

半導体／MEMS プロセスを利用したナノマイクロ 金型形成技術に関する研究

研究報告者 鈴木 恵友

プロフィール



最終学歴 平成 10 年 3 月
北陸先端科学技術大学大学院
材料科学研究科 博士後期課程修了
専門分野 材料科学、半導体プロセス、超精密加工技術
学 位 博士(材料科学)
所属団体 九州工業大学大学院 情報工学研究院
機械情報工学研究系
役 職 名 教授

今後の抱負

本研究では半導体プロセスで開発されてきたマイクロレベルの微細加工技術を、マイクロ金型形成技術に応用した。背景として半導体技術ではリソグラフィ技術の進展によりトランジスタや配線などナノレベルでのパターン形成を量産レベルで実現させている。今後、微細パターン形成技術では、本研究で確立したマイクロ金型形成技術を適応させることで、従来の機械加工で困難なマイクロ・ナノ微細構造を容易に実現させることができる。マイクロ金型の応用例としては、低屈折透明樹脂によるマイクロパターンパッドなどが挙げられる。本手法で作製されたマイクロパターンパッドは、水と同程度の屈折率である。そのため低屈折透明パッドでは、水系研磨材を用いた際にパッドの表面凹凸のなどの外乱要因を除外でき、研磨中の微粒子挙動を直接的にモニタリングすることが可能である。この技術により加工中における研磨微粒子などの材料除去プロセスや形成された加工面などの情報を直接的に取得し、加工プロセスにフィードバックすることで、より高精度な加工技術への展開が期待できる。

概要

- (1) 半導体プロセスを用いてシリコン型から Ni めっきによるマイクロ金型技術の作製手法の確立した。この成果により半導体プロセスにより形成されたマイクロレベルの構造をマイクロ金型へ転写することが実現可能となった。現在、最先端の半導体素子では 20nm 程度の配線パターンを Cu めっき技術で実現しているが、本技術が応用可能であれば半導体プロセスの副産物として新規にマイクロ・ナノ金型の実現が期待できる。
- (2) 形成されたマイクロ金型を用いたナノインプリント法において剥離が問題視されてきた。ここでは、インプリント材料を独自にブレンドすることで剥離剤を使用せずに転写することが可能となった。
- (3) マイクロ金型は半導体で使用されている化学的機械的研磨に用いるポリシングパッドの表面制御技術へ適用した。ここではポリシングパッド表面においては、ドレッシング処理により 10 μ m 程度の表面アスペリティの状態が研磨性能に直接的に影響することを別の研究で推測したが、マイクロパターンパッドで表面形状を制御し、実際に研磨試験により検証した。
- (4) マイクロ金型により形成された低屈折率のパッドの開発によりこれまで困難とされてきた研磨中におけるナノ微粒子の挙動の観察を可能にすることでポリシングパッドの線速度とナノ微粒子の運動、そして、ポリシングパッドにおける接触点近傍における微粒子の集積状況など、視覚的に捉えることを可能にした。
- (5) ポリシングパッドの開口部に低屈折率パッドを挿入することで、in-situ での研磨微粒子観察や残膜測定が可能となり本手法が難加工材の研磨技術以外に最先端の半導体プロセスにも展開を図ることが可能となる。

本文

CMP (Chemical Mechanical Polishing) は、図 1 に示すように従来の機械的研磨とは異なり、化学的作用と機械的作用を併用することで原子レベルの研磨表面を無欠陥でかつ高効率に研磨することが実現可能である。そのため、CMP は SiC 基板やサファイア基板などの最終仕上げ工程や、シリコン半導体におけるトランジスタや配線形成プロセスなどに適用されている。特に近年、シリコン半導体素子の高速化やメモリー容量の増加や電気自動車で使用されるパワー半導体の低消費電力化に伴い、CMP に要求される技術レベルの水準が年々高くなっている。国内ではパワー半導体の需要が年々増加し、サファイアや SiC 基板の生産能力を増強させるため、これらの難加工材料に対して原子レベルの基板表面を高効率に実現可能な研磨手法が必要不可欠である。

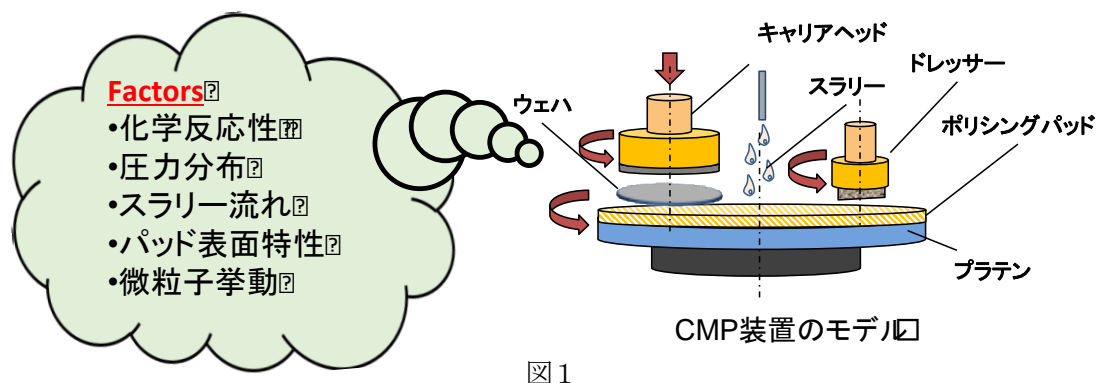


図1

本報告では、難加工材料に対する高効率研磨を実現可能にするため、CMPにおける材料除去メカニズムを考慮したマイクロパターンパッドによる高速研磨や、水と同程度の屈折率をもった低屈折率透明パッドの導入による研磨微粒子の挙動観察、そして形状発現型ポリッシングパッドによる長寿命パッドを提案し、これらの内容に関して述べる

本研究の研究背景として、パワー半導体を中心とした半導体デバイスに関する内容やCMPの導入経緯に関する内容について説明した。ここでは半導体プロセスにおける技術のトレンドや研磨技術の現状と課題について示している。この背景ではCMP装置に関する内容や消耗材としてスラリーやポリッシングパッド、ドレッサーに関する内容を示している。消耗材に関しては、これまでスラリーに関する研究が精力的に行われてきたが、ポリッシングパッドに関しては、パッドの表面形状が研磨性能に直接的に影響することが知られているにも関わらずほとんど未開拓であった。その理由としては、ドレッシング後のポリッシングパッド表面形状が複雑で、研磨性能に支配的な評価パラメータが特定困難なためである。過去の研究ではポリッシングパッドの評価指標として、表面粗さのほか空間波長の概念を導入し、材料除去レートと空間波長の関係性を評価した(図2参照)。

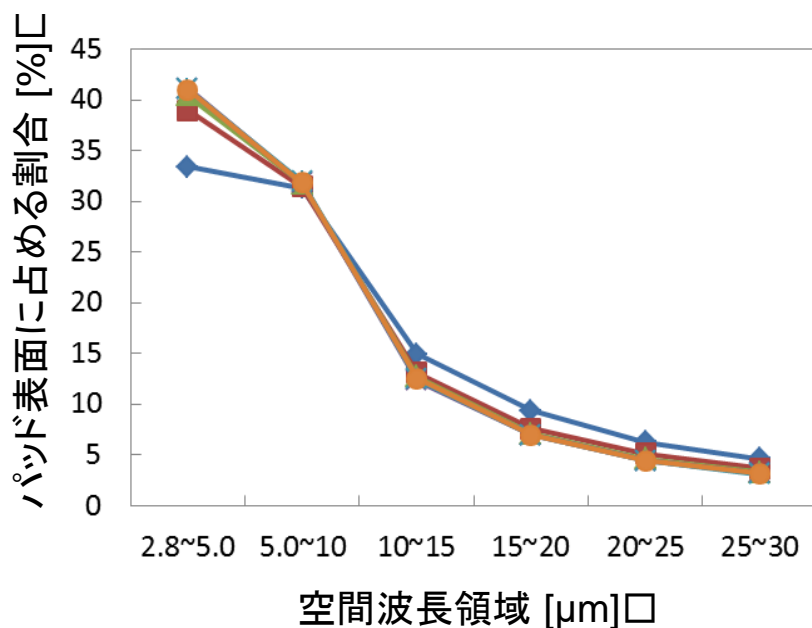


図2

ここでは $10\ \mu\text{m}$ 程度の空間波長領域で材料除去レートと強相関を示す結果が得られたが、これらの空間波長成分を選択的に形成して評価する手法が未確立であった。そのため本研究では半導体プロセスを用いたマイクロパターンパッドを開発し、CMP の材料除去メカニズムとポリシングパッドの表面形状や材質の関係について評価を進めてきた。これまで CMP の材料除去メカニズムに関する研究は、化学的作用や機械的作用の複合作用と説明されているが、実際のところ明らかにされていない。これまでの材料除去メカニズムに関する研究としては、Cook や Luo らによって材料除去モデルが報告されているが、研磨性能との関係については述べられていない。そのため CMP の研磨条件を設定する際、プレストンの関係式に基づき、エンジニアが経験的に条件を最適化しているのが実情である。プレストンの関係式では研磨圧力を高くし、相対速度を大きくすれば材料除去レートが増加するが、表面欠陥が増加する。そのため本研究ではマイクロパターンパッドの導入により、研磨表面を無欠陥の状態材料除去レートを高くするための研磨手法についても提案した。

次に、ポリシングパッドにおける空間波長の解析結果を検証するため、半導体プロセスを用いたマイクロパターンパッドを開発し、CMP における研磨レートとの関係性について示している。ここでは、図3に示すように $10\ \mu\text{m}$ 程度の空間波長領域で材料除去レートと強相関を示す結果が得られたため、マイクロパターンパッドのパターンピッチ寸法を $12\ \mu\text{m}$ に設定した。

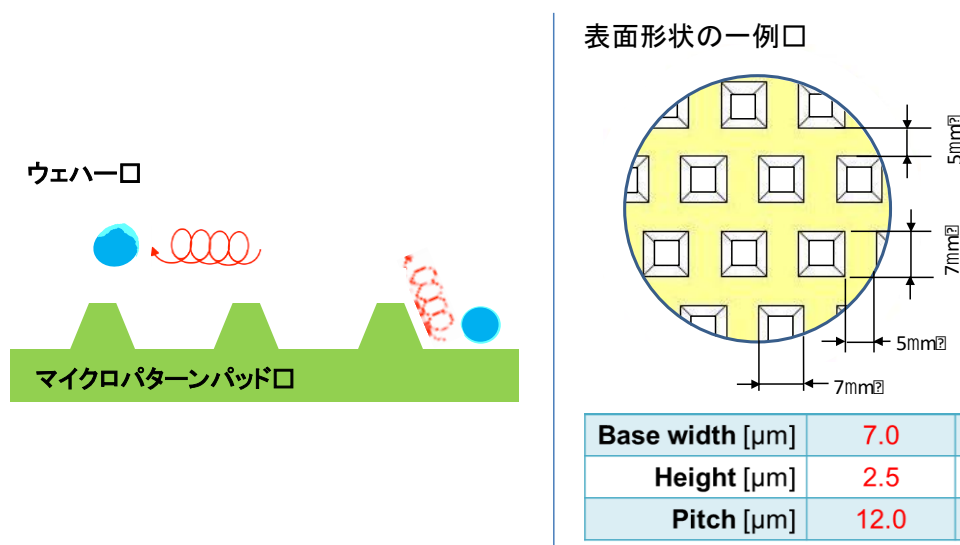


図3

マイクロパターンパッドの開発は、専用のインプリント装置を製作し、ニッケルめっきによるマイクロ金型や熱可塑性樹脂シートを用いたインプリントプロセスにより実施した。ニッケルめっきによるマイクロ金型は、フォトリソグラフィ工程とウェットエッチング工程によりシリコン基板表面にピラミッド形状の凹部を形成した。ここではピラミッドの底辺の寸法が $10\ \mu\text{m}$ 程度の空間波長領域で材料除去レートと強相関を示す結果が得られたが、これらの空間波長成分を選択的に形成して評価する手法が未確立であった。そのため本研究では $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ の底辺寸法をもつフォ

トマスクを用いて、ピラミッド形状を形成している。次に、インプリントにおける熱圧着プロセスへ適用させるためシリコン型から厚膜用のニッケル電着装置を用いてマイクロ金型を作製した。ニッケルめっき膜を適用した背景としては、シリコン基板をインプリントに適用した際、脆性が低いため金型自体が破損する問題を解決するためである。インプリント工程では図5に示すように専用の熱圧着装置を設計・製作し、マイクロパターンパッドを作製した。ここではインプリント後のマイクロパターンパッド厚さの均一化のほか、剥離の問題を解決する必要があった。離型に関しては、当初シリコン系の剥離剤を用いたが、液滴自体がマイクロパターンの寸法より大きくなってしまいうため、パターン自体が消滅してしまう問題を解決する必要があった。そのため複数の熱可塑性樹脂から剥離剤が不要な樹脂を特定し、インプリントにおけるプロセス条件の最適化をおこなった。ここではポリエチレン（図6，図7）やポリプロピレン、そしてフッ素系の樹脂などをマイクロパターンパッドとして用いている。その結果、サファイア基板の研磨においては、汎用パッドのSUBA600を超える段差緩和量レートを達成した。

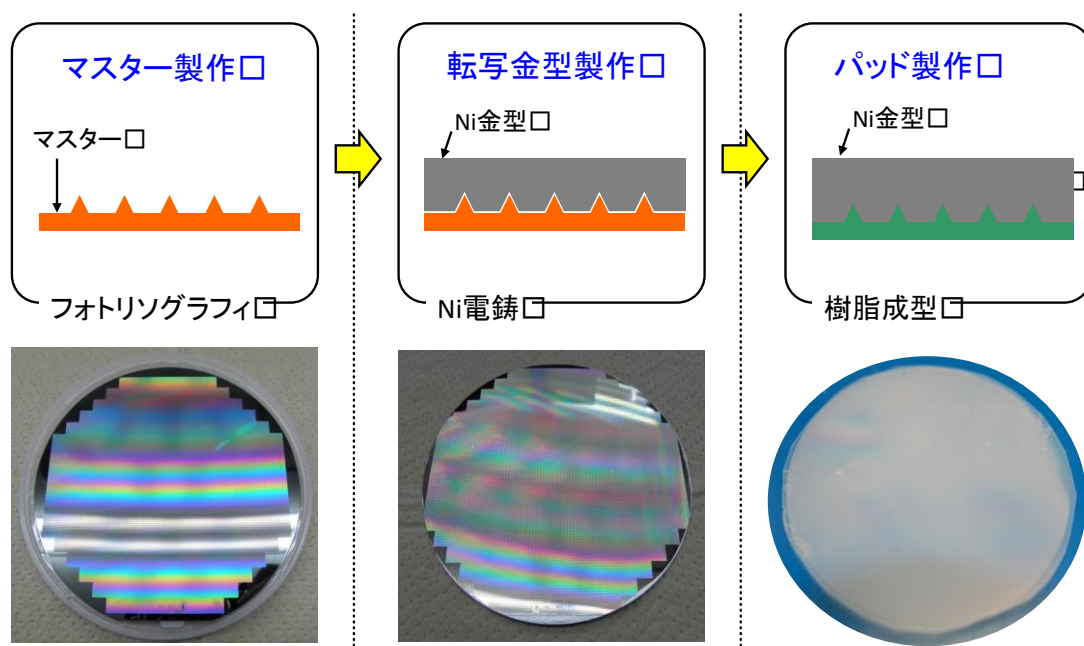
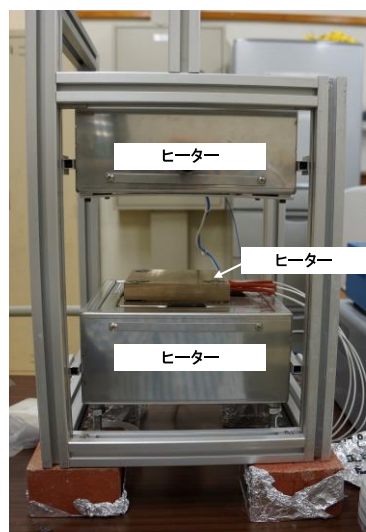


図4

そして、これらの研究で明らかとなった点としては、過去の研究において空間波長と材料除去レートとの関係が提唱されてきたが、実際にマイクロパターンパッドで検証することで $10\ \mu\text{m}$ 程度の波長領域が研磨に対して支配的であることや、材料除去レートがマイクロパターン間の配置よりもポリシングパッドの材質に対して影響されるため、親水性などの材料に関する評価パラメータが重要であることである。またマイクロパターンパッドは、ポリシングパッドと研磨性能の関係性を考察するうえでは有効であるが、研磨によるマイクロパターンの摩滅が問題となる。そのためマイクロパターンパッドを実際の半導体プロセスに適用するためには寿命の問題を解決する必要がある。



インプリンティング装置外観写真

● 装置情報

加熱温度 [°C]	400 (MAX)
荷重 [kg]	6
成型サイズ	4inch (Φ100mm)

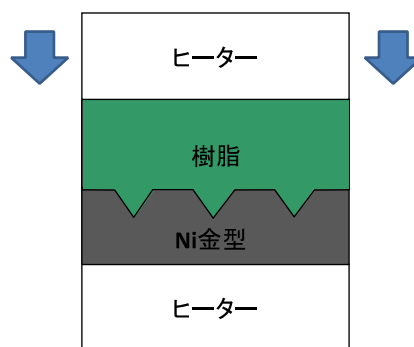
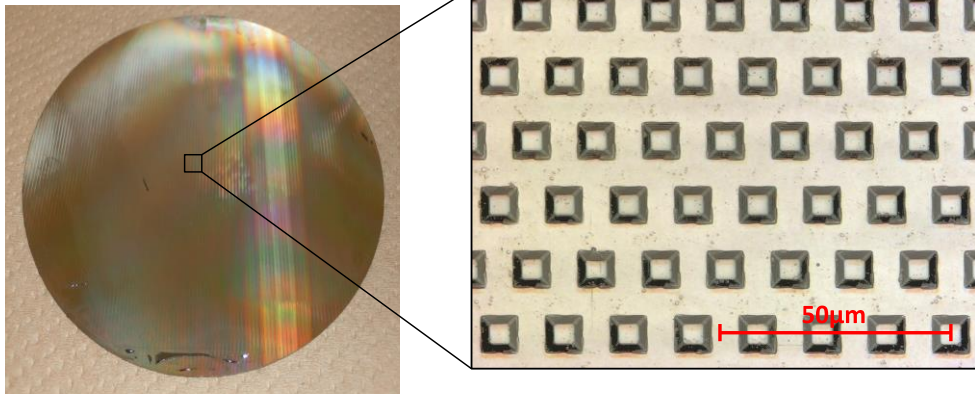


図5

そして、マイクロパターンパッドの樹脂材を低屈折率かつ透明にすることで、スラリー中における研磨微粒子や膜厚のモニタリングを実現可能にした。この低屈折透明パッドは図8に示すようにフッ素系樹脂を適用することで屈折率を水と同等適度に調整されている。低屈折透明パッドはマイクロ金型で形成されたマイクロパターンが組み込まれており、空気中では光学顕微鏡によりマイクロパターンを観察することが可能である。一方、スラリーなど水系の微粒子分散液と接触させた場合、低屈折率透明パッドの屈折率が水と同程度であるため、図9に示すように光学顕微鏡像におけるマイクロパターンのコントラストは消滅する。そのため低屈折率透明パッドをポリシングパッドに組み込むことにより、研磨微粒子の挙動観察が可能となる(図10)。この手法の利点としては、研磨微粒子などの観察対象物と計測位置がほぼ同一線上にあることから、アッペの原理の観点から高精度な微粒子計測が可能である。ここではダイヤモンドおよびセリア微粒子の挙動観察を行った結果、研磨基板とポリシングパッド間の相対速度が小さい場合、研磨微粒子はポリシングパッドの運動に追従するが、速度を大きくした場合追従しなくなる。このとき研磨微粒子の運動ベクトルはランダムになり、研磨微粒子の運動は研磨面上をランダムに運動することにより平均化され、ウェハ面内を均一に平坦化するものと推測される。また低屈折率透明パッドの適用により、ポリシングパッドとウェハ間のスラリー液層膜厚の変動やパッド表面粗さに影響されず安定した測定が可能であることを確認した。

● Ni金型



パターン形状
底辺: 7μm
高さ: 2.5μm

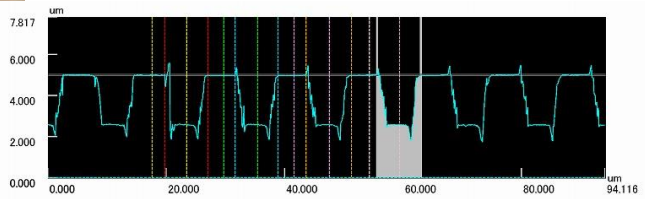
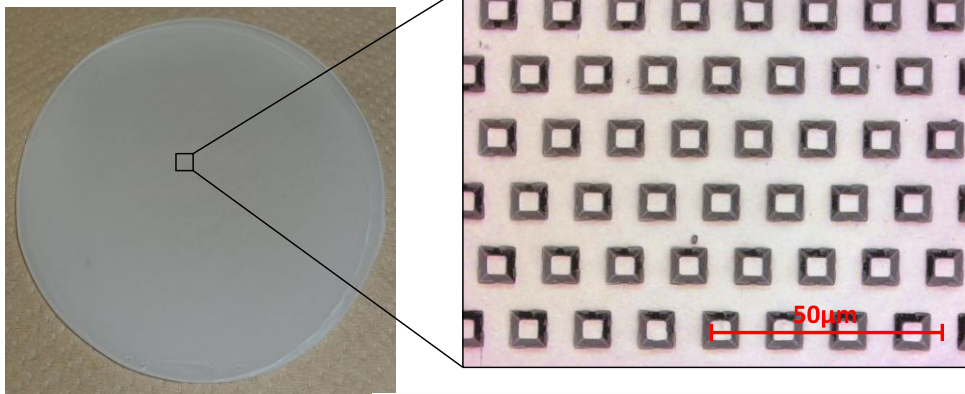


図6

● PEパッド



パターン形状
底辺: 7μm
高さ: 2.5μm

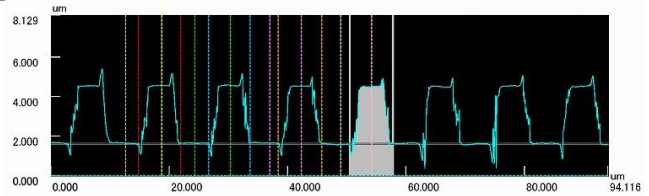
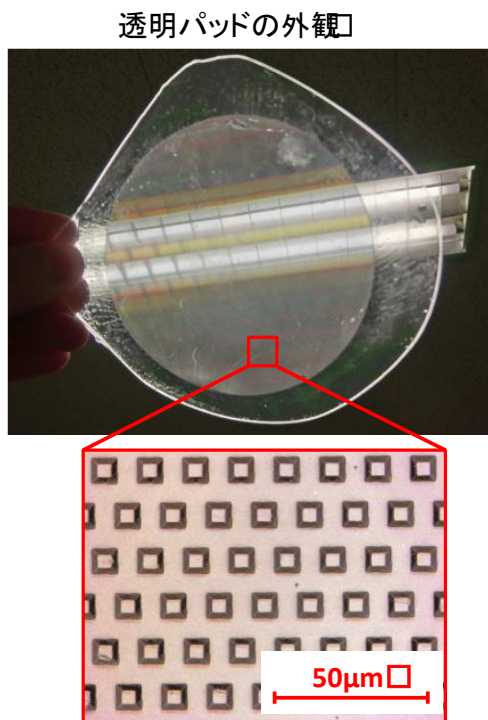


図7



透明パッド

光透過率の高い材料を用いてパッドを作製

光学特性を付与し、
新たな用途を開拓

例えば...
赤外、可視吸収、ラマン
微粒子観察

計測・検証等へ対応

透明性に加え
屈折率を制御

図8

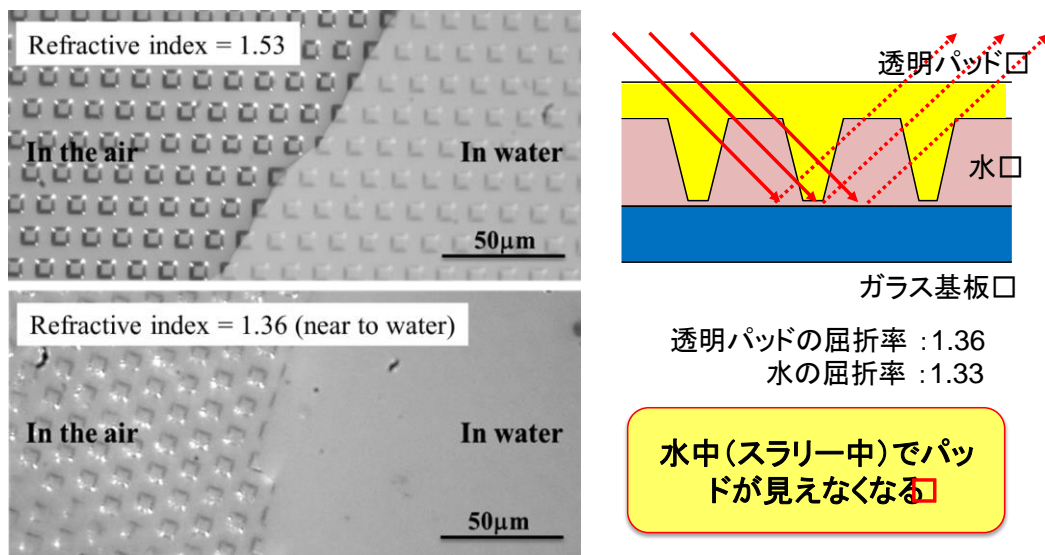


図9



図10

マイクロパターンパッドの寿命を改善するため、摩耗特性の異なる2種類の材料を用いて作製した形状発現型パッドを報告した。ナイロン繊維を配向させた状態で2液混合型のウレタン樹脂を流し、硬化させた後、切断・起毛処理を行うことで作製した形状発現型パッドでは、汎用パッドのSUBA600よりも30%程度の高い材料除去レートが確認された。ここでは連続研磨試験後も材料除去レートの低下がみられず、パッドの摩耗について改善することができた。

最後に、本財団による助成で実施した研究内容をまとめる。ここではマイクロパターンパッドや形状発現型パッドによる難加工材料における高速研磨技術の確立や、低屈折率透明パッドによる研磨微粒子の挙動観察や膜厚のモニタリング技術に関する内容について報告した。この技術の適用により、研磨性能をモニタリングしながら研磨条件へフィードバックさせることが可能となった。