



PDMS モールドを用いた液滴室温リバーサルマイクロコンタクトプリント リソグラフィによる DLC ドットアレイの作製 舞鶴工業高等専門学校

専攻科 総合システム工学専攻 電気電子システム工学コース 1 年 吉田 圭汰

電子制御工学科 5 年 筒井 舜平、橘高 雅史、岩佐 青熙

電子制御工学科 / 電気電子システム工学コース / 機械制御システム工学コース 清原 修二

1. はじめに

平成29年9月上旬、THE 高専@ SEMICON Japan 2017 に出展するために応募しました。10月中旬に東京エレクトロン FE 株式会社の弓田敦氏より、厳正なる審査の結果、出展することが決まった旨の連絡があり、その後、協賛企業として株式会社堀場製作所とコラボするため、株式会社堀場エステックの横井雅樹氏とメールでやり取りしながら、出展の準備を進めました。

今年も学生が研究成果をプレゼンテーションをする機会を与えられ、プレゼン大会を実施するとのことでした。

今年は、THE 高専@ SEMICON Japan が開催される前に後期中間試験が実施されたため本科学生が参加できたのは大変良い機会が得られました。そのため清原研究室の専攻科 総合システム工学専攻 電気電子システム工学コース1年生1名と本科生3名を参加させることにしました。専攻科生は国内でのプレゼンテーションを経験しているので、大きなプレッシャーにはならないと思い、また学生に多くの発表の経験を積ませるために出展することにしました。

本研究室は、豊橋技術科学大学、産業技術総合研究所との産学官共同研究を遂行しており、本研究室で開発した液滴室温硬化ナノインプリントリソグラフィによるマイクロ・ナノ機能性ダイヤモンドライクカーボン (Diamond-like Carbon : DLC) デバイスの開発をしています。また、試作開発したポータブルコンパクトナノインプリントシステムを用いて、主に次世代フラットパネル用 DLC エミッタ、医療用 MEMS 用摺動部品である DLC マイクロギヤの作製を目指しています。

2. 出展内容

2.1 液滴室温硬化ナノインプリントリソグラフィによる DLC ドットアレイの作製

これまで本研究ではスピンコート法によるポリジメチルシロキサン (Polydimethylsiloxane : PDMS) モールドを用いた室温硬化ナノインプリントリソグラフィ (Room-temperature Curing Nanoimprint Lithography : RTC-NIL) による DLC の超微細加工プロセスについて検討している。しかし、RTC-NIL ではスピンコート時に、高価な転

写材料の大半を飛ばしてしまうことや、転写パターンの残膜層が厚いため残膜層除去プロセスが必要という欠点があることがわかった。そこで、PDMS モールドを用いた液滴室温ナノインプリントリソグラフィ (Droplet Room-temperature Nanoimprint Lithography : DRT-NIL) を新たに提案した。PDMS は透過性がある多孔質材料であり、室温転写材料であるポリシロキサン (Polysiloxane) の溶媒を蒸発させることができるため、DRT-NIL に適していると考えられる。また、DRT-NIL はスピンコーターを必要とせず、滴下量により残膜層を調整することができる可能性がある。そこで本研究では、DRT-NIL による最適なインプリント条件を見出し、DLC ドットアレイの作製について検討した。

室温で徐々に硬化するポリシロキサン [HSG-R7-13, 日立化成(株)] を室温転写材料に用いた凹形状ピットアレイパターンを有する PDMS [KE-106, 信越化学工業(株)] モールド DRT-NIL による DLC ドットアレイの作製プロセスを図1に示す。シリコンウェーハ (10 mm 角, 0.5 mm 厚) 上に T 字状フィルタードアーク蒸着により成膜した DLC 膜 [ta-

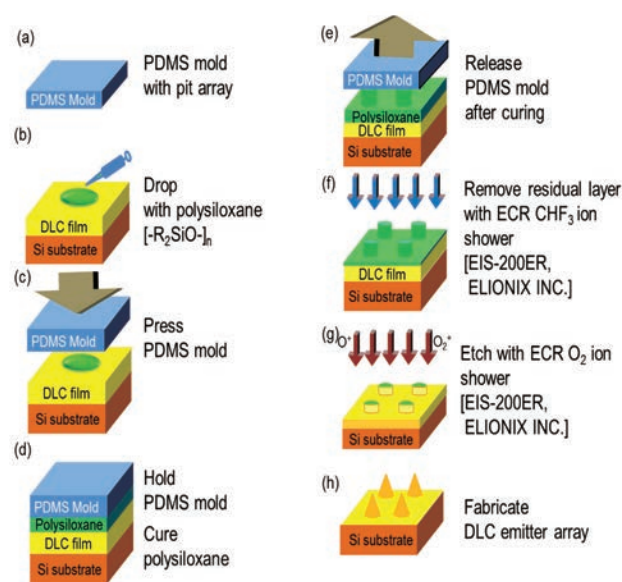


図1 PDMS モールドを用いた DRT-NIL による DLC ドットアレイの作製プロセス

C, 10 mm 角, 500 nm 厚, 表面粗さ Ra 2 nm] 上に、マイクロピペットによりポリシロキサンを滴下し、本研究で作製した凹形状5 μm 径ピットパターン (27,000 個/ cm^2) を有する PDMS モールドを押し、最適なインプリント条件下で加圧した。硬化後離型し、ポリシロキサン膜上にモールドパターンを転写した。その後、モールドを離型し電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance: ECR) CHF_3 イオンシャワー [EIS-200ER, (株)エリオニクス] で残膜層を除去後、ECR O_2 イオンシャワーにより DLC 膜を加工することで DLC ドットアレイを作製した。図2 (i) は圧力 P を変化させた場合の5 μm 径ピットパターンを有する

PDMS モールド(図(a))によるポリシロキサンの転写パターンの走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope: SPM) [NanoNaviReal s, (株)日立ハイテクサイエンス] 像を示す。図2 (c) の $P = 0.5 \text{ MPa}$ でドットの高さが約450 nm の高精度なポリシロキサンの転写パターンが得られた。図2 (ii) は加圧時間 t を変化させた場合の PDMS モールドによるポリシロキサンの転写パターンの SPM 像を示す。図 (c) の $t = 15 \text{ min}$ でドットの高さが約450 nm の高精度な転写パターンが得られた。この理由として、図3に示す DRT-NIL による転写パターンの形成のメカニズムのように、室温転写材料であるポリシロキサンが PDMS モールドの微細な孔により毛細管現象で吸い上げられ、図2に示すような高精度な転写パターンが形成されたと考えられる。

走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) [ERA-8800FE, (株)エリオニクス] により残膜層を測定したところ、RTC-NIL 法に比べて1/15の厚さである30 nm の残膜層を確認できた。この結果から CHF_3 イオンシャワーによる残膜層除去プロセスが省けることがわかった。

そこで図4に示すように、ポリシロキサンの転写パターンを ECR O_2 イオンシャワー加工 (400 eV, 14 min) することで DLC ドットアレイパターンを形成した。直径5 μm 、高さ500 nm の高精度な凸形状の DLC ドットアレイを作製することができたが、先鋭化したエミッタアレイは作製できなかった。

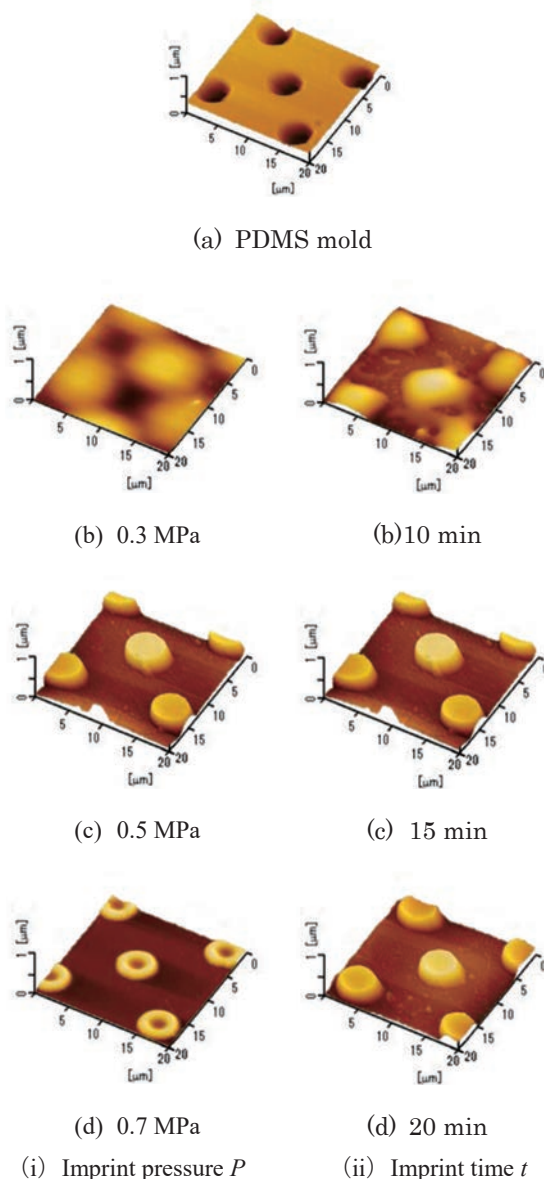


図2 PDMS モールドを用いた DRT-NIL によるポリシロキサンマスクパターンの SPM 像

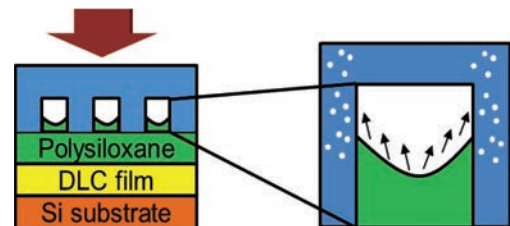


図3 ポリシロキサンのマスクパターンの形成メカニズム

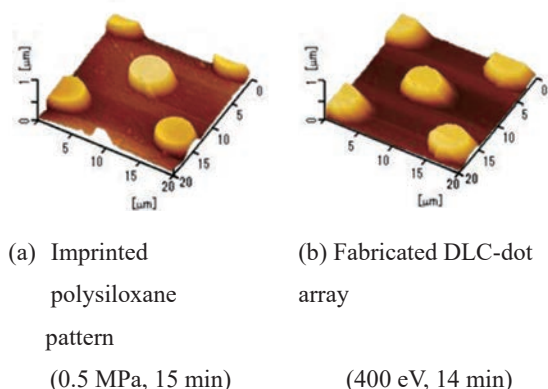


図4 PDMS モールドを用いた DRT-NIL による DLC ドットアレイの SPM 像



本研究で開発した PDMS モールドを用いた DRT-NIL を用いたプロセスでは CHF_3 イオンシャワーによる残膜層除去プロセスが省け、さらに高スループット化できることがわかった。また、高精度な凸形状 DLC ドットアレイを作製できることを確認できた。今後は次世代フラットパネルディスプレイ用 DLC エミッタアレイの開発を目指す。

今後、このプロセスが次世代フラットパネルディスプレイ用のナノエミッタの生産ラインに用いられる可能性が大いに期待できる。

2.2 PDMS モールドを用いた液滴室温リバーサルコンタクトプリントリソグラフィによる DLC ドットアレイの作製

これまでに本研究で開発した PDMS モールドを用いた室温硬化ナノインプリントリソグラフィ (Room-temperature Curing NanoimprintLithography: RTC-NIL) ではダイヤモンドライクカーボン DLC 膜の超微細パターンを形成できることがわかっている。しかし、従来の微細加工プロセスでは、残膜層が数百 nm あるという問題が生じる。そこで、室温リバーサルマイクロコンタクトプリントリソグラフィ (Room-temperature Reversal Micro Contactprint Lithography: RTRM-CL) を提案した。しかし RTRM-CL でも転写パターンに 540 nm の残膜層があった。残膜層が厚いと、イオンシャワー加工後の DLC 膜のパターンの精度が悪くなってしまう。そこで、本研究では PDMS の離型性、ポリシロキサン (Polysiloxane) の粘性を応用した PDMS モールドを用いた液滴室温リバーサルマイクロコンタクトプリントリソグラフィ (Droplet Room-temperature Reversal Micro Contactprint

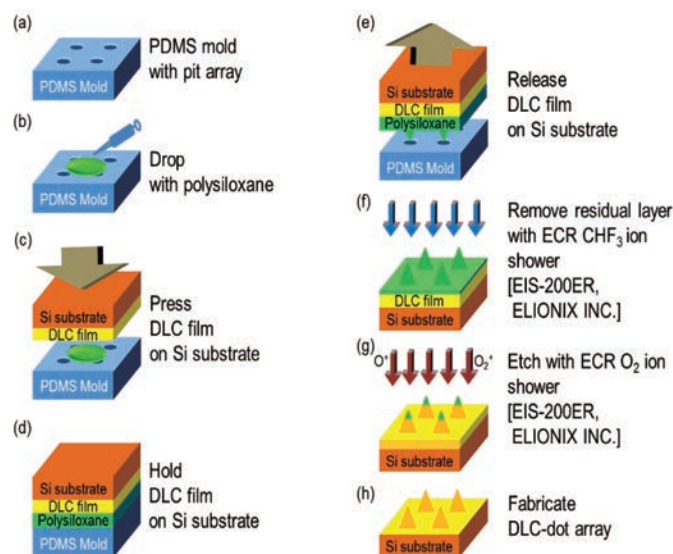


図5 PDMS モールドを用いた DRTRM-CL による DLC ドットアレイの作製プロセス

Lithography: DRTRM-CL) を提案した。この DRTRM-CL の最適なインプリント条件を見出し、DLC ドットアレイの作製について検討し、次世代フラットパネルディスプレイ用 DLC エミッタとしての開発を目指す。

室温で徐々に硬化するポリシロキサン [HSG-R7-13, 日立化成(株)] を室温転写材料に用いた凹形状ピットアレイパターンを有する PDMS [KE-106, 信越化学工業(株)] モールドを用いた DRTRM-CL による DLC ドットアレイの作製プロセスを図5に示す。

まず、凹形状 $5\text{ }\mu\text{m}$ 径ピットパターン ($79,296\text{ 個}/\text{cm}^2$) を有する PDMS モールドを作製し (a)、その PDMS モールドに転写材料ポリシロキサンを滴下した (b)。そこにシリコンウェーハ (10 mm 角, 0.5 mm 厚) 上に T 字状フィルタードアーク蒸着により成膜した DLC 膜 [ta-C, 10 mm 角, 約 500 nm , 表面粗さ $R_a = 2.0\text{ nm}$] を上から加圧 (c)、保持し (d)、硬化後離型した (e)。このように、ポリシロキサンのコンタクトプリントパターンを形成した。その試料を電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance: ECR) イオンシャワー加工装置 [EIS-200ER, (株)エリオニクス] で CHF_3 イオンシャワーにより残膜を除去し (f)、その後 O_2 イオンシャワーを施し (g)、DLC ドットアレイを作製した (h)。

本研究では DRTRM-CL の最適な条件について検討した。コンタクトプリント時間: t , コンタクトプリント圧力: P を変化させたときの検討結果の走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope: SPM) [NanoNaviReal s, (株)日立ハイテクサイエンス] 像とその断面プロファイルを図6に示す。

図6 (i) より、より先鋭化したドットアレイを得るためには、加工速度のイオン入射角依存性からパターンの形状は円柱形ではなく円錐形である方がより適していると判断した。そのため10、20 min は最適ではなかった。その要因として10 min の場合では、単純にインプリント時間が短く、転写パターンの先端が PDMS モールドの凹部分の最深部に到達するまでに至らなかったと考えられる。また、20 min の場合ではインプリント時間が長く、転写パターンの先端が必要以上に押し付けられ、平面になってしまったと考えられる。以上のことから最適コンタクトプリント時間は $t = 15\text{ min}$ であることがわかった。

図6 (ii) より、コンタクトプリント圧力が 0.50 MPa の場合、PDMS モールドの奥までポリシロキサンが入り込まず、さらに重力の作用により円錐形が形成されたと考えられる。また、コンタクトプリント圧力が 0.55 MPa の場合、PDMS モールドの凹部分をポリシロキサンが満たすことで凹の形に添った円柱形が形成されたと考えられる。以上のことから最適コンタクト圧力は $P = 0.50\text{ MPa}$ であることがわかった。

本研究で使用した直径 $5\text{ }\mu\text{m}$ のドット $79,296\text{ [個}/\text{cm}^2]$ を

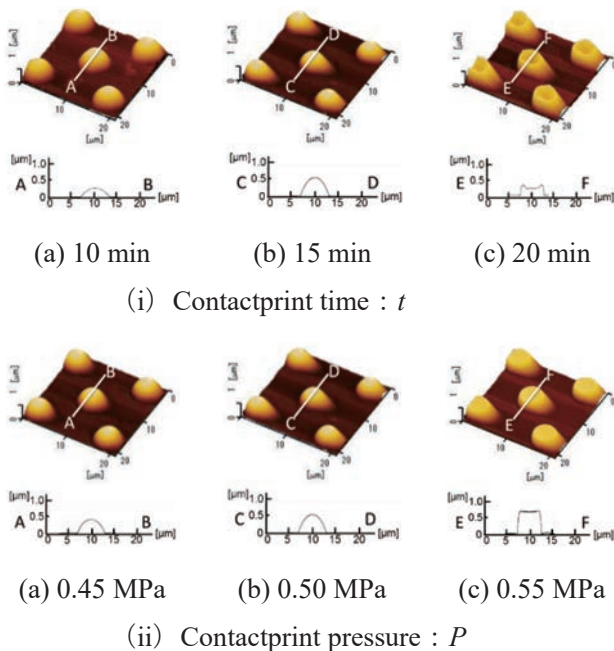


図6 PDMS モールドを用いた DRTRM-CL によるポリシロキサンパターンの SPM 像とその断面プロファイル

有するガラス状炭素 (Glass-like Carbon: GLC) マスターモールドを用いて作製した PDMS モールドの SPM 像を図7(a)、最適なインプリント条件 (15 min, 0.5 MPa) によるポリシロキサンのコンタクトプリントパターンを図7 (b) に示す。残膜層を測定したところ、RTRM-CL 法に比べて1/18の厚さである30 nm まで大幅に薄くすることができた。この結果から、CHF₃イオンシャワーによる残膜層除去プロセスが省けることがわかった。O₂イオンシャワー加工 (400 eV, 9.5

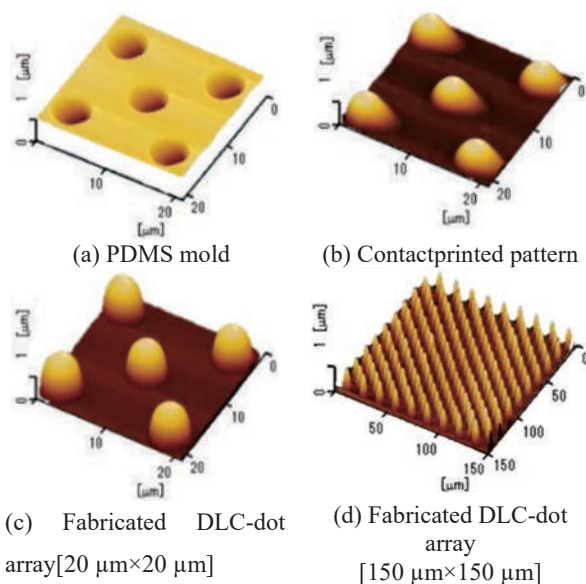


図7 PDMS モールドを用いた DRTRM-CL による DLC ドットアレイの SPM 像

min) をすることで、図7 (c)、(d) に示すように先鋭化した DLC ドットアレイの作製に成功した。

本研究で開発した PDMS モールドを用いた DRTRM-CL により、円錐状のポリシロキサンのコンタクトプリントパターンを得ることができた。これを ECR O₂イオンシャワー加工することで先端半径200 nm、直径5 μm、高さ500 nm の高精度な先鋭化した DLC ドットアレイを作製できた。

今後は次世代フラットパネルディスプレイ用 DLC エミッタアレイの開発を目指す。

2.3 THE 高専 @SEMICON Japan 2017

平成29年12月13(水) から15日(金) の3日間, SEMICON Japan 2017 が東京ビックサイトで開催され、今年は9校の高専が出展した。13 日午前9時50分から、THE 高専 @ SEMICON Japan のブースで朝礼が行われた。初日と2日目にプレゼン大会が実施されることが伝えられ、その詳細な説明があった。

図8および図9は本校の展示ブースと学生のプレゼンター



図8 舞鶴工業高等専門学校の展示ブース



図9 プレゼンテーションの様子



ションの様子を示す。大学の先生方や企業の技術者ならではの視点でアドバイスや質問をいただき、今後の研究の糧になった。多くの方々に試作したポータブル室温ナノインプリントシステムに大変興味を持っていただいた。また、本校OBの方や近隣の企業の方がブースを訪ねていただき、現在の学校の様子などを懐かしく聞き入れていた。

3. 学生の感想

電気電子システム工学コース 1 年

よしだ けいた
吉田 圭汰

SEMICON Japan には初めての参加だったのでとても緊張しながら会場入りしました。しかし、自分のプレゼンが多くの半導体関連企業の方々に見ていただけるのはとてもうれしいもので、1時間ほど経つとほどよい緊張感でプレゼンを行えるようになりました。プレゼンの内容についても評価され敢闘賞をいただいたことは、今後の励みになりました。また、半導体関連企業が出展しておられるブースを見学し、これからも半導体関連企業は成長し続けると強く実感し、その中で自分の行っている研究がどのような分野で役に立つのかを確認することができました。最後にSEMICON Japan の運営をしてくださった方々、ブースの提供をいただいた協賛企業の方々に深くお礼申し上げます。ありがとうございました。

電子制御工学科 5 年

つつい しゅんぺい
筒井 舜平

自分たちが進めてきた研究を、業界のプロの方に聞いていただき、アドバイスを頂ける場はたいへん貴重な経験になりました。最後には敢闘賞をいただき、今後の研究の励みになりました。また、半導体業界の様々な企業をみて、半導体業界の将来的な可能性を改めて感じることができました。

今回の経験を生かし、自分の力をさらに伸ばしていきたいと思います。最後に、THE 高専 @SEMICON Japan の企画運営をしてくださった方々、ブースの提供等してくださった方々、全ての人に感謝します。ありがとうございました。

電子制御工学科 5 年

きつたか まさふみ
橋高 雅史

私は、ブースの準備を含めた12/12、12/13の2日間参加し、ナノテクノロジーに関する発表を行いました。

私は学校外部での発表も初めてであったので緊張しました。一方、展示物として自分が卒業研究として製作した装置を持ち込みました。その装置に関する意見やアドバイスも多く頂き、自分の研究に役立つ貴重な機会となりました。

また、他高専の研究内容も知ることができ、他高専交流

としていい経験ができたと思います。個人的にも興味がある研究が多く、どれも見入ってしまうような発表でした。外部での発表も初めてな私にとっては良い刺激となりました。

企業様方の出展もどれもこれも素晴らしい展示で、技術の先端に触れているかのように感じました。本研究室で扱っているナノテクノロジーに関する知識も深まり、非常に有意義な時間をすごせました。

電子制御工学科 5 年

いわさ せいき
岩佐 青熙

私は、12/12~12/15に開催されたSemicon Japan 2017に出展者として12/14、12/15の2日間参加し、卒業研究の課題である微細加工技術に関する発表を行いました。半導体関連の大手企業の方々に発表を聞いていただき、発表内容および発表の仕方について評価をいただきました。また、企業ブースでは半導体製造関連の最新の製品や現在取り組まれている技術の紹介などをしていただきました。私が現在内定をいただいている会社も半導体製造の自動機の開発・製造が主であるので、研究内容の発表に評価をいただいたことや現在の半導体業界で注目されている最新の技術についてのお話を伺うことができたのは、非常に貴重な経験となりました。

4. おわりに

専攻科生は、国内における学会発表を経験しているので、THE 高専 @SEMICON Japan 2017の展示ブースにおいても訪問者の方々に、わかりやすい用語を用いながら説明していました。プレゼン大会では、清原研究室で試作開発したポータブルコンパクトインプリントシステム(4号機: ナノテク教育用に開発し持ち運びを可能とした)の実機を用いた説明がとても分かりやすかったです。この功績により、プレゼン大会で敢闘賞を受賞したことは最大の励みになりました。

最後に、THE 高専 @SEMICON Japan 2017の出展に際し、多大なる協力をいただいた株式会社堀場エステック 横井雅樹氏に対し深く感謝いたします。また、懇親会では本校OBでもある株式会社堀場エステック 家城孝之氏に出席いただき、お礼申し上げます。3日間の短い期間でしたが、とても有意義な展示会になりました。今回の経験を糧にして、清原研究室から海外で活躍するエンジニアが誕生することを楽しみにしています。THE 高専 @SEMICON Japan が今後とも継続され、多くの高専が半導体製造に関連する研究を出展し、発展することを望みます。