できたため、この装置をスケールアップすると更なる高速作製が可能になると考えられる。

#### 4. 2 ダイヤモンドワイヤ工具の砥粒突き出し量や固着量が加工に与える影響

加工能率が低い時と高い時においてワイヤ表面の砥粒数を計測した結果を図7に示



(a) 加工前 (b) 加工後  
図6 試作したワイヤ工具の表面観察



① 市販のワイヤ工具      ②0.133kA/m<sup>2</sup>  
 ③0.159kA/m<sup>2</sup>              ④0.332kA/m<sup>2</sup>

図7 加工能率とワイヤ工具表面の砥粒数

す。同図①は市販のワイヤ工具，同図②～④は図3で示したダイヤモンドワイヤ工具の作製装置を用いて，芯線に120 $\mu$ mのピアノ線を使用し，電流密度0.69kA/m<sup>2</sup>で予備メッキ，1.33kA/m<sup>2</sup>で市販のワイヤ工具と同じ粒径の砥粒を電着した。そして，砥粒の固着力を変化させるために後メッキ電流密度を変えてワイヤ工具を試作した。後メッキの電流密度は同図②は0.133kA/m<sup>2</sup>，同図③は0.159kA/m<sup>2</sup>，同図④は0.332kA/m<sup>2</sup>である。ここで，砥粒数の計測は加工後のワイヤ工具6mに対してワイヤの長手方向の400 $\mu$ mの範囲を顕微鏡で10箇所撮影し，その時にニッケル塊から突き出ていると判断された砥粒数の平均値を求めた。同図に示す様に，市販のワイヤ工具及び後メッキ電流密度が異なる条件で試作したワイヤ工具は加工能率の低い時は砥粒数が2個程度，加工能率が一番高い時は砥粒数が5～6個程度という結果を示した。よって，ワイヤの長手方向に対して400 $\mu$ mの範囲で5～6個程度砥粒があれば，ダイヤモンドワイヤ工具の切断性は十分であることが明らかとなった。

#### 4. 3 加工液や接着剤が加工に与える影響

加工液の違いが加工能率に及ぼす影響を検討するため，粘度の異なる加工液を使用して切断実験を行った結果を図8に示す。なお，同図の棒グラフは加工能率を，折れ

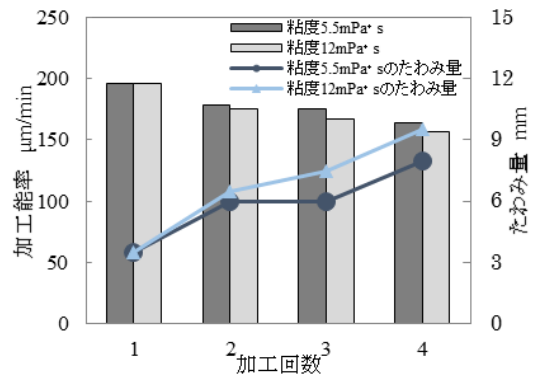


図8 粘度と加工能率の関係

線グラフはたわみ量を示している。この加工能率とは，切断速度を一定として加工を行い，厚さ20mmのシリコンブロックを完全に切断するまでに要した加工時間より求めたものである。同図より，粘度の高い加工液を使用した場合の加工能率に対し，粘度の低い加工液を使用した場合の加工能率の方が高くなっていることがわかる。そこで，それぞれの場合のたわみ量を測定してみると，低粘度の加工液を使用した場合のたわみ量が，高粘度の加工液を使用した場合に比べ小さいことがわかる。このことから，粘度の低い加工液の方が加工時の工作物との抵抗が小さいため，粘度の高い加工液を使用した場合に比べ加工能率が高くなったと考えられる。

ウェハ下部の表面粗さの向上を目指し，接着剤の切断特性の評価実験を行った。まず，工作物を固定する際に一般的に用いられているエポキシ系接着剤と樹脂特性が異なるアクリル系の接着剤を用いて60×5×50ブロックを作製し，切断実験を行った結果を図9に示す。同図より，アクリル系の接着剤を用いた場合の方がエポキシ系の接着剤を用いた場合よりも加工量が向上した。これは，アクリル系が熱可塑性樹脂であるために，加工中の摩擦熱や研削熱によって，樹脂が軟化することから，エポキシ系の熱硬化性樹脂より加工能率が向上したと考えられる。以上の結果から，熱可塑性樹脂を

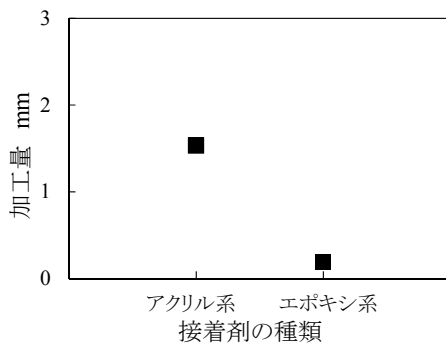


図9 接着剤の種類とその切断特性

利用した接着剤を工作物の固着に用いた方が加工しやすいことが明らかとなった。

#### 4. 4 スライシング加工中の加工液の挙動が加工に与える影響

図 10 に無振動加工時並びに揺動振動加工時に工作物エッジ部での空気挙動の一例を示す。同図はワイヤ走行方向が左向きから右向きに反転した時を 0 秒とし、5.5 秒後の静止画である。同図(a)は無振動加工時の工作物エッジ部の観察写真である。同図より、無振動の場合では、工作物エッジ部から空気はほとんど進入していないことが確認できる。それに対して、同図(b)は揺動振動加工時の工作物エッジ部の観察写真である。同図より、揺動振動を付加した場合には無振動加工時と同じ走行距離であるにもかかわらず工作物エッジ部から空気が広範囲に進入している様子が確認できる。工作物エッジ部から空気が進入したことから、加工に揺動振動を付加することによって工作物エッジ部では加工溝内部に空気が入りやすくなることが明らかとなった。

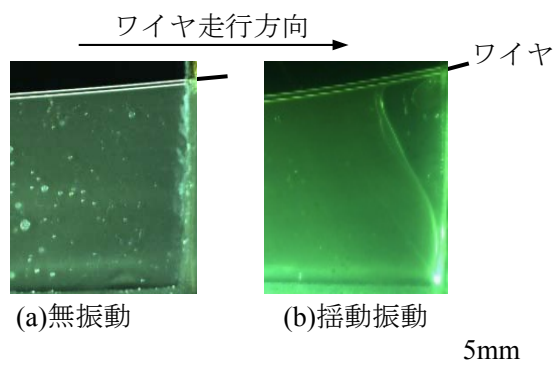


図 10 工作物エッジ部での空気挙動

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 諏訪部 仁, 秋 充, 石川 憲一: 回転ドラム式メッキ装置によるダイヤモンドワイヤ工具の高速作製法の開発に関する研究, 砥粒加工学会誌, 査読あり, 56, 10(2012)703-708

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① 四田一高, 諏訪部仁, 石川憲一: 揺動振動援用マルチワイヤソーの加工部における空気挙動に関する研究, 精密工学会春季大会学術講演会, 2014 年 3 月 19 日, 東京大学(東京都文京区).
- ② 松川和平, 諏訪部仁, 石川 憲一: ダイヤモンドワイヤ工具の表面性状が切断加工特性に与える影響, 砥粒加工学会学術講演会, 2013 年 8 月 27 日, 日本大学(東京都千代田区)
- ③ 三田村貴博, 諏訪部仁, 石川憲一: ダイヤモンドワイヤ工具を用いた切断加工の加工特性に関する研究, 日本機械学会関西支部第 88 期定時総会講演会, 2013 年 3 月 17 日, 大阪工業大学(大阪府大阪市)
- ④ 三田村 貴博, 諏訪部仁, 石川 憲一: ダイヤモンドワイヤ工具を用いたシリコンの高精度切断加工に関する研究, 砥粒加工学会学術講演会, 2012 年 8 月 29 日, 同志社大学(京都府京田辺市)
- ⑤ 三田村 貴博, 諏訪部仁, 石川憲一: ツインドラム式電着装置によるダイヤモンドワイヤ工具の高速作製と切断性能の評価, 砥粒加工学会研究・開発成果発表会講演会, 2012 年 7 月 6 日, 金沢工業大学(石川県野々市市).
- ⑥ 秋 充, 諏訪部仁, 石川 憲一: ツインドラム式メッキ装置によるダイヤモンドワイヤ工具の高速作製に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部第 49 期総会・講演会, 2012 年 3 月 10 日, 金沢工業大学(石川県野々市市).
- ⑦ 秋 充, 諏訪部仁, 石川 憲一: 電着ダイヤモンド工具の高速作製用メッキ装置の開発に関する研究, 砥粒加工学会学術講演会論文集, 2011 年 9 月 7 日, 中部大学(愛知県春日市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕 なし

〔その他〕 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

諏訪部 仁 (SUWABE, Hitoshi )

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号: 4 0 2 0 2 1 3 9

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし