

# 卒業研究報告

題目

半導体シリコン基板平坦化用

CMP 研摩パッドの開発

---

指導教員

河淵靖教授

---

報告者

松尾隼人

---

平成 14 年 2 月 5 日

高知工科大学 電子・光システム工学

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	1
1 - 1 研究背景と研究目的	1
1 - 2 本論文の構成	15
<b>第 2 章 研磨パッドの特性評価</b>	16
2 - 1 パッドの概要	16
2 - 2 測定方法	16
2 - 3 物性測定結果	18
<b>第 3 章 半導体シリコン基板を用いた研磨特性評価</b>	21
3 - 1 実験方法	21
3 - 2 研磨試験結果およびパッド物性との関係	24
3 - 3 まとめ	44
<b>第 4 章 結論と今後の課題</b>	45
<b>謝辞</b>	47
<b>参考文献</b>	48

# 第 1 章 序論

## 1 - 1 研究背景と研究目的

近年、集積回路 (IC) の素子構造が複雑になり、特に、ロジック系 IC では集積度と性能の向上のため、多層配線の層数が増加するのにもとない、IC 表面の凹凸が増え、表面段差が大きくなってきた。IC の製造工程ではシリコン基板上にさまざまな材料の薄膜を形成し、それにパターニングを施して一定の形状に微細加工した後、その上にまた次の薄膜を積む工程を何度も繰り返すのが大きな段差ができる原因である。

IC 表面に凹凸が増えると大きな問題が二つ生じる。一つは薄膜形成時に段差部での被覆性の悪化により、配線層の断線によるオープン不良や、配線層間の絶縁不良によるショート不良が発生することである。このため、良品がとれなかったり、IC を長時間使用した際に信頼性不良が生じる。

もう一つの問題はリソグラフィ工程における焦点深度の問題である。凹凸が増幅されるのにもとない、シリコン基板上の高低差が大きくなる。その大きな高低差が原因となって、フォトリソグラフィにおける微細なパターンの解像度と焦点深度が両立できなくなり、表面の凹部と凸部を同時に焦点合わせすることが困難になる<sup>1-3)</sup>。投影露光方式における解像度と焦点深度は、露光に用いる光の波長を  $\lambda$ 、レンズの明るさを表す開口数を NA とすると、

$$\text{解像度} = k_1 \cdot \lambda / \text{NA} \quad \text{焦点深度} = k_2 \cdot \lambda / \text{NA}^2$$

( $k_1$ 、 $k_2$  はプロセス条件や露光光学系による係数)

という関係がある。すなわち、より小さなパターンを解像するためには、短波長の光を使うか、開口数 NA がより大きな光学系にすればよい。しかし、 $\lambda$  を小さく NA を大きくすると焦点深度が浅くなるため、凹凸のあるシリコン基板の表面では、焦点合わせができなくなる。超 LSI における配線パターンを微細化するためには、層間絶縁膜の表面の平坦度が焦点深度の範囲内に収まっていることが必要になる<sup>4-5)</sup>。

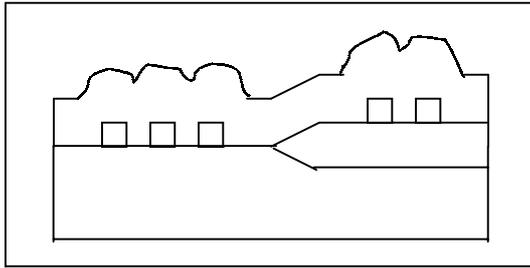
これらの問題を解決するため、シリコン基板の製造加工途中で表面の凹凸を

取り除くための平坦化処理が必要となる。これまでに行われてきた平坦化の手法を表 1.1 に示す。大別して、エッチバック法、成膜法、流動化法、選択成長法の 4 つにまとめられる。エッチバック法は、金属や絶縁膜の膜堆積とスパッタや RIE（反応性イオンエッチング）などのエッチングを組み合わせる 2 段階で行う。流動化法は、PSG（高温リフロー）、BPSG（低温リフロー）ならびに無機または有機の SOG（Spin On Glass）などを塗布してから熱処理を行って平滑化する。今日までの絶縁膜の平坦化手法としては、SOG やリフローによる平坦化、プラズマ CVD による酸化膜堆積とエッチバックの組み合わせが代表的な生産プロセスであった。しかし、これらの平坦化手法では、金属膜、絶縁膜などの膜の種類によって加工のできる工程が制約され、平坦化できる領域が配線パターンに依存するとともに、きわめて狭いという致命的な問題がある。

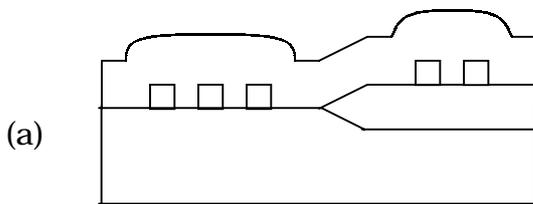
表 1.1 従来のプラナリゼーションの種類・手法と特徴

	種類	手法例	特徴
1	エッチバック法	スパッタ、 RIE、 プラズマエッチング	工程容易、 エッチングの制御性の難
2	成膜法	バイアススパッタ法、 バイアス ECR、 プラズマ CVD、RF プラズマ CVD	成膜と同時に平坦化、 ダメージの心配、 ダストが多い
3	流動化法	リフロー、 SOG(Spin on Glass)、 (FB スパッタ)	使いやすい、 膜質が疎・不安定、 マイグレーション促進
4	選択成長	選択 CVD(プラグ法) 選択エピタキシャル成長	必要部分(穴の部分)のみの 埋め込み可能、選択成長の 制御性が低い、不安定

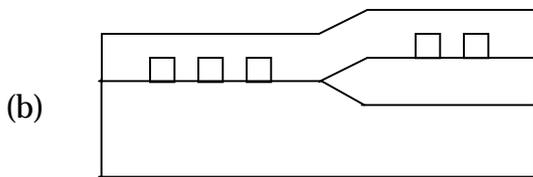
図 1.1 は、シリコン基板上にデバイスを形成する加工工程での平坦化手法の違いを示している。理想的なのは (c) のように、デバイス加工途中の凹凸のある表面を、凸部のみを除去して凹凸のない平面にするのが望ましい。これをグローバルプラナリゼーション（完全平坦化）という。シリコン基板上に形成する



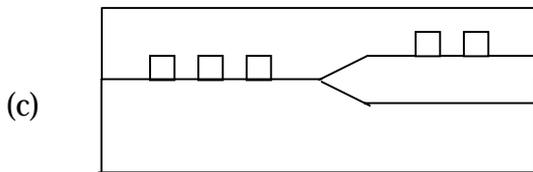
平坦化処理なし



局所的平坦化  
[スムージング]  
(密集パターン部のみの平坦化)



部分的平坦化  
[ローカルプラナリゼーション]  
(パターン部分のみの平坦化、  
下地の凹凸は解消されない)



全面的平坦化  
[グローバルプラナリゼーション]

図 1.1 デバイスを形成する途中のシリコン基板の平坦化(プラナリゼーション)の形態

デバイスチップの歩留まりと信頼性の向上のために、シリコン基板全面レベルでのグローバルプラナリゼーションが必要である。従来の平坦化手法では、(a)の密集パターン部のみの平坦化、あるいは(b)のパターン部分の平坦化の状態にとどまっている。一方、次世代 LSI デバイスを実現するためには、(c)のグローバルプラナリゼーションを実現する技術がどうしても必要となった<sup>5-6)</sup>。

このグローバルプラナリゼーションを実現するために CMP (Chemical Mechanical Polishing) 技術が開発された。これは、シリコン基板表面の凹凸を化学的、および機械的に研磨して平坦化する技術である。CMP 技術は、大きな面積を機械的に平坦にするという単純なコンセプトで、非常にわかりやすいところに魅力がある。さらに期待されることは、チップレベルはもちろん、シリコン基板レベルでの大きな面積における平坦化を実現できる可能性があることである。同じような研磨技術は、シリコン基板素材加工におけるポリシング、あるいは先端的なオプトメカトロニクス産業において大きな成果を収めてきた。デバイス加工プロセスへの CMP 技術の導入によって、デバイスの断面構造が大きく変化して平坦になった結果、微細加工が容易になり、微細化技術の進歩が加速された。すなわち、層間膜が完全に平坦化され、同じ世代のリソグラフィ技術でより微細なパターン形成が可能になったためである。さらに、層間絶縁膜の平坦化のみならず、デバイスの微細化に必須の STI (Shallow Trench Isolation) やメタルプラグをはじめ、ダマシン (埋め込み) による理想的な Cu 配線を可能にするなど、CMP 技術の波及効果はきわめて大きなものがあり、現在も盛んに研究が進められている<sup>5),7-11)</sup>。

CMP 技術に求められる主な特性は、

- (1) 加工精度の観点から、直径 300mm のシリコン基板表面における厚さ方向 0.1  $\mu\text{m}$  以下の加工マージンに対し、グローバルな平坦化 (プラナリティ) および、膜厚の均一性 (ユニフォーミティ) を、共に再現性よく安定して実現できる、超精密・高剛性の加工システムであること
- (2) 生産性の観点から、スループットを高くするため、シリコン基板の表面除去速度が高い加工システムであること

などがあげられる<sup>5)</sup>。

デバイスを形成する途中のシリコン基板の平坦化加工を行う CMP 工程は、高精度、高品位、高能率そして清浄性が要求され、様々な要素技術から構成される。デバイスを形成するシリコン基板の表面を基準とすること（表面基準）を原則として、シリコン基板表面の膜を全面均一に微量除去する。シリコン基板レベルでユニフォーミティを確保するためには、Preston の式

$$M = k \cdot p \cdot v \cdot t$$

（M：加工量、p：加工圧力、v：相対速度、t：加工時間、k：加工条件によって決まるプレストン係数）

で示されるように、シリコン基板面内の圧力と加工速度とをいかに均一にするかが CMP 装置における重要な課題となる。また、プラナリティ、ユニフォーミティならびに加工能率を確保することが、スラリーとパッドなど、消耗資材の最も重要な課題である<sup>5)</sup>。

まず、スラリーについて説明する。図 1.2 は本試験で使用したヒュームドシリカスラリーの SEM 写真である。液体を希釈した後、サンプルをカーボンの上で乾燥させたものを観察しているが、10～20nm のシリカ粒子が凝集して 2 次粒子を作っている様子がわかる。

図 1.3 は、現在開発されているスラリーを粒子の種類で大別したものである。ここでは、最も代表的なシリカ（SiO<sub>2</sub>）の粒子について紹介する。

シリカ系スラリーには、

ケイ酸ナトリウム NaSiO<sub>2</sub>（水ガラス）を原料とするシリカ粒子

有機シリケートを原料とするシリカ粒子

四塩化ケイ素 SiCl<sub>4</sub>を原料とするシリカ粒子

の 3 つがある。

では、図 1.4 のようなプロセスによって、「沈降性シリカ」と「コロイダルシリカ」が作製される。これは、出発物資がケイ酸ナトリウムであることから、比較的簡単に SiO<sub>2</sub> 粒子を得られるという特徴がある。しかしその反面、かなりの量のナトリウム成分が SiO<sub>2</sub> 粒子内部に残存する。したがって、ごく初期のシリコン基板のポリシングでは、沈降性シリカの乾燥粉体を水に懸濁させたもの

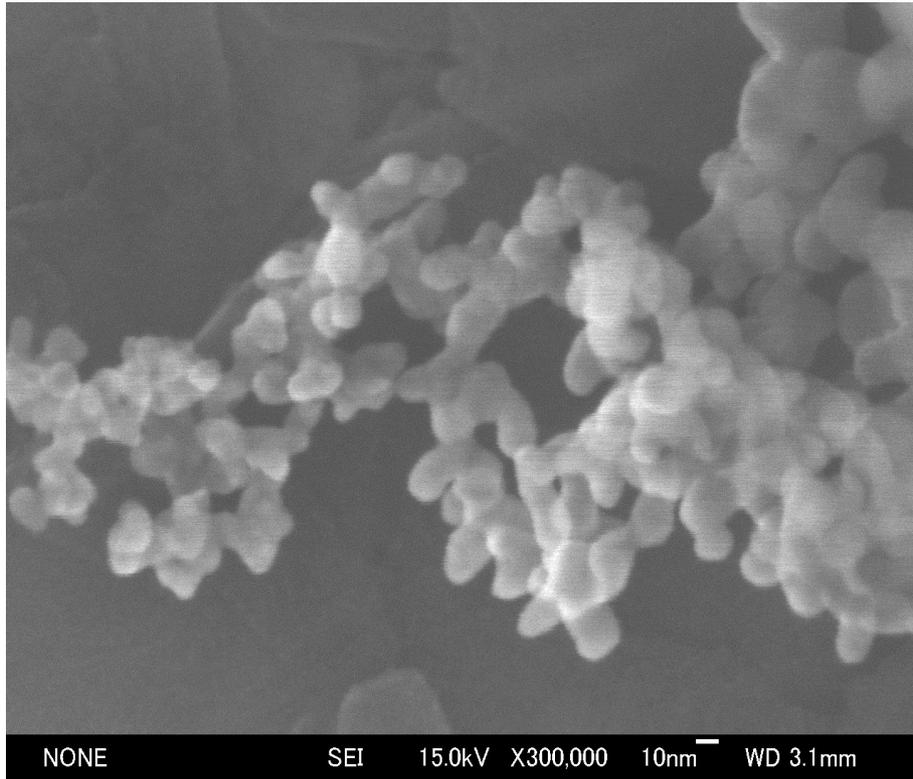


図 1.2 本試験でを使用したヒュームドシリカスラリーの SEM 観察



図 1.3 スラリーの中に分散される代表的な粒子の種類と用途  
(図中の   は CMP 用としての例)

NaSiO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O   SiO<sub>2</sub>+NaO   凝集体   沈降   乾燥粉体

[イオン交換]                      (a) 沈降性シリカ

核ゾル(=5mm)   粒子成長(10~100nm)   濃縮

(b) コロイダルシリカ (狭義)

図 1.4 沈降性シリカとコロイダルシリカの作製プロセスの概略

をスラリーとしていたが、アルカリ金属汚染の問題、粉体ハンドリングによる作業環境の問題などで、現在ではほとんど使われていない。

一方、イオン交換法により調整・作製されるコロイダルシリカは、沈降性シリカに比べ、比較的、材料の金属汚染レベルが低く、従来から、LSI 加工用のベアシリコン基板の1次および2次ポリシング用スラリーとして使用されてきた。

以上のように、ケイ酸ナトリウムを出発原料とするシリカ系スラリー、特にコロイダルシリカにおいては、CMPで研磨した後の後処理による金属汚染の低減がどのレベルまで到達できるかが課題となっている。

のコロイダルシリカでは、ナトリウム不純物の低減には限度がある。そこで最近注目されているのが、有機シリケートを原料にして、湿式で加水分解して得た超高純度コロイダルシリカである。このコロイダルシリカは、Poly-SiのCMPにも活用でき、これからのCMP用スラリーとして注目されるものである。今後、このような高純度のコロイド状粒子の開発に重点が移るものと考えられる。

は、ヒュームドシリカと称される材料の粒子で、火炎中酸化、脱塩、精製して得られる。調整・作製されたヒュームドシリカは、比較的高純度のシリカが入手できる点で、一部のLSI用シリコン基板の仕上ポリシング用スラリーとして使われてきた。また、現在の層間絶縁膜のCMP用シリカスラリーは、ほぼこのヒュームドシリカを原料として構成されている。

研磨する対象が層間絶縁膜と金属膜とで、使用するスラリーが異なる<sup>12)</sup>。表1.2は、現在開発中のCMPスラリーをまとめたものである。今回の実験では、シリコン酸化膜の研磨の研究を行った。

シリコン酸化膜で形成された層間絶縁膜を研磨するためには、10～15wt%程度の高純度ヒュームドシリカを超純水中に均一に分散したヒュームドシリカ系スラリーが広く使用されている。二次凝集径100～200nm程度のシリカは、電氣的にも安定にした状態で懸濁されている。スラリーの安定性および加工レートを考えて、pHは10前後である。

粒度分布・粘度・pH・純度は、CMPの加工特性に大きく影響する因子であ

り、最適化された CMP 専用のスラリーが普及している。LSI デバイスの層間絶縁膜の CMP では、高純度で高い加工レートが確保できる新しいスラリーの開発に加え、新しい層間絶縁膜として開発が進んでいる、低誘電率 (low-k) 材料の CMP 用スラリーの開発が課題である<sup>5),13-16)</sup>。

表 1.2 加工対象別 CMP 用スラリー

CMP 対象材料		スラリー	
		砥粒	加工液/添加液
酸化膜(ILD)		SiO <sub>2</sub>	KOH, NH <sub>4</sub> OH, アミンなど
		CeO <sub>2</sub>	あり
		ZrO <sub>2</sub>	あり
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (γ)	あり(有機分散剤)
		Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
メ タ ル	W(プラグ)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , KIO <sub>3</sub>
		MnO <sub>2</sub>	
	Al(配線/プラグ)	SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , KIO <sub>3</sub>
	Cu(配線/プラグ)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	同上、キナルジン産、グリシン、BTA など
		なし	酸化剤、溶解剤、防食剤

次にパッドについて説明する。図 1.5 は本試験で使用したパッドの一部の SEM 写真である。使用前の状態のパッドを、上の写真は 100 倍で、下の写真は 500 倍で観察したものであるが、直径 100um 程度のクレーター状の穴が分布していることがわかる。

デバイスを作る途中の加工工程におけるシリコン基板の理想的な平坦化は、シリコン基板の表面に存在する、微小な凹凸の凸部を優先的に順次加工除去することによって実現できる。等方性の湿式化学エッチングプロセスでは、エッチングする膜の凸部と凹部の両者が同じ速度で除去されるのに対し、平坦化 CMP は非等方性の加工プロセスといえる。基本的に CMP は、微細な粒子(砥粒)を懸濁したスラリーと、適用する弾性パッドを相対運動させることによりシリコン基板表面を研磨加工する。パッドがシリコン基板表面上を移動する際、シ

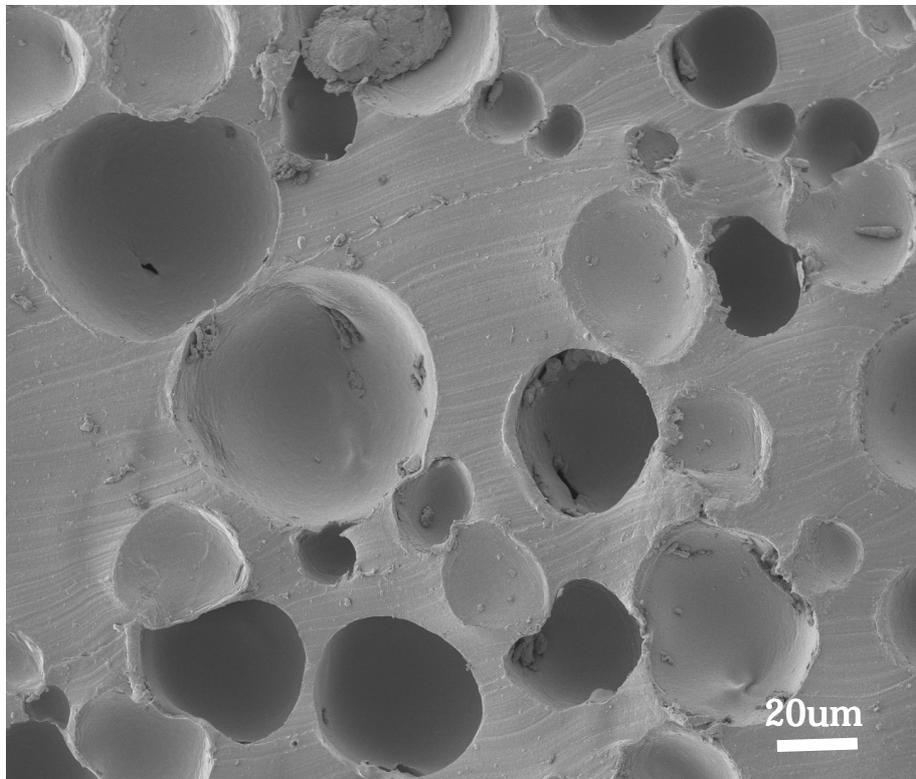
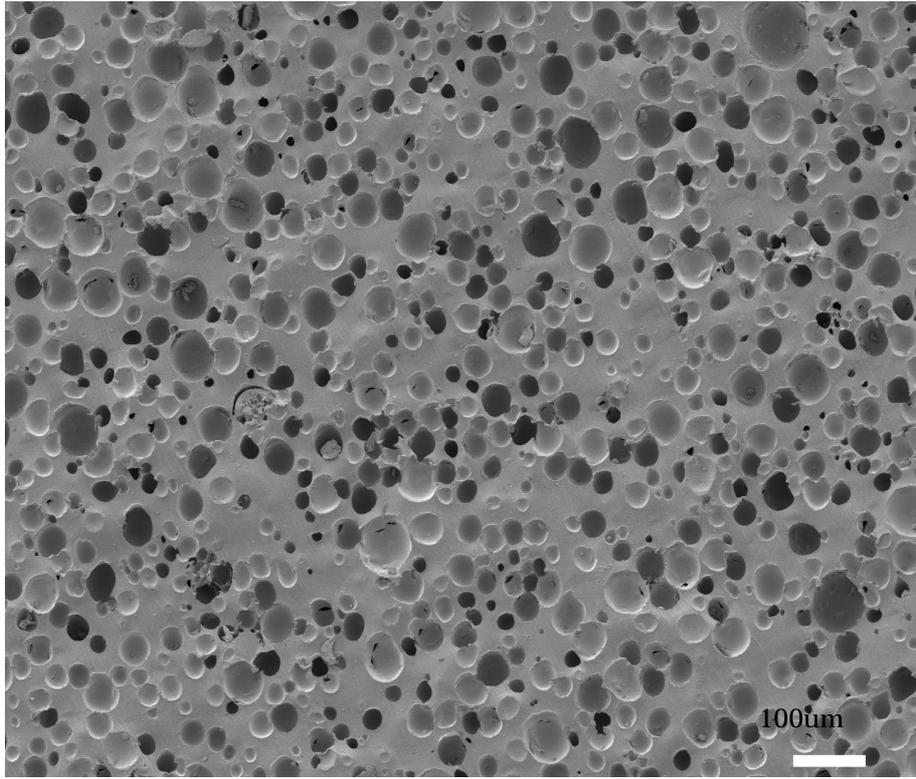


図 1.5 本試験で使用了したパッドの SEM 觀察（上 100 倍、下 500 倍）

リコン基板表面上に押し付けられた粒子との間で、滑り摩擦的な挙動によって摩耗が起こる。また、CMPにおける凸部が優先的に除去される非等方性は、パッドの特性によって大きく影響されることが知られている。

CMPの動力学は、前にも述べたように、次のPrestonの式によって表すことができる。

$$H/t = K_p \cdot L/A \cdot s/t$$

(H：パターン凸部の高さ、t：加工時間、L：荷重、A：面積、  
s：移動量、K<sub>p</sub>：プレストン係数)

したがって研磨による除去速度は、主に部分的圧力に依存し、荷重、接触面積、シリコン基板の表面上を通過するパッドの移動速度により決定される。

研磨による加工では、まずシリコン基板の端にふちだれ現象が生じ、加工量が増加するとともに平面度が大きくなり、最終的には平面度が飽和する。この最終的な平面度は、加工圧力が高くなるに従い大きくなる。これは、弾性体(パッド)に剛体(シリコン基板)を押しつけたときの圧力分布から説明できる。

ふちだれが少なく高い平面度を得るためには、

変形量が小さい硬くて薄いパッドを使用すること

比較的低い加工圧力条件を適用すること

シリコン基板面内の圧力分布の均等化を図ること

などがあげられる。 、 は、シリコン基板の加工品位ならびに加工能率に密接に関係する。 については、シリコン基板を加圧する際に細心の注意を払う必要があるが、パッド表面に溝を入れることも有効な手法として知られている。以上述べたように、パッドの厚さ、硬さや加工圧力などのパラメータが、加工されるシリコン基板の平面精度に大きく影響する。

次に、表面に凹凸パターンを有するシリコン基板を平坦化するためのCMP技術について述べる。図1.6に、比較的軟らかい軟質なパッドを使ったときの基本的な平坦化機構を示す。パッドの物性は、スラリー粒子との相互作用によって水平方向および垂直方向で不規則な挙動を示す。荷重をかけられたパッドからの水平方向の圧力分布の広がり、平坦化加工における重要な因子となる。

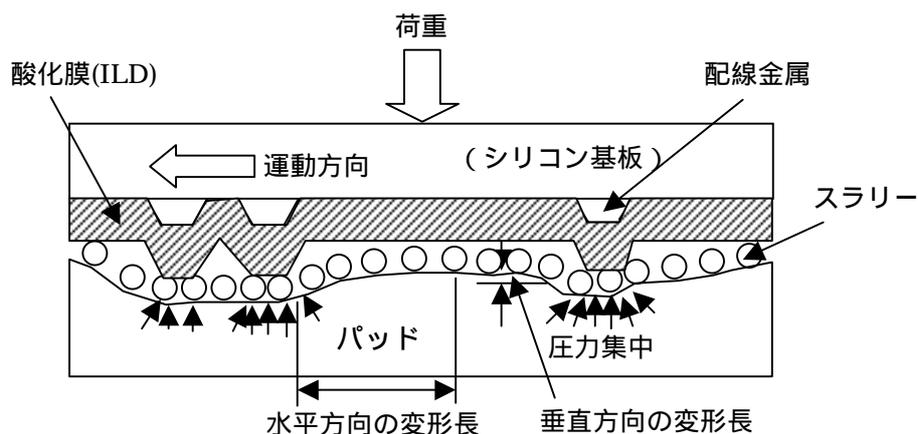


図 1.6 CMP 平坦化の基本的なモデル (パッドの挙動)

デバイスを形成する途中のシリコン基板のパターン凸部の近傍では、パッドは押されて弾性変形を起こす。一方、シリコン基板のパターン凹部とパッドとの直接接触は起こらず、その凹部が凸部と同様に加工される可能性は少ない。このパッドの変形領域が、デバイスパターン間のスペースよりも比較的広い場合には、そのパターン凸部が、凸部の段差分だけ加工除去される。そして、高低差が小さくなるに従って、凹部が次第に加工されはじめる。平坦化の速度は、研磨する膜の凹部が加工されはじめるのに従って低下してゆく。

一般的に、剛性が高く変形の少ない硬いパッドは、10～20mm 角程度のサイズのチップの平坦度に関しては非常によく仕上がる反面、200～300mm のシリコン基板全面での均一性については劣る。一方、柔軟なパッドは、水平方向での変形が大きくなるので、チップ毎の平坦度はあまりよくないが、シリコン基板全面での研磨量の均一性は逆に向上する。

前に述べたように、パッドの弾性変形特性は重要である。パッド厚さのバラツキをできるだけ小さくすることは当然であるが、弾性変形に関連する硬さ、厚さなどを考えて材料を選ぶ必要がある。CMP におけるパッドに求められる基本的な必要条件について整理すると、

- スラリーを保持できること (高能率化の確保)
- パッド表面は適度な硬さがあること (平坦化・高品位化の確保)
- パッド表面はシリコン基板のうねり・反りに追従できること (均一性の確保)

保)

加工屑・反応性生物の排出部のあること(加工の再現性の確保)  
などがあげられる。

まず、研磨するためには十分なスラリーが存在しなければならないから、は必須である。一般的には、微細孔やある一定のパターン溝などを設けることが効果があるということが知られている。これは、加工屑などの排出部としての機能( )も併せもつ。溝をパッドの表面に形成すると、シリコン基板面にかかる圧力分布を分散できるので、比較的平面度のよい加工面が得られる。とはトレードオフの関係にある。そのため、どのような材料をどのくらいの厚さで、どのような断面構造にするかを検討することが課題となってくる。

一般的にパッド表面には微細な孔や溝を設けるため、そこに加工屑・反応生成物が留まるが、完全に留まりきった状態(目づまり)になると、加工特性が著しく劣化する。目づまり状態になった微細な孔や溝から、加工屑などを取り除いて初期状態に戻すことは極めて困難になる。そこで、ダイヤモンド砥石で目づまり状態になったパッド表面を削り取って除去する、いわゆるドレッシングという作業を施す。劣化して使えなくなったパッド表面層を削り、初期状態と同様の面を出して研磨加工に使用する。したがって、再現性ある安定した加工特性を維持するためには、パッドの表面構造を均一にするのと同時に、その断面構造も均一にしなければならない。

パッド表面には特別な溝や穴形状の加工を施すことが一般的になっている。たとえば、直径 1~2mm の小さい穴を表面に多数あけて、スラリーの保持性およびシリコン基板の吸い付き防止を図るタイプ、格子状、同心円状あるいはらせん状の溝をつけて、パッド表面でのスラリーの流動性やシリコン基板面内の平坦性・均一性の向上を図ったタイプなどがある。図 1.7 に、パッド表面に加工した 3 つのタイプの模式図を示す。

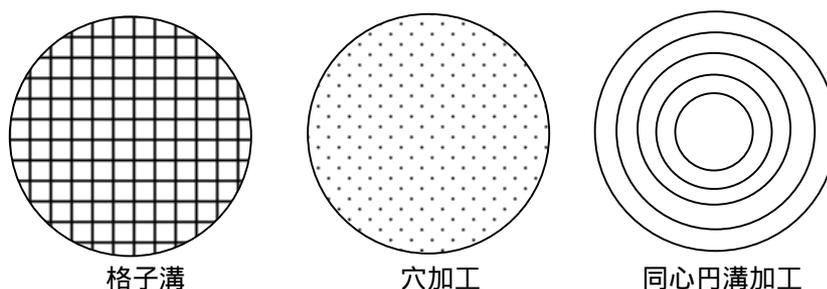


図 1.7 パッド表面に施した各種パターンの加工例

CMP 用のパッドには、いくつか種類があるが、今回の実験では、ロデールニッタ社製の IC1400 を使用した。IC1400 系パッドは、高架橋したウレタン高分子を材料にしたパッドと、その下層に均一で柔らかいウレタンフォームをはり合わせた二層パッドである<sup>17)</sup>。パッド自体の高純度化、下地(粘着テープや貼り付け定盤など)への水分の浸入もないため、パッドの安定性がかなり改善されている。現在使用されている CMP 用パッドとその特徴の例を表 1.3 に示す。

表 1.3 CMP 用パッドの例

量産品番	用途(加工対象)	構造および特徴
IC1000	SiO <sub>2</sub> , W, Cu, Poly-Si, Al	標準的 CMP パッド 表層:IC1000 下地:Suba400 構成の二層パッド
IC1400	SiO <sub>2</sub> , W, Cu, Poly-Si, Al	下地の液浸透性無し、弾性回復が速い 表層:IC1000 下地:ウレタンフォーム構成の二層パッド

現状のパッドの問題点としては、

- ・ 圧縮率、密度などの物性バラツキ
- ・ 研磨パッドの粘弾性特性および表面の変化による、研磨レートや均一性等の研磨特性の劣化
- ・ ローカルな平坦性(プラナリティ)と、グローバルな平坦性(ユニフォームティ)の両立
- ・ 研磨パッド中の不純物金属、異物(パーティクル)が原因となるシリコン基板表面の汚染

などが知られているが<sup>5)</sup>、今までパッド物性と研磨試験の結果を結びつける系統

だてた研究報告はなされていなかった。

今回の研究では、パッドの物性が、研磨レートおよび均一性にどのような影響を与えるかを検討した。また、その結果をもとに、どのような物性のパッドにすればよりよい結果が得られるかを考察することを研究目的とした。

## 1 - 2 本論文の構成

本論文は、半導体シリコン基板の平坦化プロセスにおける CMP 技術で用いられるパッド材料の開発について述べたものである。異なる物性のパッドを作製し、それを用いて実際に研磨試験を行い、結果について考察を加えてより良い材料の開発指針を得ることを目的とした。

このため、第 1 章で研磨の背景について述べた後、第 2 章でパッドの物性評価について、第 3 章で半導体シリコン基板を用いた研磨試験の結果について考察した結果を述べる。第 4 章で結論と今後の課題についてまとめることにする。

## 第2章 研磨パッドの特性評価

### 2 - 1 パッドの概要

第1章で述べたように、パッドの物性によって研磨試験の結果は大きく影響される。今回の研究で測定したパッドの物性は、圧縮率、回復率、厚さ、硬さ、開口部占有率、開口部平均径、表面粗さの7項目である。次にその7項目の測定方法について説明する。

また、図2.1に本試験で使ったパッドを示す。パッドの大きさは直径24インチである。

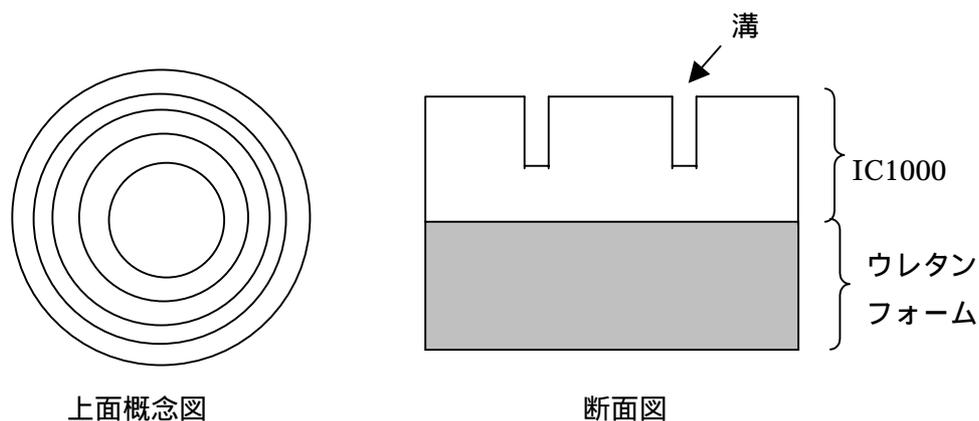


図2.1 本試験で使ったIC1400パッド

### 2 - 2 測定方法

#### 圧縮率・回復率

圧縮率および回復率測定は、自動圧縮率測定器を用い、一定荷重をかけて図2.2のシーケンスで3点の測定を行い、その平均を出したものである。また、図2.3に測定した3点の場所を示す。

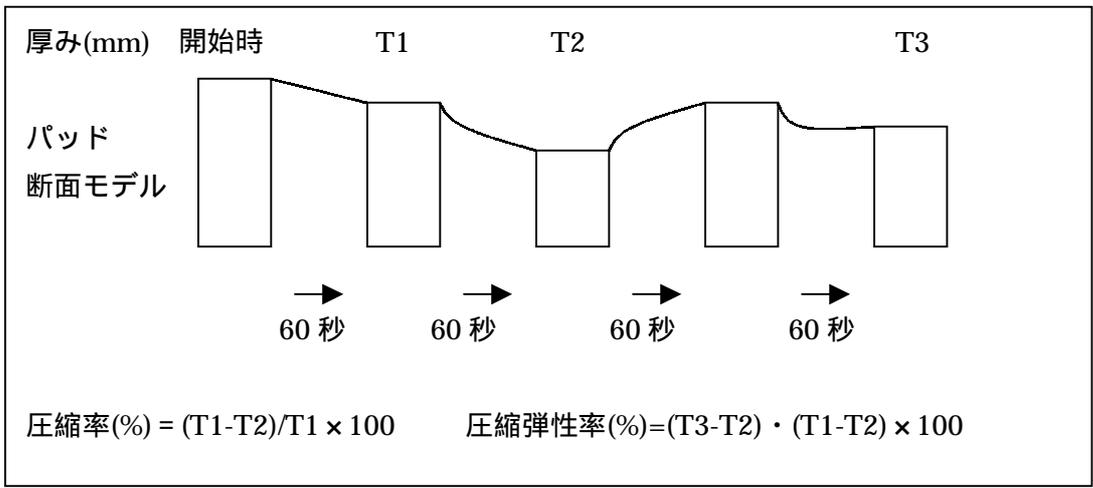


図 2.2 圧縮率測定方法

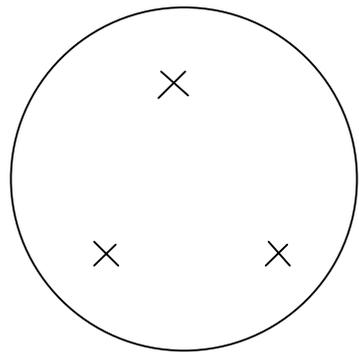


図 2.3 おおまかな 3 点の測定点

**厚さ**

パッドの厚さは、マイクロメータを用いて 4 点測定し、その平均を出したものである。図 2.4 に測定した 4 点の場所を示す。

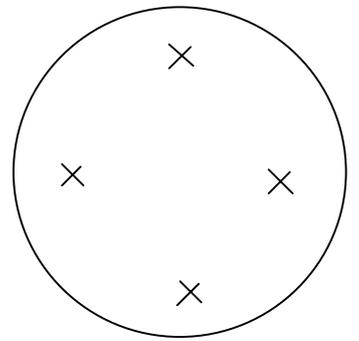


図 2.4 おおまかな 4 点の測定点

## 硬さ

パッドの硬さは、Shore D を用いて針をパッドに刺し、その抵抗力を測定したものである。針がパッドの溝に落ちないように注意しながら 4 点測定し、その平均値を求めた。測定点は図 2.4 と同じである。

## 開口部占有率

パッド中に含まれる空孔が表面で開口している面積率の測定は、レーザー顕微鏡を用いてパッドの光学顕微鏡像を撮影した後、画像処理して数値化した。

## 開口部平均径

パッド中に含まれる空孔の平均径をだしたものである。開口部占有率と同じ方法で測定した。

## 表面粗さ

Surfcom430A(東京精密社製)を用いて、パッド表面の粗さを、長さ 12.5mm の範囲で 4 点測定し、その平均値を求めた。測定器の針がパッドの溝に落ちないように注意しながら測定する。また、測定点は図 2.4 と同じである。

## 2 - 3 物性測定結果

試験に用いたパッドの物性測定の結果を表 2.1 と表 2.2 に示す。表 2.1 は単層での結果、表 2.2 は積層での結果である。表 2.1 に示す単層のデータは、二層パッドの上部の硬い部分の測定データである。また、今回使用したパッドの A グループは圧縮率を変化させたものである。同じく B グループは密度を変化させたものである。

単層のデータから分かるように、シリコン基板と接するウレタン高分子層の厚さは 1.26 ~ 1.28mm の範囲にあり、大きな差はみられない。硬さは、A グループのパッドは全て 56.0、B グループのパッドは全て 57.0 であり、B グループの方が少し硬い。圧縮率は、A グループのパッドは全て 1.0%、B グループのパ

表 2.1 パッドの物性測定結果(単層:ウレタン高分子層のみ)

グループ	資料#	厚さ(mm)	硬さ	密度(g/cm <sup>3</sup> )	圧縮率(%)
A	1	1.27	56.0	0.74	1.0
	2	1.28	56.0	0.75	1.0
	3	1.27	56.0	0.75	1.0
B	1	1.26	57.0	0.78	1.1
	2	1.26	57.0	0.75	1.1
	3	1.27	57.0	0.81	1.1

表 2.2 パッドの物性測定結果(積層:ウレタン高分子+ウレタンフォーム)

グループ	資料#	表面粗さ Ra(um)	開口部		厚さ(mm)	硬さ	圧縮率(%)	回復率(%)
			面積率(%)	平均径(um)				
A	1	5.2	83.3	23.2	2.705	42.7	1.1	86.0
	2	5.6	81.0	21.2	2.672	42.4	1.3	91.4
	3	5.1	72.0	24.1	2.653	39.3	2.4	92.1
B	1	4.6	67.6	19.7	2.673	44.8	1.3	91.5
	2	5.1	72.9	20.5	2.648	42.6	1.3	94.4
	3	3.8	64.6	24.8	2.666	45.8	1.5	88.8

ッドは全て 1.1%であり、B グループの方が少し高い。密度は  $0.74 \sim 0.81\text{g/cm}^3$  の範囲にある。

表 2.2 に示したデータでは、表面粗さが  $3.8 \sim 5.6\mu\text{m}$  の範囲にあり多少差がみられる。また、B3 は  $3.8\mu\text{m}$  と極端に低くなっている。開口部面積率は  $64.6 \sim 83.3\%$  の範囲にあり、大きくばらついている。ここでも B3 が一番低い値を示している。また、A1 は  $83.3\%$ 、A2 は  $81.0\%$  と、特に大きな値を示している。開口部平均径は  $19.7 \sim 24.8\mu\text{m}$  の範囲にあり、B3 が一番大きな値を示している。厚さは  $2.648 \sim 2.705\text{mm}$  の範囲にあり、おおまかにみればあまり差はない。硬さは  $39.3 \sim 45.8$  の範囲にあり、単層に比べると値にばらつきがみられる。また、厚さと硬さにおいては、単層の時と値が大きく変わっている。圧縮率は  $1.1 \sim 2.4\%$  の範囲にあるが、A3 は  $2.4\%$  と極端に大きな値になっている。回復率は  $86.0 \sim 94.4\%$  の範囲にあり、多少のばらつきがみられる。

# 第3章 半導体シリコン基板を用いた 研磨特性評価

## 3 - 1 実験方法

図 3.1 に研磨装置の概略を示す。パッドを貼り付けた定盤と、シリコン基板を貼り付けたキャリアがともに回転し、研磨が行われる。この研磨装置：SH-24(SPEEDFAM 社製)を用いて、次の条件、順序で研磨を行った。

パッド立ち上げ(ブレークイン)・・・(\* 1 )

条件・・・DF(ドレス圧力)：18kgf(1.90)

PS(定盤の回転速度)：28rpm

DS(ドレッサーの回転速度)：60rpm

Time：10min

サンプル取り 1

Monitor・・・(\* 2 )

条件・・・DF(加工圧力)：7.0psi(1.94)

PS：60rpm

CS(キャリアの回転速度)：41rpm

Time：120sec

ダミー5枚・・・(\* 3 )

条件・・・Monitor と同じ

ドレス・・・(\* 4 )

条件・・・DF(ドレス圧力)：10kgf(1.06)

PS：83rpm

DS：59rpm

Time：30sec

サンプル取り 2

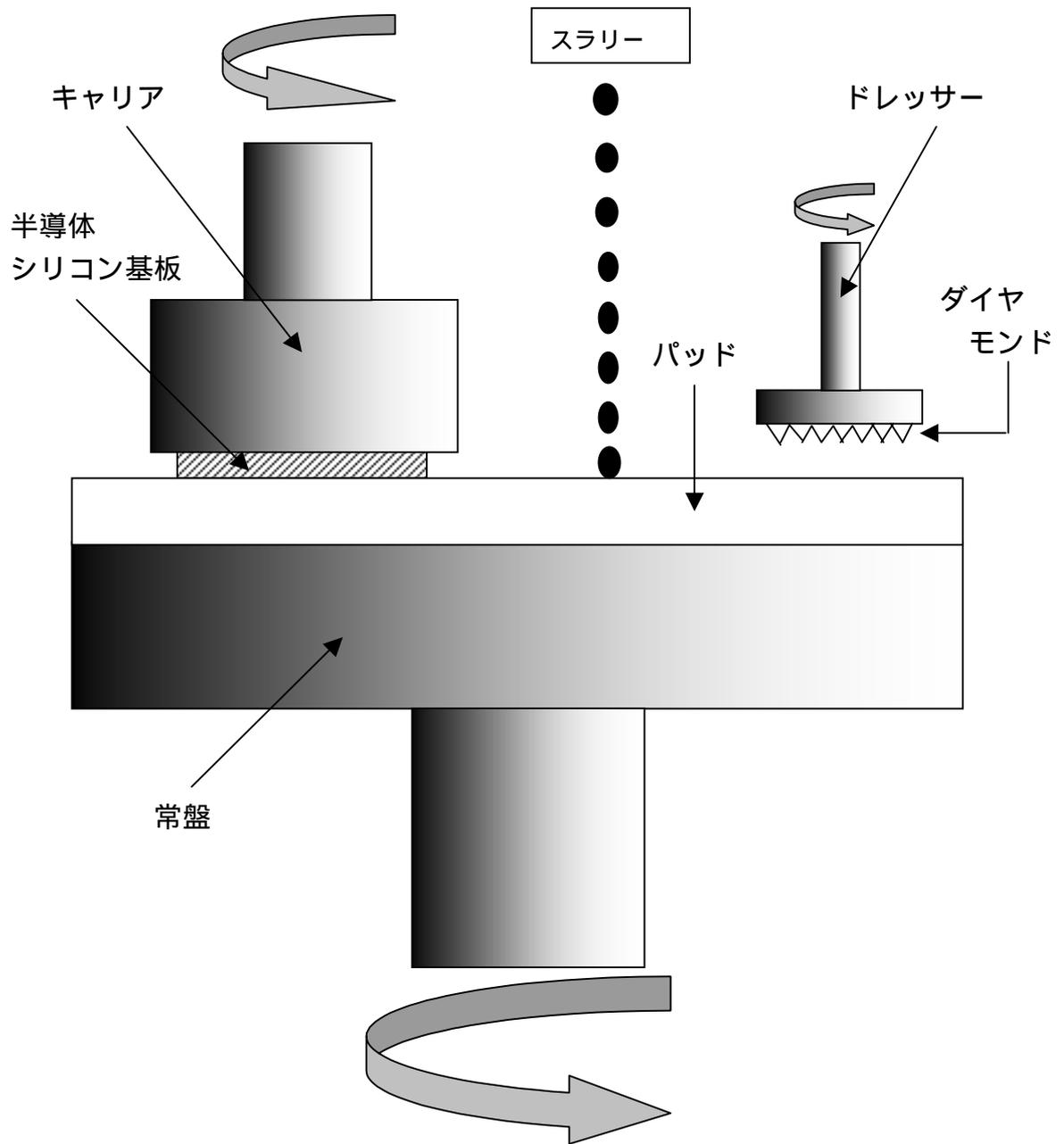


図 3.1 研摩装置の概略図

Monitor

ダミー5枚

ドレス

サンプル取り3

Monitor

注) 図 3.2 はサンプル取りのおおまかな位置である。端から約 10cm の場所で、約 1cm 角の四角形で切り取る。試験前に切り口を入れておく。サンプル取りで取ったサンプルは、研磨試験終了後に、単層でそれぞれの表面粗さ、厚みを測定する(表面粗さは長さ 7.0mm の範囲で測定)。また、それぞれのサンプル表面を SEM 観察した。

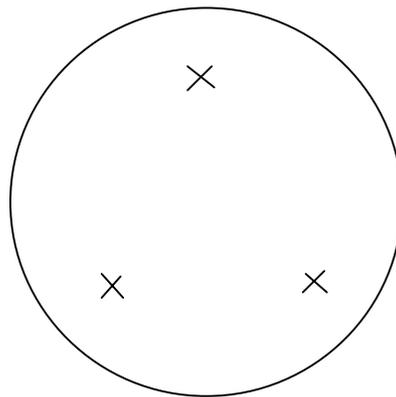


図 3.2 パッド上のサンプル取りの位置

- ( \* 1 ) パッド立ち上げ(ブレードイン)とは、新しいパッドで研磨ができる状態にするために、図 3.1 のドレスサーと定盤を回転させパッドを荒らす仕事である。
- ( \* 2 ) Monitor とは、研磨レートおよび面内均一性を評価するために、測定用のシリコン基板を研磨することである。
- ( \* 3 ) ダミーとは、何回か使用してまだ使えるシリコン基板を利用して研磨をすることで、それを 5 枚研磨する。研磨の前には毎回 ( \* 4 ) のド

レスを行う。

( \* 4 ) パッド立ち上げと内容は同じで、条件を変えたものである。

### 3 - 2 研磨試験結果およびパッド物性との関係

図 3.3 に研磨レート ( Removal Rate : RR ) の変化を示す。ここでは A、B グループで各グループ 3 枚のパッドを使った実験結果をプロットしている。横軸のサンプリング回数は、1 が使用開始直後のパッド、2 はダミーシリコン基板を 5 枚研磨した後、3 は更にダミーシリコン基板を 5 枚研磨した後の測定データである。この図からわかるように、A1 を除いた他のパッドでは、研磨が進むにしたがって RR が低下する傾向があることがわかった。

次に図 3.4 に不均一性 ( Non Uniformity : NU ) の変化を示す。ここでも条件は上に述べた図 3.3 と同じである。この図から分かるように、A グループのパッドでは、A2 以外は研磨の回数が増えるにしたがって NU が大きくなり均一性は悪化する。一方、B グループのパッドの NU では少しずつ変化しているのが分かる。

これらの研磨結果と、パッドの物性がどう関係しているかを調べた。図 3.5 に未使用パッドの開口部面積率と RR、図 3.6 に未使用パッドの開口部面積率と NU の関係を示す。図 3.6 の NU にはあまり大きな差はみられないが、図 3.5 では、開口部面積率が大きくなるほど RR も大きくなっていく傾向が見られる。これは、パッドに空孔が多いほどスラリーの粒子がたくさん保持され、その結果、よく削れるようになると考えられる。

図 3.7 は、未使用パッドの表面粗さと RR の関係を、図 3.8 は、未使用パッドの表面粗さと NU の関係を示したものである。図 3.7、3.8 では、横軸が研磨試験を行う前に測定したパッドの表面粗さ、縦軸が RR、NU である。図 3.7 に示すように、RR は表面粗さが粗くなるほど高くなっている。一方、図 3.8 の NU では明らかな相関関係はみられなかった。

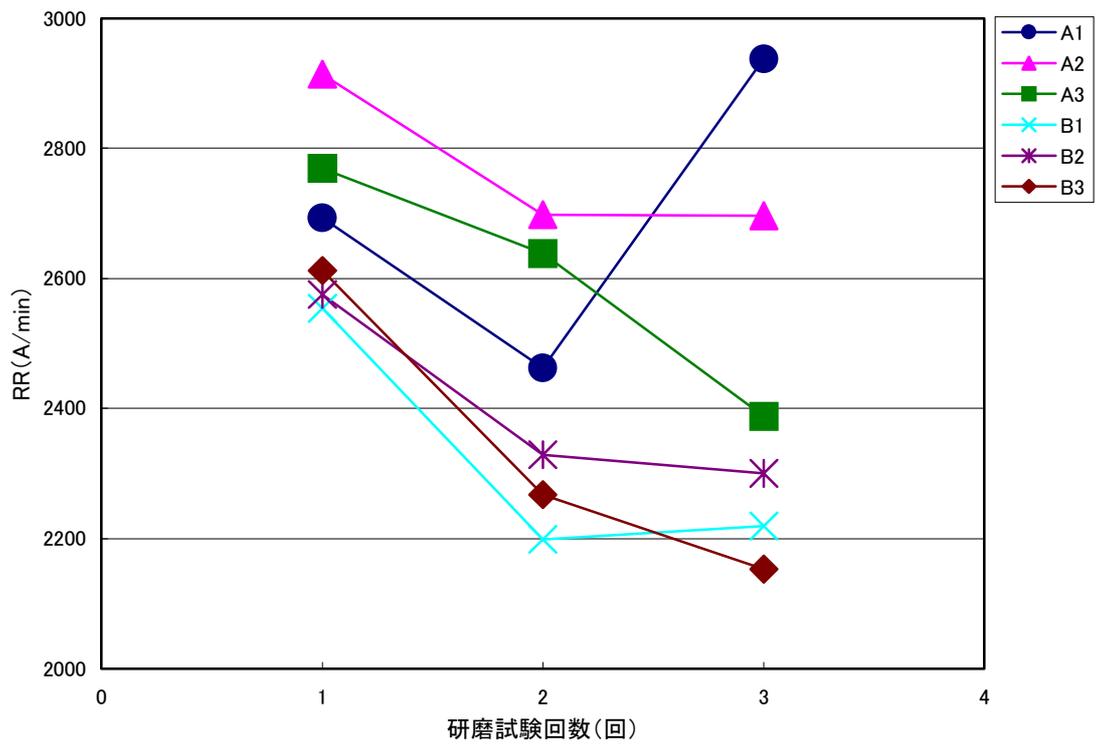


図3.3 研磨試験によるRRの変化

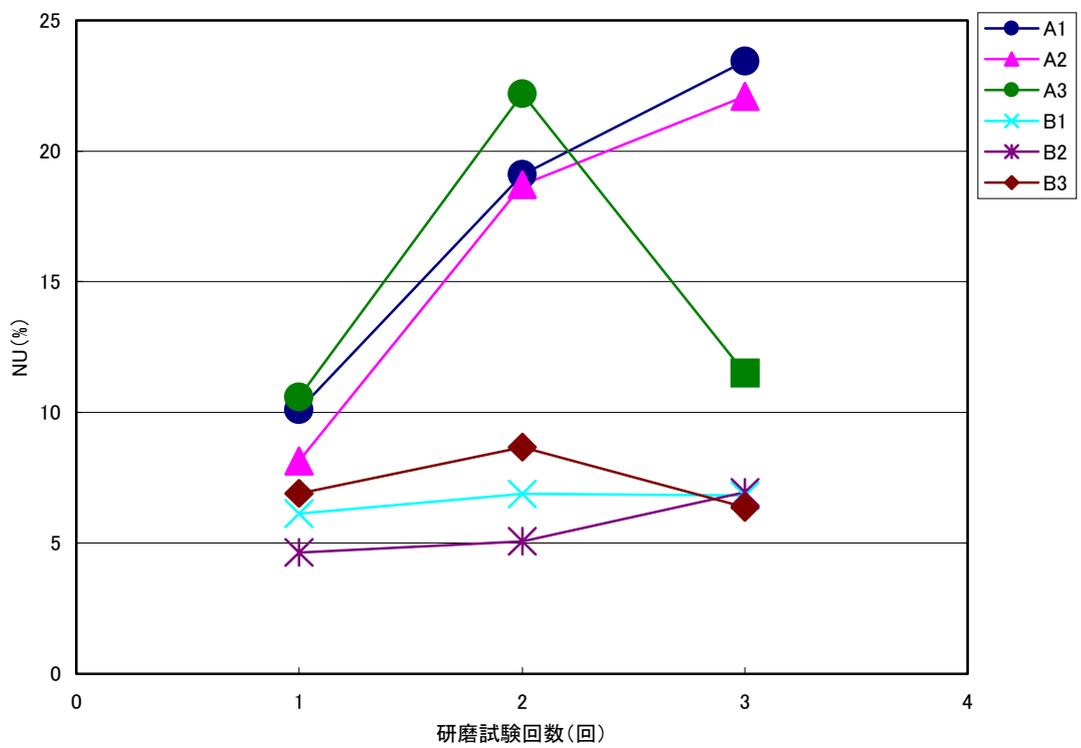


図3.4 研磨試験によるNUの変化

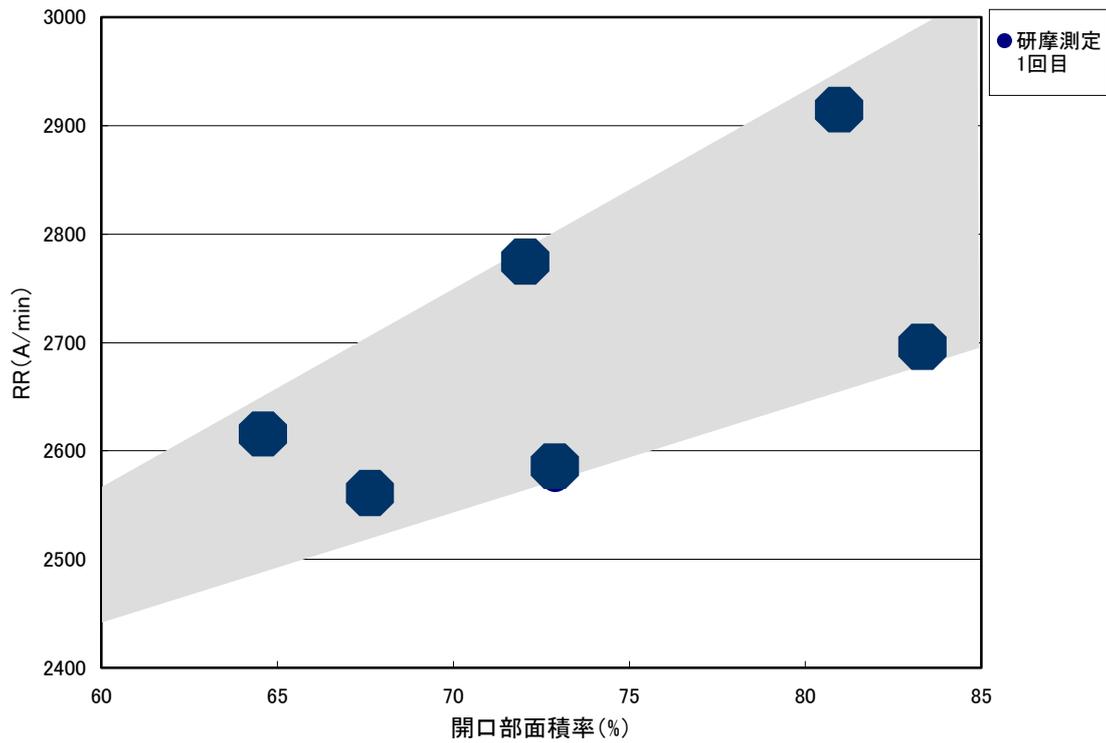


図3.5 未使用パッド開口部面積率とRRの関係

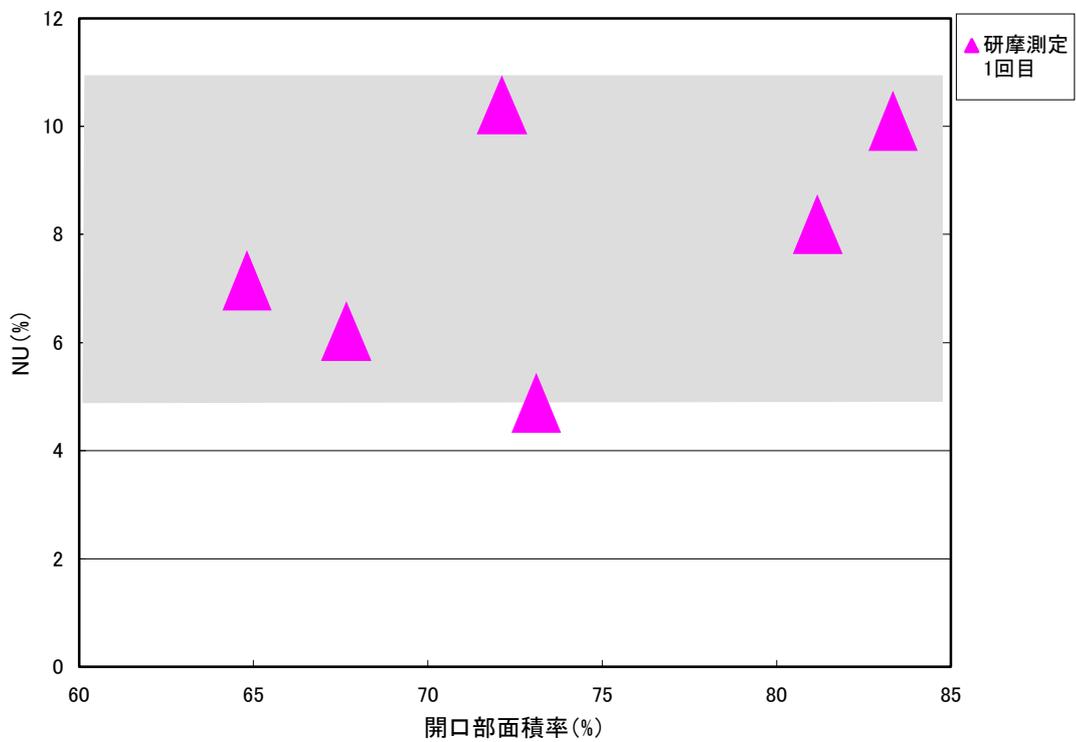


図3.6 未使用パッド開口部面積率とNUの関係

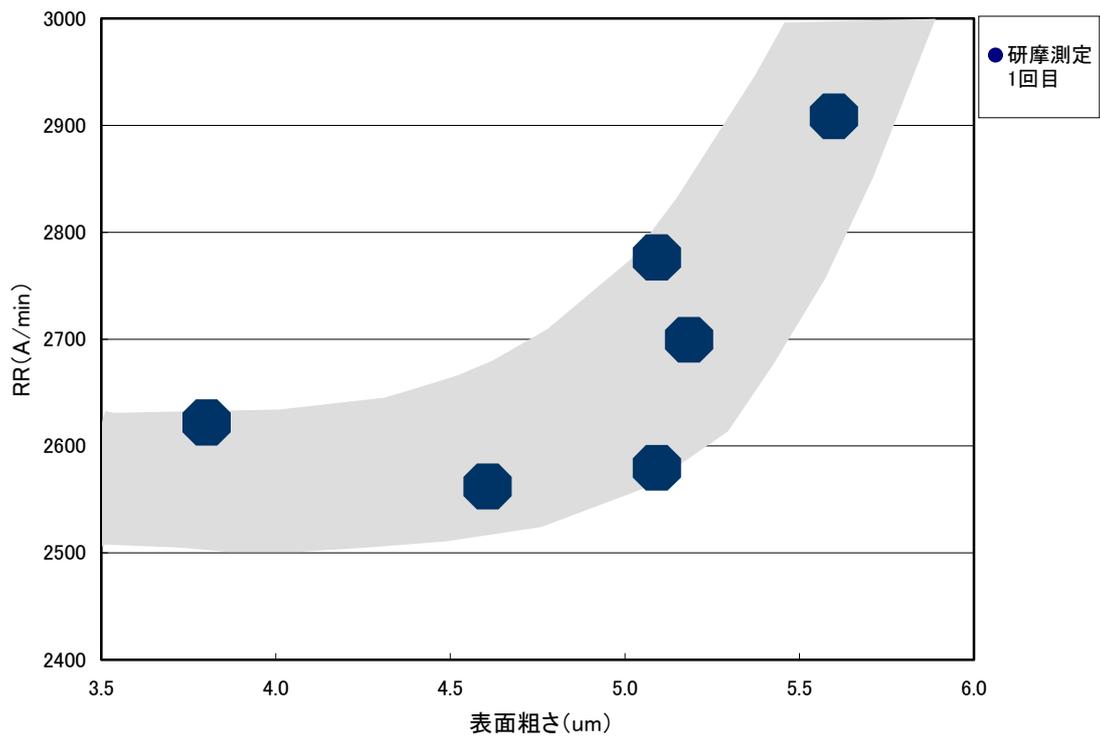


図3.7 未使用パッド表面粗さとRRの関係

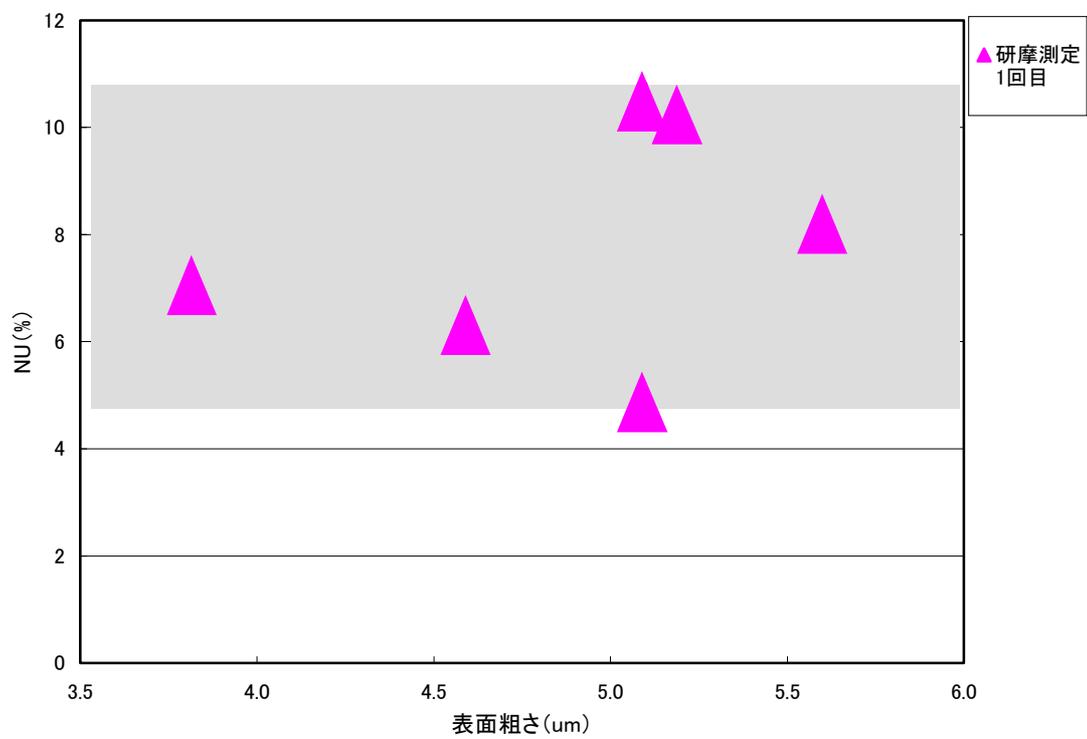


図3.8 未使用パッド表面粗さとNUの関係

図 3.9 と図 3.10 は、研磨時の表面粗さと RR、NU の関係をそれぞれ示したものである。図 3.9、図 3.10 とともに、横軸は研磨試験の直前にサンプル取りした試料を測定した表面粗さの値で、研磨回数に関係なくプロットしている。図 3.9 からわかるように、ここでもやはり RR は表面粗さが粗くなるほど高くなっている。したがって、図 3.7、3.9 の結果より、RR は表面粗さが粗くなるほど高くなると考えられる。一方、図 3.10 から分かるように、A グループのパッドも B グループのパッドも、表面粗さが粗くなるほど NU は良いが、A グループの NU は大きい。また、A グループでは、表面粗さが 3.9 $\mu\text{m}$  よりも小さくなると NU が急激に大きくなる。一方 B グループでは、表面粗さが 3.0~4.2 $\mu\text{m}$  の範囲では、NU はほぼ一定の範囲に納まっている。図 3.10 の結果から、A、B のパッドでは本質的な研磨特性に違いがあることが推定できる。

図 3.11 は、研磨試験を継続している途中でサンプル取りした試料を測定した表面粗さで、最も大きな値 (4.3 $\mu\text{m}$ ) を示したパッドの SEM 写真で、500 倍で観察したものである。また、図 3.12 は、逆に最も小さな値 (3.0 $\mu\text{m}$ ) を示したパッドの SEM 写真で、同じく 500 倍で観察したものである。図 3.11 と図 3.12 の写真を比べてみて分かるように、図 3.11 では、一つ一つの空孔が大きく、でこぼこしており、その凹凸の差も大きい。一方の図 3.12 は、ほぼ同じ大きさの空孔がまんべんなく分布し、平滑でべっとりとして見える塑性変形した部分もでてきて凹凸の差も小さい。

図 3.3 および図 3.4 に示すように、研磨試験を行った結果、A グループのパッドの方が B グループのパッドよりも RR が高く、NU は B グループの方が A グループよりも良かった。図 3.13 は A グループの異なるパッド 3 枚、図 3.14 は B グループの異なるパッド 3 枚の、研磨試験前のサンプル表面を 100 倍で観察した SEM 写真である。図 3.13 の A グループと図 3.14 の B グループを比較してみると、A グループでは空孔の大きさに大小の差があるが、B グループではほぼ同じくらいの大きさの空孔が均等に分散している。また、B グループの方が表面がよく荒れているように見える。

図 3.15 は、A1 のパッドの 500 倍での SEM 写真で、サンプリング 1、2、3 回目のサンプルを示している。A1 は最も大きな NU の値を示したパッドで、研

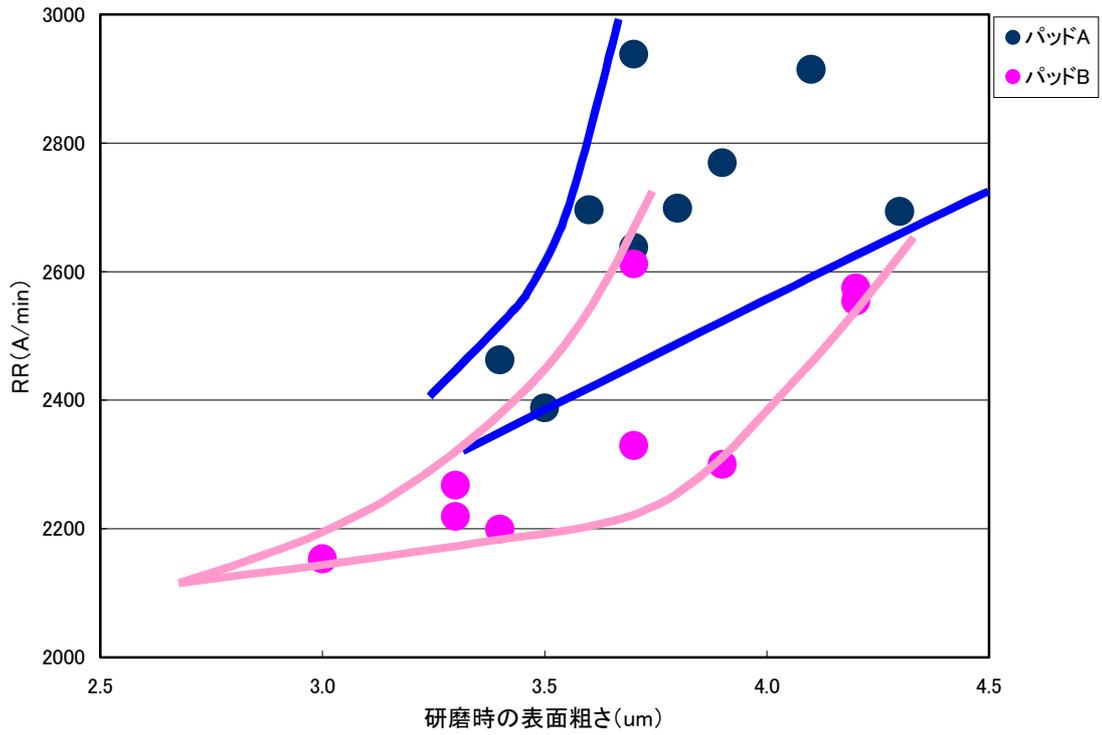


図3.9 研磨時のパッド表面粗さとRRの関係

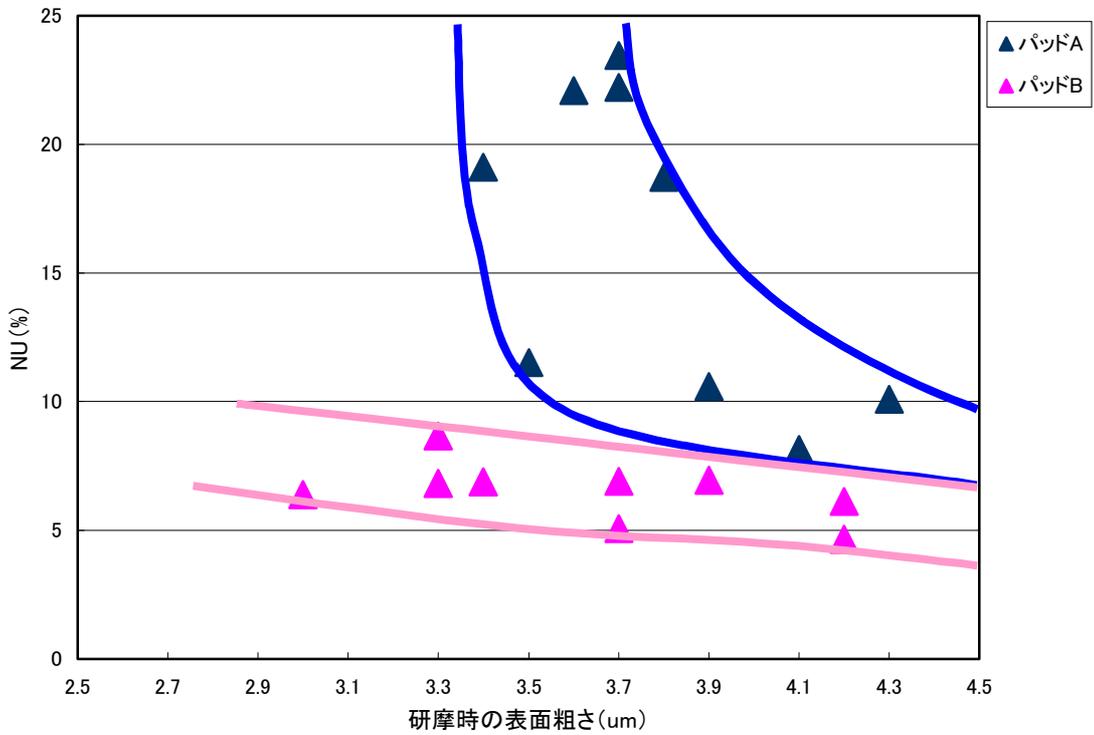


図3.10 研磨時のパッド表面粗さとNUの関係

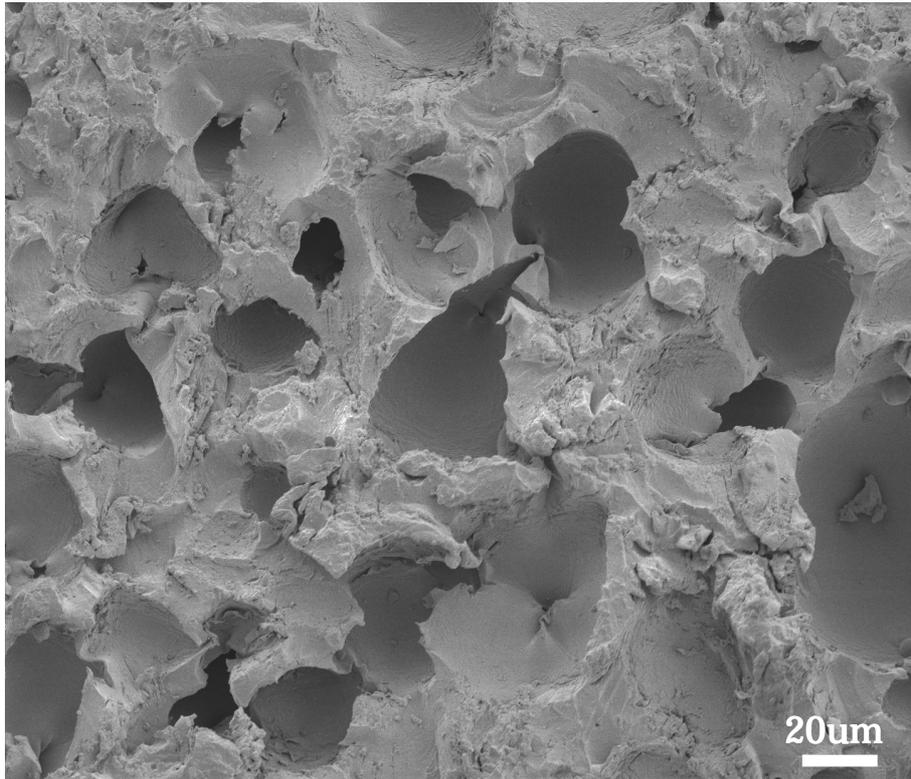


図 3.11 表面粗さの大きいパッド (A1、試験 1 回目) の SEM 観察

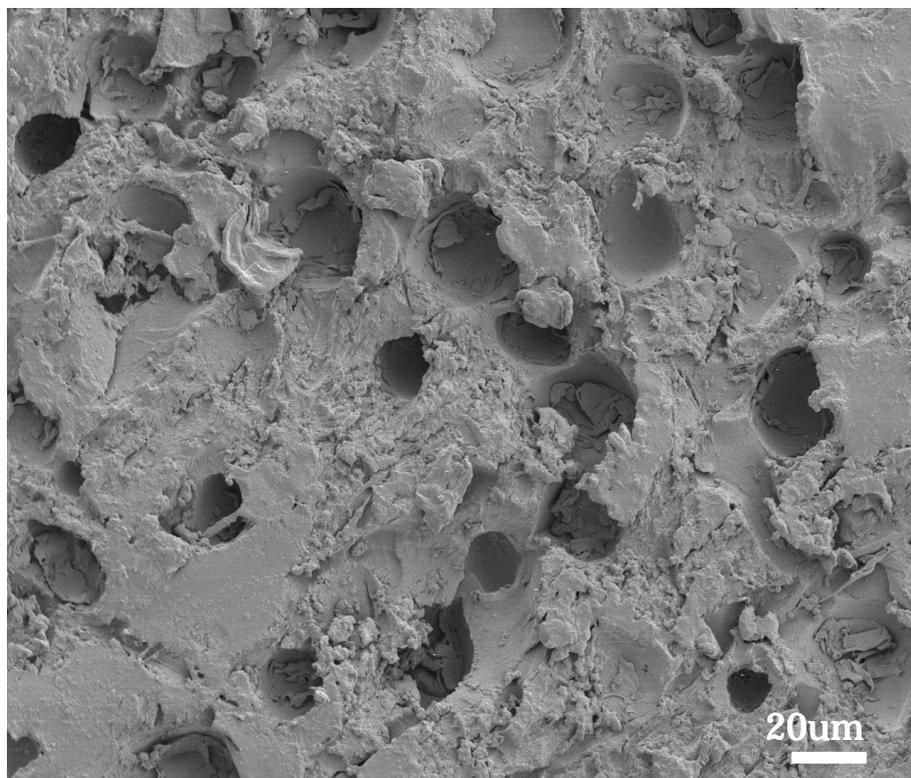


図 3.12 表面粗さの小さいパッド (B3、試験 3 回目) の SEM 観察

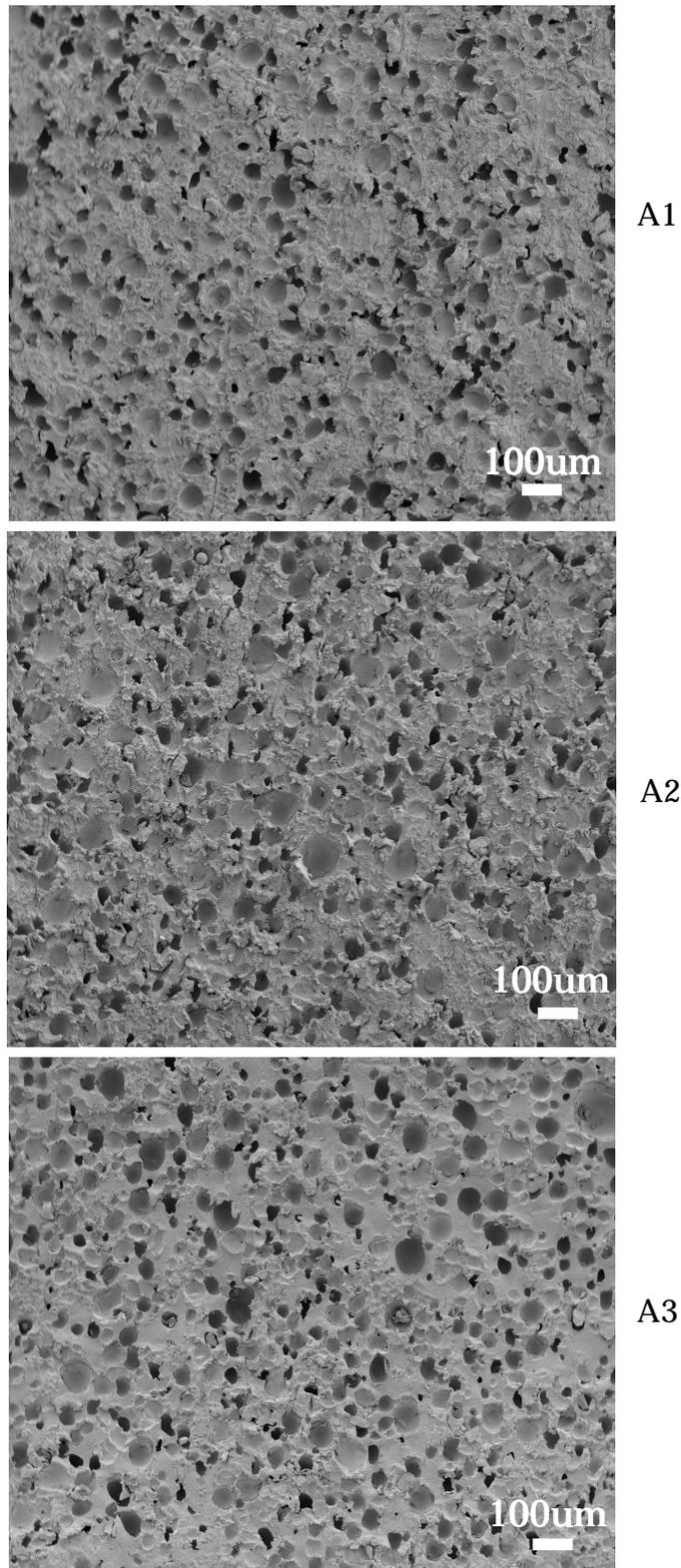


図 3.13 A グループのパッドの SEM 観察 (上から A1、A2、A3)

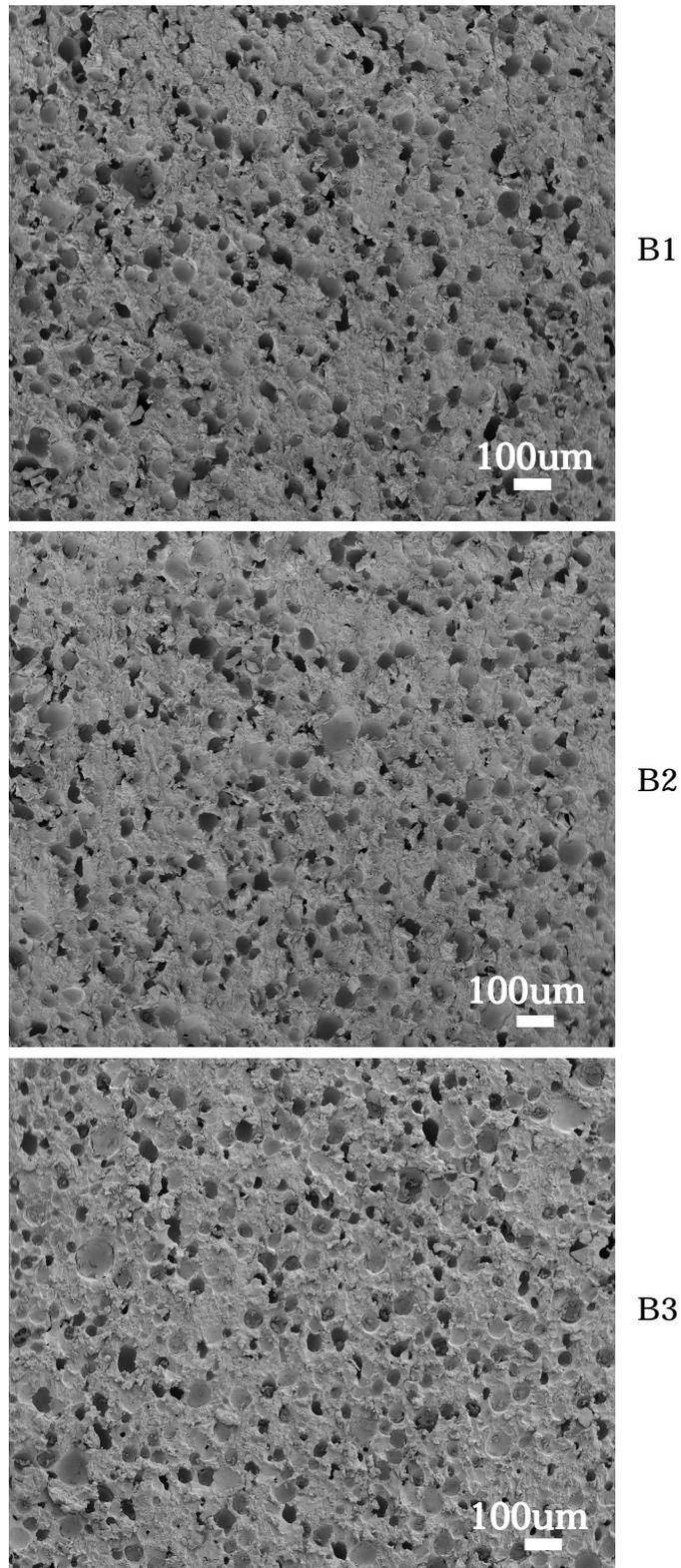
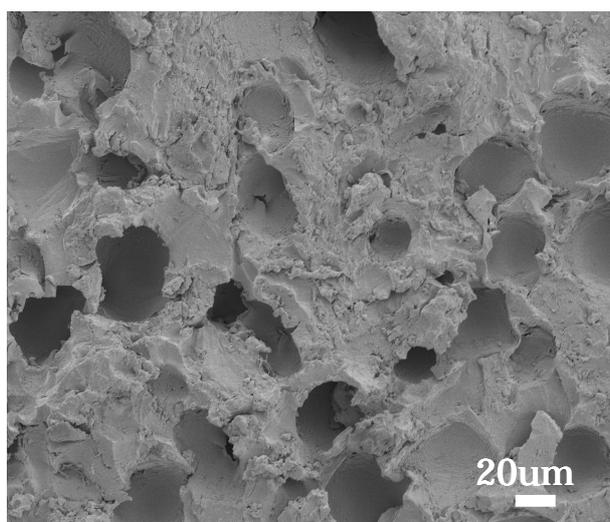
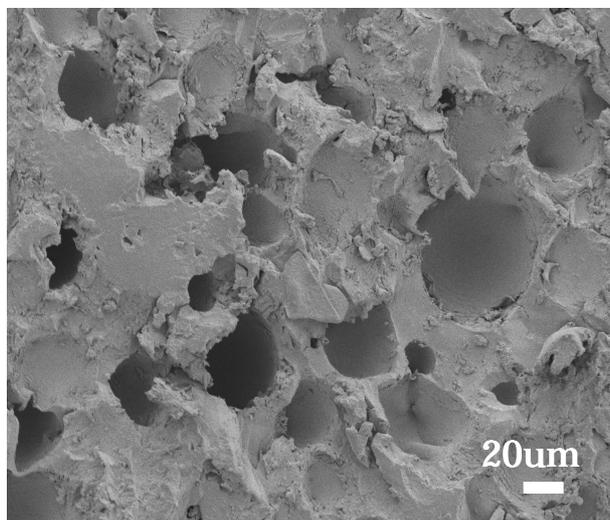


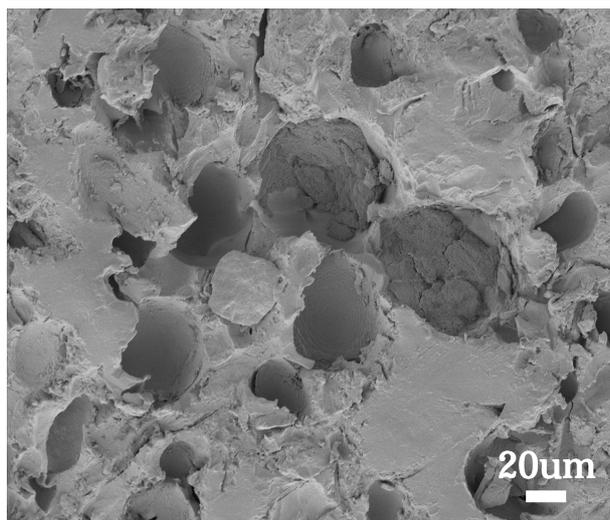
図 3.14 B グループのパッドの SEM 観察 (上から B1、B2、B3)



A1 : 1 回目



A1 : 2 回目



A1 : 3 回目

図 3.15 A1 パッドによる試験 1 ~ 3 回後の表面 SEM 観察

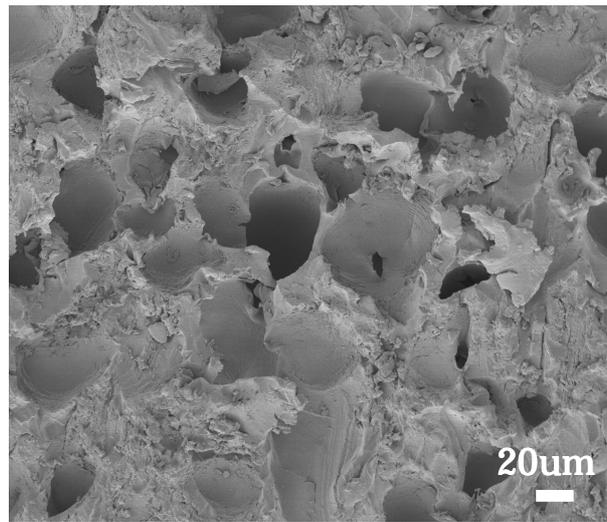
摩試験が進むにしたがって NU が大きくなり、均一性が悪くなっていく。この写真から、研磨が進むにしたがって空孔がつぶれて、塑性変形（粘って平滑になるようなつぶれ方）しているのが分かる。この大きな塑性変形が原因で NU が大きくなったと推定する。

図 3.16 は、B2 のパッドの 500 倍での SEM 写真で、サンプリング 1、2、3 回目のサンプルを示している。B2 は最も NU が良かったパッドである。この写真から、研磨が進んでいっても塑性変形はほとんどおこらず、表面が荒れた状態で保たれているのが分かる。

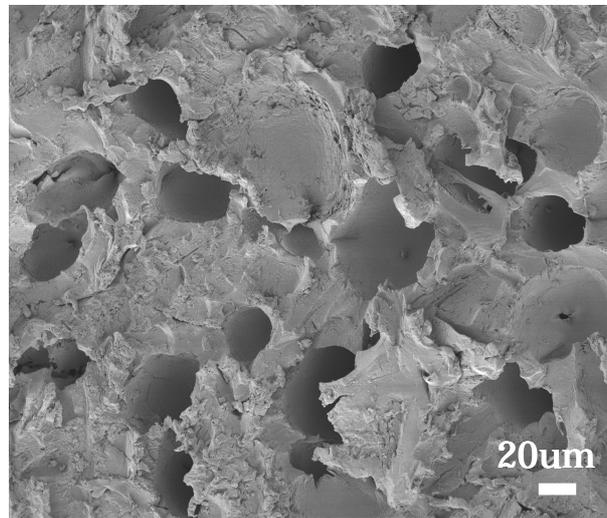
図 3.17~3.20 は、積層でのウレタン高分子パッドの密度、硬さと RR、NU の関係をそれぞれ示したものである。パッドの密度と RR との関係を図 3.17 に示す。この図から、密度が高い方が RR は低くなることが分かる。また、パッドの密度と NU との関係を図 3.18 に示す。この図から、密度が高い方が NU は小さな値を示すことが分かる。パッドの硬さと RR との関係を図 3.19 に示す。この図から、パッドが硬いほうが RR が低いことが分かった。また、図 3.20 にパッドの硬さと NU との関係を示す。この図から、パッドが硬いほうが NU は小さな値を示すことが分かる。

図 3.21 は研磨試験 3 回目の、A1、B2 のパッドを 500 倍の SEM 写真で比較したものである。図 3.21 から分かるように、A1 では表面が塑性変形している様子がよくわかる。一方、B2 では塑性変形はほとんど見られず、表面も荒れている様子がわかる。したがって、前にも述べたように、塑性変形が NU の値を大きくしている原因であると考えられる。このように、図 3.17~3.20 と図 3.21 の SEM 観察の写真より、B グループのような高密度のパッドは、ウレタン架橋が進んでおり結合が強いため硬さも硬く、研磨しても塑性変形して表面がつぶれないため、NU が小さく良い結果がでていていると考える。一方、A グループでは逆に塑性変形によって表面がつぶれるため、パッドとシリコン基板との接触面積が増加し、研磨レートが B グループの研磨レートよりも大きくなっていると考えられる。

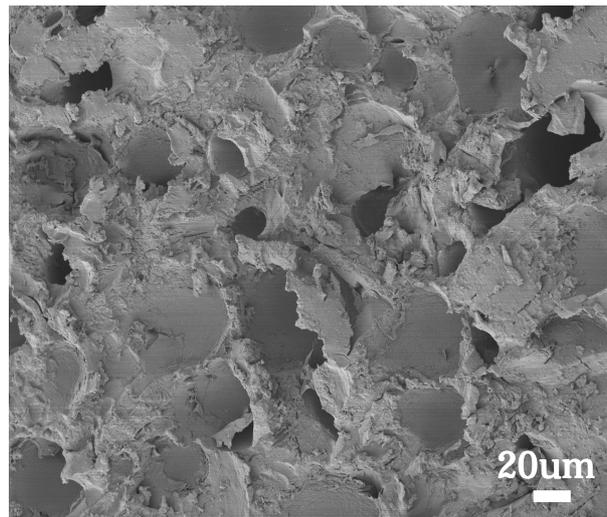
図 3.22 はパッドの開口部平均径と RR との関係を示したものである。この図から分かるように、開口部平均径と RR に相関関係は見られない。また、図 3.23 はパッドの開口部平均径と NU との関係を示したものである。この図から分か



B2 : 1 回目



B2 : 2 回目



B2 : 3 回目

図 3.16 B2 パッドによる試験 1 ~ 3 回後の表面 SEM 観察

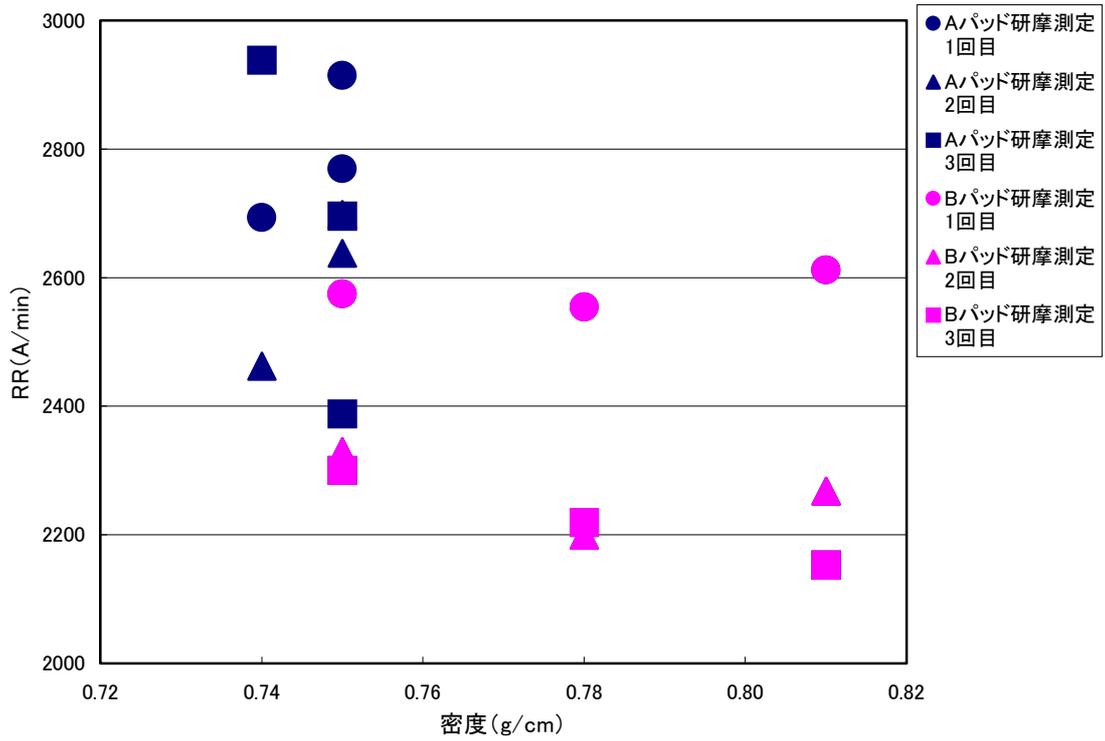


図3.17 パッド密度とRRの関係

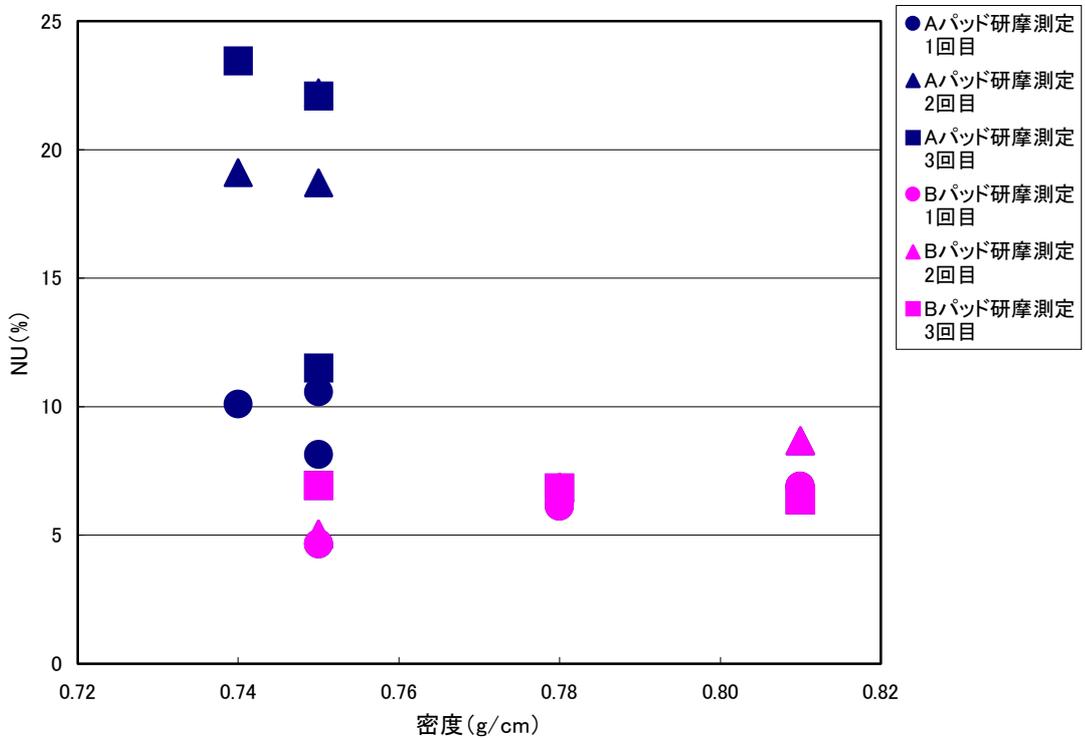


図3.18 パッド密度とNUの関係

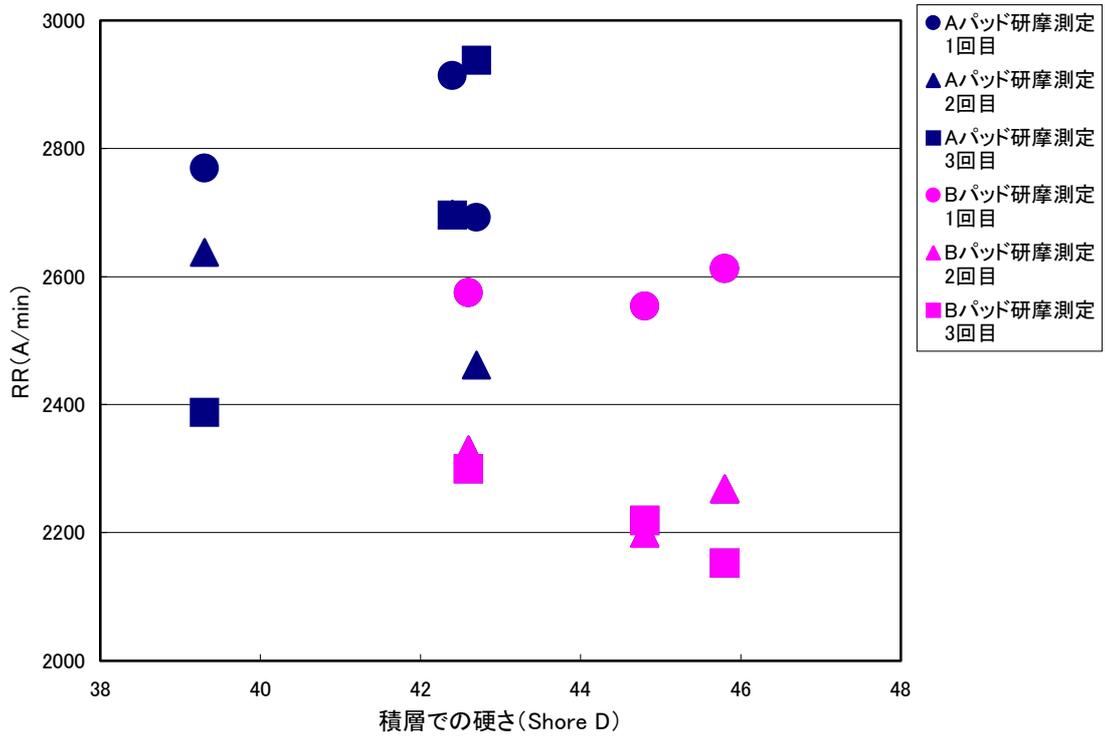


図3.19 パッド硬さ(積層)とRRの関係

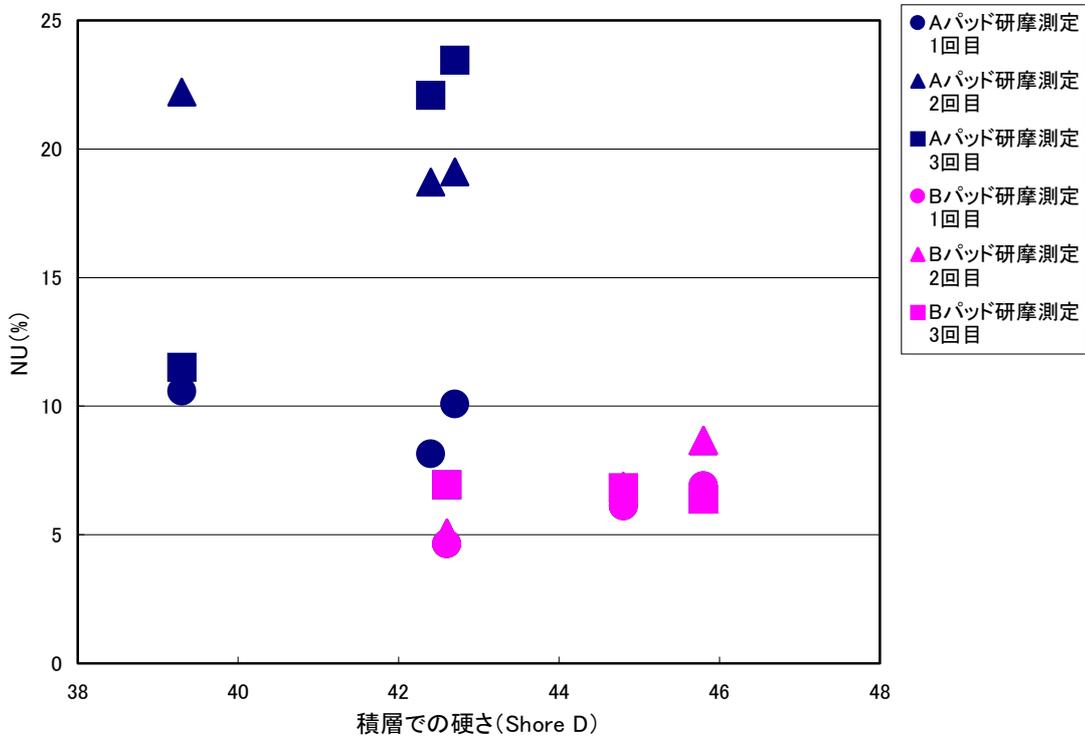
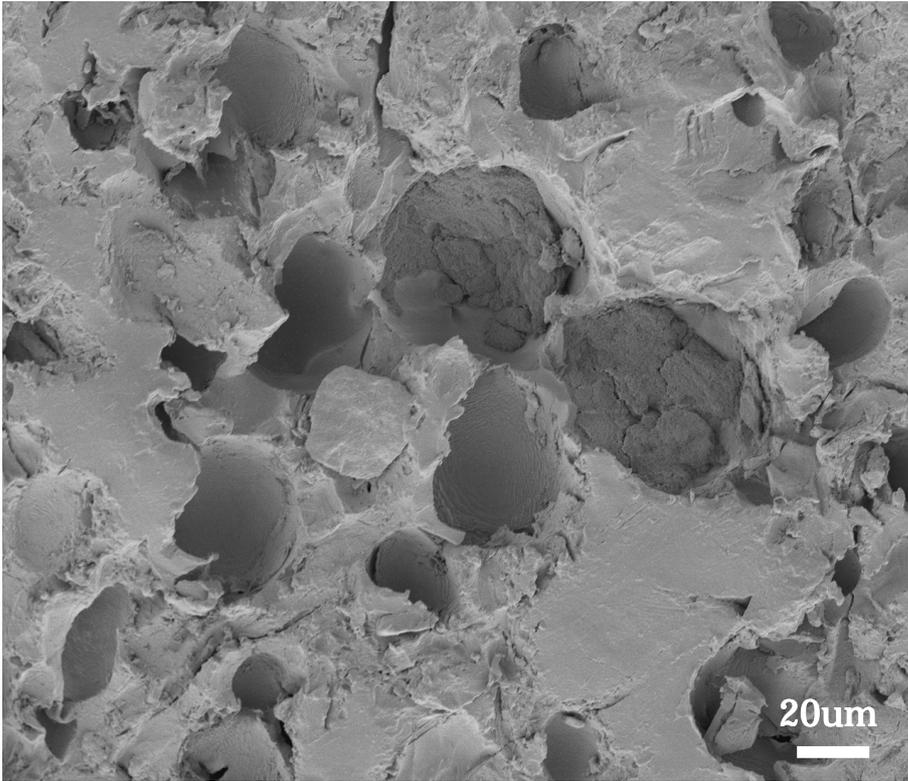
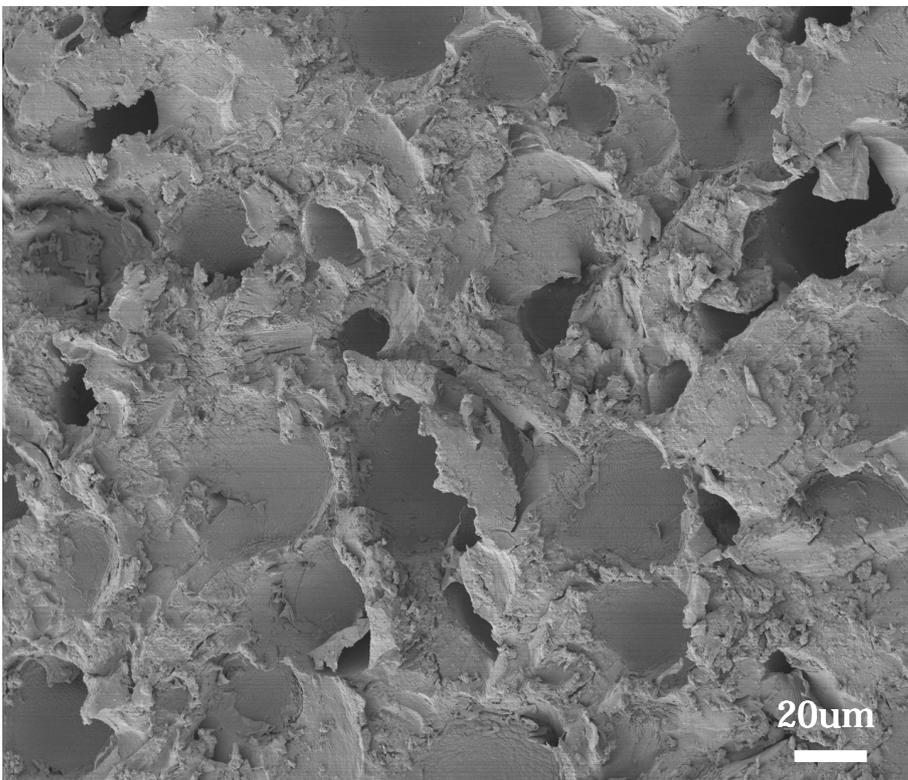


図3.20 パッド硬さ(積層)とNUの関係



パッド A1  
RR : 2938A/min  
NU : 23.44%



パッド B2  
RR : 2300A/min  
NU : 6.94%

図 3.21 研摩試験 3 回目の A、B パッドの比較

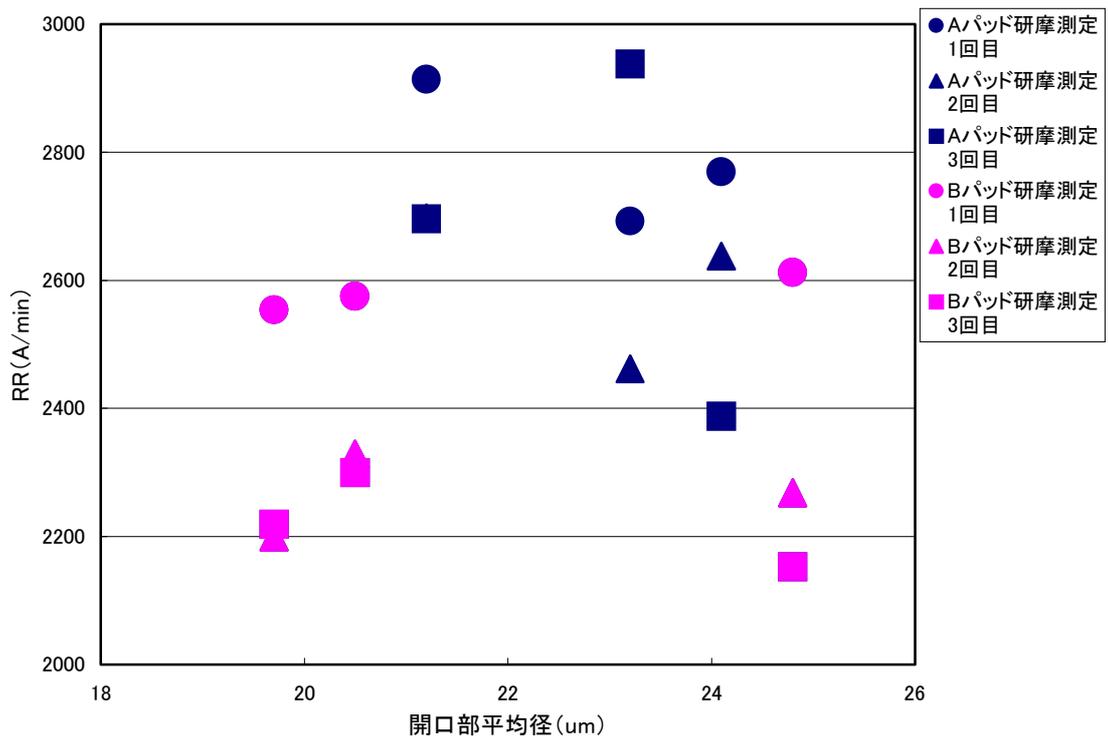


図3.22 パッド開口部平均径とRRの関係

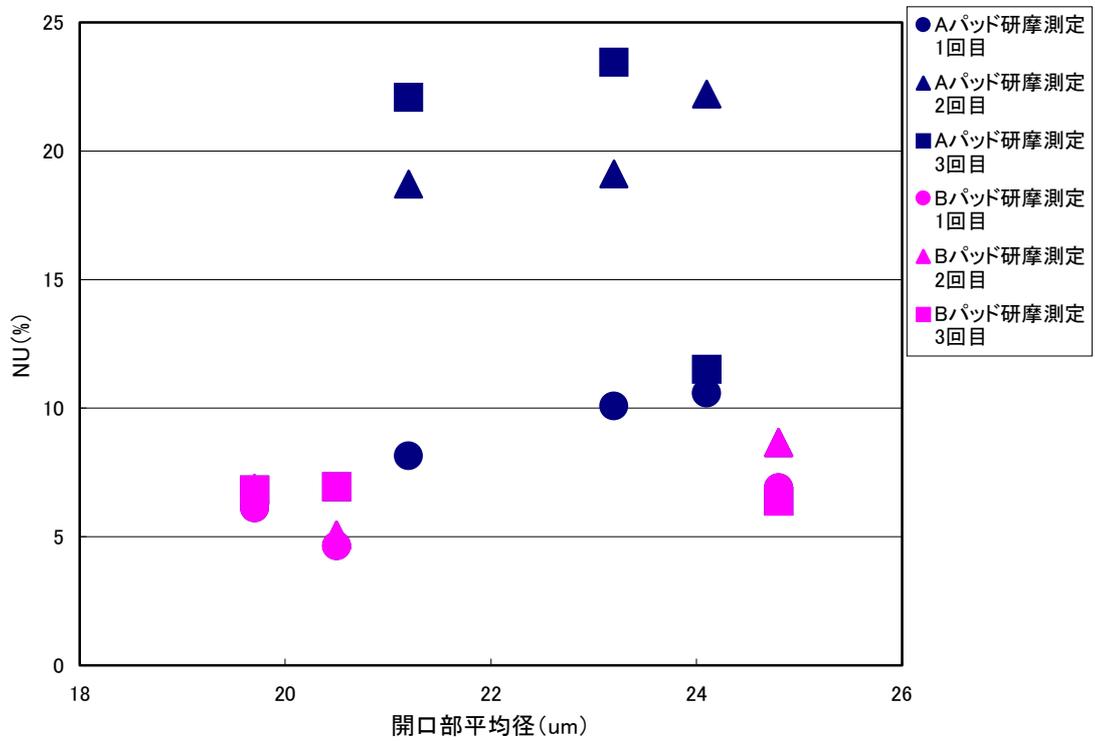


図3.23 パッド開口部平均径とNUの関係

るように、開口部平均径と NU にも相関関係は見られない。パッドの厚さと RR との関係を図 3.24 に示す。この図から、厚さと RR にも相関関係はないことが分かる。また、パッドの厚さと NU との関係を図 3.25 に示す。この図から、厚さと NU にも相関関係はないことが分かる。図 3.26 にパッドの圧縮率と RR との関係を示す。この図から分かるように、圧縮率と RR にも相関関係は見られない。また、図 3.27 にパッドの圧縮率と NU との関係を示す。この図から分かるように、圧縮率と NU にも相関関係は見られない。図 3.28 はパッドの回復率と RR との関係を示したものである。この図から、回復率と RR にも相関関係はないことが分かる。また、図 3.29 はパッドの回復率と NU との関係を示したものである。この図から、回復率と NU にも相関関係はないことが分かる。このように、図 3.22 ~ 3.29 から分かるように、パッドの開口部平均径、厚さ、圧縮率、回復率の各パラメータと RR、NU との相関関係はほとんど見られない。これらのパッド物性の研摩試験に対する影響は、SEM 観察で示した表面状態の影響ほど大きくないと考えられる。

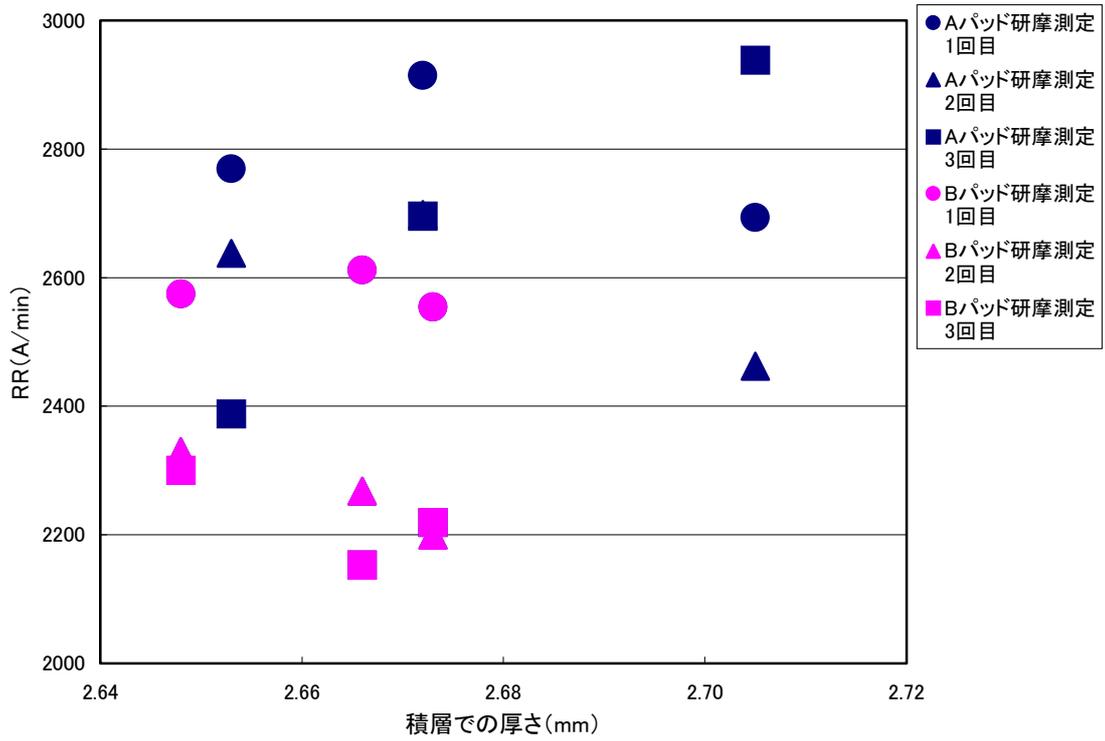


図3.24 パッド厚さ(積層)とRRの関係

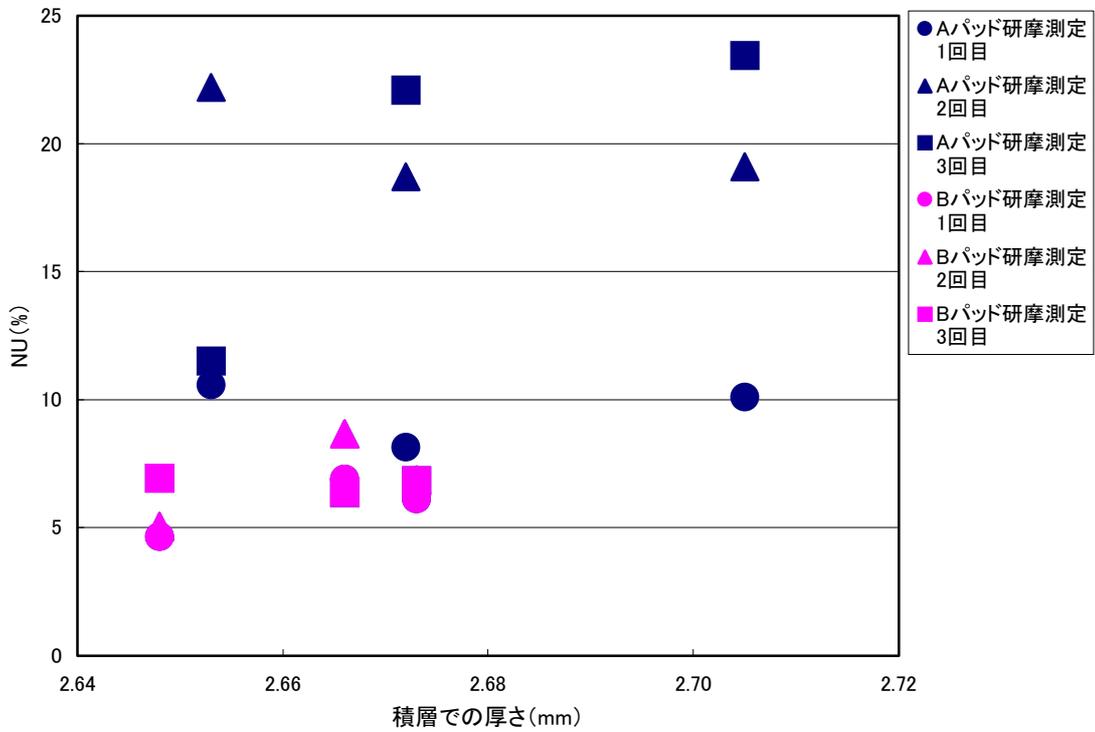


図3.25 パッド厚さ(積層)とNUの関係

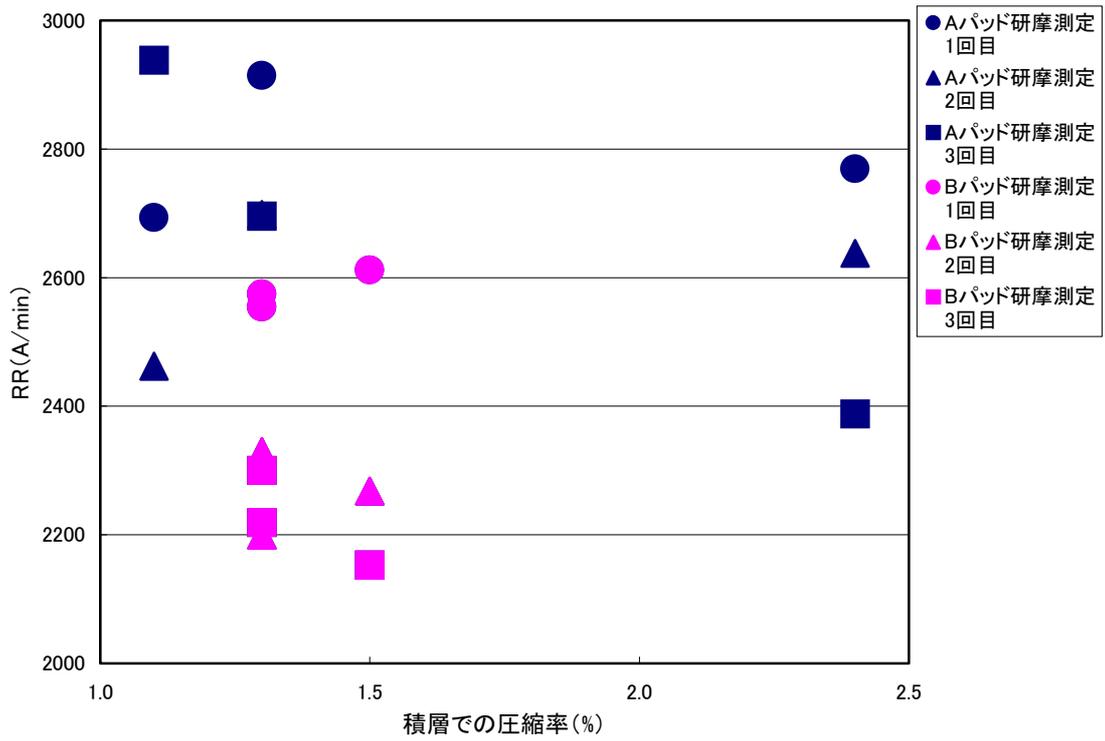


図3.26 パッド圧縮率(積層)とRRの関係

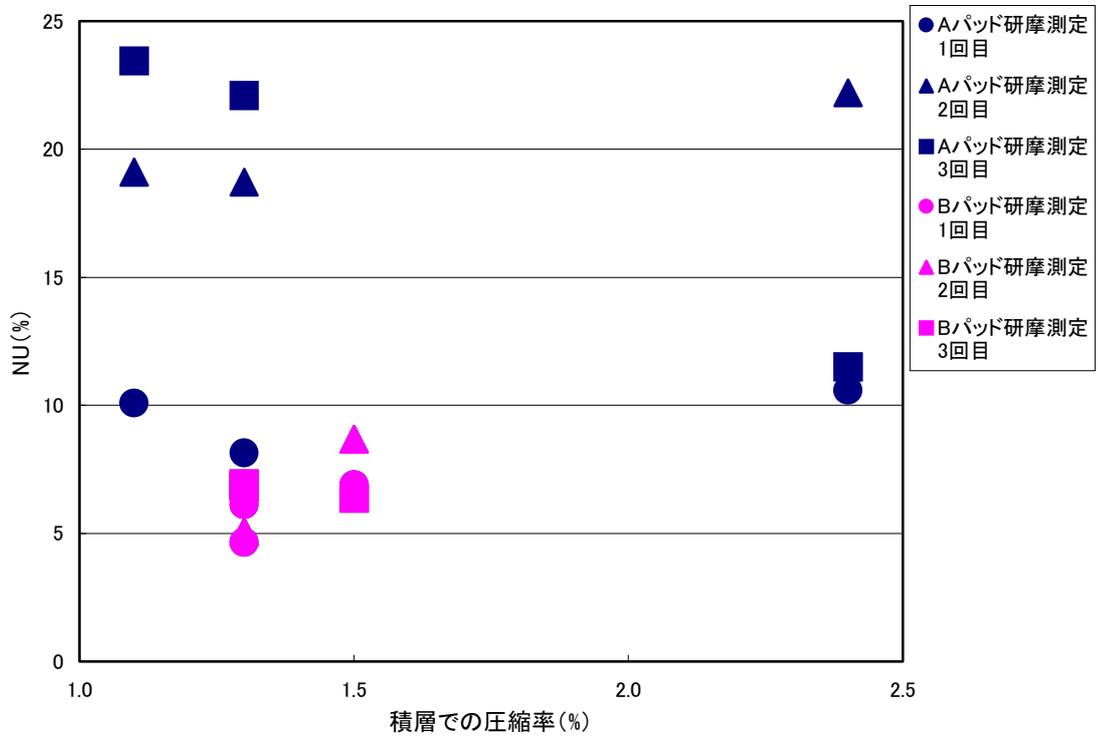


図3.27 パッド圧縮率(積層)とNUの関係

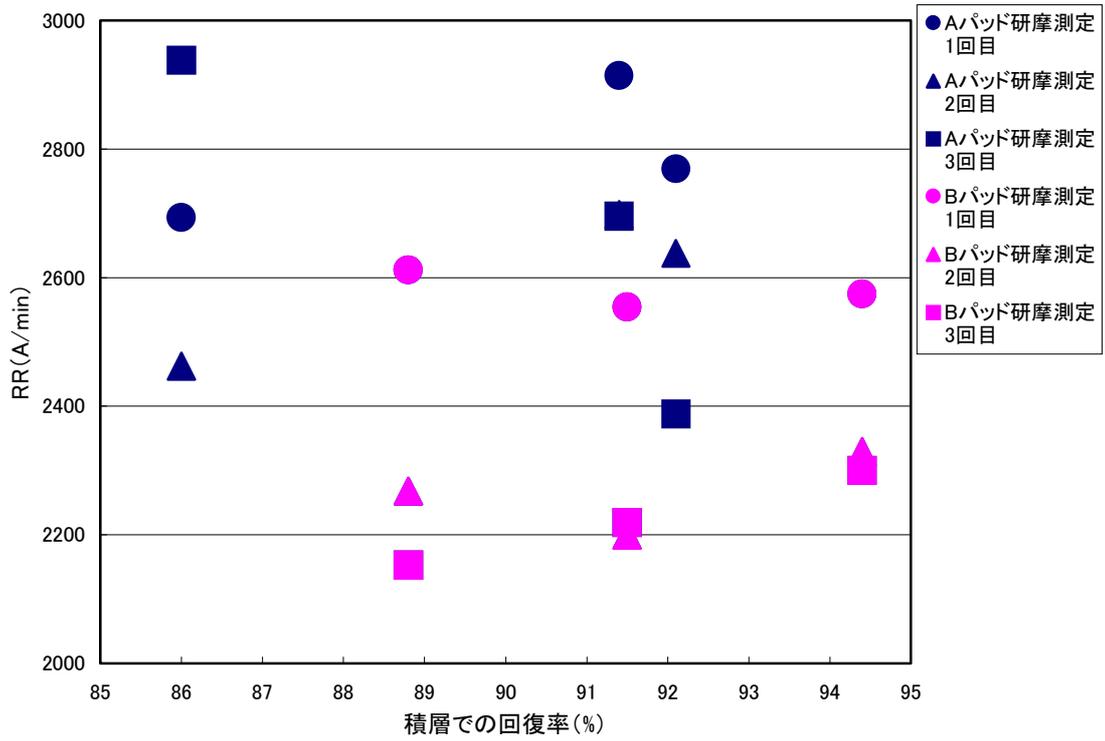


図3.28 パッド回復率(積層)とRRの関係

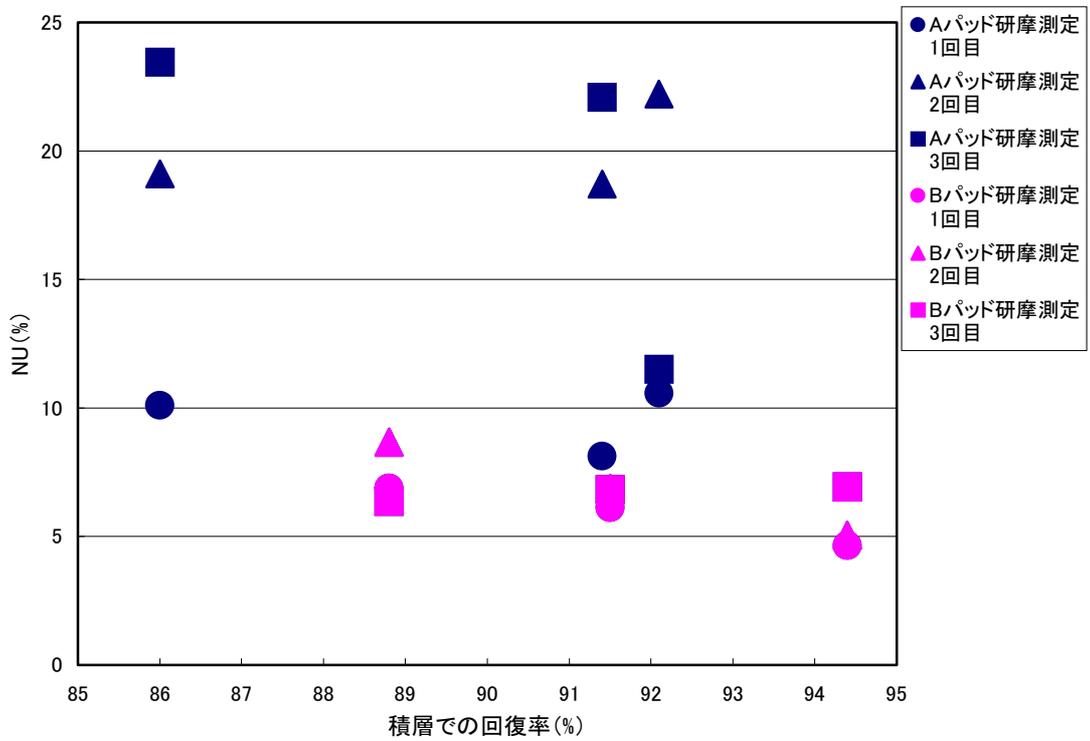


図3.29 パッド回復率(積層)とNUの関係

### 3 - 3 まとめ

研磨試験を行った結果、研磨レート（RR）とパッドの開口部面積率、表面粗さの間には相関があり、それぞれの物性値が大きくなるほど RR が高くなることが分かった。また、開口部面積率が高い方が不均一性（NU）も良さそうと予想したが、今回の試験ではあまり相関関係がないという結果が得られた。一方、パッドの表面粗さが大きい方が、NU は小さな値を示すことを見出した。また、パッドの密度、硬さと NU との間にも相関があり、それぞれの物性値が大きくなるほど NU は小さくなる。

また、SEM を用いてパッドの表面を詳細に観察した結果、研磨した時、塑性変形が大きく表面が平滑に変形するようなパッドでは NU の値が大きく悪くなり、逆に表面が荒れた状態を保っているパッドの方が、NU の値は小さく良い結果になることが分かった。

## 第4章 結論と今後の課題

第3章で述べたように、パッドの開口部面積率が大きいほど RR は高くなるという結果が得られた。これは、パッドの空孔が多いほどスラリーの粒子を多く保持し、その結果よく削れると考えられる。開口部面積率が大きいほど不均一性 (NU) の値も良くなりそうと考えたが、本試験で明らかな相関関係は得られなかった。

また、パッドの表面粗さが大きいほど 研磨レート (RR) は高くなる。これは、パッドの表面が荒れているほど、スラリーをたくさん保持できるため、酸化膜が能率よく削れると考える。

また、B グループのパッドの方が A グループのパッドよりも密度が大きく、硬さも硬く、NU も良いという結果が得られた。これは、高密度のパッドは、ウレタン架橋が進んでおり結合状態が強いため硬く、そのため研磨を進めていっても表面がつぶれず、スラリーをためることができ、NU が良い結果になると考える。

SEM 観察で A グループと B グループのパッドを比較してみると、A グループは空孔の大きさに大小の差があるが、B グループはほぼ同じくらいの大きさの空孔が均等に分散しているように見える。この空孔分布と表面状態の違いも、A グループと B グループのパッドで研磨したときの NU の差に影響していると考えられる。また A グループのパッドでは、研磨が進むにしたがって、パッド表面が塑性変形してべっとりとした平滑な表面状態に変化していく様子が見られた。これが NU を悪くする原因だと考えられる。逆に、表面が荒れている方が NU は良い値を示しており、パッドの表面状態と NU は密接に関連していると考えられる。一方、A グループのパッドで、パッド表面が塑性変形しても RR が高い値を示している点に関しては、パッドが塑性変形したことにより、シリコン基板との接触面積が増加したためであると考えられる。

これらの結果から、パッドを構成する高分子の物性が、研磨結果に影響を与えているものと考えられる。今後は、分子レベルでの塑性変形を制御する方法

の研究が重要となると思われる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導してくださいました、高知工科大学工学部電子・光システム工学科、河渕靖先生に心から感謝いたします。

また、ロデールニッタ株式会社の横道、板井、松村、松岡、平木、羽場、森岡、堅尾、宮本、妹尾、柴垣、井上、山本、その他の皆様には、研究の進め方、実験方法、企業での生活等、たいへん親切なご指導を頂き、心より御礼申し上げます。研究をまとめることができましたことを心から感謝いたします。

最後に、四年間ご指導頂いた電子・光システム工学科、原央学科長、矢野漣先生、その他の教職員の方々にも心から感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 菊池正典 : 「やさしくわかる半導体」, 日本実業出版社(2000)、220-221
- 2) 菊池正典 : 「半導体のすべて」, 日本実業出版社(1998)、138-139
- 3) 菊池正典・高山洋一郎・鈴木俊一 : 「半導体・IC のすべて」, 電波新聞社(2000)、202-204
- 4) 笹子勝・遠藤政孝 : 「次世代超 LSI プロセス技術 ( 応用編 )」, リアライズ社 (1998)、287-290
- 5) 土肥俊郎 : 「詳説 半導体 CMP 技術」, 工業調査会(2001)、13-119
- 6) 丹呉浩侑 : 「半導体プロセス技術」, 培風館(1998)、57-60
- 7) 横須賀俊之・黒川仁・稲葉祐策・高見誠一・久保百司・宮本明・今村詮 : “ CMP 過程解説のための高速化量子分子動力学プログラムの開発 ”, 「2001 年 ( 平成 13 年 ) 春季 第 48 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 第 2 分冊」, 29a YG 1、( 社 ) 応用物理学会 ( 2001 ) p868
- 8) 徳山裕介・小川洋輝・菊池純・堀池靖浩 : “ Cu 薄膜表面の CMP 過程の終点検出 ”, 「2001 年 ( 平成 13 年 ) 春季 第 48 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 第 2 分冊」, 29a YG 2、( 社 ) 応用物理学会 ( 2001 ) p868
- 9) 小野寺貴弘・三橋秀男・山形真司・長谷川功一・中浩・大川勝久・林善宏 : “ ローカル CMP 方法における研磨終点検出マージンに対するスラリー特性の影響 ”, 「2001 年 ( 平成 13 年 ) 春季 第 48 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 第 2 分冊」, 29a YG 4、( 社 ) 応用物理学会 ( 2001 ) p869
- 10) 原徹・黒須敏明・都甲文亨・土肥俊郎 : バリア膜と Cu 配線層の MnO<sub>2</sub> スラリーによる CMP ( ) “, 「2001 年 ( 平成 13 年 ) 春季 第 48 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 第 2 分冊」, 29a YG 5、( 社 ) 応用物理学会 ( 2001 ) p869
- 11) S. Kondo, N. Sakuma, Y. Homma and N. Ohashi : “Slurry Chemical Corrosion and Galvanic Corrosion during Copper Chemical Mechanical Polishing”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 39(2000), 6216-6222

- 12) 大見忠弘 : 「新しい半導体製造プロセスと材料」, シーエムシー(2000)、  
259-265
- 13) Shijian Li, Lizhong Sun, Stan Tsai, Feng Q. Liu and Liang Chen : "A  
Low Cost and Residue-Free Copper CMP Process With Low Dishing,  
Erosion And Oxide Loss", Proceedings of the 2001 International  
Interconnect Technology Conference(2001), 137-139
- 14) N. Ohashi, Y. Yamada, N. Konishi, H. Maruyama, T. Oshima, H.  
Yamagichi and A. Satou : Improved Cu CMP process for 0.13um node  
multilevel metallization", Proceedings of the 2001 International  
Interconnect Technology Conference(2001),140-142
- 15) Anne E. Miller, Paul B. Fischer, A. Daniel Feller, Kennets C.  
Cadien : "Chemically Induced Defects During Copper Polish",  
Proceedings of the 2001 International Interconnect Technology  
Conference(2001), 143-145
- 16) Simon Lin, Changming Jin, Lawrence Lui, Minghsing Tsai, Michael  
Daniels, Albert Gonzalez, Jeffrey T. Wetzel, K. A. Monnig, P. A.  
Winebarger, Simon Jang, Douglas Yu and M. S. Liang : "Low-k  
Dielectrics Characterization for Damascene Integration", Proceedings of  
the 2001 International Interconnect Technology Conference(2001),  
146-148
- 17) 月刊Semiconductor World 「2000最新半導体プロセス技術 Technology &  
Equipment」, プレスジャーナル(1999)、p272