

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「スーパーインクジェットを用いたソーワイヤへの  
砥粒配置技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社つくば研究支援センター

# 目次

頁

## 第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	4
1-3	成果概要	8
1-4	当該研究開発の連絡窓口	10

## 第2章 本論

2-1	ベース装置の開発	
2-1-1	初期ベース装置開発	11
2-1-2	多連ヘッド組込ユニット	12
2-1-3	多連ヘッド組込ユニット改造	13
2-1-4	めっき工程のタンデム化	14
2-2	砥粒付着用インクの開発	
2-2-1	インク選定	15
2-2-2	砥粒付着用インク	16
2-3	砥粒配置制御ソーワイヤ	17
2-3-1	ソーワイヤ上へのダイヤモンド砥粒の仮固定	18
2-3-2	ソーワイヤ上へのダイヤモンド砥粒の本固定	18
2-3-3	砥粒配置制御	19
2-4	切削能力の評価	
2-4-1	簡易切断試験	20
2-4-2	コスト見積もり	21

最終章	全体総括	22
-----	------	----

参考文献および引用文献	23
-------------	----

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

低環境負荷、高効率エネルギー利用を進める上で必要不可欠な結晶シリコン太陽電池、照明用LED、電力変換に不可欠なインバータなどの性能を飛躍的に向上させるワイドギャップ半導体など、グリーンエレクトロニクスに対応する各種電子素子は、シリコン (Si)、サファイヤ ( $Al_2O_3$ )、シリコンカーバイド (SiC) などが基板として用いられている。

川下製造業者の抱える課題としては、中国経済産業局がまとめた「中国地域のFPD関連産業における太陽電池分野の参入可能性等調査」(2010年3月)[1]の中で、結晶シリコン太陽電池における技術開発課題として極薄基板製造のための安価なスライス技術の必要性が述べられおり、また照明用LEDのサファイヤ基板においては、光取出し効率向上のための薄膜化技術の高度化が課題であるとされている。

特に、ワイドギャップ半導体の代表であるシリコンカーバイド素子は、製造プロセスコストのうち、8割が切削のためのコストといわれている。これらの材料の薄膜化などは、単に資源の有効利用効率、コスト、生産能力などに影響するだけでなく、製品の性能にも直接影響を及ぼす。そのため、ウェハー切削技術の高度化に対しては、川下製造業者からの強い要請がある。

シリコン、サファイヤ、シリコンカーバイドなどの高硬度材、高脆材の切削方法として、現在主流となっているのがソーワイヤによるスライス加工であり、大手ソーワイヤメーカーA社の2009年度の報告によると、6インチサイズのサファイヤウェハーの切断時間は遊離砥粒方式の場合120時間かかるところを、レジンボンド法による固定砥粒方式では50時間、電着法による固定砥粒方式では20時間に短縮できると発表されている。そのため、電着法による固定砥粒方式は、ウェハー切削の先端技術として注目されている。しかしながら、ソーワイヤ自体の一般的な市場販売価格は、10-20円/mである。一方で、レジンボンド法による固定砥粒方式はおよそ5-10円/mである。そのため、切削時間の短縮を考慮しても切削コストが高い事が課題となっている。また、スライスするウェハーの薄膜化による資源の有効利用効率および生産能力向上のために更なる切削能力の向上が課題である。

従来の電着法による固定砥粒式ソーワイヤは、めっき液中に分散させた砥粒をめっき析出によりソーワイヤに付着させるため、砥粒がソーワイヤ近傍に滞留する必要があるため、ソーワイヤを高速に走行させることができず、生産に非常に時間が掛かる。また、めっき液に砥粒を混合するため、めっき廃液処理の際には環境への負荷が大きいと考えられている。また、金沢工業大学の諏訪部らにより報告された「フッ素樹脂を用いたスパイラル状ダイヤモンド電着ワイヤ工具の開発」(1999年砥粒加工学会誌)[2]によると切削屑の排出は切削能力向上に重要な要因であると位置付けられていることから、砥粒配置制御は重要な技術と考えられている。しかし、ソーワイヤの生産

においてはこの技術が確立されていない状況にある。

そこで、独立行政法人産業技術総合研究所が発明した独自のインク吐出方式によるスーパーインクジェット技術を用いる事で、従来不可能であった液滴径  $10\mu\text{m}$  以下の超微細塗布が可能になり、非接触技術による砥粒の配置制御の達成が期待できる。ソーワイヤとして使用予定の線材は、直径  $120\mu\text{m}$  である。そのため、ワイヤ上にパターンを描画するには、ワイヤ直径よりも十分に小さな砥粒を固定する必要がある。本研究において使用するダイヤモンド砥粒の平均粒径は  $10\mu\text{m}$  程度であり、スーパーインクジェットで描画可能な液滴径と近い値であり、インク吐出と砥粒付着を適切に制御できれば、吐出インク 1 か所あたりに、ダイヤモンド砥粒一個を付着させることも原理的には可能であると考えられる。また、スーパーインクジェット技術を用いる事により、めっき前工程における砥粒付着が可能になり、めっき析出時間の短縮によるソーワイヤの生産速度向上も見込まれる(図 1-1-1)。

これらの理由から、従来の電着法による固定砥粒方式ソーワイヤの性能向上と、生産性向上に寄与する新たな製造プロセスとして、下記項目が見込めるスーパーインクジェットを用いためっき前工程における砥粒の配置制御技術の確立を目指す。

- ①砥粒配置制御による切削能力の向上
- ②めっき析出時間の短縮によるソーワイヤ生産速度の向上によるコスト削減

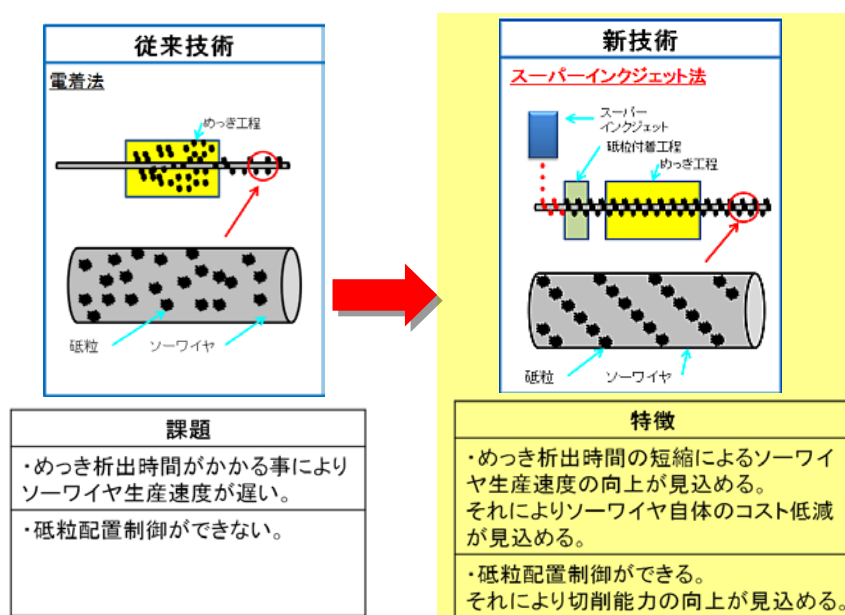


図 1-1-1 従来技術と新技術

本事業における基盤技術高度化目標は、①高硬度材加工対応を可能にする切削能力の向上と、②切削コスト削減のためのソーワイヤの開発である。

それぞれ目標に対する目標値としては、①切削能力の向上については、従来技術のベンチマーク対比で切削時間を 2/3 に削減することであり、②切削コストの削減については、ソーワイヤ自身のコストを 1/2 に削減することである(図 1-1-2)。

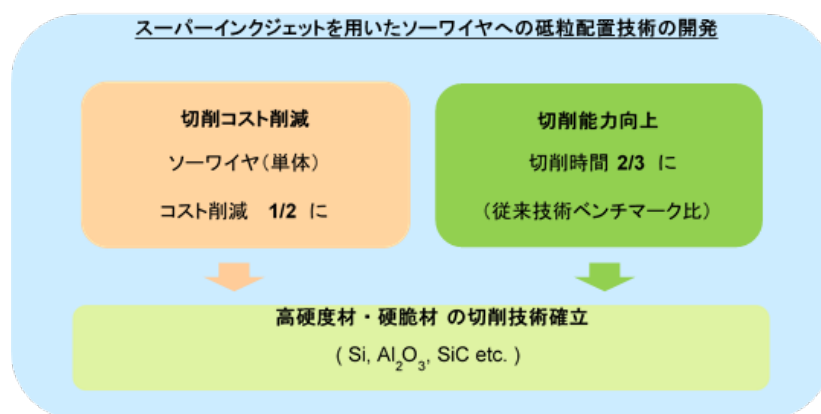
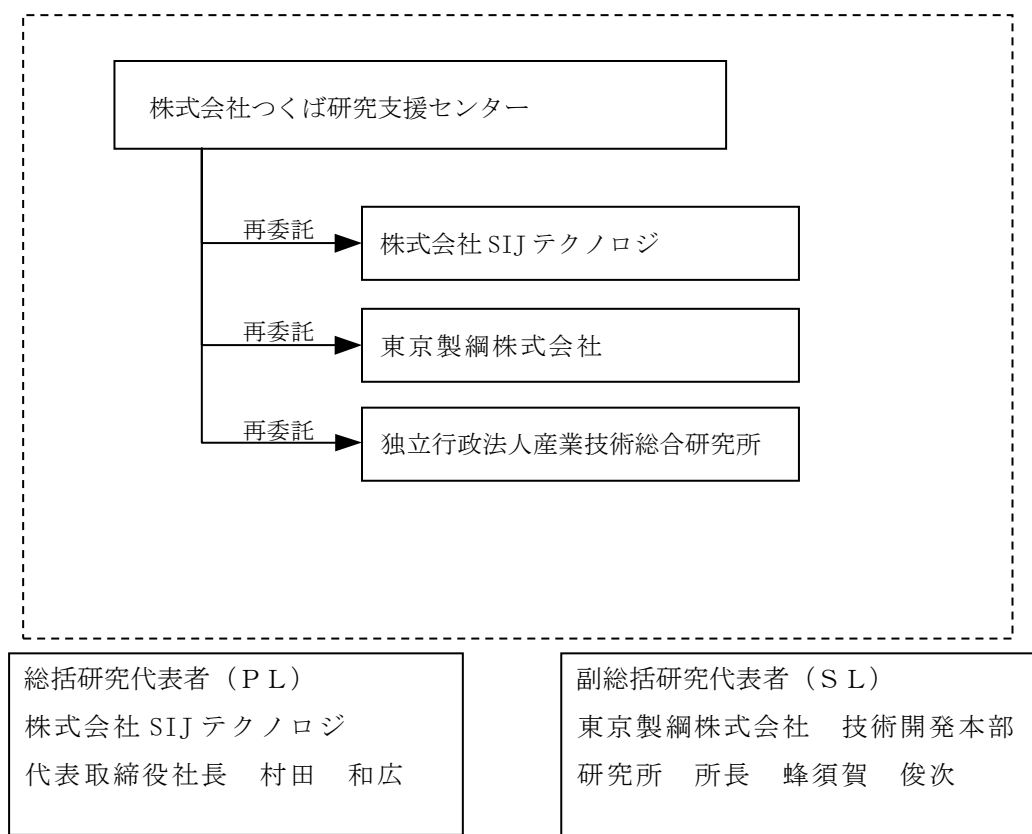


図 1-1-2 本事業の開発目標

## 1-2 研究体制

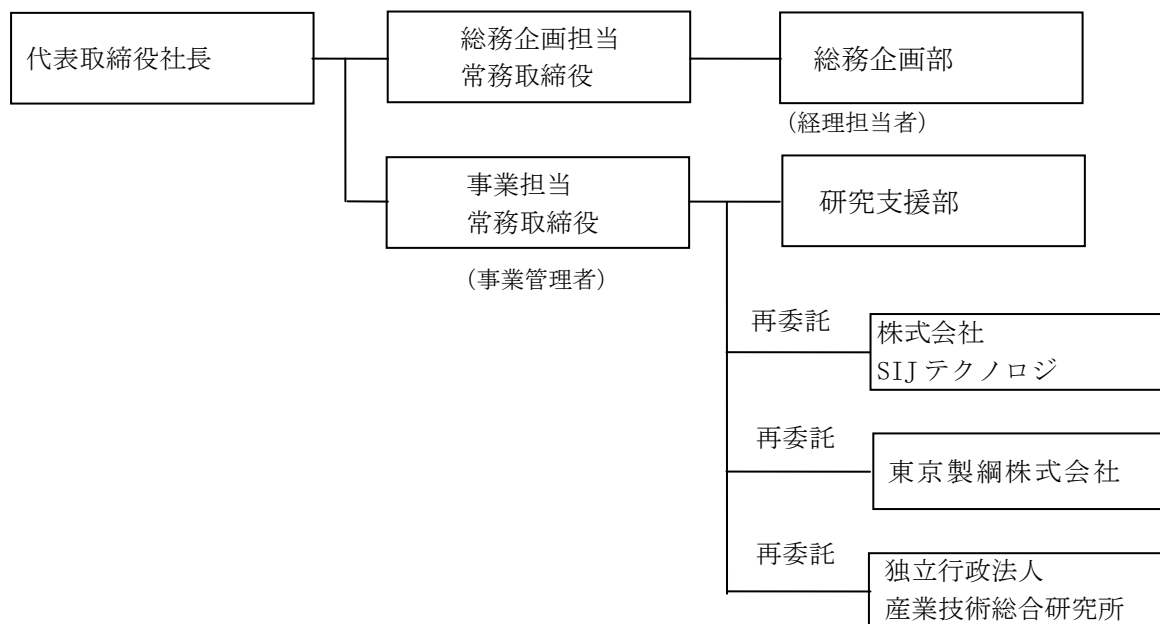
### 【研究組織（全体）】



### 【管理体制】

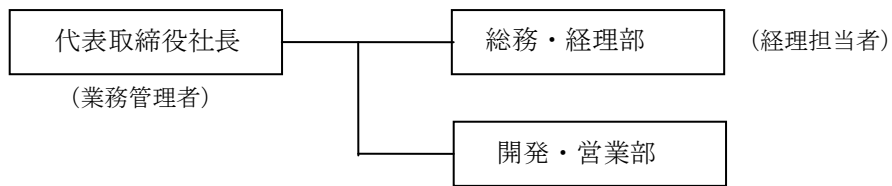
#### <事業管理機関>

#### [株式会社つくば研究支援センター]

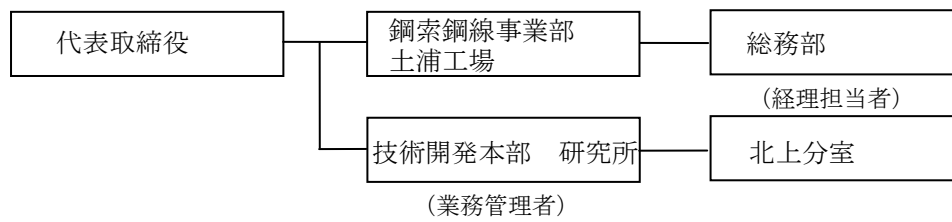


<委託先>

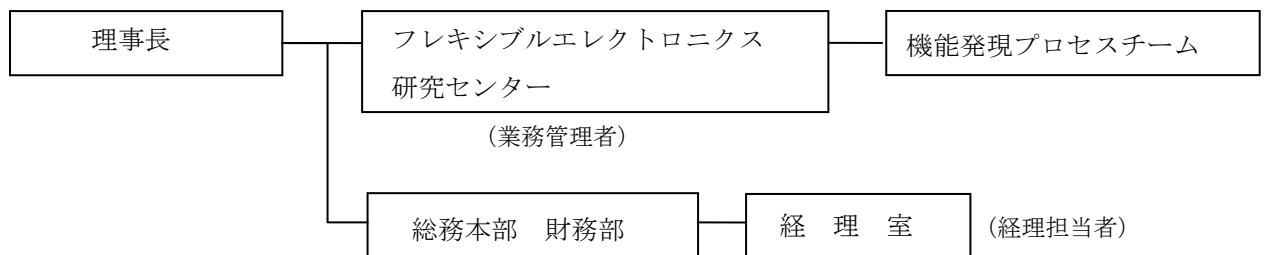
[株式会社 SIJ テクノロジ]



[東京製綱株式会社]



[独立行政法人産業技術総合研究所]



【管理員及び研究員】

<事業管理機関>

[株式会社つくば研究支援センター]

(管理員)

氏名	所属・役職
高田 青史	研究支援部 次長
永岩 良教	研究支援部
窪田 真美	研究支援部

<再委託先>

(研究員)

[株式会社 SIJ テクノロジ]

氏名	所属・役職
村田 和広	代表取締役社長
田代 直樹	開発・営業部 マネージャー
堀井 美德	開発・営業部 リーダー

[東京製綱株式会社]

氏名	所属・役職
蜂須賀 俊次	技術開発本部 研究所 所長
水間 薫	技術開発本部 研究所 副所長
木根 弘起	技術開発本部 研究所 係員
平勢 理士	技術開発本部 研究所 係員
玉田 聡	技術開発本部 研究所 北上分室GL
呂 精琢	技術開発本部 研究所 北上分室係員

[独立行政法人産業技術総合研究所]

氏名	所属・役職
白川 直樹	フレキシブルエレクトロニクス研究センター機能発現プロセスチーム



【経理担当者及び業務管理者の所属、氏名】

<事業管理機関>

[株式会社つくば研究支援センター]

(経理担当者) 総務企画部 課長 沼田 きみ江  
 (業務管理者) 常務取締役 一條 久夫

<再委託先>

[株式会社 SIJ テクノロジ]

(経理担当者) 取締役 増田 久恵  
 (業務管理者) 代表取締役社長 村田 和広

[東京製綱株式会社]

(経理担当者) 鋼索鋼線事業部 土浦工場 総務部  
 経理担当マネージャー 金子 泰之  
 (業務管理者) 技術開発本部 研究所 所長 蜂須賀 俊次  
 技術開発本部 研究所 副所長 水間 薫  
 技術開発本部 研究所 部長 竹内 潤

[独立行政法人産業技術総合研究所]

(経理担当者) 総務本部 財務部 経理室長 山口 洋二  
 (業務管理者) フレキシブルエレクトロニクス研究センター長 鎌田 俊英

【他からの指導・協力者】

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
村田 和広	株式会社 S I J テクノロジ 代表取締役社長	P L
蜂須賀 俊次	東京製綱株式会社 技術開発本部 研究所 所長	S L 委
田代 直樹	株式会社 S I J テクノロジ 開発・営業部マネージャー	委
堀井 美徳	株式会社 S I J テクノロジ 開発・営業部リーダー	委
水間 薫	東京製綱株式会社 技術開発本部 研究所 副所長	委
白川 直樹	独立行政法人産業技術総合研究所フレキシブルエレクトロニクス研究センター機能発現プロセスチーム	
一條 久夫	株式会社つくば研究支援センター 常務取締役	
高田 青史	株式会社つくば研究支援センター 研究支援部 次長	
永岩 良教	株式会社つくば研究支援センター 研究支援部	
窪田 真美	株式会社つくば研究支援センター 研究支援部	

### 1-3 成果概要

本事業は、シリコン、サファイヤ、シリコンカーバイドなどの高硬度・高脆材の切削工法として現在主流のソーワイヤによるスライス加工において、先端技術として注目されている電着法による固定砥粒方式ソーワイヤの製造プロセスについて、新技術を開発し、固定砥粒型ソーワイヤのコスト削減と切削時間短縮を目指すものである。

本事業で開発する新技術は、超微細塗布が可能なスーパーインクジェット技術を用いることにより、めっき前工程におけるダイヤモンド砥粒の付着を可能にし、めっき析出時間の短縮によるソーワイヤの生産速度の向上を見込んでいる。また、スーパーインクジェットを用いた非接触技術によってワイヤ上に砥粒配置制御を行う事により、切削加工時に切削屑の排出を促し、切削能力の向上を見込んでいる。

本事業で開発する技術に用いるスーパーインクジェットは、液滴サイズ  $10\mu\text{m}$  以下の超微細塗布が可能であり、直径  $120\mu\text{m}$  程度のソーワイヤ上に、平均粒径約  $10\mu\text{m}$  のダイヤモンド砥粒を仮固定するための砥粒付着用インクのパターン描画が可能なインク吐出技術である。

平成 23 年度には、ベース装置の開発において、ソーワイヤ巻取り搬送速度を可変機構設計と装置作製を行った。また、砥粒付着用インクのベースとなるインクの選定において、めっき工程前における砥粒付着率 80 % 以上を実現した。多連ヘッドの開発において、6 ヘッドのインク吐出用ヘッドでの吐出液滴サイズ  $10\mu\text{m}$  を実現した。ヘッド組立自動化装置の開発において、インク吐出用ヘッドの組立時間を短縮した。

平成 24 年度には、ベース装置にヘッド数 6 つの多連ヘッド組込み、6 ヘッドにより走行ソーワイヤ上へのインク吐出を可能にした。巻取搬送速度  $5.0\text{m}/\text{min}$  においてインク吐出と砥粒付着を実現した。また、砥粒付着用インクの開発を進め、めっき工程後の砥粒付着率を改善した。砥粒付着率は目標にとどかなかったが、各工程での課題抽出を行うことができた。

平成 25 年度には、めっき後の固定砥粒数が少ないという前年度の課題を踏まえて、ベース装置へめっき装置の組込みを行い、めっき工程のタンデム化を実施した。また、ソーワイヤ上の砥粒観察画像からインク吐出条件を調整させるフィードバック制御を組み込んだ。これにより、 $100\mu\text{m}$  以下のピッチでソーワイヤ円周上にパターン描画を実現した。そして、 $5\text{m}/\text{min}$  以上の巻取り搬送速度への対応を可能にした。更に、種々の条件を整えると、めっき後の砥粒付着率が十分な水準になることを確認した。これまでの成果に基づき特許出願を行っている。また、スーパーインクジェットを用いて砥粒配置制御を施したソーワイヤの製造コストの見積りを行い、従来の電着法固定砥粒方式と比較して製造コスト 1/2 以下となる見通しを立てた。砥粒配置制御を施したソーワイヤの切削能力の評価では、従来技術を上回る切削性能を確認し、シリコン材において従来技術の切削時間 5/6 を得た。

【成果一覧】

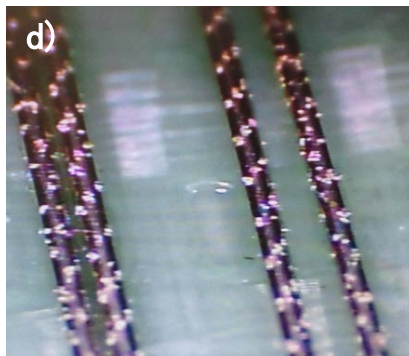
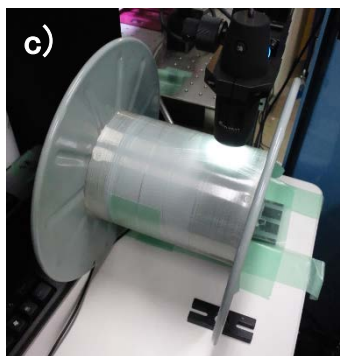
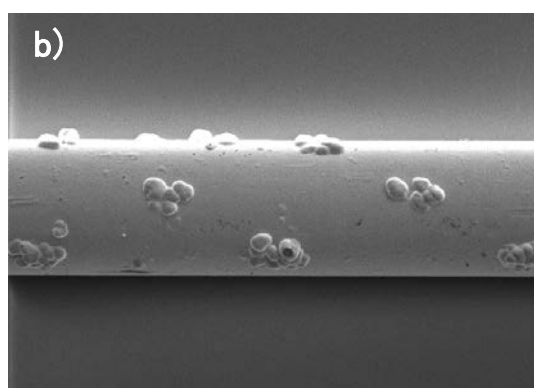
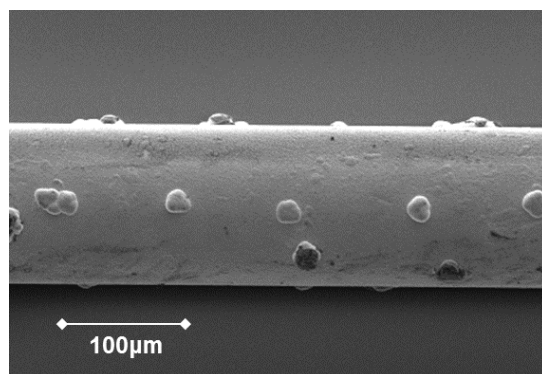


図 1 - 3 - 1 固定砥粒ソーワイヤ

a) 5m/min で作製した固定砥粒ソーワイヤ

b), c), d) リング型砥粒配置固定砥粒ソーワイヤ

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

(フリガナ)： タカタ セイシ  
氏名： 高田 青史  
所属組織名： 株式会社つくば研究支援センター  
所属役職： 研究支援部 次長  
Tel： 029-858-6000  
Fax： 029-858-6014  
E-mail： [tc-iis@tsukuba-tci.co.jp](mailto:tc-iis@tsukuba-tci.co.jp)

## 第2章 本論

### 2-1 ベース装置の開発

#### 2-1-1 初期ベース装置

平成23年度ベース装置の開発では、①ソーワイヤ繰出機、②シングルヘッド吐出ユニット、③砥粒付着、④巻取機からなる装置を検討し、ソーワイヤの巻取搬送速度を可変する機構の設計および作製を行った（図2-1-1）。

スーパーインクジェットを用いてソーワイヤ上にインクを付着させるためには、ソーワイヤのブレ量を少なくする必要がある。そのため、ソーワイヤのブレ量抑制機構の開発を行った。

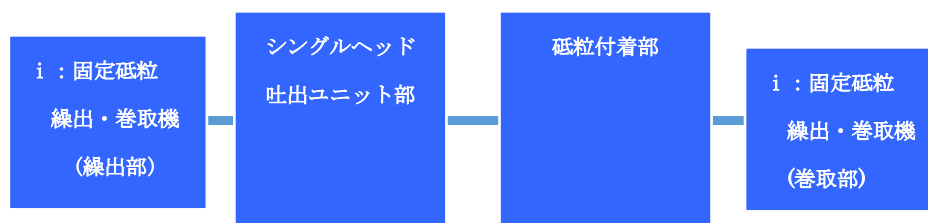


図 2-1-1 平成23年度ベース装置の概要

固定砥粒繰出・巻取機は、ソーワイヤを一定速度で搬送させるほか、ソーワイヤを可能な限り振動させずに、定点を通過させることができることが望まれる。

固定砥粒繰出・巻取機については、専用機の開発を進め、操作性確認と共に、速度、張力制御等の検証を行った。砥粒付着用インク付着後に、ダイヤモンド砥粒をソーワイヤに供給する部分については、ダイヤモンド砥粒を掻き上げて、その中をソーワイヤが走行する装置を製作し、砥粒付着状況をカメラで撮影観察して、ソーワイヤ周囲にほぼ均一にダイヤモンド砥粒が分散、供給されることを確認した。条件によっては、均一性に問題が生じることがあり、最適な条件があることが判明した。図2-1-2に研究実施場所に設置した固定砥粒繰出・巻取機を示す。上述の通り、所定の機構設計と装置作製を完了した。

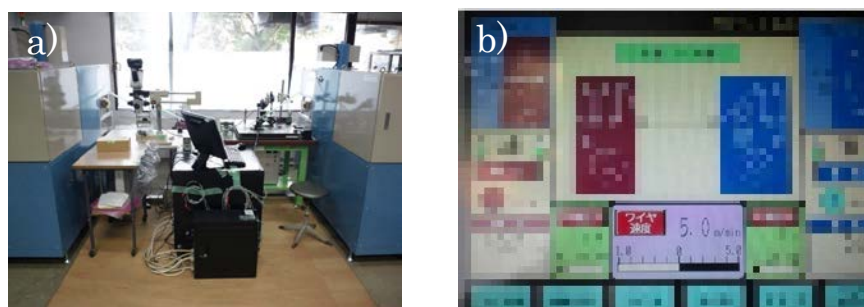


図 2-1-2 固定砥粒用 繰出・巻取機  
(a) ベース装置写真, (b) 巻取機操作パネル写真（設定速度 5 m/min）

## 2-1-2 多連ヘッド組込ユニット

平成24年度に多連ヘッド組込ユニットの検討を行った。このユニットについては、市販の設備装置はなく、スーパーインクジェット技術の適応を行う為に、専用ユニットの開発を行った。これは、平成23年度開発したベース装置に、多連ヘッドを用いたスーパーインクジェットによるインク吐出、吐出インク上への砥粒付着および仮固定、付着砥粒の観察という機能を付与するユニットである。インク吐出ユニット、砥粒付着ユニット、付着砥粒観察ユニットからなる組込ユニットである(図2-1-3)。

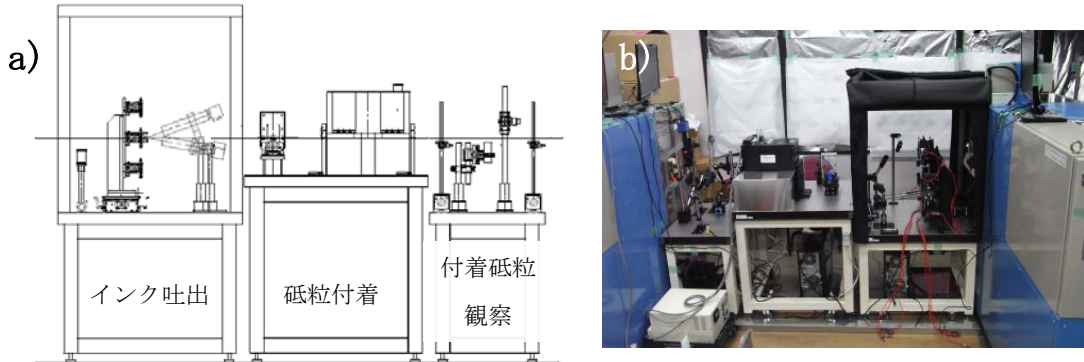


図 2-1-3 多連ヘッド組込ユニット

a) ユニット概要、 b) ユニットの組込んだベース装置

インク吐出ユニットは、最大6個のインク吐出用ヘッドが搭載可能であり、固定砥粒繰出・巻取機の間を搬送されるソーワイヤの円周上に60°毎に1ヘッドずつ配置することができる。ヘッド先端のインク吐出部は、ソーワイヤに対しインク吐出が可能な範囲に位置調整できる。ヘッドの位置調整は、カメラによりヘッドを撮影し、モニタを観察しながら調整を行うことができる。また、走行ソーワイヤのブレ抑制機構を用いて、巻取搬送時のブレ量を所定範囲以内で実現している。

砥粒付着ユニットは、ソーワイヤ上に吐出したインクに砥粒を付着させる砥粒付着部を備える。砥粒付着部は、平成23年度に採用した砥粒掻き上げ方式としている。

付着砥粒観察ユニットは、ソーワイヤの円周上に付着した直径約10 $\mu$ mの砥粒を観察するための顕微鏡および検査用カメラを備えている。また、このユニットには、ソーワイヤ切断用のワイヤ保持台が備わっており、繰出・巻取機へのソーワイヤ取付けあるいは、交換時にワイヤを保持することができる。

平成24年度のベース装置で固定砥粒ソーワイヤの連続的な試作を進めた結果を図2-1-4に示す。試作体制として、砥粒仮固定実施場所とめっき固定実施場所が離れており、めっき固定前の輸送に関わる付着砥粒脱落等が課題であることが明らかになった。砥粒脱落等については、可能性として、①砥粒脱落、②砥粒未付着が考えられる。これらの解消には、①めっき工程前の摩擦箇所低減の為に、ベース装置へめっき工程をタンデム化する。②インク吐出条件の最適化の為に、インク吐出にフィードバック機構を追加するなどの対策が考えられる。

そこで、平成 25 年度は付着砥粒脱落を防ぐ為、めっき固定前のソーワイヤ巻取ボビン輸送をなくし、ベース装置へめっき装置を組込み、インク吐出・砥粒仮固定とめっき固定のタンデム化を行うこととした。また、前年度ベース装置へ組込んだ多連ヘッド組込ユニット改造によりワイヤ画像処理などによるインク吐出へのフィードバック制御を組込み、砥粒付着用インク吐出の最適化を図るものとした。

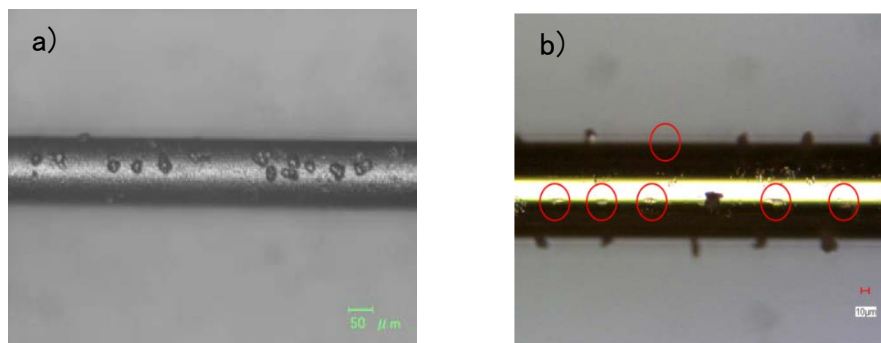


図 2-1-4 平成 24 年度・固定砥粒ソーワイヤ試作  
a) 固定砥粒ソーワイヤ試作、 b) 砥粒脱落  
赤丸：砥粒脱落箇所

### 2-1-3 多連ヘッド組込ユニット改造

平成 25 年度には、多連ヘッド組込ユニット改造を実施した(図 2-1-5)。平成 24 年度に導入した多連ヘッド組込ユニットは、インク吐出ユニット、砥粒付着ユニット、付着砥粒観察ユニットからなっている。多連ヘッド組込ユニットでは、付着砥粒観察ユニットにより、主にワイヤ停止状態での砥粒付着状態の観察を行うことができるが、各ユニット間の機能は電氣的・機械的に連動しておらず、インク吐出ユニットのインク吐出条件の調整は、観察像などにに基づき、手作業で行うものであった。平成 25 年度、固定砥粒ソーワイヤの切削能力の評価では長尺サンプルが必要となるが、長尺サンプルの作製は、長さに応じてサンプル作製に時間を要する。また、前年度 100 m 級の長尺試作において、長時間にわたり安定したパターンを形成するためには、吐出条件の調整が必要であることが明らかになった。そこで、高速カメラを用いた走行ソーワイヤの画像処理結果をインク吐出へフィードバックし、吐出条件の自動調整を可能にし、より安定なパターン形成を図った。インク吐出部近傍やワイヤの清浄化によってもインクの安定吐出が期待される。

この改造では、多連ヘッド組込ユニットに高速カメラを追加し、高速カメラでの観察像の画像解析結果をインク吐出ユニットへフィードバックさせインク吐出条件を自動調整することを可能にした。また、インク吐出部近傍やインク着弾前のワイヤの清浄化を可能し、インク吐出の安定性を向上させた。

多連ヘッド改造実施後に砥粒付着精度が向上し、砥粒付着率の大幅な上昇と、砥粒

配置制御による明確なパターン形成が可能となった。

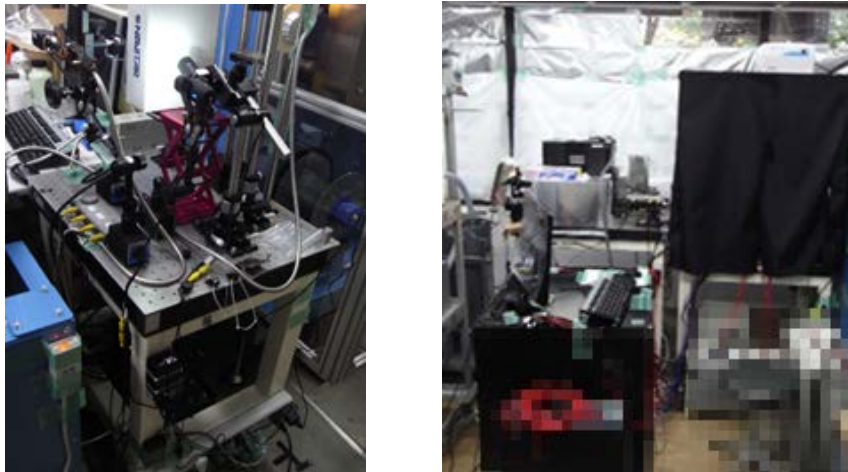


図 2-1-5 多連ヘッド組込ユニット改造

#### 2-1-4 めっき工程のタンデム化

平成 25 年度にベース装置へめっき装置を導入し、めっき工程のタンデム化を行った。平成 24 年度のベース装置では、砥粒付着インクの印刷からダイヤモンド砥粒の仮固定までが可能であった (図 2-1-6 a)。めっき固定前にソーワイヤをポビンに巻取り、めっき工程への輸送を行っていた。また、めっき工程へ投入する際には、ソーワイヤをポビンから繰り出し、洗浄工程を通るなど負荷のかかる工程であった。そこで、ベース装置のインク付着ユニットの後段にめっき装置を導入した (図 2-1-6 b)。めっき装置は、めっき槽、めっき用電源、ターンローラー、洗浄槽からなる装置である。

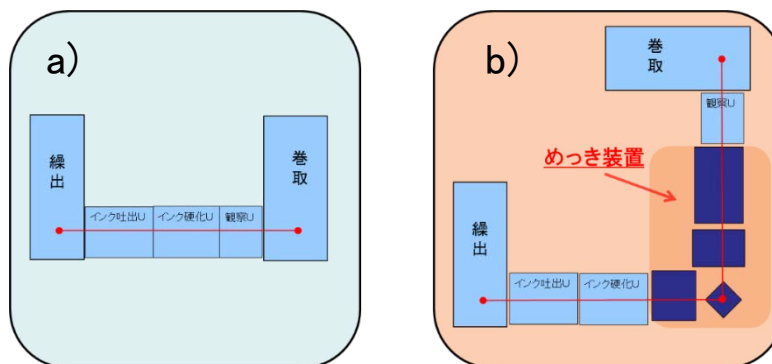


図 2-1-6 ベース装置へのめっき工程のタンデム化

a) 平成 24 年度ベース装置概要、 b) 平成 25 年度ベース装置概要



図2-1-7にめっき工程をタンデム化したベース装置を示す。めっき装置は、めっき槽、めっき用電源、ターンローラー、洗浄槽からなる装置である。ソーワイヤ上にダイヤモンド砥粒を固定するめっき槽は、インク付着ユニットの直後に配置されている。これにより、前工程でソーワイヤ上に仮固定されたダイヤモンド砥粒への負荷を最小にして、めっき工程へソーワイヤを導入することができる。



図2-1-7  
ベース装置への  
めっき工程タンデム化

## 2-2 砥粒付着用インクの開発

### 2-2-1 インク選定

砥粒付着用インクの選定では、アプローチの異なる2種類のインクを候補とした。①樹脂インク、砥粒付着率を高めることが狙い。②導電インク：めっき析出速度を高めることが狙い（金、銀、銅、白金、パラジウムなど）。また、ソーワイヤ静止状態でダイヤモンド砥粒を付着させた後、砥粒固定化を検証した。初期のインク吐出性の確認には、ガラス基板を用いた。吐出性が良好なインクについては、静止ソーワイヤ上への吐出試験を行った。理想的なダイヤモンド砥粒の付着はインク1点あたり砥粒1個である。

ガラス上では、樹脂インクは、砥粒付着率100%となったが、複数砥粒の付着が確認された。理想的な砥粒付着を実現するためには、吐出条件の調整が必要である。導電インクの砥粒付着性は樹脂インクと比較して著しく悪い。

樹脂インクを用いたソーワイヤ上への吐出では、めっきによる砥粒の固定においても複数のダイヤモンド砥粒が固定されていることを確認した（図2-2-1）。導電インクの場合でも、砥粒付着性は樹脂インクより劣るが、砥粒の付着を確認し、めっき工程後においてもダイヤモンド砥粒の付着が確認できた（図2-2-2）。

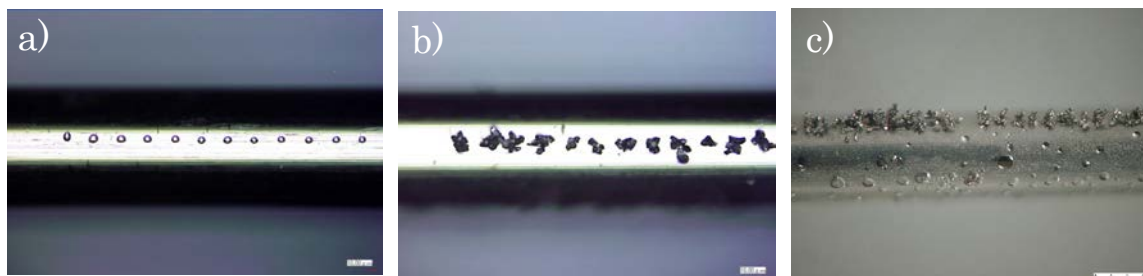


図2-2-1 樹脂インク ソーワイヤ上への吐出結果  
a) インクのみ、b) 砥粒仮固定、c) 砥粒固定・めっき後



図 2-2-2 導電インク ソーワイヤ上への吐出結果  
a) インクのみ、b) 砥粒仮固定、c) 砥粒固定・めっき後

### 2-2-2 砥粒付着用インク

平成 24 年度に前年度の結果に基づき樹脂インクおよび導電インクの粘度・組成の調整を行い、それぞれの特徴を活かした砥粒付着およびめっき工程に適した砥粒付着用インクの開発を進めた。砥粒付着性が良好な樹脂インクでは付着砥粒数の最適化を図り、導電インクでは砥粒付着性の向上を図った。また、ダイヤモンド砥粒を付着させた後、砥粒固定化を検証した。目標値は、砥粒付着率 80 %とした。

樹脂インクでは、インク 1 点に対する付着砥粒数を 1 個にする為の条件最適化を行った。粘度、組成、インクサイズなどの影響を把握した。ガラス基板に固定した静止ソーワイヤ上で、インク 1 点に 1 個のダイヤモンド砥粒を付着させた(図 2-2-3)。

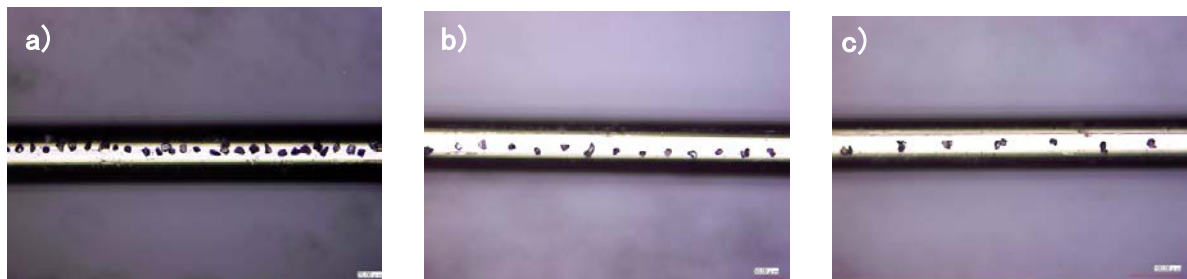


図 2-2-3 樹脂インクの付着砥粒最適化  
a) 25  $\mu\text{m}$  ピッチ、b) 50  $\mu\text{m}$  ピッチ、c) 100  $\mu\text{m}$  ピッチ

砥粒付着ワイヤは、短尺サンプルとしてめっき試作の工程へ提供し、めっき後の観察を行った。めっき工程へのサンプル輸送に際し、めっき工程前に、ある程度の砥粒付着強度が必要である事が明らかになった。導電インクについては、粘度調整や組成変更などにより課題であった付着性向上の検討を進めていたが、付着強度が樹脂インクより弱いことが分かった。また、めっき工程での固定条件の確認により、樹脂インクでのダイヤモンド砥粒固定が確認できた為、以降、砥粒付着用インクは、樹脂インクとして開発を進める事とした。

## 2-3 砥粒配置制御ソーワイヤ

砥粒配置制御ソーワイヤの作製は、多連ヘッドを組み込んだベース装置で行うことができる。多連ヘッドを組み込んだベース装置のインク吐出部には、6つのインク吐出ヘッドを備えており、ワイヤ円周上に配置できる（図2-3-1）。本開発プロセスでは、走行するソーワイヤ円周上に砥粒付着用インクの印刷を行う。安定的なインク吐出を得るためにソーワイヤとヘッドの間隔は所定距離に保たれる必要がある。また、走行するワイヤの振動は、インク着弾する範囲に抑える必要がある。ソーワイヤ上へのダイヤモンド砥粒の配置は、インク吐出ヘッドによる砥粒付着用インクの印刷パターンによるものである。図2-3-1 a)のように、同一面内にインク吐出ヘッドを配置すると、図2-3-1 b)のように砥粒付着用インクがリング状に印刷されることになる。印刷ピッチは、ソーワイヤ巻取搬送速度に対応した印刷タイミングなどにより、任意に調整が可能である。ソーワイヤ上の印刷パターン（砥粒配置パターン）を平面へ展開すると図2-3-1 c)のようになる。本開発プロセスでは、砥粒付着用インク吐出ヘッドの位置調整、印刷ピッチなどの調整により、ソーワイヤ上に意図的な砥粒配置が可能となる。

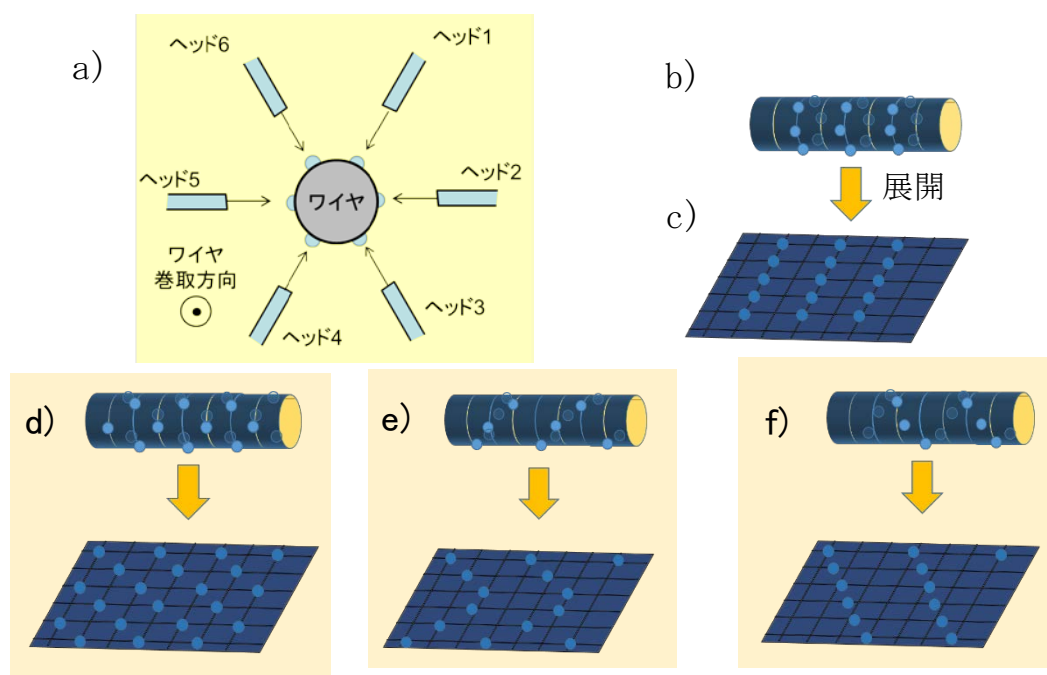


図2-3-1 多連ヘッドによるワイヤ上へのインク吐出

- a) ヘッド配置とインク吐出、b) ソーワイヤ上の印刷パターン、  
c) 印刷パターン展開図、d) 千鳥配置、e) リング配置、f) らせん配置

砥粒付着用インクが印刷されたソーワイヤには、ダイヤモンド砥粒が供給され、インクにダイヤモンド砥粒が付着し仮固定される。ダイヤモンド砥粒が仮固定されたワイヤは、めっき槽へ導入され、電気めっきにより、ダイヤモンド砥粒がワイヤ表面に本固定される。

### 2-3-1 ワイヤ上へのダイヤモンド砥粒の仮固定

図2-3-2にソーワイヤ上にダイヤモンド砥粒を仮固定した状態のSEM写真を示す。めっきによる本固定前であるため、ダイヤモンド砥粒の固定力は、砥粒付着用インクによるものである。ダイヤモンド砥粒は、砥粒付着用インクが印刷された上だけに付着しており、インクの印刷パターンを制御すれば、砥粒配置を制御することができることが明らかである。更に、直径 $100\mu\text{m}$ のソーワイヤにおいても、インク1点に対して砥粒1個を達成しており、開発プロセスが次世代コアワイヤにも適用できることを示している。

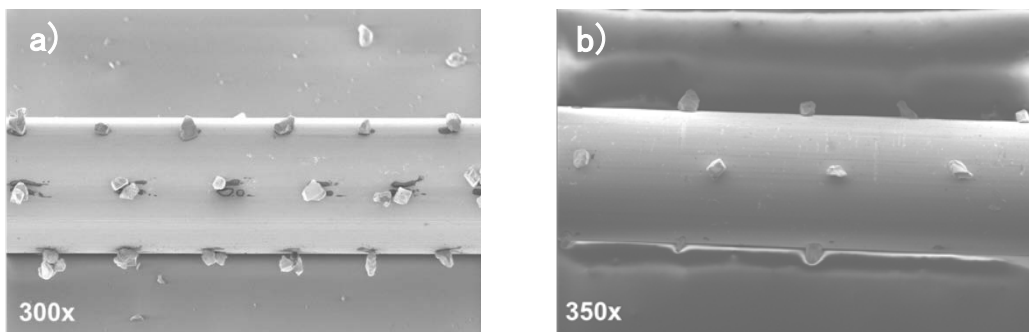


図2-3-2 試作ソーワイヤSEM写真（めっき前）  
a) 直径 $120\mu\text{m}$ , b) 直径 $100\mu\text{m}$

### 2-3-2 ワイヤ上へのダイヤモンド砥粒の本固定

図2-3-3にソーワイヤ上にダイヤモンド砥粒を固定した試作ソーワイヤのSEM写真を示す。ダイヤモンド砥粒の固定力は、めっきによるものである。ソーワイヤの直径は $120\mu\text{m}$ である。ダイヤモンド砥粒はソーワイヤ円周上に $100\mu\text{m}$ 以下のピッチで固定されている。また、図a)は、インク1点に対して砥粒1個の固定を実現している。また、砥粒付着用インクの吐出条件などにより、図b)のように複数砥粒の固定も可能であり、砥粒配置だけでなく、砥粒付着数の設計も可能といえる。

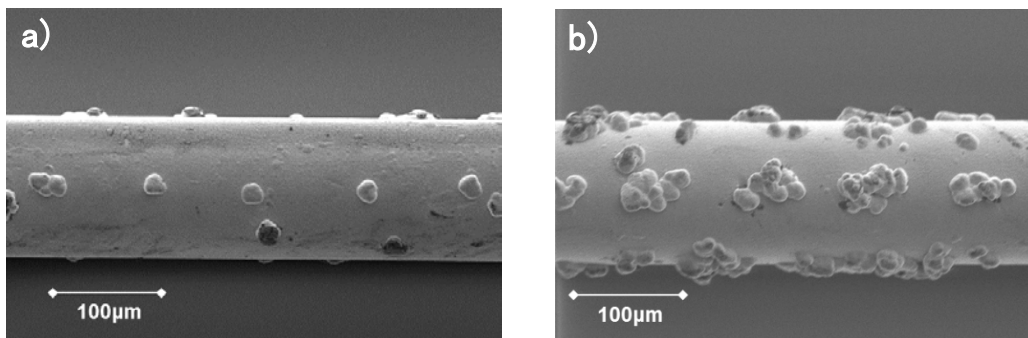


図2-3-3 試作ソーワイヤSEM写真（めっき後）  
a) 単数砥粒固定, b) 複数砥粒固定  
巻取搬送速度  $5.0\text{m}/\text{min}$

### 2-3-3 砥粒配置制御

砥粒配置制御は、従来技術の電着法と異なる本開発プロセスに特異な特徴である。開発プロセスを用いれば、直径  $120\mu\text{m}$  程度のソーワイヤ表面に意図したパターンでダイヤモンド砥粒を配置・固定することが可能である。

試作では、千鳥配置、リング配置、らせん配置など配置を実現している（図2-3-4）。このような砥粒の配置は、従来技術の電着法では、不可能な砥粒配置である。100m程度ボビンに巻き取った試作ソーワイヤを観察しても、明確なパターンを確認することができる（図2-3-5）。今後、切削能力向上に対して有効な砥粒配置パターンを探索するための基礎的な技術を実証することができた。

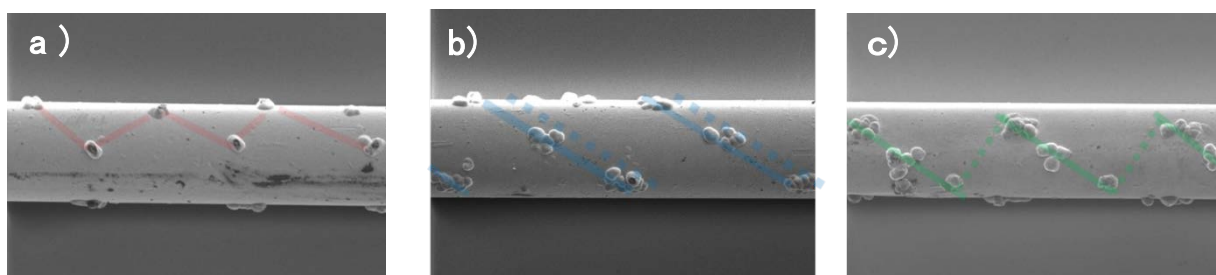


図2-3-4 試作ソーワイヤ SEM 写真（めっき後） 砥粒配置  
a) 千鳥配置, b) リング配置, c) らせん配置

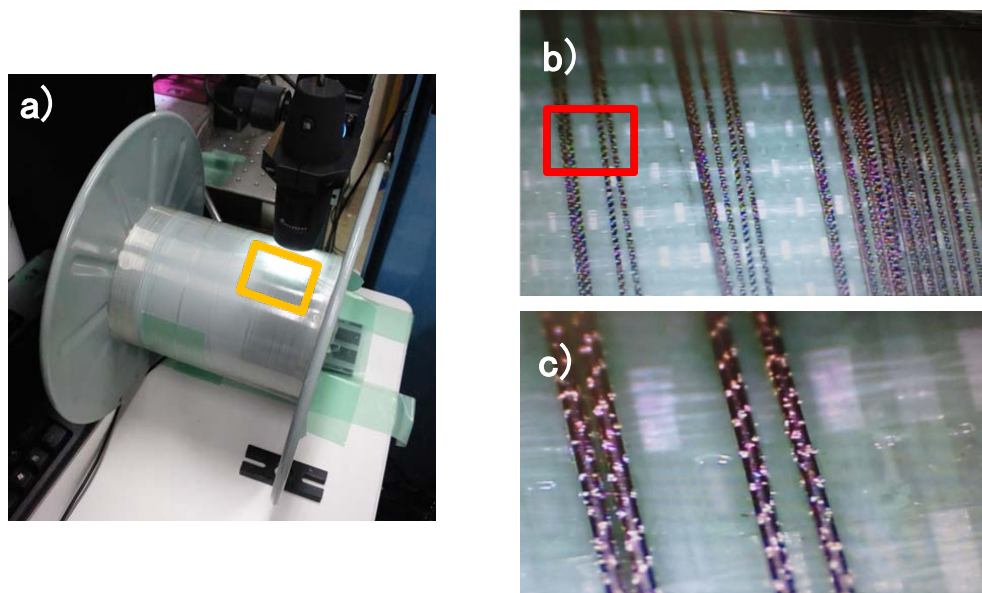


図2-3-5 砥粒配置制御を施した固定砥粒ソーワイヤ試作品  
a) ボビンに巻いた試作品、 b) a)の黄枠の拡大、 c) b)の赤枠の拡大

## 2-4 切削能力の評価

### 2-4-1 簡易切断試験

簡易切断試験は、切断試験機に試作ソーワイヤをセットし、シリコン材を切断することにより行うものである。簡易切断試験は、図2-4-1のようなイメージで行われる。所定の速度で走行するソーワイヤが、一定時間の間に一定の力でシリコン材に押し当てられる。所定時間経過後、ソーワイヤを押し当てる位置を変えて、切り込み深さのプロファイルを計測するものである。一定時間の切り込み深さが切断速度となり、切り込み数が切断面積となる。切り込みが深いほど、切断速度が速く切断性能が高い。また、切断面積が増えても切断速度が高い、あるいは速度が維持されるものの切断性能が高いと言える。この試験では、従来技術の電着法ランダム配置固定砥粒ソーワイヤ（従来品）での切断速度の水準を比較対象として、試作ソーワイヤの切断能力の評価を行うものとした。切断時間の目標値は従来品の約67% (2/3) である。

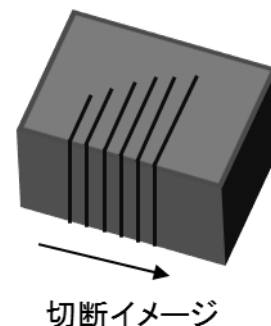


図2-4-1  
シリコン材  
切断イメージ

本事業での開発プロセスは、めっき前にスーパーインクジェット技術によりソーワイヤ上に砥粒付着インクを印刷し、そのインクの上にダイヤモンド砥粒を付着させるものである。その後、ソーワイヤはめっき工程に入り、仮固定されたダイヤモンド砥粒は、めっきによりソーワイヤ上に本固定される。

図2-4-2に、簡易切断試験使用した試作品のSEM写真を示す。この写真は、 $0^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $240^\circ$ と観察する角度を変えた写真である。どの角度からの観察でも、ソーワイヤ上にダイヤモンド砥粒がめっきで最終固定されていることが確認できる。このようなソーワイヤ円周上に砥粒が配置された固定砥粒ソーワイヤ試作品などを用いて簡易切断試験を行った。

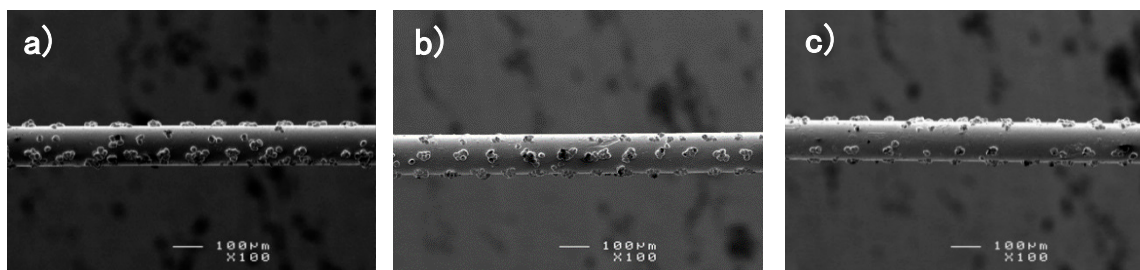


図2-4-2

直径  $120\ \mu\text{m}$  ワイヤ簡易切断試験用サンプル SEM 写真 開発品 A

a)  $0^\circ$  , b)  $120^\circ$  , c)  $240^\circ$

図2-4-3に、直径  $120\mu\text{m}$  のワイヤを用いた砥粒配置固定砥粒ソーワイヤの簡易切断試験結果を示す。■が開発品A、●が開発品Bであり、二つは砥粒付着率が異なる。開発品Aは開発品Bより砥粒付着率が高い。図中の矢印（赤色）が従来電着法による従来品の切断速度水準を示している。

開発品Aも開発品Bも、切断面積が小さい部分では、切断速度が緩やかに上昇している。これは、切断初期はダイヤモンド砥粒が露出してないことによるものと考えられる。切断速度は、面積増大（時間経過）により、ある速度へ向かって飽和していくように見える。この飽和した水準が、ダイヤモンド砥粒がほぼ露出した水準といえる。

図中の破線部では、切断速度の劣る開発品Bでも、従来品の水準に達している。開発品Aでは、従来品の約1.2倍の切断速度となっており、更に上昇する傾向も見られる。切断速度が、従来品の約1.2倍となっていることから、切断時間は従来技術の83%程度（5/6）となると見込まれる。また、図中の破線部以降においては、開発品Aの切断速度水準は低下しておらず、安定して切断速度が継続している。このことから、開発品を用いた場合に、ウェハー1枚あたりに必要とされるソーワイヤの長さを減少させることができると期待できる。

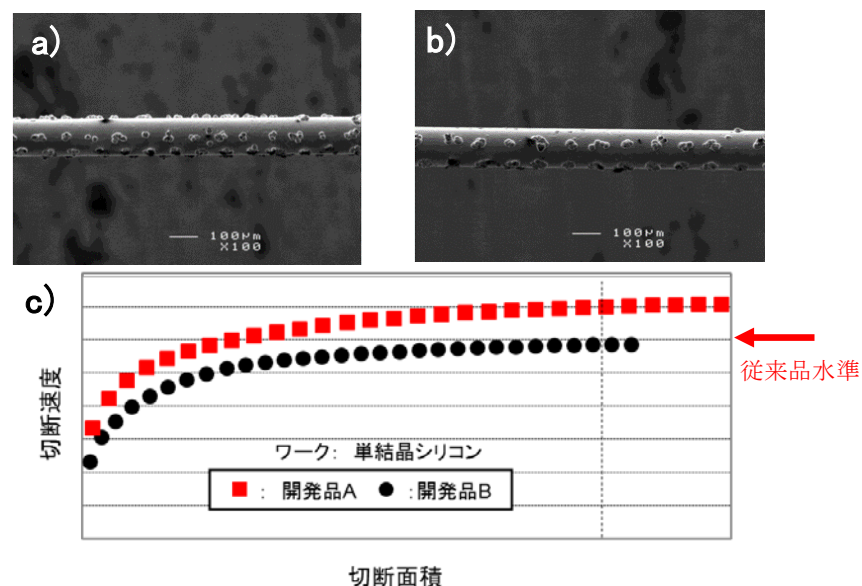


図2-4-3 直径  $120\mu\text{m}$  ワイヤ簡易切断試験

a) 開発品A SEM写真、 b) 開発品B SEM写真

c) 簡易切断試験結果

## 2-4-2 コスト見積もり

本事業での開発プロセスでは、切削コストに関わる項目として、ソーワイヤ生産速度、ダイヤモンド砥粒使用量、めっき廃液処理費用、砥粒付着用インク・ヘッド費用といった項目がある（表2-4-1）。これらについて、コストダウンが可能となる。表のコストアップとなる部分については、本事業でヘッド組立自動化装開発してコストダウンを図れており、製造コスト削減 1/2 以下が見込まれる。

表 2-4-1 コスト見積もり

項目	切削コストへの影響
ソーワイヤ生産速度	高速化(5m/min~)によるコストダウン
ダイヤモンド砥粒使用量	使用量削減によるコストダウン 1/10程度
めっき廃液処理費用	処理費用低減によるコストダウン
インク・ヘッド費用	従来技術にない費用でコストアップ <small>※ヘッド組立自動化装置開発によりコストダウン</small>

\* 従来技術のソーワイヤ生産速度を2.5m/minとして想定

## 最終章 全体総括

本事業によりスーパーインクジェットを用いたソーワイヤへの砥粒配置技術の開発を進め、ソーワイヤ上へダイヤモンド砥粒の配置制御を施した固定砥粒型ソーワイヤを試作し、その切削能力の評価を行った。開発プロセスによる試作品は、ダイヤモンド砥粒がランダムに固定される従来技術による固定砥粒ソーワイヤと比較して、切削能力が向上することを確認した。また、従来技術を比較して切削コスト削減の見通しを立てた。これにより、開発プロセスの有効性を実証することができた。

平成 23 年度においては、ベース装置の開発において、ソーワイヤの巻取り搬送速度を可変する機構設計と装置作製を行った。砥粒付着用インクのベースとなるインクの選定においては、めっき工程前における砥粒付着を実現した。多連ヘッドの開発では、6ヘッドのインク吐出用ヘッドで吐出液滴サイズ 10 $\mu$ m を実現した。

平成 24 年度においては、ベース装置へ多連ヘッド組込を行い、走行ソーワイヤ上へのインク吐出を可能にした。巻取搬送速度 5.0 m/min においてインク吐出と砥粒付着を実現した。砥粒付着用インクの開発では、樹脂インクを砥粒付着インクとした。ソーワイヤ上へのインク吐出および砥粒付着を行った後、めっきによる砥粒固定を行い、めっき工程後の砥粒付着率を改善した。

最終年度においては、ベース装置へめっき装置の組込みを行い、めっき工程のタンドム化を実施した。また、ワイヤ上の砥粒観察画像からインク吐出条件を変化させるフィードバック制御機構を組み込んだ。これらの実施により、ベース装置を用いて 100 $\mu$ m 以下のピッチでソーワイヤ円周状にパターン描画を実現した。ソーワイヤ上へのパターン描画においては、5m/min 以上の巻取り搬送速度に対応する描画を可能にした。また、インク吐出、砥粒付着、砥粒本固定の条件を整えると、めっき後の砥粒付着率が十分な水準になることが確認できた。平成 25 年度、これまでの成果に基づき特許出願を行った。

また、スーパーインクジェットを用いて砥粒配置制御を施したソーワイヤの製造コストの見積りを行い、従来の電着法固定砥粒方式と比較して製造コスト 1/2



以下となる見通しを立てた。また、砥粒配置制御を施したソーワイヤの切削能力の評価を行い、切削速度において従来技術を上回る性能を確認した。シリコン材において従来技術の5/6の切削時間が得られることを明らかにした。

今後、試作から量産へ移行するための技術開発を継続する。

#### 参考文献および引用文献

- [1] 「中国地域の FPD 関連産業における太陽電池分野の参入可能性等調査」,  
中国経済産業局（平成 22 年 3 月）
- [2] 諏訪部仁、石川憲一、山坂庄英, 「フッ素樹脂を用いたスパイラル状ダイヤモンド電着ワイヤ工具の開発」, 砥粒加工学会誌, 第 43 巻, 第 10 号（1999 年）
- [3] European Photovoltaic Industry Association のホームページ,  
EPIA PUBLICATIONS 「SOLAR GENERATION 6」,  
<http://www.epia.org/>, European Photovoltaic Industry Association
- [4] 環境ビジネス.jp 「太陽光発電・太陽電池ニュース」  
<http://www.kankyo-business.jp/news2010/20100909d.html>, 株式会社日本ビジネス出版
- [5] 矢野経済研究所のホームページ 「照明用途白色LED市場に関する調査報告 2008」, <http://www.yano.co.jp/press/press.php/000433>, 株式会社矢野経済研究所