

令和 6 年度 TC 論文

機械系クリーンルーム管理運営の改善と
表面改質およびエッチング技術による
マイクロプロセス系研究支援

Improvement of Management and Operation
for Mechano-Micro Processing Cleanroom
and
Research Support for Microprocess System
Through Surface Modification and Etching Technologies

TC カレッジ マイクロプロセス系コース
遠西 美重

東京科学大学 リサーチインフラ・マネジメント機構
コアファシリティセンター マイクロプロセス部門

目次

第1章 緒論

1.1 大学における機械系クリーンルーム管理運営の問題

1.1.1 機械系クリーンルームメカノマイクロプロセス室の概要

1.1.2 半導体メーカーのクリーンルームとメカノマイクロプロセス室の比較

1.2 マイクロプロセス技術支援

1.2.1 表面改質技術

1.2.2 ドライエッチング技術

1.3 本論文の目的

1.4 本論文の概要

第2章 大学における機械系クリーンルーム管理運営の改善

2.1 大学における機械系クリーンルームの現状と問題

2.1.1 大学における機械系クリーンルームの特徴

2.1.2 大学における機械系クリーンルームの問題点

2.2 清浄度の向上

2.2.1 電子デバイスメーカーの現場の取り組み

2.2.2 現状を踏まえた上での改善例

2.3 装置維持・保全方法の改善

- 2.3.1 これまでに起きた主なトラブル事例
- 2.3.2 故障対策並びにメンテナンスの改善
- 2.4 運営資金の改善
 - 2.4.1 運営資金の構成
 - 2.4.2 メカノマイクロプロセス室の予算項目の見直しと効果
- 2.5 第2章まとめ

第3章 表面改質技術の研究支援

- 3.1 メカノマイクロプロセス室における表面改質の技術支援
 - 3.1.1 異種材料接合の手法と問題点
 - 3.1.2 自作の固体ソース H₂O プラズマ装置の開発
- 3.2 H₂O プラズマ装置を用いた研究支援の例
 - 3.2.1 マイクロ流路の作製におけるガラスと PDMS の接合のための表面改質
 - 3.2.2 フレキシブル電極の作製における電極金属成膜前のポリイミド表面の改質
- 3.3 第3章まとめ

第4章 ドライエッチング技術の研究支援

- 4.1 メカノマイクロプロセス室におけるドライエッチング装置
 - 4.1.1 RIE および Deep-RIE 装置の概要

4.1.2 ドライエッチング技術の問題点と解決へのアプローチ

4.2 ドライエッチング技術の研究支援の例

4.2.1 TiO₂ ピンホールエッチングの技術支援

4.2.2 格子ブレードのための垂直形状の Si 貫通エッチングの条件検討

4.3 第4章まとめ

第5章 総括と展望

5.1 まとめとメカノマイクロプロセス室の今後の課題

5.2 高度技術専門人財としてのマイクロプロセス系 TC が目指すべき研究支援の在り方

参考文献

成果発表一覧

謝辞

第1章 緒論

1.1 大学における機械系クリーンルーム管理運営の問題

1.1.1 機械系クリーンルームメカノマイクロプロセス室の概要

はじめに、本論文で取り上げる大学の機械系クリーンルームである東京科学大学（旧東京工業大学）メカノマイクロプロセス室について、設立からこれまでの沿革を述べる。東京工業大学 精密工学研究所（以下精研：現在の東京科学大学 総合研究院 未来産業技術研究所）は、精密機械研究所（1939 年創設）と電気科学研究所（1944 年創設）が 1954 年に合併した研究組織で、東京工業大学附置研究所の一つであった。設立以来、精研は「精密工学における学理の究明と応用」をミッションとし、さまざまな研究成果を創出し、産業界や学界の発展に多大な貢献をしてきた。精研は機械工学、制御工学、電子工学、情報工学、材料工学などの広範な研究分野の教員から構成されていることが特徴である。1991 年に「精密と知能を融合した新しい精密工学」の創成をめざして、英文名称を「Precision and Intelligence Laboratory（略称：P&I Lab.）」に変更し、1993 年に従来の研究体制から知能化学、極微デバイス、精機デバイス、高機能化システム、先端材料の 5 部門 15 研究分野の体制に改組した。1995 年には文部省研究環境高度化支援プログラムの一環として、バイオ、メカトロニクスの融合的なデバイス研究のためのクリーンルームである真空加工システム室（105 m²）が稼働を開始した。このクリーンルームが名称を変更し、メカノマイクロプロセス室となる。図 1.1 に 1995 年の真空加工システム室設立から 2024 年 8 月までのメカノマイクロプロセ

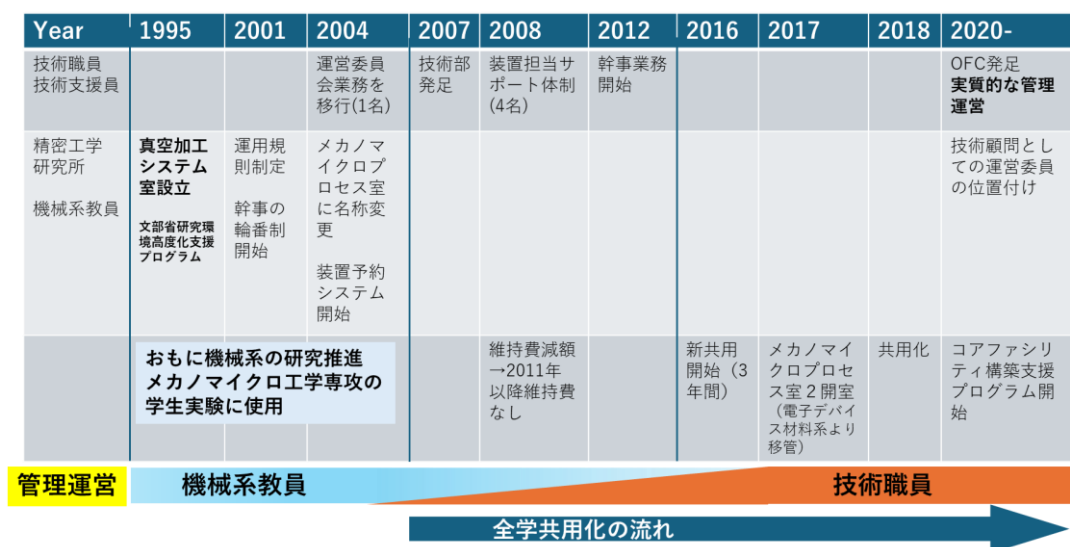


図 1.1 メカノマイクロプロセス室の管理運営の沿革

ス室の管理運営の沿革を示す。設立当初、真空加工システム室は精研の機械系研究室の研究推進と大学院総合理工学研究科精密機械システム専攻（のちのメカノマイクロ工学専攻）の学生実験に使用されており、精研内の機械系研究室教員の運営委員会メンバーが主体となって運営された。2007 年以降は大学法人化とともに集約された技術部半導体 MEMS プロセス技術センター（現在のリサーチインフラ・マネジメント機構 コアファシリティセンター マイクロプロセス部門）による装置の維持・保全および講習が行われるようになり、2008 年からは全学に開放された。全学開放とともに文部省研究環境高度化支援プログラムの維持費や精研の補助は減額され、現在ではメカノマイクロプロセス室の運営資金は使用研究室から徴収する年会費からのみとなる。2012 年からは、運営の取りまとめを行う幹事業務を教員に代わって技術職員や技術支援員が行うようになった。2017 年には精研の電子デバイス材料系が中心となって管理していた材料評価室をメカノマイクロプロセス室 2（91 m²）として拡大し、機械系研究室がメインユーザーの限定的な利用から、学内外に幅広く開放した全学的かつ広範囲な研究支援設備へと進化した。メカノマイクロプロセス室は、2018 年には文科省の先端研究基盤共用促進事業の対象となり、3 年間の共用化のための整備費用の補助を受けて装置の充実を図り、複数の研究分野で利用できるハブ拠点としての機能を拡充してきた。加えて 2020 年より、研究機関全体の研究基盤として戦略的に導入・更新・共用する仕組みを強化（コアファシリティ化）する目的の文科省コアファシリティ構築支援

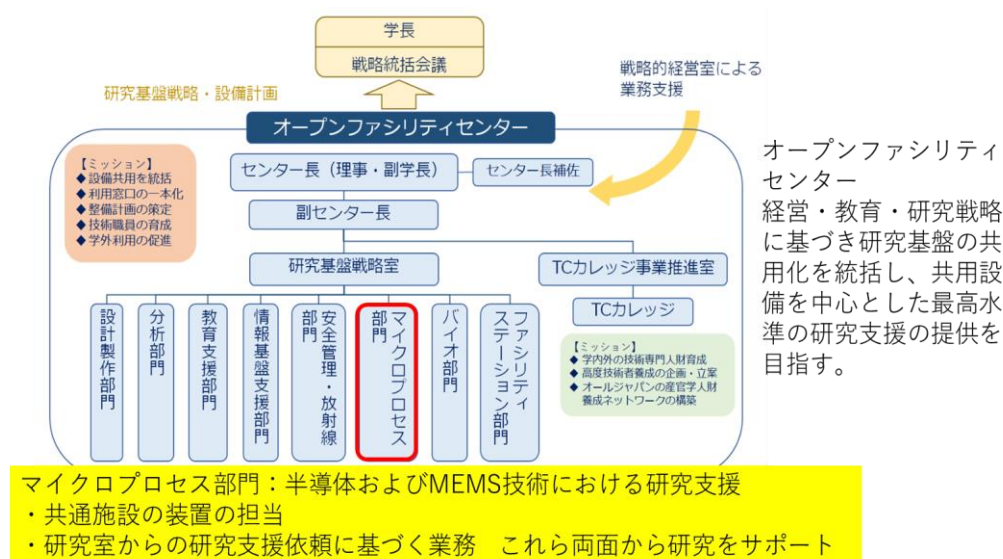


図 1.2 マイクロプロセス部門の位置づけ（2024 年 8 月） [1]

プログラムに技術部から改組したオープンファシリティセンターが採択され、技術職員が内外に開放された共用クリーンルーム設備としてのメカノマイクロプロセス室の管理運営を主体的に担うこととなった。

次に筆者が所属するマイクロプロセス部門の位置付けを述べる。マイクロプロセス部門は、「半導体プロセス技術によるマイクロデバイス開発支援」を主な業務とする研究支援部門である（本学規則による）。2007年に技術職員の業務の全学的な見直しにより、技術職員が集約され、技術部が設置された。これに伴い、メカノマイクロプロセス室に関わる半導体・MEMS支援センターが設立され、プロセス技術・評価分析技術の支援を行うようになった。また2012年からは並行してメカノマイクロプロセス室の管理・運営も行うようになった。その後、文科省第6期科学技術基本計画を見据えた中で、研究力向上に資する基盤的な力の更なる強化が求められ、2020年には技術部が発展的に解消され、オープンファシリティセンターが設立された。図1.2に研究基盤戦略の仕組みのもと、2024年6月時点での筆者が所属するオープンファシリティセンター・マイクロプロセス部門の位置づけ



図 1.3 メカノマイクロプロセス室および装置群 [2]

[1]を示す。オープンファシリティセンターは、経営・教育・研究戦略に基づき研究基盤の共用化を統括し、共用設備を中心とした最高水準の研究支援を目指すものである。元々、共同利用のクリーンルームであったメカノマイクロプロセス室も共用設備の一つとして組み込まれ、メカノマイクロプロセス室の管理運営は未来産業技術研究所の手を離れ、マイクロプロセス部門が中心となって行うようになった。マイクロプロセス部門の技術顧問は、引き続きメカノマイクロプロセス室設立の中心であった精密工学研究所の流れを引く未来産業技術研究所の機械系教員が担っており、未来産業技術研究所の事務室にも様々なサポートを頂いている。

図 1.3 にメカノマイクロプロセス室および装置群を示す[2]。MEMS デバイスでは、主にリソグラフィ、成膜、エッチングのプロセスを複数回繰り返して作製が行われる。メカノマイクロプロセス室では、デバイス作製のためのプロセスに必要な装置や評価に使用される装置が備わっており、年会費を収めた学内外の研究室の利用者は講習を受講後、利用時間内で自由に装置を使用することができる。経験の浅い利用者はクリーンルーム環境や装置の取り扱いに慣れるための時間が必要であり、デバイス作製ではトライアルアンドエラーが生じるため、条件出しや実験の失敗も含めた装置利用が可能な、自由度の高い登録年会費制とした方が、利用者にとっては都合が良い。図 1.4 に 2002 年度と 2023 年度の登録研究室の研究分野の割合を示す。共用化に伴い、学内外で機械系以外でも利用する研究室が増えた。研究テーマがメカノマイクロプロセス室の装置で作製できるものであれば、機械系以外でも毎年利用する研究室もある。2023 年度は学内 20 研究室 63 名、学外 2 研究室 9 名の登録があった。

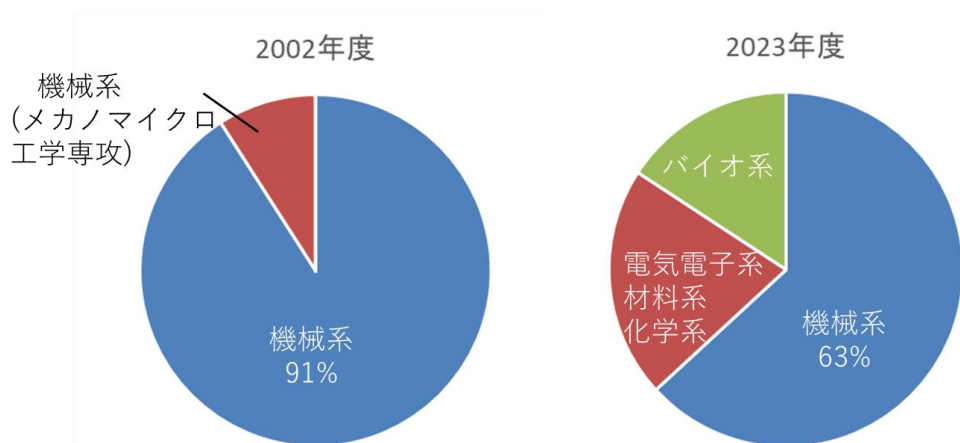


図 1.4 メカノマイクロプロセス室における登録研究室の研究分野の割合

1.1.2 半導体メーカーのクリーンルームとメカノマイクロプロセス室の比較

筆者は大学卒業後、電気メーカーの電子デバイス系クリーンルームで業務を行った経験がある。電気メーカーでの所属部署は生産現場と直接の関わりはなかったが、工場内のクリーンルームに実験室があり、主に試作品の評価や故障解析を行い、量産工場に赴く機会もあった。2010年には東京工業大学 精密工学研究所の研究支援推進員に着任し、クリーンルーム従事経験者としてメカノマイクロプロセス室の業務に携わるようになった。以下に大学の機械系クリーンルーム着任時に実感した電子デバイス系クリーンルームとの違いについて、清浄度と目的の比較を通して述べる。

表 1.1 に清浄度クラスと上限濃度[3]、表 1.2 に産業分野と求められる清浄度[4]を示す。筆者が業務を行っていた半導体工場がクラス 3-5 であったのに対し、機械系クリーンルームであるメカノマイクロプロセス室はクラス 6、メカノマイクロプロセス室 2 はクラ

表 1.1 清浄度クラスと上限濃度 [3]

清浄度クラス		上限濃度 (個/m ³)					
ISO 14644-1 (2015)	米国連邦規格 (Fed.Std.209E)	粒径					
		0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	1.0 μm	5.0 μm
Class1		10	—	—	—	—	—
Class2		100	24	10	—	—	—
Class3	1	1,000	237	102	35	—	—
Class4	10	10,000	2,370	1,020	352	83	—
Class5	100	100,000	23,700	10,200	3,520	832	—
Class6	1,000	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
Class7	10,000	—	—	—	352,000	83,200	2,930
Class8	100,000	—	—	—	3,520,000	832,000	29,300
Class9		—	—	—	35,200,000	8,320,000	293,000

Fed. Std.209Eは2001年に廃止され、ISO規格に移行

表 1.2 産業分野と求められる清浄度 [4]

産業分野	求められる清浄度	
半導体工場	クラス3-5 (1-100)	集積回路、エッチング、成膜や研磨などにおけるハイレベルな塵埃管理
電子部品工場	クラス5-7 (100-10,000)	プリント基板、ディスク、コンデンサーなどの製品の生産性向上と品質管理
光学機械工場		レンズやカメラ、レーザーなど高精度製品への対応と品質管理
精密機械工場		時計、ロケット用部品、ミニチュアベアリングなどに対応する微細塵埃の除去と製品の品質管理
薬品・食品工場	クラス5-8 (100-100,000)	乳製品や醸造品、食肉加工における虫などの混入対策
印刷工場	クラス6-8 (1000-100,000)	製品の仕上りの向上と品質管理
自動車工場		部品製造における金属などの切粉・コゲ・くず等目に見えるもの

ス7に相当する。扱っているデバイスに対して、目的に合った清浄度であれば問題はない。しかしながら、メカノマイクロプロセス室は産業目的ではなく、利用者が使用するデバイス製作が主である。利用者は自由に入室して実験を行い、作業環境への配慮にあまり目が向けられていない。また、学生の多くは数年程度で入れ替わるため、清浄化への意識が定着しにくいことが考えられる。このように目的や利用状況は異なるが、清浄度を維持する働きかけは重要であるとする。メカノマイクロプロセス室内で作製したデバイスが不良となる原因が異物混入であるのは一例である。ポリジメチルシロキサン（PDMS）流路デバイスの作製において、鋳型の欠陥や最後に封止ができなかった原因は、いずれもゴミの混入が原因であった。上で述べたように、デバイスは複数回のプロセスを重ねて作製されるため、膨大な時間と労力が数ミクロンのゴミのせいで全て無駄になる。そうすると利用者は新たに作り直す労力と気力が残らない悪循環に陥ってしまう。利用者が所望の研究成果を得られるよう、メカノマイクロプロセス室の管理運営では、利用目的と予算が限られている大学ならではの制約に沿いながら、清浄度を上げ、維持する方向に改善していく必要がある。

1.2 マイクロプロセス技術支援

1.2.1 表面改質技術

メカノマイクロプロセス室の装置では、筆者は表面処理のためのプラズマ発生装置を担当している。プラズマ表面処理は、プラズマを用いて材料表面を洗浄・改質する表面処理の一つである。プラズマとは、固体、液体、気体に続く第4状態であり、気体を構成する分子が電離して陽イオンと電子に分かれた状態である[5]。自然現象では雷やオーロラ、身近なものでは蛍光灯などがプラズマ現象である。図 1.5 にプラズマによる表面処理の原理を示す。プラズマは気体が励起されて高いエネルギー状態を持ち、イオン、反応性ラジカル種を形成し、基板表面の中性原子と反応して汚染物の除去および官能基を付与して表面を改質

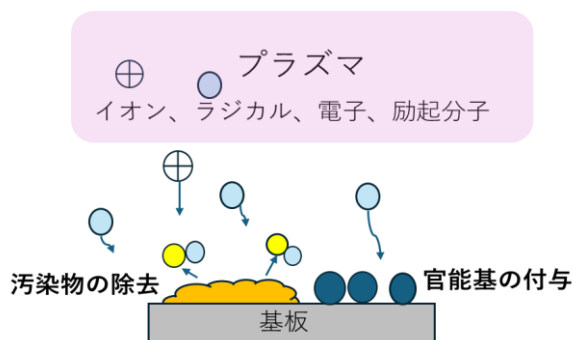
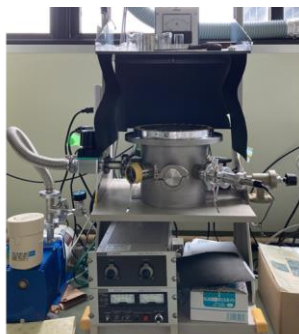


図 1.5 プラズマによる表面処理の原理

させる。メカノマイクロプロセス室では酸素ガスを用い、表面の汚染物除去や C-O, C=O, O-C=O 等の酸素含む官能基を付与することにより基板表面を親水化させるプラズマ処理を用いることがある。そのための装置として、図 1.6(a)に示す容量結合型プラズマ(CCP)装置 (SAMCO PD-10C) を使用することが多い。プラズマによる親水化を更に向上させるために、筆者らは図 1.6(b)に示す固体の水をプラズマ源とした H₂O プラズマ装置も開発した。



(a) CCP 装置 SAMCO PD-10C (1995-) (b) 自作の H₂O プラズマ発生装置 (2019-)

図 1.6 表面処理で用いられるプラズマ装置

1.2.2 ドライエッチング技術

筆者はプラズマによる表面処理技術の他に、プラズマエッチング技術も担当している。エッチングとは、基板の表面に溝やパターンを彫る加工であり、エッチング液を使用したウェットエッチングと、反応性ガスやプラズマを用いたドライエッチングがある。

図 1.7 に反応性イオンエッチング (RIE) の場合のエッチングの原理を示す。プラズマを用いたドライエッチングは、プラズマによる表面処理と類似であるが、基板方向に加速したイ

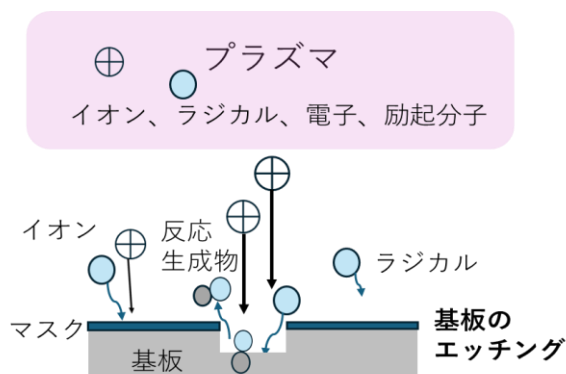
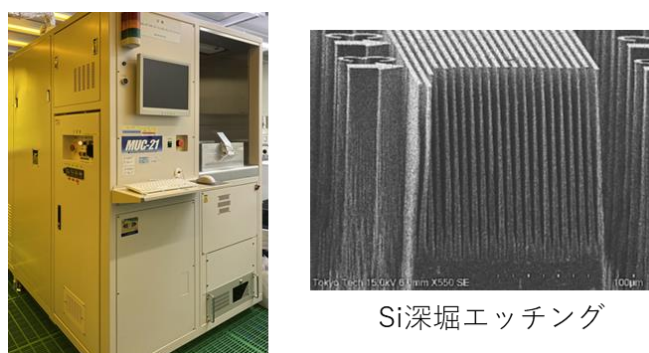


図 1.7 プラズマエッチングの原理 (RIE の場合)



(a) RIE（反応性イオンエッチング装置）
 RIE-101L（SAMCO）（1995）
 RIE-10NR（SAMCO）（2021）



(b) Deep-RIE（深堀り反応性イオンエッチング装置）
 MUC21 HRMX（住友精密工業）（2004）

図 1.8 ドライエッチングで用いられるプラズマ装置と加工例

オンによって、プラズマに含まれるラジカルと基板原子の反応を促進させ、反応生成物を除去することにより、基板をパターン通りに精密に削ることができる。

筆者がメカノマイクロプロセス室で担当してるエッチング装置は RIE 装置と深堀り反応性イオンエッチング (Deep-RIE) 装置である。図 1.8(a) に RIE 装置、図 1.8(b) に Deep-RIE 装置と加工例を示す。Deep-RIE はデポジションとエッチングを交互に行うプロセスで側壁を保護しながらエッチングできるため、深堀りエッチングが可能である。プラズマエッチングによって所望の深さや形状を得るためには、圧力、ガス流量、RF パワーなどの条件設定に工夫が必要である。条件検討などの基礎実験で得られた情報は、マイクロプロセス部門が年度末に発行するテクニカルレポートにまとめて公開し、技術情報として利用者の実験の参考に活用されている。また基礎実験の結果の一部は、内容を発展させて研究会や応用物理学会などで学内外に発表し、メカノマイクロプロセス室の新規ユーザー獲得に役立っている。

1.3 本論文の目的

本論文の目的は、オープンファシリティセンターの理念である「経営・教育・研究戦略に基づく研究基盤の共用化統括」および「共用設備を中心とした最高水準の研究支援」を実現するための具体的な取り組みを提案することにある。

第一の柱として、MEMS、光デバイス、電子デバイス、バイオ関連分野など、多岐にわたる最先端の研究を行う大学機械系クリーンルーム利用者のニーズに合致した管理運営の改善について検討する。この際、メーカー（電子デバイス分野）との比較を通じて、より効果的な運営モデルを模索する。

第二の柱として、利用研究室からの技術相談を起点にした技術支援活動において、技術的知見や研究成果につながった事例を示し、「ヒト（利用研究室や利用者、メーカー）」と「モノ（設備や装置）」のコミュニケーションを通じて主体的にアプローチを行う高度技術専門人財「テクニカルコンダクター（TC）」の研究支援の在り方を提案する。

以上を通じて、大学における機械系クリーンルームの運営と研究支援における新しい方向性を示すことを目的としている。

1.4 本論文の概要

図 1.9 に本論文の概要を示す。第 2 章では、メーカー（電子デバイス）でのクリーンルーム内の業務経験の視点から、大学機械系のクリーンルーム環境の違いを比較し、企業と異なる環境での問題点や大学ならではの運営方法の課題を示し、行った改善事例を述べる。第 3 章では表面改質の技術支援について、異種材料接合の手法と問題点を示し、接合向上のため

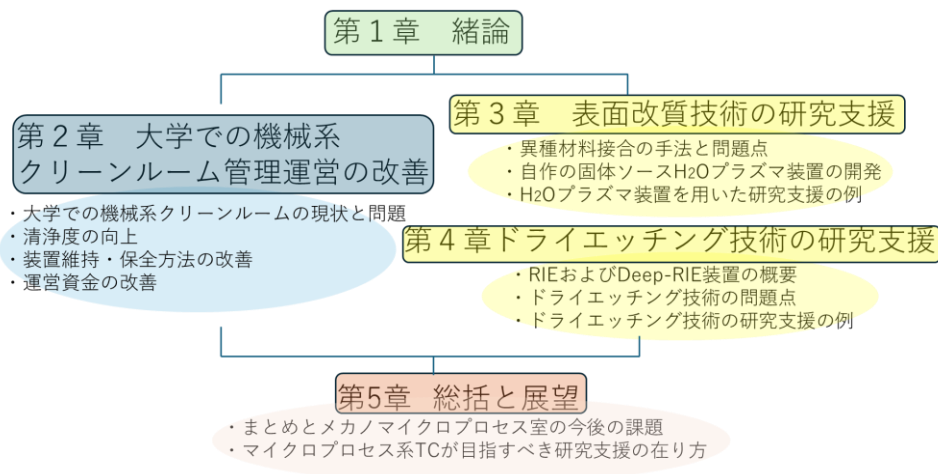


図 1.9 本論文の概要

に H₂O プラズマ装置を開発し、研究成果につながった事例を述べる。第 4 章ではドライエッチングの技術支援について、エッチング技術の概要と問題点を示し、問題解決のための条件検討から研究成果につながった事例を述べる。第 5 章にまとめと、機械系クリーンルームの今後の課題および TC に求められる研究支援の在り方について述べる。

第2章 大学における機械系クリーンルーム管理運営の改善

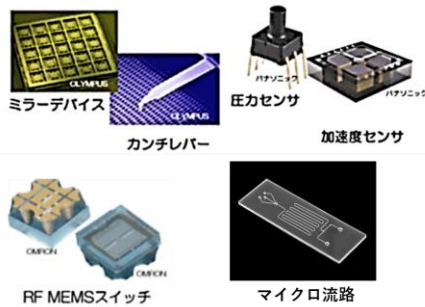
2.1 大学における機械系クリーンルームの現状と問題

2.1.1 大学における機械系クリーンルームの特徴

マイクロプロセス部門は、半導体、光・電子デバイス、MEMS デバイス、マイクロ流路（バイオ応用）、関連材料の分析を対象とした半導体プロセスによる集積システム及び MEMS 開発支援を行う[6]。Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)とは、光・機械・電気・材料などを融合した多様な要素を集積化し、高度な働きをする小型システムのことである。図 2.1 に MEMS デバイスと作製の基本プロセスを示す。リソグラフィー、成膜、エッチングなどの複数回のプロセスを重ね、小型かつ集積化されたデバイス作製や評価を行う。小型デバイスではモジュールがミリメートル以下のスケールであるため、それぞれのプロセスにおいて塵埃の混入は不具合の原因となり、塵埃を排除した清浄環境での作業が必須となる。図 2.2 にメカノマイクロプロセス室の装置群の配置を示す。半導体デバイス工場では、高い清浄度が要求される封入前の前工程と組み立てを行う後工程で完全なスペース分離を行う。しかしながら、メカノマイクロプロセス室はゾーン分けした装置の設置をしているが、塵埃を嫌う装置と発生させる装置が同じ空間にある。狭い範囲で手軽に加工ができる使い勝手の良さは利点であるが、リソグラフィーなどの清浄度が要求されるプロセスで塵埃混入する恐れがある。

MEMS : Micro Electro Mechanical Systems

- ・多様な要素を集積化し高度な働きをする小形システム
- ・光・機械・電気・材料などの異分野を融合



■デバイス作製の基本プロセス

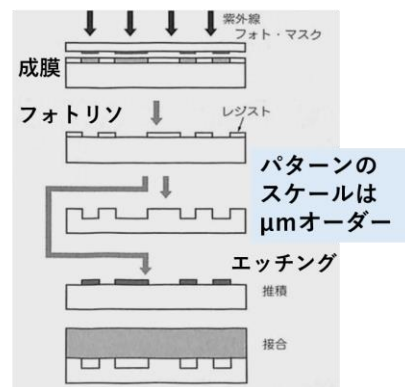


図 2.1 MEMS デバイスと作製の基本プロセス [6]

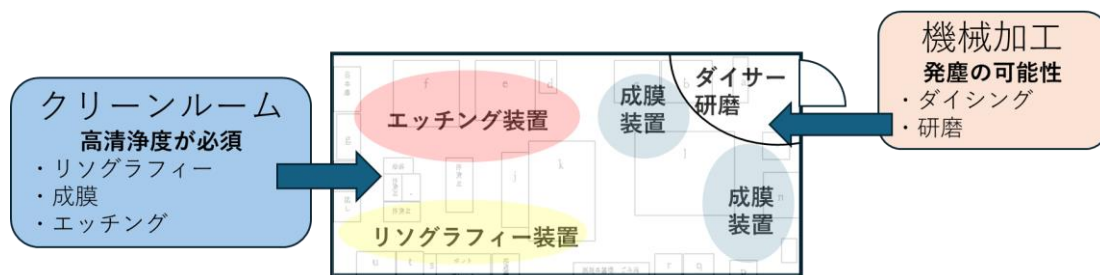


図 2.2 メカノマイクロプロセス室内の装置配置

2.1.2 大学における機械系クリーンルームの問題点

ここで、本論文におけるクリーンルームを定義する。クリーンルームとはコンタミネーションコントロールが行われている限られた空間であって、空気中における浮遊微小粒子、浮遊微生物が限定された清浄度レベル以下に管理され、また、その空間に供給される材料、薬品、水などについても要求される清浄度が保持され、必要に応じて温度、湿度、圧力などの環境条件についても管理が行われている空間である[7]。つまりクリーンルームは、施工業者等によって作られた設備の整った清浄空間を指しているのではなく、図 2.3 に示すクリーンルームの 4 原則（発生しうる塵埃を「持ち込まない」「発生させない」「堆積させない」「排除する」）に従って、管理者が各種環境条件を維持・管理して清浄レベルを保ち続ける空間なのである。この 4 原則が守られないと清浄度は低下する。図 2.4 に半導体工場と大学の機械系クリーンルームの比較を示す。清浄度の違いがあるとはいえ、クリーンルームの使用目的と利用者の意識が異なっているのがわかる。生産歩留まりを上げるために皆で塵埃抑制の努力をする生産現場の作業者のクリーンルームと、自分の実験が目的で立ち入るため、塵埃を発散させていることに配慮しない利用者がいる共用のクリーンルームでは、最大の塵埃源であるヒトの意識が異なる。この状況を鑑みた上で、メカノマイクロプロセス室の清浄度を保つためには、まずは管理者側がクリーンルームの定義を理解し、4 原則を意識した管理運営を日々継続して行うことが求められる。

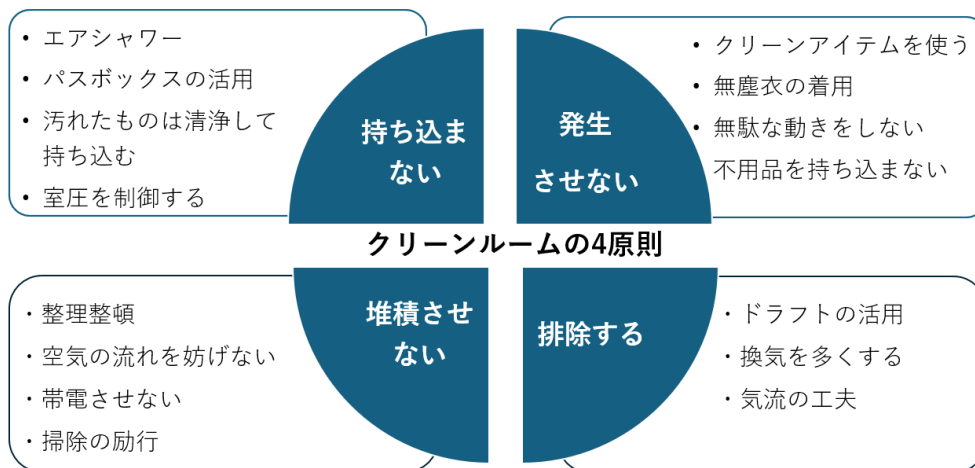


図 2.3 クリーンルームの 4 原則

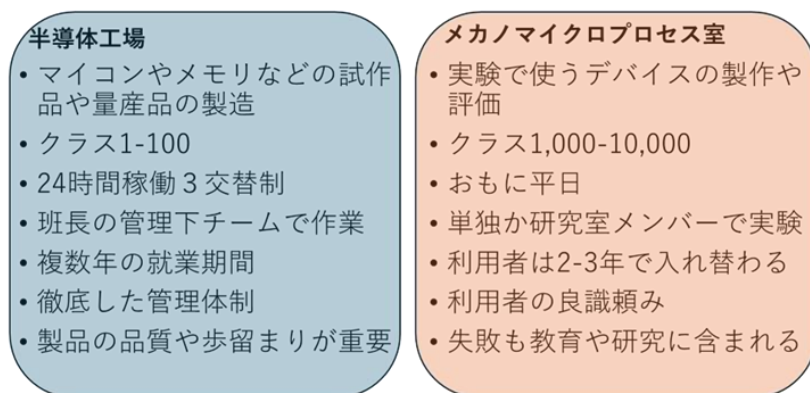


図 2.4 半導体工場と大学の機械系クリーンルームの比較

2.2 清浄度の向上

2.2.1 電子デバイスメーカーの現場の取り組み

客先への安定した製品供給を行うため、生産現場では歩留まりの向上が求められ、製造管理の徹底は重要課題である。半導体工場に限らず、製造現場で「TPM 活動」を行っているメーカーは多い。TPM は Total Productive Maintenance の略で、製造工場及び設備におけるあらゆるロスをゼロにすることを目的とした、生産性維持のためのマネジメントシステムのことである[8]。TPM の要は全員参加が求められる点である。品質向上と企業ブランド力アップのために、企業は現場の作業員に対し、教育や啓発を行っている。作業班ごとの歩留まり率の推移のグラフや改善点が廊下に掲示され、優秀なグループには報奨を行うなど、作業員自らの意識向上への働きかけはその一例である。このように訓練された作業員が複数人おり、日常点検も徹底して行われるため、メーカーのクリーンルームでは異常や汚染の初期の気付きが可能となり、結果として安定した製品生産のためのクリーン環境が維持できる。また、空気の流れを考慮したレイアウト設計や温湿度の自動管理、定期的な空調フィルター交換、および自動搬送や掃除ロボットの導入など、設備に予算を配分できるのは資金の潤沢な企業のなせる業である。TPM の目標である製造ロスゼロへの改善アプローチが「ヒト」と「設備（モノ）」に着目していることであるならば、メカノマイクロプロセス室においても、清浄化意識向上のための利用者への働きかけ、および設備の改善にできる所から着手することによって、清浄環境の維持管理が改善すると考えられる。

2.2.2 現状を踏まえた上での改善例

筆者は企業においてクリーンルームに立ち入った経験はあっても管理する立場ではなかったため、まずは一般常識から理解を深め、クリーンルームの改善において助言できる知識を得るために、東京工業大学 精密工学研究所に着任した 2010 年に甲種危険物取扱者を、翌年に第一種衛生管理者の資格を取得した。資格取得を通して学んだことは、法的な規約の知識習得だけでなく、整理整頓、物の管理、掃除と廃棄という日々の地道な作業がクリーンルームの維持管理に重要であるということであった。整理整頓が行き届いた環境は不用意に散らかしにくくなり、事故を防ぐことにもつながる。整った環境を保つために、1 日 1 回以上はメカノマイクロプロセス室に立ち入って見回りを行った。見回りの中で装置の異音や器具の放置など気付くことがあり、重大な故障や事故を未然に防ぐこともできた。またクリーンルーム入室における注意喚起の掲示とともにクリーンルーム内でスリッパのままの入室する利用者や、帽子の着用忘れなどの声掛けも行った。表 2.1 にメカノマイクロプロセス室の管理業務 1 年目に行った改善例と効果を示す。改善の効果が評価され、2012 年からはメカノマイクロプロセス室の窓口や運営および環境整備などの取りまとめを行う幹事業務

を、輪番制で担当していた機械系研究室の助教に代わって筆者が行うことになった。スタッフ（技術職員および技術支援員）が専任で幹事業務を担うことは、教員の研究時間の確保にもつながり、スタッフにとってもメカノマイクロプロセス室の改善に主体的に取り組む良いモチベーションになる。

表 2.1 メカノマイクロプロセス室の管理 1 年目に行った改善例と効果

改善前	改善内容	効果
服装の不備	注意喚起、定期クリーニング、鏡の設置	汚染防止および塵埃の低下
前室の整理整頓の不備	手洗い場とエアタオルの設置 定期的な掃除	汚染防止 塵埃の堆積防止および排除
掃除の不備	定期的な掃除	塵埃の堆積防止および排除
不明薬品の放置	在庫薬品の棚卸および整頓	事故防止

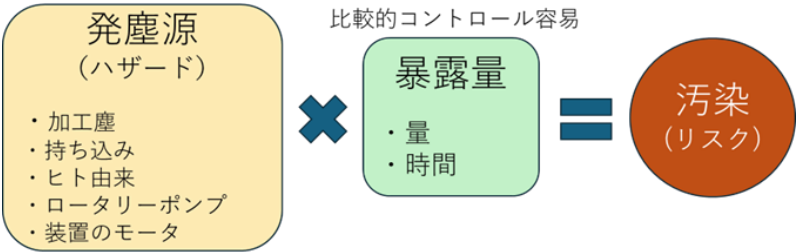


図 2.5 汚染の起こりうる可能性

筆者がメカノマイクロプロセス室の幹事となった後、スタッフで発案したメカノマイクロプロセス室の改善例を述べる。2.1.1 で述べたように、メカノマイクロプロセス室は、高い清浄度が求められる装置と塵埃が発生する装置が同じ空間にあり、いかに清浄度を保つかは重要な課題である。図 2.5 に汚染の起こりうる可能性について示す。発塵源に暴露量を乗じたものが汚染の起こる可能性である。清浄度を上げるためには、発塵源の抑制とともに、暴露量を減らすことが重要となる。2013 年頃までメカノマイクロプロセス室は 24 時間開放

表 2.2 コロナ禍後に行ったおもな改善例と効果

改善前	改善内容	効果
マスクと手袋の未着用	着用の義務化	飛沫や接触による汚染防止
制限時間なしの開放	平日9－16時の開放	職員による閉室時の点検の時間確保 事故防止 人流や装置稼働の発塵発生の減少
湿気の滞留	床下に扇風機を設置	塵埃の堆積防止および排除
薬品の室内暴露	作業台にエレファントノーズを設置	塵埃の堆積防止および排除

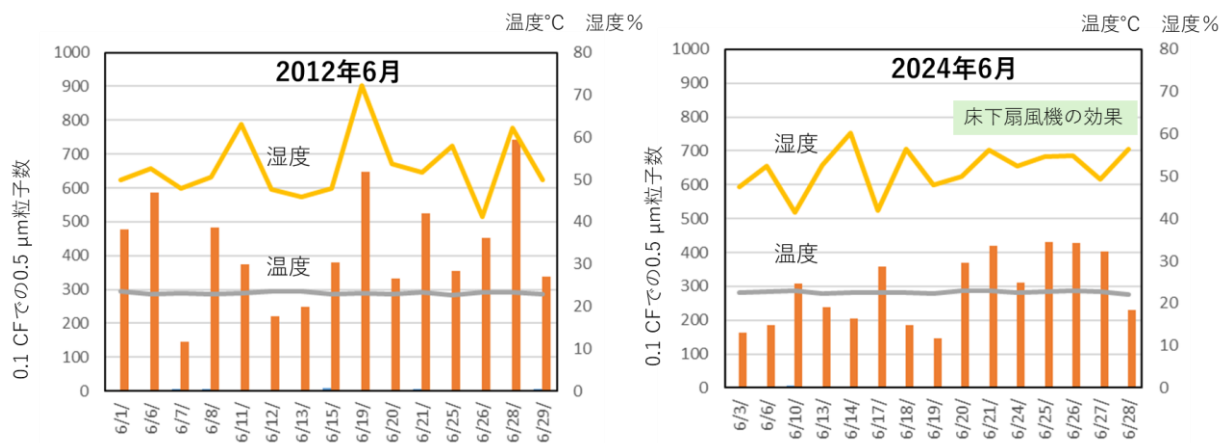


図 2.6 2012 年と 2024 年の 6 月のパーティクル測定値の比較

され、利用時間に制限はなかったが、学内において事故防止のために夜間および休日の単独での実験を制限する方針になったこと、加えてコロナ禍による出校制限があったことをきっかけに、スタッフが出校している平日 9-16 時の時間帯のみを利用可能とし、16 時から点検作業を行うこととした。結果として、夜間に頻発していた軽微な事故や不具合も解消された。図 2.5 の発塵源をハザードに置き換えると、汚染の項目はリスクと置き換えることができる。清浄化への改善のしくみはリスク低減にもつながる。表 2.2 はコロナ禍以降に行った主な改善例と効果である。マスクや手袋の着用が定着したことについては、コロナ禍をきっかけとした社会的な変化に伴う利用者の意識の変化によるものである。また、メカノマイクロプロセス室は天井フィルターからの非循環型ダウンフローによるクリーンルームである

が、床面の漏水センサが誤検知するような湿気溜りがしばしば発生した。グレーチング床下の壁面に設置されている屋外との通気口に向かい、グレーチング床下設置した扇風機で空気の流れを生み出すことで、塵埃の排出とともに漏水センサの誤検知もなくなった。

図 2.6 に年間で最も塵埃数が多い 6 月の 2012 年と 2024 年のメカノマイクロプロセス室のパーティクルカウンター（RION KC-01C）測定値の比較を示す。いずれも天井フィルターを交換してから同じ経年数である。0.1 CF (Cubic Feet) 中の 0.5 μm の塵埃数を計測した。測定時間内の入室者数の平均はいずれも 3 人であった。温度はほぼ一定に保たれているのに対し、梅雨時のため雨天時は高湿度になる。2024 年では湿度の上下振れ幅が小さくなった。これは前述の床下の湿気溜り解消の効果である。6 月の塵埃数の平均値を比較すると、2012 年の 420 個に対し 2024 年では 292 個となり、30%の低減となった。

2.3 装置維持・保全方法の改善

2.3.1 これまでに起きた主なトラブル事例

これまでにメカノマイクロプロセス室で起きた装置および設備のトラブルを大別すると、3つの由来（ヒューマンエラー、建物構造の問題、装置の老朽化）に分けられる。ヒューマンエラーは、「初めて」「変更」「久しぶり」の利用者で散見された。これは、卒業による学生の入替わりや継続的な利用に限らない利用研究室もあることなどの大学ならではの課題である。建物構造の問題であるが、メカノマイクロプロセス室は、既存の実験室に入れ子方式で作られているため、グレーチング床の下に通気口があり、ドラフト排気口も屋上に筒抜けの状態となっている。時には室内に虫類の侵入が見られることもある。建屋もコンクリート建築のため、湿気が溜まりやすく、夏場は結露が生じやすい。装置の老朽化であるが、メカノマイクロプロセス室には 1995 年の設立から使用している装置や、研究室から譲り受けた装置があり、それらが頻繁に老朽化原因の不具合を起こしている。特に装置の自動システムの動作不良が多く発生した。10 年を越える装置の場合、多くはメーカーの保証期間が過ぎているため対応不可であり、自力で修繕やメンテナンスせざるを得ない。

2.3.2 故障対策並びにメンテナンスの改善

前述の 3つの由来によるトラブルは、可能な限り自力で解決してきた。表 2.3 にこれまで発生したトラブル事例と行った対策を示す。ヒューマンエラーは、閉室時の点検を行うことで早期に発見することができ、トラブルを未然に回避することができた。誤操作回避のためのスイッチ類へのわかりやすい表示や触れてはいけない箇所のマスキングなども効果的であった。構造の問題により発生する湿気溜りや漏水対策は、コロナ禍による学生の

表 2.3 これまでに起きたトラブル事例と行った対策

	トラブル事例	対策
ヒューマンエラー	・ ボンベ、スイッチの閉め忘れ	・ 閉室時点検、表示の工夫
構造の問題	・ 原因不明の漏水検知 ・ エアコン本体のドレイン溢出	・ 変色する漏水センサに貼り替え ・ 床下扇風機設置 ・ 利用時間外の水栓閉 ・ エアコン台座の防水処理
装置の老朽化	・ 装置の故障 ・ 空調の故障	・ 自動から手動に改造 ・ 業者による定期点検

出校停止期間を利用し、漏水箇所が変色する漏水センサへ貼り替えた。実際に漏水が発生した時は、色が変わった箇所からすぐに漏水箇所を特定し、対応することができた。夜間・休日の漏水のリスクを減らすために、水栓はメカノマイクロプロセス室開室時のみ開けることとした。

装置の老朽化によるトラブルの対策については、保証期間が過ぎた装置でも、メーカー技術者に問い合わせることで、考えられる原因や解決法のアドバイスが得られ、軽微な故障を自力で修理した。また、壊れた自動制御部分は手動で行えるように改造することで、装置の延命を可能にした。個々のバルブを手動で開閉した方が、装置の自動ボタンを押すだけよりも、学生が使用する際には、装置原理を理解しやすく、教育的効果もある。空調については、壊れてからの対応ではなく、定期メンテナンスを専門業者によって行うようにした。このように閉室時からの点検作業を通すことで、トラブルやメンテナンスの必要性を発見することが可能となった。装置や設備の状態に耳を傾け、不具合がまだ小さい状態での気付きと、こまめに行うマシンメンテナンスが、装置の保全において重要なポイントである。

2.4 運営資金の改善

2.4.1 運営資金の構成

メカノマイクロプロセス室の研究室登録の窓口や運営および環境整備などの取りまとめを行う幹事は、利用者分担金（年間利用料）の徴収と予算管理も行う。図 2.7 に設立時から 2021 年までのメカノマイクロプロセス室の運営資金の構成を示す。メカノマイクロプロセス室の運営資金は、1995 年に開始した文部省研究環境高度化支援プログラムによる設備導入における維持費と各研究室から登録費と 4 万円/人の年会費からなる利用者分担金から構

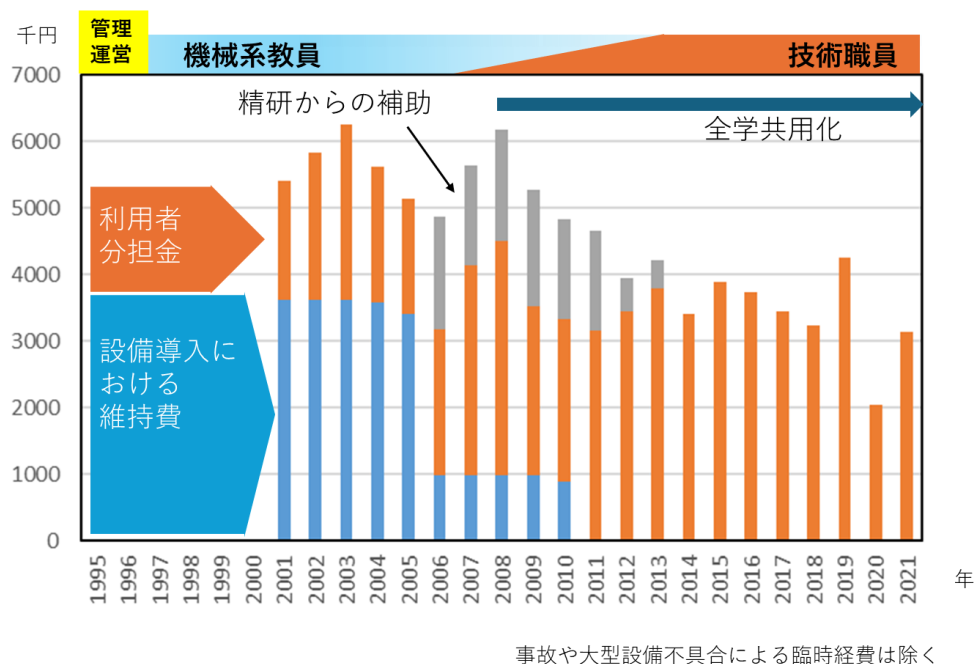


図 2.7 メカノマイクロプロセス室の運営資金の構成と経緯

成されていた。設立から 10 年経過した 2006 年以降は、維持費減額に伴い、精研の補助と利用者分担金値上げ（5 万円/人）により、運営資金を確保した。しかしながら、精研以外の研究室にも開放される全学共用化の流れが始まり、運営資金を利用者分担金 100%の構成にシフトさせるために、改めて運営資金の費目を見直すことが必要となった。

2.4.2 メカノマイクロプロセス室の予算項目の見直しと効果

図 2.8 に全学開放前後の運営資金の予算項目の見直しと効果を示す。共用化以前では、装置や設備に関わる固定費に加え、メカノマイクロプロセス室での研究に用いる材料、薬品、消耗品も運営資金から全て賄っていたため、はじめに、固定費（装置、設備）と研究関連（材料、薬品、消耗品）の費目に分け、整理した。次に、運営資金の半分以上を占めていた研究関連の費目の中身を見直し、共用で使用する共通品と研究室独自で用いる個別品に分け、共通品は運営資金から、個別品は研究室から負担することとした。研究室で使用する特殊な材料、手袋、クリーン服、マスクなどを個別品とした。これら個別品を研究室からの持ち込み制とすることで、年間費用の 35 万円を削減することができた。また、固定費と共通品を運営資金から支出することにより、運営資金が公平に共用の目的に使われることが明確になった。

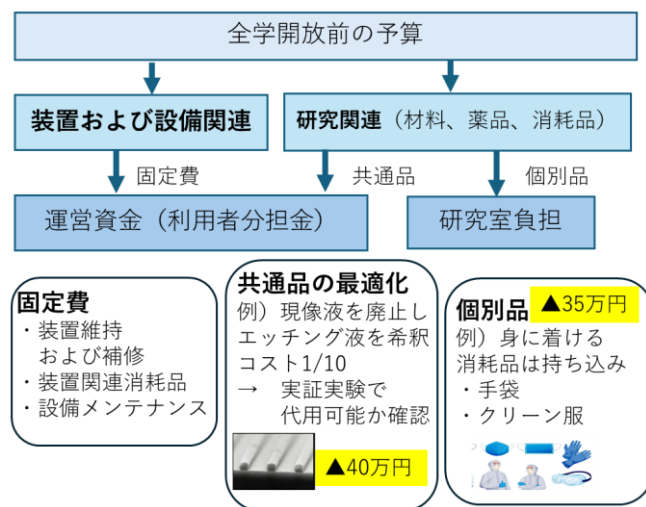


図 2.8 全学開放前後の予算項目の見直しと効果

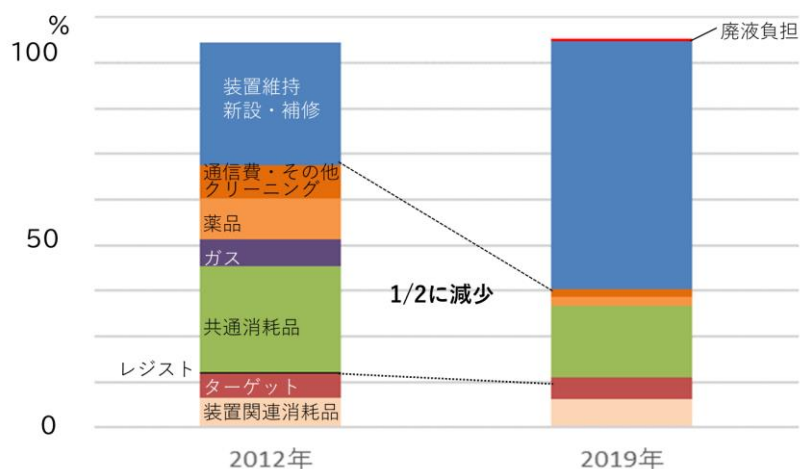


図 2.9 2012 年度と 2019 年度の支出の割合の比較

共通品は更に見直しを行い、薬品と消耗品を中心にコストカットが可能になるか検討した。薬品の変更によりプロセスに問題がないか実証実験を通して利用者が使用する共通薬品の見直しを行い、年間で最低限必要な量と価格の見直しを行った。はじめに、洗浄で用いる薬品を金額の高いエタノールからイソプロパノールに変更した (33→3.5 千円/18L)。また、リソグラフィープロセスで用いるレジストをネガ型ポジ型の両方で使用できる汎用性の高いものに限定して種類を減らした。更に、市販のレジスト現像液 (TMAH 2.38%) の代替

として、同等の成分が含まれるウェットエッチングで用いるテトラメチルアンモニウムヒドロキシ (TMAH) 25%溶液を純水で希釈し、レジスト現像液として用いることとした (15→1.5 千円/5L)。消耗品も使用頻度の低いものは共通品から外すことにした。その結果、薬品や消耗品の在庫数と種類および年間費用の 40 万円を削減することができた。図 2.9 に運営資金の改善の効果を示すために、運営資金が同程度であった 2012 年度と 2019 年度での支出の割合の比較を示す。利用者分担金のみで約 300 万円の年間必要額を確保し、装置維持・管理・新設に充てる費用の割合を増やすことができた。2020 年のオープンファシリティセンター発足に伴い、技術部予算の部門運営費がなくなり、各部門の経済的な自立が求められた際も、運営資金を改善したことによって、運営資金の固定費の予算内に部門活動費を管理費として加えることが可能となった。

このように運営資金の費目を整理し、共通品を見直したところ、年間必要額は 300 万円と見積もられた。図 2.10 に利用者分担金の設定パターンの例と試算を示す。利用者分担金の内訳を研究室登録費、1 人当たりの料金、研究室上限額の項目に分け、過年度の登録状況を元に年間必要額に最も近くなる利用者分担金のパターンを試算し、利用者分担金の設定を行った。現在の利用者分担金の内訳は、学内研究室は登録料+利用者料金 (1 人目 5 万円+2 人目 4 万円+3 人目 3 万円+4 人目以降 2 万円/人数)、学外研究室は登録料+利用者料金 (5 万円/人) となっており、おおむね年間必要額を満たしている。

【案】メカノマイクロプロセス室 27年度分担金詳細(振替)							
研究室	分担金(円)1	分担金(円)2	分担金(円)3	分担金(円)4	分担金(円)5	分担金(円)6	分担金(円)7
	従来1人*5万	1人*5万教員分なし	1人*4万	1人*4万教員分2万	1人*5万~教員分5万	1人*5万~教員分4.5万	1人*5万~教員分4万
1 (12/13名)上限	250,000	250,000	200,000	200,000	200,000	195,000	190,000
2 (16/17名)上限	250,000	250,000	200,000	200,000	200,000	195,000	190,000
3 (8/9名)上限	250,000	250,000	200,000	200,000	200,000	195,000	190,000
8 (1/2名)	100,000	50,000	80,000	60,000	100,000	95,000	90,000
振替金額合計	3,500,000	2,700,000	2,800,000	2,480,000	3,050,000	2,945,000	2,840,000
		▲800000	▲700000	▲1020000	▲450000	▲555000	▲660000

図 2.10 利用者分担金の設定パターンの例と試算

このように、メカノマイクロプロセス室の運営資金を見直すことで改善を行ってきたが、課題は今後も続いていく。研究室の利用登録は年度ごとに異なるため、必ずしも利用分担金総額が年間必要額に達する保証がない。また、予算を超える装置維持・管理・新設の費用が発生する可能性もある。今後は定期メンテナンスの実施により、大きな出費につながる不具合の予兆を早期に発見し、大きなメンテナンスに必要な費用を中長期的に見積もっていくことが必要である。

2.5 第2章まとめ

大学での機械系クリーンルームは、清浄度が要求される装置と発塵可能性のある装置が同じ空間にあり、常に塵埃が発生する恐れがあるが、クリーンルームの4原則を守ることによって、清浄度を保つことが可能となる。またクリーンルームは清浄度を保つ努力が必要な空間であるため、発塵源の抑制にはスタッフの努力みならず、利用者へのクリーン意識の啓発や理解も必要である。メカノマイクロプロセス室の利用時間を制限することにより、塵埃の低減とともに、装置の日常点検によるトラブルの早期発見とメンテナンスが可能となった。また、運営資金の費目を見直すことにより、装置関連の費用を増額し最適化することができた。ヒト（利用者、利用研究室、装置メーカー技術者）やモノ（設備や装置）とのコミュニケーション（声掛け、問い合わせ、傾聴、相談、見回り点検）を取ることで、清浄化と装置維持・保全およびメカノマイクロプロセス室の運営の改善につながる。

第3章 表面改質技術の研究支援

3.1 メカノマイクロプロセス室における表面改質の技術支援

3.1.1 異種材料接合の手法と問題点

デバイス製作において、構造体の形成、密閉、3次元積層のために、Si や化合物半導体、ガラス、金属などを対象とした異種材料接合のプロセスがある。図 3.1 に MEMS デバイスのための各種接合方法を示す[9]。メカノマイクロプロセス室利用者が行っている接合方法は、主にガラスと Si を接合させる陽極接合とプラズマを用いた表面活性化接合である。プラズマを用いた表面活性化接合では、ポリジメチルシロキサン (PDMS) とガラス等の基板を接合させたマイクロ流路の作製を行う事例が多数であり、接合が上手くできないと相談されることが多い。メカノマイクロプロセス室では接合する表面に CCP 装置 (容量結合型プラズマ発生装置) を用いて酸素プラズマ処理を行い、貼り合わせを行っている。接合における密着で重要なのは、接合面の密着化と接合界面での原子間または分子間での結合である。メカノマイクロプロセス室の CCP 装置は、表面処理の他に TEOS を導入して SiO_2 成膜を行うこともあるため、チャンバー内のクリーニング不足や装置周辺の残存塵埃によって接合不良が発生することもある。この解決のためには、クリーンルームの清浄度向上やチャンバーのクリーニングによる塵埃除去が重要であるといえる。また、冬場の低湿度時は接合が達成できない傾向があったことから、接合界面での原子間または分子間での結合を促進させるため、接合界面で水素結合する H、OH が多く存在する水分リッチな状態で接合する手法を検討した。

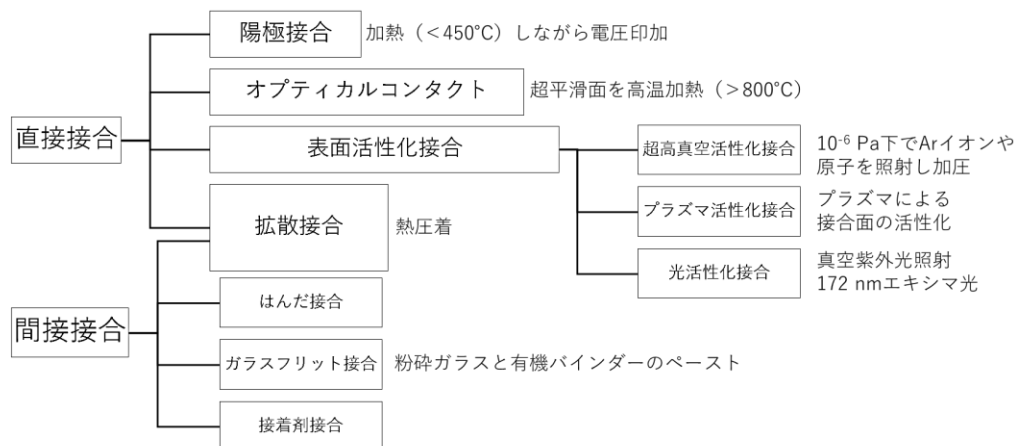


図 3.1 MEMS デバイスのための各種接合方法 [9]

3.1.2 自作の固体ソース H₂O プラズマ装置の開発

水をプラズマソースとしたプラズマ表面処理は、水素結合を介した接合のための表面処理の一つである。メカノマイクロプロセス室でも水をソースとしたプラズマ処理は、表面処理において役立つことができると考えた。装置メーカーの SAMCO より、水蒸気のプラズマ発生装置として製品化された AQUA Plasma 装置を用いた、シクロオレフィンポリマー (COP) とガラス系基板の良好な接合が報告されている[10]。

真空装置においてはチャンバーや配管内の水分が真空度を低下させる原因となるため、既存の真空プラズマ発生装置を用いて H₂O プラズマを発生させることはできない。したがっ

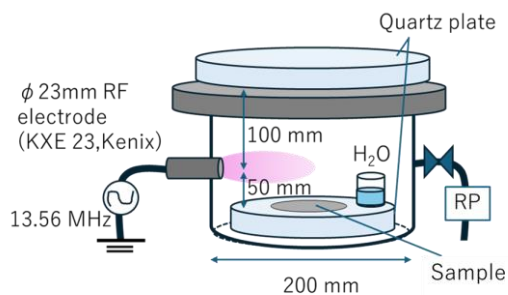


図 3.2 H₂O プラズマ発生装置の概要

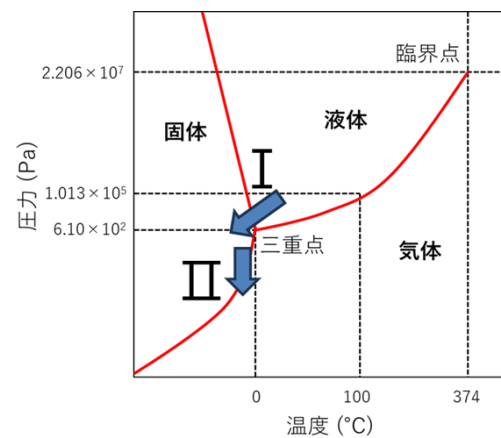


図 3.3 水の状態変化図

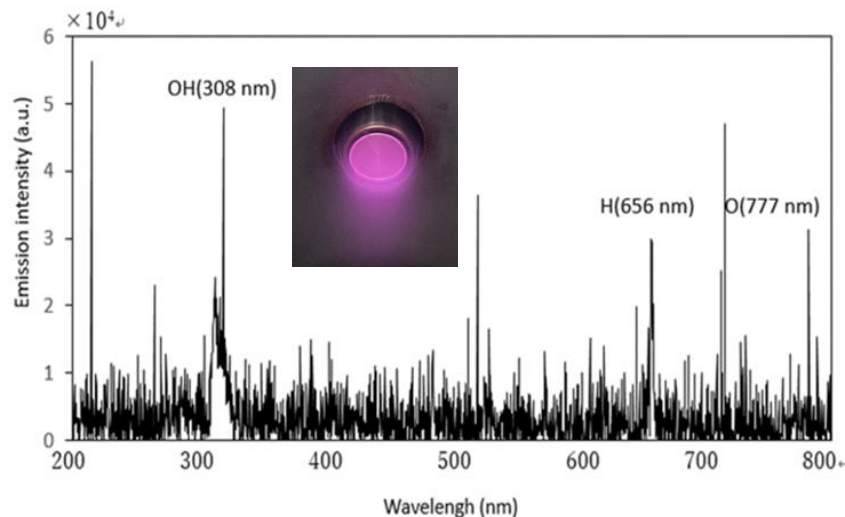


図 3.4 H₂O プラズマの様子と発光スペクトル

(M. Tohnishi, et al., Sensors and Materials, Vol. 33, No. 2, p. 569 (2021))

て、使わなくなった SUS チャンバーと、中古のロータリーポンプと RF 電源を活用し、 H_2O プラズマ発生装置を自作した。図 3.2 に自作の固体ソース H_2O プラズマ発生装置の概要を示す。内径 200 mm の SUS チャンバーには直径 35 mm のフランジ付きのポートが複数あり、排気用ロータリーポンプ、RF 電源、圧力ゲージおよびリーク弁を取り付けた。プラズマ発光とプラズマ分布を確認するために、チャンバー上部は透明な $t=20$ mm の石英板とした。ガラス製の供給容器に 5 mL の水を入れてチャンバー内に置き、 H_2O ガスの供給源とした。サンプルおよび供給容器からチャンバー本体へ熱が伝わらないよう、チャンバー底にも $t=30$ mm の石英板を置いた。図 3.3 の矢印に示すように、供給容器の水はチャンバー内を減圧することで気化熱が奪われて固体となって昇華し、 H_2O ガスとしてチャンバー内に供給される。100 Pa 以下に減圧したところで 13.56 MHz の高周波 (RF) を 10 W 印加してプラズマを発生させることができる。図 3.4 に分光器 (Ocean Photonics) によりチャンバー石英蓋を通して観測したプラズマの発光スペクトルを示す。 H_2O プラズマに起因する OH、H、O に相当する発光が観察された[11]。

3.2 H_2O プラズマ装置を用いた研究支援の例

3.2.1 マイクロ流路の作製におけるガラスと PDMS の接合のための表面改質

固体ソース H_2O プラズマ発生装置を用いて表面処理を行った研究の一つ目の事例として、ガラスと PDMS の接合のための表面処理について述べる。図 3.5 はガラスと PDMS を接合して製作したマイクロ流路である。当初、ガラスと PDMS の接合には CCP 装置による酸素プラズマ処理の方法を用いていたが、しばしば強い接合が得られず、流路からの液体の漏れや基板端で剥がれが起る不具合が起きた。そこで H_2O プラズマによる表面処理の効果を検証するために、 15×15 mm² のガラスと PDMS それぞれに固体ソース H_2O プラズマによる表面処理を行い、表面の親水性、およびガラスと PDMS を接合し、過剰な水分を除去するためにベークした後の接合部分の強度を測定した。比較のため、酸素プラズマでも同様に実験を行った。

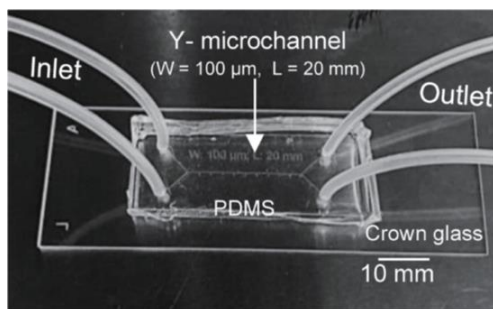


図 3.5 ガラスと PDMS を接合したマイクロ流路

(M. Tohnishi, et al., Sensors and Materials, Vol. 33, No. 2, p. 569 (2021))

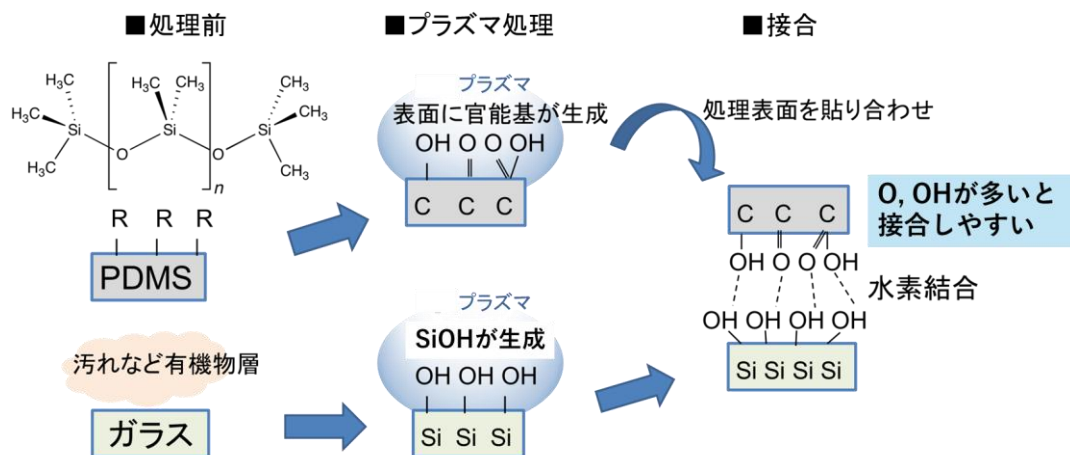


図 3.6 H_2O プラズマ処理によるガラスと PDMS の接合のメカニズム

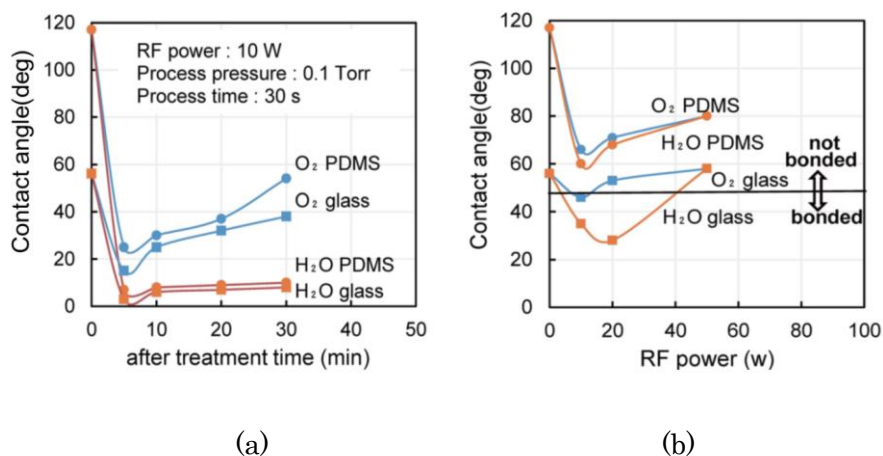


図 3.7 (a) 接触角とプラズマ処理後の時間の関係 (b) 接触角とプラズマ RF パワー依存性
(M. Tohnishi, et al., Sensors and Materials, Vol. 33, No. 2, p. 569 (2021))

図 3.6 に H_2O プラズマ処理による接合のメカニズムを示す。PDMS とガラスの表面をそれぞれ H_2O プラズマ処理すると、PDMS は表面に O と H からなる官能基が生成し、ガラスは表面に SiOH が生成する。それらの処理表面を貼り合わせると界面で水素結合し、強い接合が得られる。O, OH が多い表面は親水性を示すため、純水滴による接触角は小さくなるので、その接触角を観察することにより、接合しやすさがわかる。図 3.7(a) に PDMS とガラスの接触角と H_2O と酸素のプラズマ処理後の時間の関係を示す。 H_2O プラズマ処理は酸素プラズマ処理よりも試料表面の接触角が小さく、処理後 30 分でも小さい接触角が保たれていた。この結果より、 H_2O プラズマ処理が親水化に効果的であることがわかった。次に、プラズマ処理

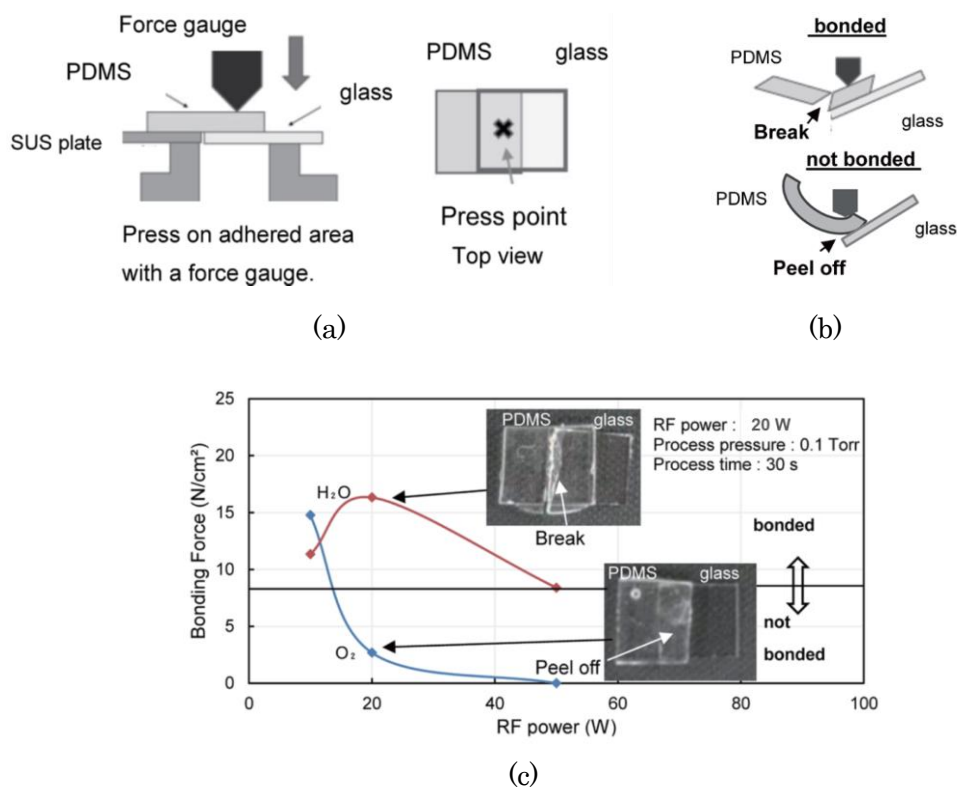


図 3.8 a) フォースゲージによる破壊試験方法 b) 破壊試験による接合判定
c) 接合強度とプラズマ RF パワー依存性

(M. Tohnishi, et al., Sensors and Materials, Vol. 33, No. 2, p. 569 (2021))

後、ただちに処理面の 1/2 の面積を貼り合わせて 90℃で 10 分ベークを行い、PDMS とガラスの接合を確認した。図 3.7(b)にベーク後の貼り合わせていない面の接触角の RF パワー依存性を示す。RF パワーが低いと接触角は小さく、RF パワーが増加すると接触角は増加した。H₂O プラズマでは RF パワーが 10-20 W、酸素プラズマでは RF パワーが 10 W の処理においてガラスと PDMS は接合した。次に、図 3.8(a)に示す破壊試験により接合強度を評価した。7.5 × 15 mm² の範囲の貼り合わせた箇所の中心にフォースゲージの先端を押し付け、試料が破壊する時のフォースゲージの最大ピーク値を接合強度として測定した。図 3.8(b)に示すように、接合した場合は PDMS が割れ、接合していないときはガラスと PDMS は剥がれた。フォースゲージの最大ピーク値 9 N/cm² を境にガラスと PDMS の接合可否が分かれた。図 3.8(c)に接合強度のプラズマ RF パワー依存性を示す。H₂O プラズマでは、10-50 W でいずれも接合強度が 9 N/cm² 以上であり、破壊試験においても H₂O プラズマ処理による良好な結果が得られた。図 3.9 に、H₂O プラズマ処理したガラスと PDMS を接合して作製した Y 字流路を示す。

異なる色素で着色した純水を流速 100 $\mu\text{L}/\text{min}$ で流したところ、流路における液体の漏れや剥がれは発生せず、層流を確認することができた[11]。

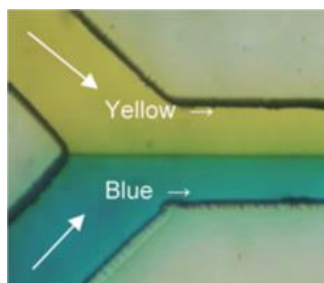


図 3.9 作製した Y 字流路の層流（流路幅 100 μm 、深さ 90 μm ）

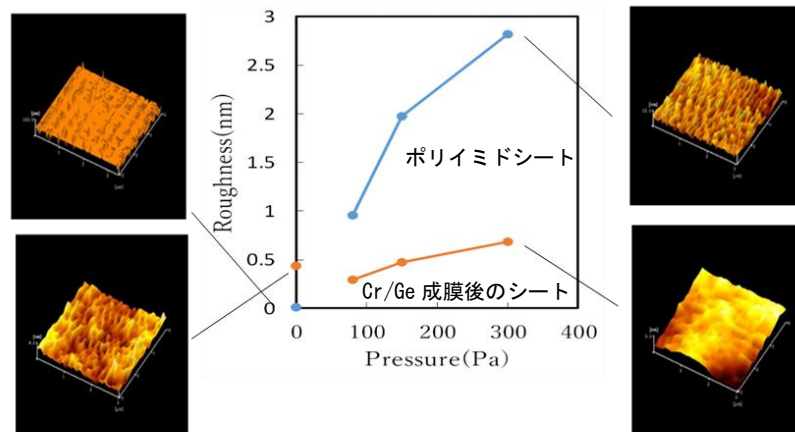
(M. Tohnishi, et al., Sensors and Materials, Vol. 33, No. 2, p. 569 (2021))

3.2.3 フレキシブル電極の作製における電極金属成膜前のポリイミド表面の改質

自作の H_2O プラズマ発生装置を用いた研究の二つ目の事例として、ポリイミドシート上に金属電極を成膜する際の前処理として、固体ソース H_2O プラズマの効果を検討した事例を紹介する。特に、Cr 密着層を成膜する前処理としての効果を中心に述べる。

メカノマイクロプロセス室利用研究室から、熱励起による酸化還元反応を活用した半導体増感型熱利用電池の作製について相談を受けた。目標は、厚さ 50 μm のポリイミドシート上に Cr を密着層とした Ge と Pt の櫛歯電極を作製することである。しかし、ポリイミドと金属の熱膨張率の違いにより、リソグラフィーや成膜時に熱による反りが発生し、細い金属配線の断線が課題となっている。そこで、成膜前の前処理として H_2O プラズマ処理を行い、断線のない線幅 20 μm の Cr/Ge と Cr/Pt 電極を組み合わせた櫛歯電極が作製可能かを検討した。

図 3.10 (a)に、 H_2O プラズマ処理を施したポリイミドシートおよびその上に成膜した Cr/Ge 膜の表面粗さのプラズマ圧力依存性を示す。 H_2O プラズマの圧力が増加すると、ポリイミドシートの表面粗さも増加した。 H_2O プラズマ処理を施したポリイミドシート上に成膜した Cr/Ge 膜では、プロセス圧力 150 Pa 以下の条件で、未処理の場合よりも表面粗さが低下することが確認された。これは、図 3.10 (b)の断面モデル図で示すように、 H_2O プラズマ処理により形成されたポリイミド表面の凹凸に Cr/Ge が入りこんだためと考えられる。



ポリイミドシート表面 未処理 < H₂O プラズマ処理

Cr/Ge 膜表面 未処理 > H₂O プラズマ処理 (150 Pa 以下)

(a) AFM による $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ の表面粗さの H₂O プラズマ圧力依存性



(b) Cr/Ge 成膜後のポリイミドシートの断面モデル

図 3.10 (a) H₂O プラズマ処理したポリイミドシートおよびシートに Cr/Ge 成膜した表面粗さの H₂O プラズマ圧力依存性 (b) Cr/Ge 成膜後のポリイミドシートの断面モデル
(遠西美重ほか 第 69 回応物春 22a-P01-p9 (2022))

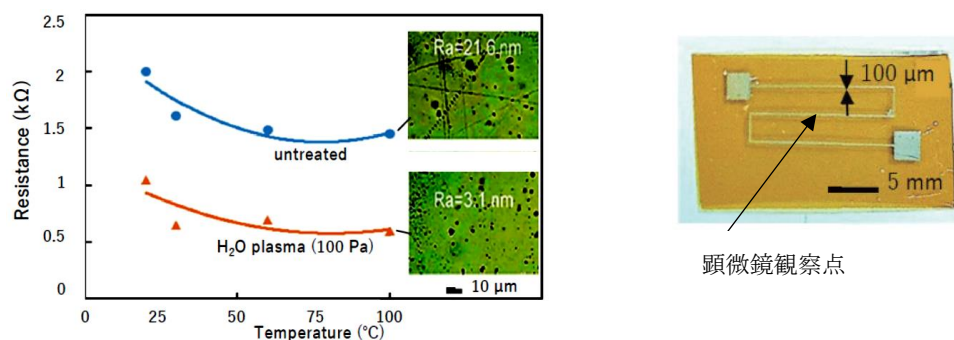


図 3.11 50 μm 厚ポリイミドシートに成膜した Cr/Ge 電極 抵抗値の温度依存性および 100°C での電極中央部の表面顕微鏡写真
(M. Tohnishi, et al., Sensors and Materials, Vol. 35, No. 3, p. 1023 (2023))

図 3.11 に、ポリイミドシート上に作製した Cr/Ge 電極をホットプレートで加熱しながら測定した温度と抵抗値の関係、および 100℃での電極中央部表面の光学顕微鏡写真を示す。Ge は半導体であるため、加熱すると抵抗値が低くなる。H₂O プラズマ処理を施した電極では、未処理の電極よりも抵抗値が低い結果が得られた。また 100℃での電極表面は、未処理の電極では亀裂が見られたが、H₂O プラズマ処理を行った電極では亀裂がほとんど確認されなかった。この結果から、H₂O プラズマ処理により、加熱しても亀裂が発生せず、低抵抗の金属電極を作製できることが分かった。

次に、H₂O プラズマ処理によるポリイミドシート表面の改質と Cr 密着層の接合メカニズムを考察する。図 3.12 に、未処理と H₂O プラズマ処理（プラズマ圧力 100 Pa、RF パワー 10 W、処理時間 5 min）を施したポリイミドシートの FT-IR および XPS の分析結果を示す[13]。

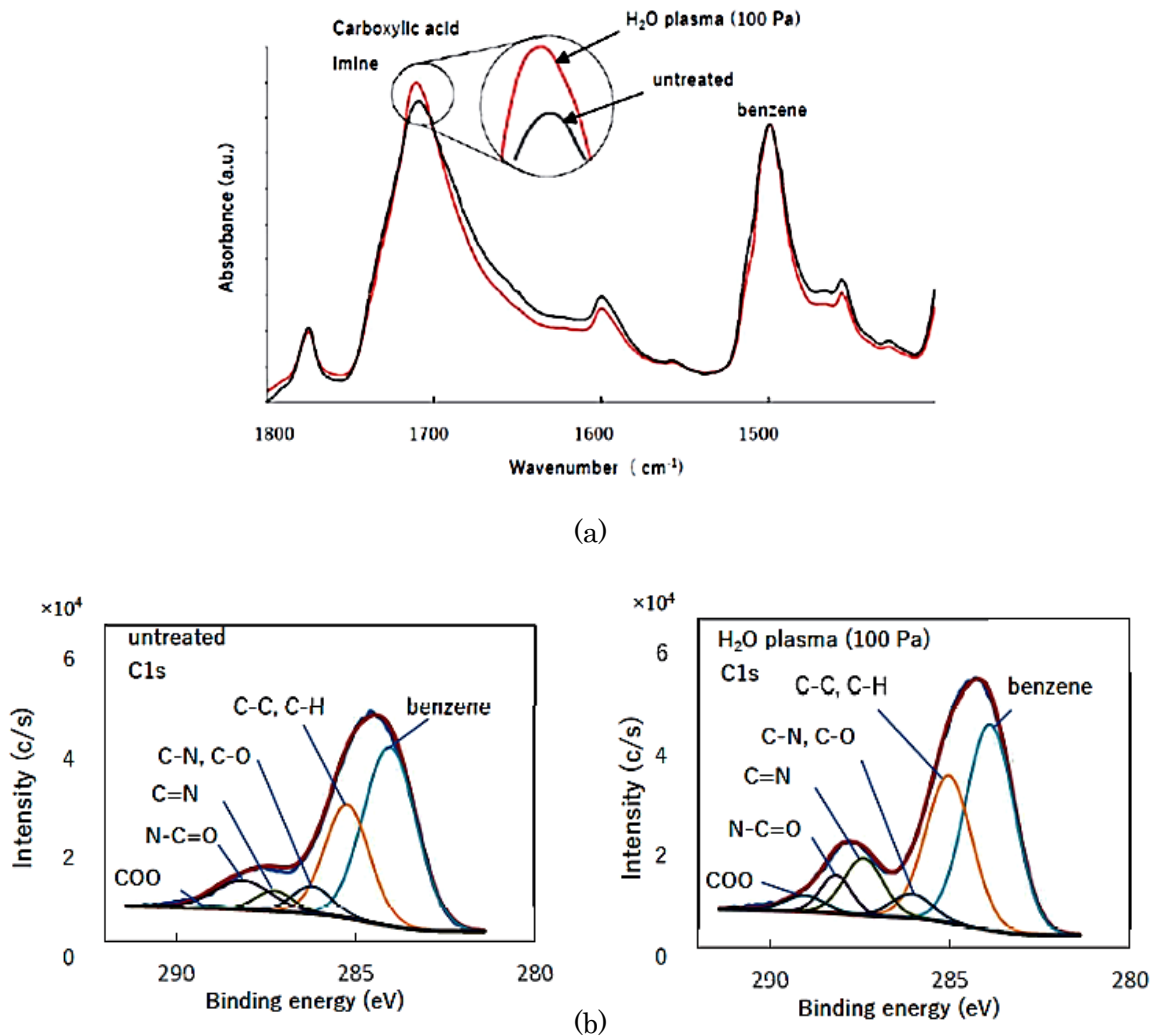


図 3.12 (a) 未処理と H₂O プラズマ処理したポリイミドの FT-IR 分析結果

(b) 未処理と H₂O プラズマ処理したポリイミドの XPS 分析結果

(M. Tohnishi, et al., Sensors and Materials, Vol. 35, No. 3, p. 1023 (2023))

FT-IR はパーキンエルマージャパンの新居田氏が測定を行い、XPS は本学ファシリティステーションの XPS 装置を用い、コアファシリティセンター分析部門の金井技術専門員が測定を行った。FT-IR 測定では、ベンゼンを固定したカルボキシル基の波数において H₂O プラズマ処理と未処理とでピーク値に差が見られた。また、XPS 測定では H₂O プラズマ処理によりアミド基のピーク値の増加が見られた。これらの結果により、H₂O プラズマ処理によってポリイミドのイミド基が開環し、カルボキシル基とアミド基が増加したことが分かった。この反応モデルを図 3.13 に示す。ポリイミドに H₂O プラズマ処理によって H₂O が加わると、ポリイミドの一部が開環して前駆体の不安定なポリアミック酸となる。Cr とポリイミドの界面では、不安定なポリアミック酸のカルボキシル基とアミド基の O 原子が Cr と結合することにより、原子レベルでの強い接合が可能となることが考えられる。

これらの結果より、H₂O プラズマ処理は実際の電極作製においても有効であることが示された。図 3.14 は H₂O プラズマ処理を施して作製した櫛歯電極である。H₂O プラズマ処理を施したポリイミド上に成膜した Ge と Pt の線幅 20 μm の櫛歯電極は、リソグラフィーとスパッタ成膜を 2 回行っても、剥がれや亀裂が見られなかった[12, 13]。

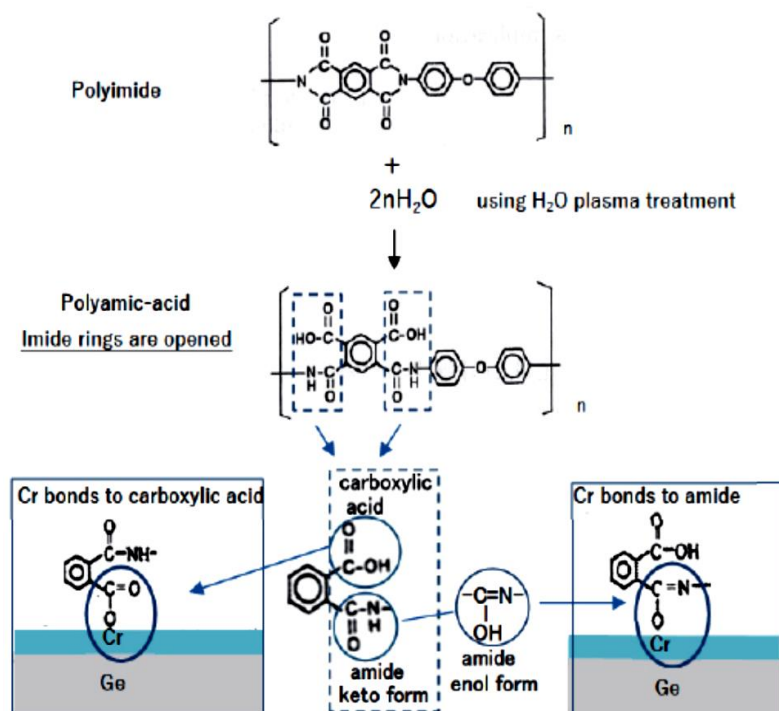


図 3.13 H₂O プラズマ処理したポリイミドと密着層としての Cr との結合の反応モデル
(M. Tohnishi, et al., Sensors and Materials, Vol. 35, No. 3, p. 1023 (2023))

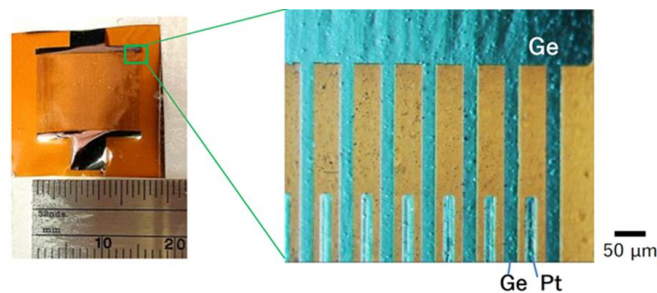


図 3.14 50 μm 厚ポリイミドシートに成膜した Cr/Ge および Cr/Pt の櫛歯電極
(M. Tohnishi, et al., Sensors and Materials, Vol. 35, No. 3, p. 1023 (2023))

3.3 第3章まとめ

メカノマイクロプロセス室のデバイス作製において異種材料の接合を行うプロセスがあるが、接合できなかった実験環境を振り返ると、塵埃の混入や乾燥が原因であった。接合においても実験環境の清浄化と温湿度管理は非常に重要である。また、水蒸気プラズマによる良好な接合の先行研究を参考に、チャンバー内をロータリーポンプで減圧することにより容器内の水を凍らせて昇華したガスをプラズマソースとする、水の状態変化を利用したシンプルな構造の固体ソース H_2O プラズマ発生装置を作製した。この固体ソース H_2O プラズマ装置を用いた表面処理により、マイクロ流路デバイスのためのガラスと PDMS、およびフレキシブル電極のための金属とポリイミドにおいて良好な接合が得られた。これらの 2 つの事例を通じた成果は、応用物理学会などで発表し、論文化した[11, 12]。ガラスと PDMS の接合についての論文は学術誌でも引用された[14-18]。筆者は、固体ソース H_2O プラズマ装置のチャンバー内のプラズマ分布の均一化について令和 6(2024)年度科研費奨励研究に採択され、装置の改良を進行中である。

第4章 ドライエッチング技術の研究支援

4.1 メカノマイクロプロセス室におけるドライエッチング装置

4.1.1 RIE および Deep-RIE 装置の概要

エッチングは大別するとウェットエッチングとドライエッチングがある。ウェットエッチングは、酸性もしくはアルカリ性のエッチング液に基板を浸漬させ、化学反応によって削る加工である。対してドライエッチングは反応性ガスやプラズマによるエッチングである。ドライエッチングの中でも高真空プラズマを用いたプラズマエッチングは、1.2.2 で述べたように、加速したイオンで方向性を持たせてラジカルと基板表面の反応を促進させ、基板を精密にエッチングすることができるため、微細加工で多く用いられている。エッチングプロセスにおいて、塵埃は望まないエッチングマスクとなり、プロセスの不具合の原因となるため、ここでも実験環境の清浄化は必須である。また、所望の深さや形状を得るためには、エッチングパラメーターの最適化が求められる。本章では、筆者の担当装置である反応性イオンエッチング (RIE) 装置と深掘り反応性イオンエッチング (Deep-RIE) 装置について述べる。

図 4.1 に RIE (RIE-10NR) の装置構成を示す。RIE は容量結合型プラズマ発生装置で、構成要素は、電源系と結合系、プラズマを収容する容器にかかわる装置系、物質の生成加工の対象を置く基板系、原料ガスを供給・排気する気体系からなる。プラズマエッチング装置の構成はきわめてシンプルであるが、プラズマ中で進行している反応は非常に複雑であり、パラメーターの設定の違いによって所望のエッチング形状と異なることがある。関与するパラメーターは、基板材料、ガス種類、ガス流量、プロセス圧力、RF パワー、チャンバー材料、温度などであるが、それらが相互に影響し合いながら、エッチングが進行する。図 4.2(a) に Deep-RIE (MUC21-HRMX) の装置構成、4.2(b) にボッシュプロセスの反応機構を示す。Deep-RIE 装置は誘導結合型 (ICP) プラズマによる高密度プラズマを生成することが可能である。また、エッチング側壁保護のためのパッシベーションモードとエッチングを進行させるエ

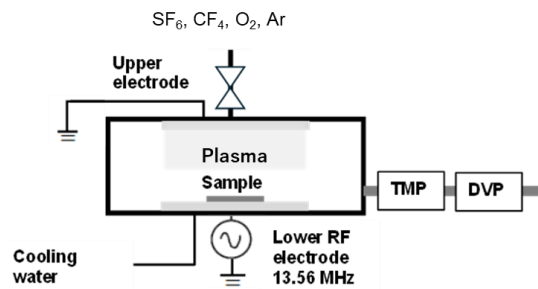
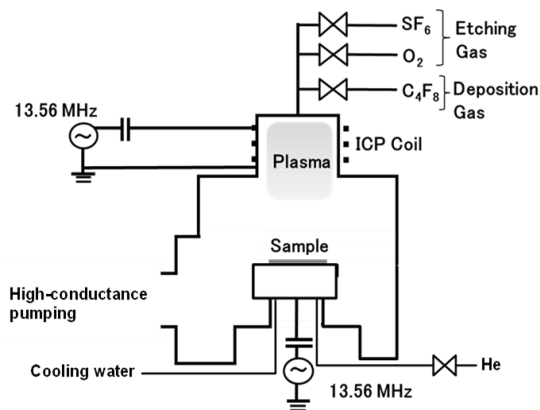
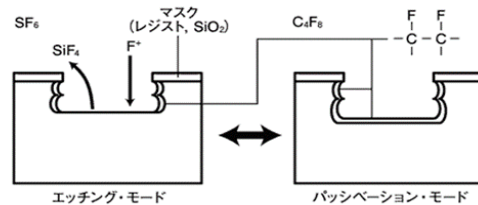


図 4.1 RIE (RIE-10NR) の装置構成



(a)



2006 年 11 月 p.253 MEMS テクノロジ 2007 より

(b)

図 4.2 (a) Deep-RIE (MUC21 HRMX) の装置構成 (b) ボッシュプロセスの反応機構

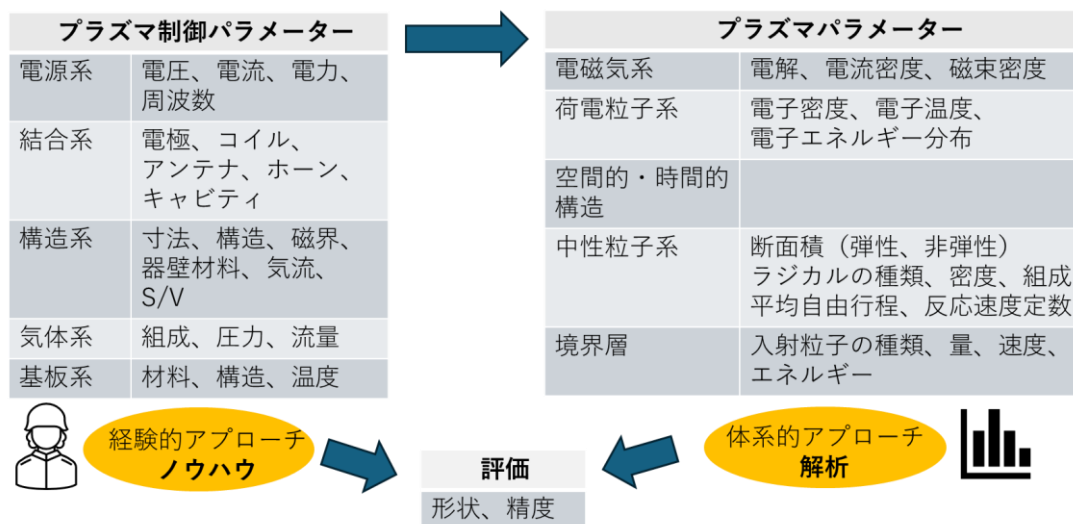


図 4.3 プラズマを規定するパラメーター間の関係 [20]

エッチングモードをスイッチしながら深くエッチングするボッシュプロセス方式[19]により、ラジカルによる側壁へのエッチングを保護しながら、基板方向に深くエッチングすることができる。しかしながら反応の複雑性は増加し、パラメーターの数はRIEを上回るため、パラメーター設定は非常に困難を極める。図 4.3 にプラズマを規定するパラメーター間の関係を示す。プラズマ制御パラメーターは人為的に外部から制御可能なパラメーターであり、プラズマパラメーターはプロセス中で起こり得る内部のパラメーターである。エッチングにおける複雑な反応であっても、制御パラメーターを調整することで、プラズマパラメータ

ーが決定され、所望のエッチング形状に近づけることは可能である[20]。しかしながらプラズマパラメーターは相互に密接に関係し合っているため、制御パラメーターの値を一つ変えても一義的に影響するとは限らず、数多くの条件出しから得たノウハウと評価によるデータ結果から適切なパラメーターを解析し、エッチング条件を決定していく作業が必要となる。

4.1.2 ドライエッチング技術の問題点と解決へのアプローチ

4.1.1 の装置の概要の中で、プラズマエッチングではプラズマパラメーターがプラズマ内で複雑に影響するため、所望のレートや形状を得られない場合があることを述べた。ここでは、側壁を垂直にエッチングすることを目的とした際の問題となる現象と解決へのアプローチの例を述べる。図 4.4 (a)に RIE を用いてエッチングしたラインパターンの断面 SEM 写真を示す。RIE は、圧力が高いとイオンの平均自由行程が短くなるためにエッチングが等方的に進み[21]、マスクの下にアンダーカットが入る。また、基板から反跳するラジカルが過剰であるとサイドエッチングにより側面がえぐれた形状になる。図 4.4 (b)に Deep-RIE を用いてエッチングしたパターンの断面 SEM 写真を示す。側壁保護のためのパッシベーションガス流量が少ないと側壁保護されず、左のように逆テーパ形状になる。また逆にパッシベーションガス流量が多いとパッシベーションのクラスターから形成したマイクロマスクにより右のようにマイクログラスが発生する。これらのエッチング形状から制御すべきパラメーターを推測し、最適化を行っていく。

図 4.5 に RIE-10NR を用いた CF_4 プラズマによる Si エッチングにおいて、垂直形状エッチングのための条件検討の例を示す。エッチング条件が不十分であるとサイドエッチングとアンダーカットのある形状となる。ここでは、RF 出力、ガス流量、圧力などの制御パラメーターにおいて、はじめにその中の一つのパラメーターのみを変えながらエッチングレートをグラフ化し、所望の深さを得るためのエッチングレートを測定した。次にパラメーター

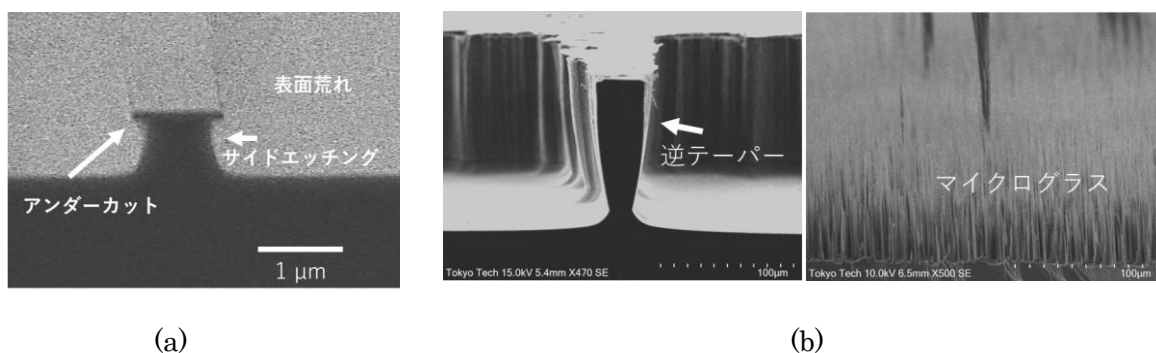


図 4.4 (a) RIE によるエッチング断面 SEM 像 (b) Deep-RIE によるエッチング断面 SEM 像

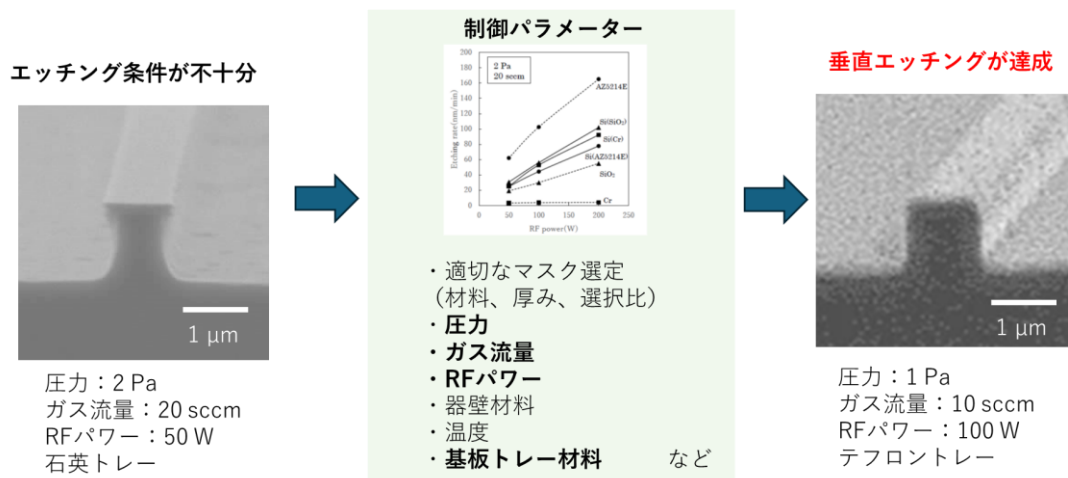


図 4.5 RIE-10NR を用いた CF_4 による Si 垂直形状エッチングの条件検討

条件ごとにエッチングした基板の断面 SEM 観察から形状を確認し、所望の形状となるパラメーターを決定した。ラジカルの等方性エッチングを抑制するためにガス流量を少なくした。またイオンによるエッチングは異方性を持つことから、RF パワーを上げ、圧力を下げた。さらに基板から反跳し、側壁をエッチングする過剰なラジカルを抑制するため、ラジカルを吸収するテフロントレーに基板を置いてエッチングを行った[22]。このように、適切な制御パラメーターの条件設定とテフロントレーの効果により、垂直な側壁のエッチング形状を得ることができた。

4.2 ドライエッチング技術の研究支援の例

4.2.1 TiO_2 ピンホールエッチングの技術支援

垂直形状エッチングを行った研究の一つ目の事例として、 TiO_2 基板へのピンホール作製について述べる。天体観測時における微弱な光の光学面検査に用いられる光学素子の試作のために、学外利用研究室からメカノマイクロプロセス室利用の申請があった。図 4.6(a) に作製する光学素子図を示す。複屈折結晶である TiO_2 基板のピンホールに複屈折性のない Nb_2O_5 を充填するために、 TiO_2 基板上にエッチングによって垂直形状かつ底面荒れのない直径 30 μm 、深さ 1 μm のピンホールを作製することが目標であった。メカノマイクロプロセス室の RIE では Si や SiO_2 基板をエッチングする利用者が多いため、 TiO_2 基板の汚染防止や装置のコンディションを保つ目的で、不特定多数の利用者が使わない装置を用いる必要が

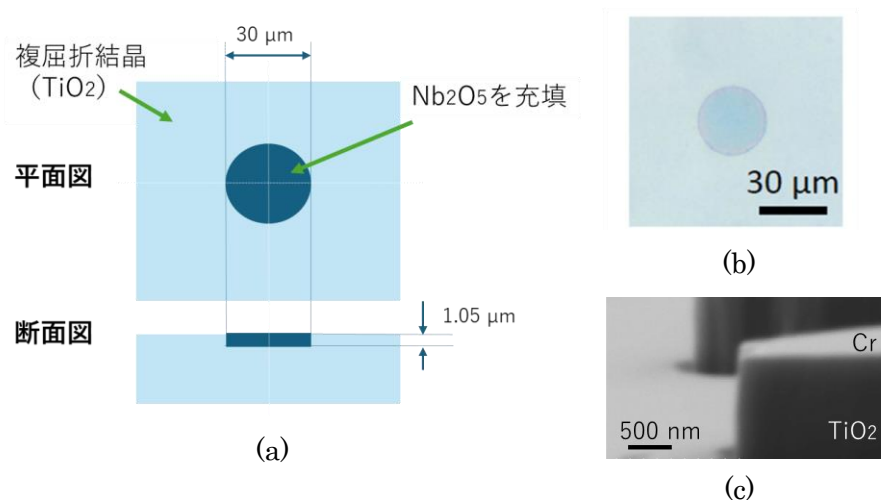


図 4.6 (a) 作製する光学素子図

(b) TiO_2 ピンホールに Nb_2O_5 を充填して作製した試作品の光学顕微鏡写真 (Top View) [24]

(c) エッチングした TiO_2 の側壁 SEM 写真 (Tilted View)

あった。ここでは TiO_2 エッチング専用装置として、利用開放していなかった RIE 装置 (RIE-101L) を用いることとし、筆者がエッチングプロセスを担当した。1995 年に導入した RIE 装置 (RIE-101L) の使用可能なチャンバーや排気系をそのまま活用し、不具合部分であった搬送機能と蓋などを手動仕様に改造して使用した。 TiO_2 基板を用いて垂直なエッチング形状ができることを確認し、 TiO_2 基板へピンホールエッチングを行った。図 4.6 (b) に TiO_2 ピンホールに Nb_2O_5 を充填した試作品の光学顕微鏡写真を示す。また図 4.6 (c) に TiO_2 のエッチング側壁の SEM 写真を示す。設計通りの光学素子を作製することができた。今回作製した光学素子を用いて実験を行ったところ、良好な測定精度が得られることが示され[23, 24]、系外惑星の直接撮像観測を目的としたせいめい望遠鏡の極限補償光学装置 SEICA へ搭載されることにつながった。

4.2.2 格子ブレードのための垂直形状の Si 貫通エッチングの条件検討

垂直形状エッチングを行った研究の二つ目の事例として、細胞を切断するマイクロブレード作製のための Si の貫通エッチングについて述べる。三次元構造のための深堀エッチングや多層構造デバイスのための基板貫通プロセスが求められる場合、Deep-RIE を用いた加工が行われる。利用研究室より細胞を切断する Si 格子ブレード作製の相談があった。380 μm 厚の Si 基板を Deep-RIE を用いて格子幅 10 μm のパターンで貫通エッチングすることが目標である。図 4.7 (a) に予備実験で作製した格子幅 100 μm の格子ブレードを示す。

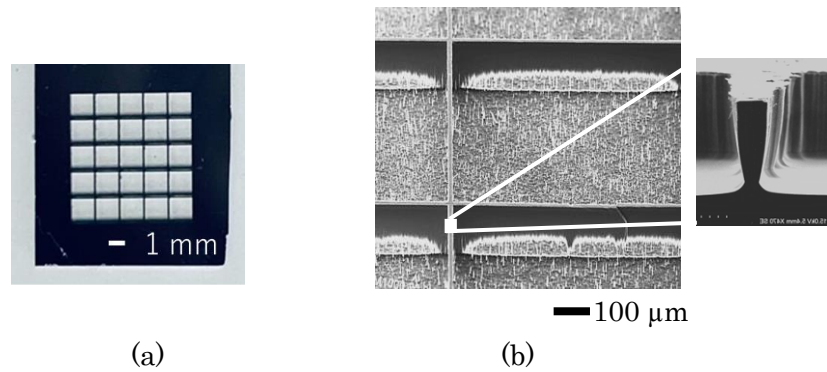


図 4.7 (a) 予備実験で作製した格子幅 $100\ \mu\text{m}$ の Si 格子型ブレード (Top View)
 (b) エッチング途中の格子幅 $10\ \mu\text{m}$ の Si 格子型ブレード
 および格子の交差部付近でへき開した格子の断面 (Tilted View)

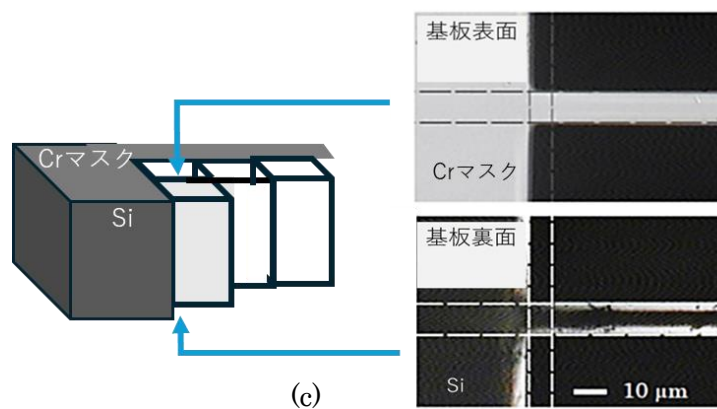
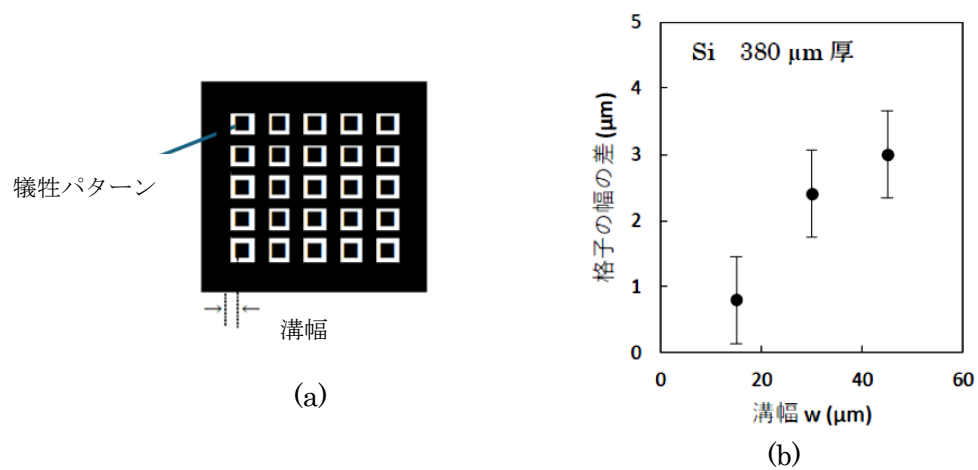


図 4.8 (a) 変更したマスクパターン図 (b) 溝幅と基板表裏の格子幅の差の関係
 (c) 溝幅 $15\ \mu\text{m}$ の基板表裏面から撮影した $10\ \mu\text{m}$ 幅の格子の顕微鏡写真 (Top View)

格子幅が 100 μm では、基板の底まで格子の形を保ったまま貫通エッチングすることは可能であったが、格子の側壁は底に向かってテーパ形状となり、マスクでは 100 μm の格子幅が裏面側では 10 μm 幅となった。図 4.7 (b) にエッチング途中の格子幅 10 μm の格子ブレードを示す。垂直エッチングに最適な条件としたにもかかわらず、格子幅 10 μm ではエッチングの途中でサイドエッチングにより側壁がなくなってしまった。

Deep-RIE によるラインアンドスペースのエッチングでは、トレンチ幅が狭い場合、トレンチ側壁の底の方もパッシベーション膜で保護され、サイドエッチングされにくいことが先行研究で報告されている[25]。そこで、狭いトレンチパターンをエッチングするために、格子の中に一回り小さい正方形の犠牲パターンを追加し、格子と犠牲パターン間の狭い溝をエッチングするマスクパターンに変更した。図 4.8(a) に変更したマスクパターン図を示す。図 4.8(b) に、格子と犠牲パターンの溝幅と基板表面側と裏面側の格子幅の差の関係を示す。格子と犠牲パターンの間の溝幅が小さいほど、基板の表面側と裏面側の格子幅の差が小さく、垂直に近い側面エッチングが可能となることが分かった。図 4.8(c) に溝幅 15 μm で貫通エッチングを行った 10 μm 幅の格子の Cr マスクのついた基板の表面と裏面の Si 基板の顕微鏡写真を示す。格子と犠牲パターンの間の溝幅 15 μm において、格子幅 10 μm のブレードのための Si 貫通エッチングが達成できた。

4.3 第4章まとめ

プラズマ装置構造はシンプルであるが、プラズマ中の反応はきわめて複雑であり、関与するパラメーターの数も非常に多い。しかしながら、プラズマ制御パラメーターから得られた結果を解析し、最適化することにより、所望の形状のエッチングを得ることが可能となる。装置側だけでなく、エッチングする基板の開口部の面積（構造）のような基板側のパラメーターも影響するので、設計の最適化も必要である。本章では垂直エッチング形状を目的として、 TiO_2 のピンホールエッチングおよびマイクロブレードのための Si 貫通エッチングの事例を述べた。このように最適条件を模索して得られたデータは、マイクロプロセス部門が年度末に発行するテクニカルレポートにまとめて公開し、技術情報として利用者の実験の参考に活用されている。また、実験結果は内容を発展させて研究会や応用物理学会などで発表し、一部は論文の共著に入れて頂いた[24]。今後も実験相談を起点としたプロセス条件検討の実験結果をテクニカルレポートや学会などでアウトプットすることで、エッチング技術による微細加工の可能性を示したい。

第5章 総括と展望

5.1 まとめとメカノマイクロプロセス室の今後の課題

経営・教育・研究戦略に基づき研究基盤の共用化を統括し、共用設備を中心とした最高水準の研究支援の提供を目指すオープンファシリティセンターの意義のもと、第2章「機械系クリーンルーム管理運営の改善」では、メーカー（電子デバイス）との比較を通して「ヒト」と「モノ」に着目し、MEMS、光デバイス、電子デバイス、バイオ関連分野といった広範囲かつ最先端の研究を行う大学機械系クリーンルーム利用者のニーズに合致した管理運営の改善を、第3章「表面改質技術の研究支援」および第4章「ドライエッチング技術の研究支援」では、利用研究室からの実験相談を起点とした技術支援から、問題解決を通じて技術の知見や研究成果につながった事例を示した。

筆者が考えるメカノマイクロプロセス室における今後の課題と提案を示す。一つ目は、引き続き清浄化への努力を継続すること、利用者から清浄化への理解と協力を得ることである。共用設備であるため、利用者の研究内容や利用目的は研究ごとに異なり、一律に理解と協力を得ることは容易ではない。こちらの要望を受け入れてもらうためには、納得が必要である。例えば目で見てわかるデータの開示や実験結果を示すなどコミュニケーションを通じた働きかけが重要となる。また納得の結果、協力のための行動につなげるためには、習慣化することもポイントである。コロナ禍で習慣として定着したマスクと手袋の着用義務化は、自然に馴染んだ例である。納得のいく働きかけとコミュニケーションを繰り返し図りながら、管理運営する側が清浄環境を保つために努力をする姿勢を示すことで、「きれいに使う」ことをメカノマイクロプロセス室の当たり前の習慣とすることが、持続的な清浄化のポイントではないかと考える。

二つ目の課題は、近々に対策が必要である経年劣化に伴う設備および装置の不具合対応である。図 5.1 に故障率曲線[26-28]を示す。工作機械の耐用年数はおおむね 17~18 年とされており、30 年近く稼働しているメカノマイクロプロセス室はすでに摩耗故障期に入っている。摩耗故障期では、設備および装置の更新が必須であるが、限られた予算の中で更新費用を捻出するのは困難である。この解決のために、研究のトレンドや利用研究室が求めるプロセスの内容によっては、設備および装置をリストラすることも一考である。例えば、現在使用しているダウンフロー型の空調も、移動可能なサイドフローパネルにすることで、限られた区画の清浄度を上げることが可能であり、同じ室内に塵埃を嫌う装置と塵埃を発生する装置が置かれているメカノマイクロプロセス室においてはメリハリのある清浄化対策となる。一方、更新以外での延命法として、部品交換による故障率の低減と部分更新によ

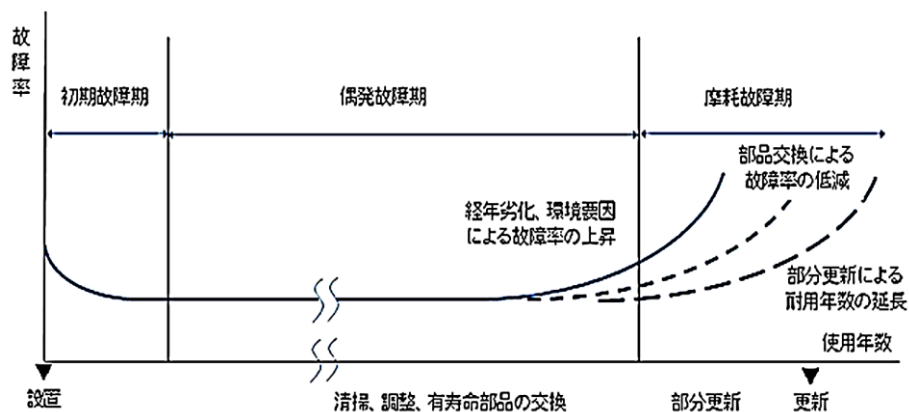


図 5.1 機械・装置における故障率曲線（バスタブカーブ） [26]

る耐用年数の延長がある。メカノマイクロプロセス室で装置に不具合が出た際は、マイクロプロセス部門の該当装置担当者がまずは自力で調整し、解決できなければメーカーに相談して修理を依頼する。そこで軽微な不具合は部品交換で解決できるが、保証が切れて部品も生産終了している古い装置は、部分更新もしくは廃棄となる。したがって、定期点検によって軽微な不具合を発見し、部品交換しながら未然に大きな故障を予防することは、装置の延命に効果的である。最近ではシステムが自動化しブラックボックス化された装置が多いが、物理現象や装置の仕組みを理解する教育的観点からも、自動化されていない単純な構成の方が、大学の実験装置としては望ましい。第 3 章の自作した H_2O プラズマ発生装置や第 4 章の TiO_2 のピンホールエッチングで用いた手動化した RIE-101L のように、改良できるものは部分交換可能なシンプルな装置に部分更新し、メンテナンスしながら長く大事に使用することも、装置延命につながると思われる。

しかしながら、摩耗故障期に入った設備および装置の延命にも限りがある。メカノマイクロプロセス室も大学の予算計画に盛り込んで大幅な更新を行うことが最も望ましい。MEMS および半導体は今後も発展する研究分野であり、特に半導体は、国としても 2030 年までに 12 兆円を超える官民投資を行う大変重要な産業である。技術の発展や未来の産業を担う人財を育成する教育機関の場として、大学の機械系クリーンルームへの更なる環境の整備や充実が強く望まれる。

5.2 高度技術専門人財としてのマイクロプロセス系 TC が目指すべき研究支援の在り方

利用者にベストコンディションで装置を使用してもらい、良い研究成果と技術人財を輩出することが技術職員としての本望であり、ひいては共用設備を中心とした最高水準の研

研究支援の提供を目指すオープンファシリティセンターの意義を具現化するものである。利用者が望む微細加工の実現に近づけるよう研究準備段階から意見交換し、気軽に相談に乗ることで、「良い実験結果が出て晴れて卒業できました」「研究成果が出て世の中に発表することができました」と感謝されることが、技術職員であることの喜びである。ヒト（利用研究室、利用者やメーカー）やモノ（設備や装置）より発せられる情報に改善のヒントが多いことから、筆者が関わる機械系クリーンルームのより良い管理運営と研究支援のためには、日々のコミュニケーションが大変重要である。例えば利用者に対する声掛けから、実験の進行具合や装置の使用状況がわかり、時には清浄度に関わる注意喚起および事故防止も可能となる。また装置は日常点検を通しての保全を行うことで不具合を未然に防ぎ、結果として故障率曲線を低く抑えることが可能となる。これらは装置とのコミュニケーションである。円滑なコミュニケーションのためには、ヒトとモノから信頼されるに資する知識と技術力を土台とし、不具合発見のための違和感や解決のためのヒントをキャッチするアンテナを持つことが大変重要である。そのためには、展示会などを利用した技術動向の情報収集や各種技術研究会への参加、また自己研鑽は必須である。そして、新技術やより良い研究環境の整備、充実のための設備および装置導入を提案し、研究の発展に主体的にアプローチしていくことが、高度技術専門人財であるテクニカルコンダクターが目指すべき研究支援の在り方であると思われる。

参考文献

- [1] 東京工業大学オープンファシリティセンターHP (2024 年 8 月時点)
<https://www.ofc.titech.ac.jp/overview/>
- [2] 東京工業大学メカノマイクロプロセス室 HP (2024 年 8 月時点)
<http://www.mmp.pi.titech.ac.jp/equip.pdf>
- [3] Intechno Japan HP
<https://www.intechno.co.jp/information/techinfo/aircleanlinessclass/>
- [4] アイオン株式会社 HP https://www.aion-kk.co.jp/column/cleanroom_voll/
- [5] R. J. Goldston and P. H. Rutherford, Introduction to plasma physics, Taylor & Francis, Chap. 1, New York, (1995)
- [6] 第 21 回 MEMS 集中講義資料, マイクロマシニング 1 p.3 (2022)
- [7] JIS Z8122
- [8] JIS Z8141
- [9] 2019 年度第 19 回ナノファブスクエア講習会資料 P.8 (2019)
- [10] 寺井ほか, 電学論 E, 38 p.358 (2018)
- [11] M. Tohnishi and A. Matsutani, Sensors and Materials, Vol.33, No.2, p.569 (2021)
- [12] 遠西美重, 佐藤美那, 松下祥子, 松谷晃宏, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 22a-P01-9 (2022)
- [13] M. Tohnishi, M. Sato, A. Matsutani, T. Ubukata, and S. Matsushita, Sensors and Materials, Vol.35, No.3, p.1023 (2023)
- [14] S. Ertman, K. Orzechowski, K. Rutkowska, O. Kołodyńska, J. Różycka, A. Ignaciuk, N. Wasilewska, T. Osuch, and T. R. Woliński, Scientific Reports, Vol.13, 13896 (2023)
- [15] S. Baczyński, P. Sobotka, K. Marchlewicz, M. Juchniewicz, A. Dybko, and K.A. Rutkowska, Crystals, Vol.12 No.5, p.729 (2022)
- [16] NR Ali, MH Ghanim, MZ Abdullah, and MAM Zawawi, IEEE Access, Vol.9, 129661 (2021)
- [17] P. Sobotka, K. Marchlewicz, M. Juchniewicz, and A. Dybko, Crystals, Vol.12, p.729 (2022)
- [18] M. Sato, M. Tohnishi, and A. Matsutani, Sensors and Materials, Vol.34, No.1, p.37 (2022)
- [19] 2006 年 11 月 MEMS テクノロジ p.253 (2007)
- [20] 板谷良平 応用物理, 第 64 巻, 第 6 号 p.526 (1995)

- [21] 菅野卓雄 半導体プラズマプロセス技術 第3版 産業図書, p. 44
- [22] A. Matsutani, F. Koyama, and K. Iga, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 30, No. 2 p. 428 (1991)
- [23] R. Tsukui, M. Kino, K. Yamamoto, M. Sato, M. Tohnishi, A. Matsutani, and M. Kurita, Optics Continuum, Vol. 2, p. 382 (2023)
- [24] 津久井遼, 木野勝, 山本広大, 栗田光樹夫, 松谷晃宏, 日本天文学会 2021 年秋季年会, V245b, Sept. (2021)
- [25] A. Matsutani, K. Nishioka, and M. Sato, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55 06GH05 (2016)
- [26] 厚生労働省安全サイト HP https://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo59_1.html
- [27] JIS Z8115
- [28] MIL HANDBOOK 217F

成果発表一覧

学術論文への貢献

Ryo Tsukui, Masaru Kino, Kodai Yamamoto, Mina Sato, Mie Tohnishi, Akihiro Matsutani, Mikio Kurita. Experimental characterization of the birefringent point-diffraction interferometer wavefront sensor, Proc. of SPIE Vol.13097 130971W (2024)

Mina Sato, Mie Tohnishi, Akihiro Matsutani. Microfabrication of Si by KOH Etchant Using Etching Masks Amorphized by Ion Beam Extracted from Electron Cyclotron Plasma, Sensors and Materials, Vol.36, No.4, p.319 (2024)

Mie Tohnishi, Mina Sato, Akihiro Matsutani, Takashi Ubukata, Sachiko Matsushita. Surface Treatment of Polyimide using Solid-source H₂O Plasma for Fabrication of Ge Electrode, Sensors and Materials, Vol.35, No.3, p.1023 (2023)

Ryo Tsukui, Masaru Kino, Kodai Yamamoto, Mina Sato, Mie Tohnishi, Akihiro Matsutani, Mikio Kurita. Laboratory demonstration of the birefringent point-diffraction interferometer wavefront sensor, Optics Continuum, Vol.2, p.382 (2023)

Mina Sato, Mie Tohnishi, Akihiro Matsutani. Microfabrication of Si by KOH Etchant Using Etching Mask Amorphized by Ar Ion Beam, Sensors and Materials, Vol.34, No.1, p.37 (2022)

Mie Tohnishi, Akihiro Matsutani. Surface Treatment of Polydimethylsiloxane and Glass Using Solid-source H₂O Plasma for Fabrication of Microfluidic Devices, Sensors and Materials, Vol.33, No.2, p.569 (2021)

学会発表等への貢献

Mina Sato, Mie Tohnishi, Miho Fujimoto, Akihiro Matsutani. Submicrometer-sized Patterning of Photoresist by Electron Beam Projection Lithography Using Tabletop Scanning Electron Microscope System and Si Stencil Mask, MNC2024 (37th International Microprocesses and Nanotechnology Conference), 14P-1-6, Nov. (2024)

遠西 美重. 固体ソース H₂O プラズマによるフォトレジストのエッチング分布の均一化, 第 30 回機器・分析技術研究会, P-33, Sept. (2024)

松谷晃宏, 遠西美重, 吉田 桜子. Os コーティングによる SU-8 膜の梁構造の機械的強度の向上, 2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23p-P05-36, Mar. (2024)

遠西美重, 松下祥子, 松谷晃宏. Deep-RIE で作製したブラック Ge の微細構造側壁のスキヤロップ深さと反射率との関係, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23p-P05-33, Mar. (2024)

陳科廷, 遠西美重, 松谷晃宏, 松下祥子. 二枚楕形電極を重ねた Ge 増感型熱利用電池構造のシミュレーションと作製, 2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 22p-13P-10, Mar. 2024.

佐藤美那, 遠西美重, 松谷晃宏. イオンビーム照射によりアモルファス化した Si 表面の XRR 測定, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23p-P05-34, Mar. (2024)

Mie Tohnishi, Sachiko Matsushita, Akihiro Matsutani. Fabrication of nonreflective black germanium in near-infrared region up to a wavelength of 2.5 μm by $\text{SF}_6+\text{O}_2/\text{C}_4\text{F}_8$ -plasma-based deep reactive ion etching, 2023 International Symposium on Dry Process (DPS 2023), Proceedings of International Symposium on Dry Process, P-5, Nov. (2023)

遠西美重, 松谷晃宏, 松下祥子. Deep-RIE により作製したブラック Ge 微細構造側壁の EDX 分析, 2023 年第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-P07-15, Sept. (2023)

松谷晃宏, 遠西美重. デジタルカメラと回折格子による Si の Deep-RIE プラズマの発光分光測定と EDX による高アスペクト比 (HAR) エッチング側壁の分析の比較, 2023 年第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-P07-16, Sept. (2023)

遠西 美重, 松谷晃宏, 生方 俊, 松下祥子. 固体ソース H_2O プラズマ処理したポリイミド樹脂の表面の XPS 分析, 2023 年第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-PA02-5, Mar. (2023)

佐藤 美那, 遠西美重, 松谷晃宏. Ar^+ ビーム照射により作製した KOH エッチング用 Si マスクの XPS 解析, 2023 年第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-PA02-6, Mar. (2023)

津久井遼, 木野勝, 山本広大, 佐藤美那, 遠西美重, 松谷晃宏, 栗田光樹夫, 点回折干渉計方式による極限補償光学用波面センサの開発, 2023 年度精密工学会春季学術講演会, D45, Mar. (2023)

松谷晃宏, 遠西美重, 藤本美穂, 松下祥子. ポジ型電子線レジスト SML1000 をマスクとして用いた SF₆-RIE による Ge のドライエッチング, 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-P01-5, Sept. (2022)

佐藤美那, 遠西美重, 松谷晃宏. Ar⁺ビーム照射による Si アモルファスマスクを利用した KOH エッチングによる単一細胞分離プレートとマイクロ流路の作製, 22a-P01-8, 第 69 回応用物理学会 春季学術講演会, Mar. (2022)

遠西 美重, 佐藤美那, 松下祥子, 松谷晃宏. ポリイミドシート上へスパッタ成膜した Cr/Ge 電極の固体ソース H₂O プラズマを用いた前処理による低抵抗化, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 22a-P01-9, Mar. (2022)

遠西 美重, 佐藤美那, 松下祥子, 松谷晃宏. 固体ソース H₂O プラズマを用いて表面処理したポリイミドテープ上の Cr/Cu 電極の折り曲げ耐久性, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 21a-P03-5, Sept. (2021)

佐藤美那, 遠西美重, 松谷晃宏. エッチングマスクとして Ar⁺イオンビームを照射した 微細マスクパターンを用いた KOH エッチングによる Si の微細加工, 第 82 回 応用物理学会秋季学術講演会, 21a-P03-7, Sept. (2021)

遠西 美重, 松谷 晃宏. 固体ソース H₂O プラズマ処理したポジ型フォトリソの表面粗さの観察, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-P04-6, Mar. (2021)

遠西 美重, 松谷 晃宏. 固体ソース H₂O プラズマ処理によるガラスと PDMS の接合表面処理, 2020 年度機器・分析技術研究会, P-31, Sept. (2020)

遠西 美重. PDMS とガラスの酸素プラズマ処理による接合, 技術研究会 2020, P-3-08, Mar. (2020)

遠西 美重, 松谷 晃宏. 固体ソース H₂O プラズマ処理による PDMS とガラスの接合, 第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-PA1-14, Mar. (2020)

松谷晃宏, 佐藤美那, 遠西美重, 藤本 美穂, 平野 明子, 西沢望, 進士忠彦, 初澤毅. 東京工業大学におけるクリーンルーム統合共用化による 組織的研究支援の推進, 研究・イノベーション学会第 34 回年次学術大会, 研究・イノベーション学会第 34 回年次学術大会講演要旨集, p. 245, Oct. (2019)

科学研究費採択課題への貢献

研究課題/領域番号：24H02547

研究題目：異種材料接合の表面処理における固体ソース H₂O プラズマ分布均一化のための改良

研究種目：奨励研究

研究機関：東京工業大学

研究代表者：遠西 美重

研究機関（年度）2024-04-01 - 2025-03-31

謝辞

本論文作成にあたり、ご指導賜りました主査の進士忠彦 教授、副査の西迫貴志 准教授、松谷晃宏 部門長に深く感謝申し上げます。

メカノマイクロプロセス室運営にお力添え賜りました初澤毅 名誉教授、北里大学西沢望 講師に深く感謝申し上げます。

メカノマイクロプロセス室の運営にご協力いただいた研究室の教職員の皆様、また本論文で取り上げた研究でお世話になりました柳田保子 教授、松下祥子 准教授、京都大学長田哲也 教授に感謝申し上げます。

表面分析にご協力賜りましたパーキンエルマージャパン新居田氏、本学コアファシリティセンター分析部門金井技術専門員に深く感謝申し上げます。日々の業務において多大なご協力並びにご助言を頂きました佐藤美那 技術専門員、藤本美穂 一般技術職員に厚く御礼申し上げます。

これまでマイクロプロセス部門の運営やメカノマイクロプロセス室での業務においてご指導・ご協力頂きました庄司大 技術専門員、西岡國生 旧技術職員、長谷部浩一 旧技術職員、田村茂雄 旧技術職員、平野明子 旧技術職員、吉川浩太 技術支援員、星野弥生 旧技術支援員に深く感謝申し上げます。

これまでのメカノマイクロプロセス室の運営や業務にあたりご理解とご支援いただきました旧オープンファシリティセンター長、旧オープンファシリティセンター副センター長、旧オープンファシリティセンター研究基盤戦略室の皆様、総合研究院 未来産業技術研究所 事務室の皆様に深く感謝申し上げます。

最後に、本研究支援の遂行にあたり様々なご協力いただきました本学 リサーチインフラ・マネジメント機構の職員の皆様に深く感謝申し上げます。