

コーヒーフィルターを セラミックスで作る



2023年度プロジェクトリサーチ

2023 年度プロジェクトリサーチ 活動報告書

「コーヒーフィルターをセラミックスで作る」

報告者：三木悠生

学籍番号:Y210500

所属：先端理工学部応用化学課程

学年：3年

報告書

1. 緒言

本研究に於いて研究される対象はサイフォン式のコーヒーフィルターである。そもそもの話、コーヒーは豆の産地等よりも大きな枠組みとして淹れ方によって名称が異なる。自家製コーヒーとして世間一般に受け入れられるのは挽いたコーヒー豆を逆円錐型のフィルターの上に配置して上から熱湯を用いて抽出するドリップ式コーヒーである。この他に高圧、高温下の液体で微細に挽いたコーヒー豆を抽出するエスプレッソ式コーヒーや、変わり種として濾過せずに砂上で水と共にコーヒー粉を沸かして濾過せずに飲むトルコ式コーヒー等がある。本研究に於いての抽出方法であるサイフォン式は以下の図1の簡略図のようなものである。

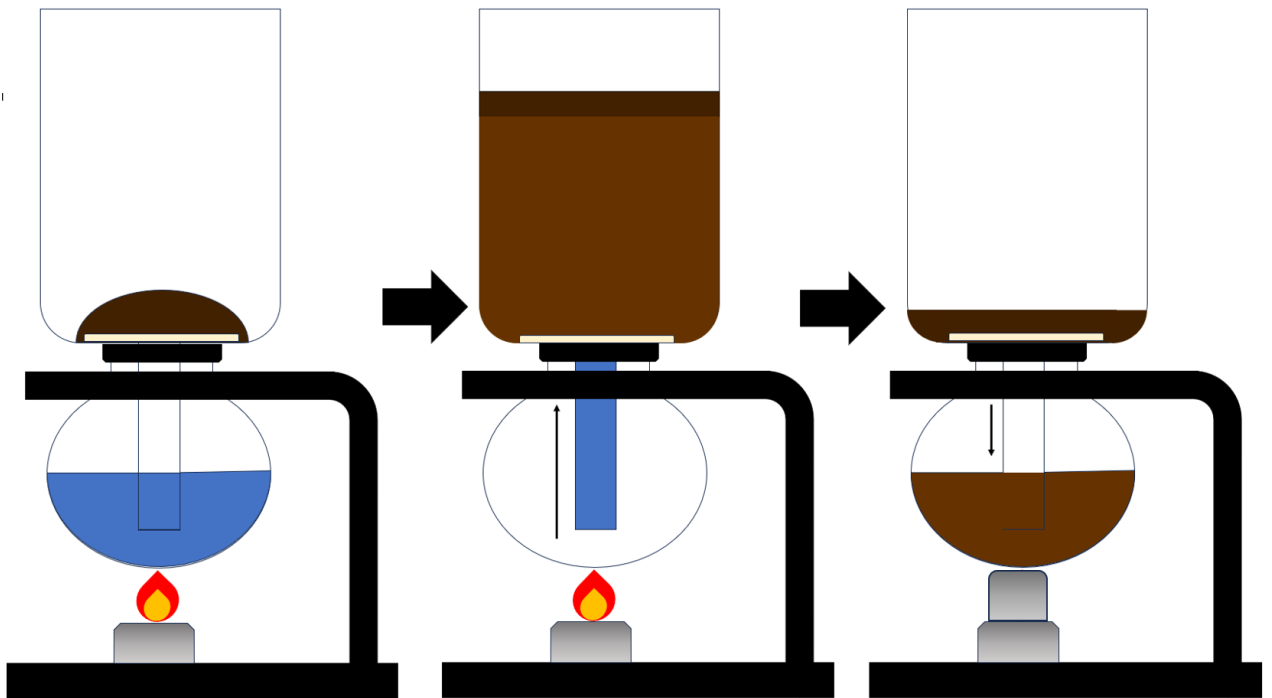


図1.サイフォン式コーヒーに於ける抽出

フィルターが開口部に固定され、先口が細くなっているガラス筒を支持台に固定されたフラスコに差し込み、両者の接合部を密着させる。これらガラス筒、フラスコ、フィルター、支持台、加熱器がサイフォンの抽出に用いられる道具である。コーヒーを抽出する際にフラスコに水を入れ、フィルターの上に挽いたコーヒー豆を置き、フラスコの下部から水を熱する。こうする事で図1の中央の図の様に熱された水が水蒸気へと変じ、ガラス筒の細口を通してフィルター及びフィルター上のコーヒー豆に接して熱水へと戻る。熱せられている間、水蒸気は絶えず細口を昇り続ける事からフラスコ内に戻ることなくコーヒー豆から成分を煮出す。その後、フラスコへの加熱を止めると図1の右図のようにフラスコ内の気圧が下がり、ガラス筒内のコーヒーが降りてくる。この際にコーヒー豆から成分の抜けたコーヒー滓はフィルターで濾し取られ、コーヒーは抽出される。この抽出方法の利点はドリップよりも高温での抽出の為に香りばしいコーヒーが抽出される事、減圧作用によって濾過される事で抽出時間が短いことが挙げられる。又、短所として抽出時間こそ短いものの水が熱して水蒸気とする為に加熱時間が長い事や高温での抽出の為にコーヒーが苦くなりやすい事、

エスプレッソ式に比べれば幾分は楽なもの器具の手入れに手間がかかることなどが挙げられる。

コーヒーのフィルターは数多の素材で製造されている。使いきりだが安くて使用感も良い紙製、再使用が可能だが詰まり易く且つ濾過が甘い金属製、詰まりにくく解消可能だがパフォーマンスが低下しやすく凍結して保管しなければならない布製などがあるが、どれも再利用の手間や環境への配慮といった点で難がある。その中で近年開発され、台頭してきたのがセラミックス製のフィルターである。

セラミックスは定義が研究者または研究分野で大きく異なるが、本研究に於いては通常金属元素と非金属元素と組み合わせによる一炭素のような例外も存在するが一イオン結合及び共有結合で結合した素材全般を指す[1]。セラミックスは様々な用途があるが、この内フィルターとして使用される際には高温、高反応性の液体の濾過などの耐久性や耐食性を必要とされる場面に用いられる。またセラミックスフィルターの幾つかのものは詰まりができた時、焼成によって詰まった物質を焼くことで取り除いて再使用できる。この性質を利用して、再利用可能なコーヒーフィルターが製造されている。

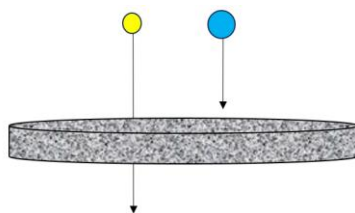
2.目的

本研究の目的はサイフォン式のコーヒーフィルターをセラミックスで製造することである。この目的の契機は通販サイト等でコーヒーフィルターを探した際にドリップ式のセラミックスフィルターは多々あれどサイフォン式のセラミックスフィルターが見受けられなかった事が発端である。この事実のもと、サイフォン式のコーヒーの抽出に於いてセラミックスは何らかの技術的、経済的欠陥があると考えられ、そこに興味を抱いた為に試してみようと考えた。又、それ以外にも仮令、まだ誰もセラミックスでのサイフォン式コーヒーフィルター作っていないのであれば、その部門のパイオニアとなれる事や、自らセラミックス式のフィルターを製造できるとなれば自家用のサイフォンコーヒー用のフィルターを自前で用意できてフィルターを替える際の費用が浮くと言った要因もあった。そうした興味と功名心と打算によってこの目的は設定された。それと同時にカオリン系のセラミックスを実際に扱う事で非金属系のセラミックスについて知見を得る事も目的の一つである。

3.調査方法

本研究の調査方法は実際に自らの手でサイフォン式セラミックスフィルターを製作し、これを自家用のガラス筒に固定して、上からテストダストと水の混合液を注ぎ、濾過できるか調べる。また、実際にコーヒーを抽出して抽出の具合を調べることで調査を行う。

製造するフィルターの性能に関しては以下の図2のような濾過性能を求めた。



- : 粒径約0.1mmの粒
- : 液体成分

図 2.求められる濾過性能

4.計画

フィルターに求めるのは前述の濾過性能の他、酸性であるコーヒーに接触しても良い耐食性、100°C前後の水蒸気に耐える耐熱性であった。その為、当初は製作するフィルターは金属系セラミックスを想定していたが、焼結に用いる小型電気炉の焼結温度が 1350°C近傍であった為断念し、また市販のドリップ式のコーヒーフィルターを電子顕微鏡による操作結果より陶器セラミックスによるフィルター、即ちカオリン系(Al-Si)の粘土を泥漿鑄込みによって成型する事に決定した。電子顕微鏡による成分分析結果は次の図 3 のようである

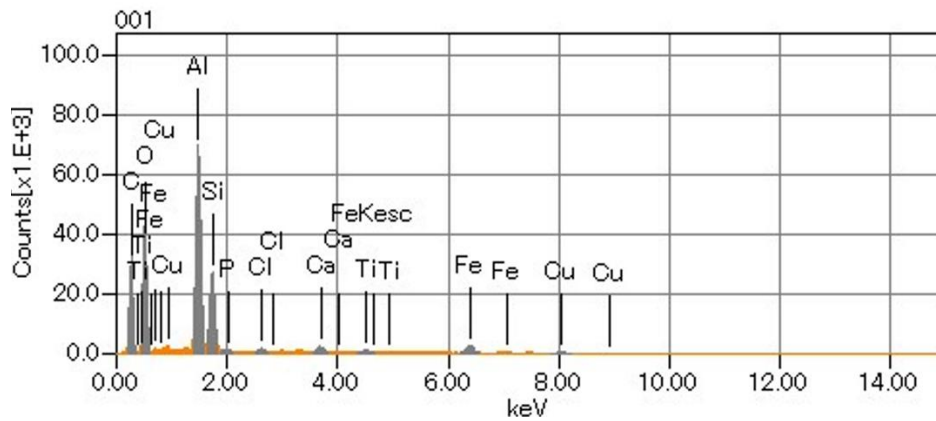


図 3.電子顕微鏡による成分分析結果

また構造を拡大し、解析した様子は図 4 のようである。

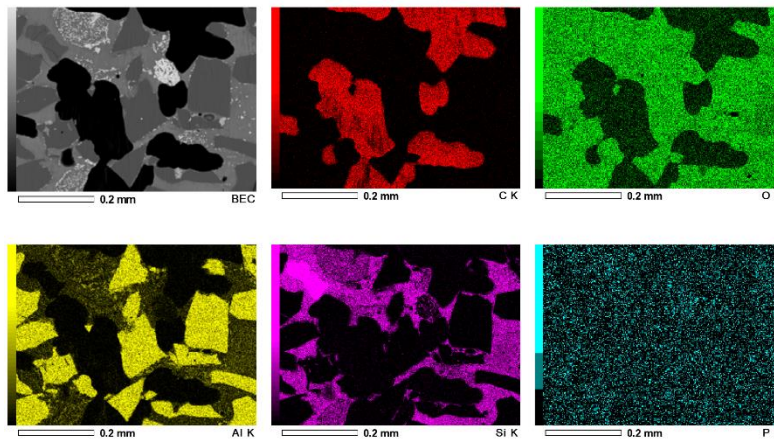


図 4.電子顕微鏡による構造解析結果

泥漿鑄込みは以下の図 5 のような成型手法である。

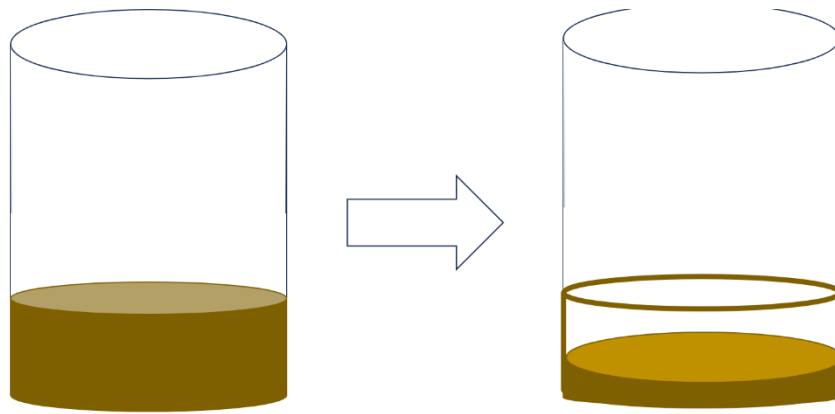


図 5.泥漿鑄込みの簡略図

泥漿鑄込みでは粘土と水をおよそ 3:10 の割合で攪拌したスラリー、泥漿を石膏の型に流し込む成型方法である。流し込まれた泥漿は型の石膏に水分が吸収されることで粘土成分が型に付着、凝固する。これを乾燥させることで決まった形に粘土を成型する。この鑄込み型は 3D プリンターで作った模型を底に置き、そこに化学反応を起こして凝固する前の石膏と水の混合スラリーを流し込み、時間経過によって凝固したものを用いた。

焼結する泥漿の構造について、当初は上下に直径 0.05mm 前後の貫通した穴を有するものを想定していた(方針①)。直径 0.05mm というのは使用した 3D プリンターの精度、及び求められる分離能から決定した直径である。しかし、実験の進行に伴い、泥漿そのものに直径が約 0.05mm の炭素粉末、即ち成分を抽出したコーヒー滓を 3 時間ほどボールミルで粉碎して乾燥させたものを添加して焼き上げる(方針②)へと転換した。方針②では以下の図 6 のように炭素を燃焼させて取り除く事で多孔質構造を有するセラミックスを焼き上げる狙いがあった。



図 6.多孔質構造を形成するイメージ

鑄込まれた泥漿を石膏型から取り出した後、これを風通しの良い日陰で一日ほど乾燥し、これを小型電気炉で焼結することを計画した。

焼結したフィルターの濾過性能の試験方法について、テストダストとして成分を抽出した後のコーヒー滓(可視できるもので最小のもので粒径は約 0.1mm)10g と水 100mL の混合溶液をフィルターが固定されたガラス筒の上口から注いだ際に分離が可能であるかで試験することを計画した。

5.活動経過

最初に方針①に於ける模型の制作を行った。ここで製作した模型はソフト「Fusion360」を用いた以

下の図7の左のような設計図のもと、3Dプリンターで製作された。



図7.方針①に於ける模型の設計・模型・石膏型



図7中央に於ける表面上の穴は底部まで貫通しており、石膏スラリーを流し込んだ際にその内部まで充填された状態で固まる事を期待していた。しかし最初に製造した模型では石膏スラリーが有する表面張力によって内部まで充填されなかった。その為、フィルターの素材として選択した半磁器土が焼結前後で体積が約13%縮小することを考慮して穴の直径を0.06mmにして模型を作り、石膏スラリーを流し込んだ所、模型の穴部分まで石膏が充填された。尚、図7の模型では石膏型から模型を取り出す際に削る必要が出てきた為、実際の石膏型は模型のものよりも1mm前後の体積の拡張が行った。



これに半磁器土300gと2.6Lの水、2.2mLの珪酸ソーダ1号をドリルとペンキミキサーを用いて良く攪拌して泥漿を流し込んだ。珪酸ソーダ1号を用いた理由は、これを添加することで泥漿が滑らかに、即ち粘度が増すことから乾燥及び焼結に際して亀裂の発生を防ぐことを期待したからである。

泥漿を石膏型に流し込んで数十分おき、水分が減る度に泥漿を継ぎ足して石膏型を満たした。これを一日ほど乾燥させ、取り出した。これを当初は600K/hの昇温速度で2時間かけて昇温、その後1250°Cで保持して焼結を行った。最初の焼結では小型電気炉の操作確認、試運転もかねて穴の空いていない泥漿の乾燥したものを焼結した。焼結は問題なく行われ、焼結体の強度も確認できた為、フィルターの焼結を始めた。

以下、方針①での各フィルター泥漿の焼結条件、及びその結果等を表1として示す。

表1.方針①に於ける各焼結条件および結果

番号	乾燥泥漿の質量[g]	昇温速度 [K/h]	保持温度 [K]	保持時間 [h]	焼結結果	焼結後の質量[g]
1	32.553	600	1250	2.0		17.540
2	34.665	600	1200	2.0		17.328

3	36.297	550	1200	2.0		17.990
4	34.611	300	1200	4.0		17.026

一度目のフィルター焼結を行ったものは穴が繋がってしまい、焼結体がバラバラになってしまった。二度目の焼結では一度目の失敗を踏まえ、昇温速度、時間を変えず、これを1200度で2時間保持して焼結を行った。しかし焼結体は変わらず粉々になった。その為、今度は昇温速度に難があると考え、三度目の焼結では550K/hの昇温速度で2.19時間かけて昇温した。しかし、これも焼結体がバラバラに割れてしまった。その為、四度目では300K/hの昇温速度で4時間かけて昇温した後、4時間保持した。焼結体は粉々にならなかったものの、隣接する穴同士が繋がってしまい、希求する濾過機能を失ってしまった。

以上の結果から方針①では実現が難しいと判断し、方針②を実施するのを決定した。

方針②に使う石膏型は以下の図8左のような設計のもとで製作した模型を用いて製作した。



図8. 方針②に於ける模型の設計・模型・石膏型

今回の模型は石膏から取り出す為に形状を考慮したもので、石膏型を削らずに製作できた。石膏型は特別な形状を持たず、底面が平らなものとなった。これに流し込む泥漿は方針①でも使用したものだが、方針②ではこれに直径が0.1mm以下のコーヒー滓、即ち炭素粉末を添加して使用した。ここで使用したコーヒー滓は実際に淹れて出洩らしになったコーヒー滓をボールミルにかけて粉碎、それを373.15K近傍にて6時間以上加熱して乾燥させたものを更に乳鉢で粉碎したものである。このコーヒー滓の質量と泥漿に含まれる半磁器土の質量の割合が焼き上げた際の空孔の割合と等しくなると予想し、泥漿と良く攪拌した上で石膏型に流し込み、乾燥させた。添加される泥漿の全量、コーヒー滓の添加量、予測される焼結した理論空孔率、およびその密度は以下の表2のようになった。

表2. コーヒー滓を添加された各泥漿の理論空孔率など

番号	泥漿の全量[g]	コーヒー滓添加量[g]	理論空孔率[%]	理論密度[g/cm ³]
1	256	61.793	70	4.5341

2	261	6.7500	20	1.2955
3	291	30.103	50	3.2387
4	257	39.879	60	3.8864

表2にて理論空孔率として示している数値は泥漿に含まれる半磁器土成分の質量とコーヒー滓質量から計算される空孔率である。コーヒー滓が全て空孔に変じるとすれば、その式は以下のようである。

$$\text{理論空孔率} = \frac{\text{コーヒー滓添加量}}{\left(\text{泥漿の全量} \times \frac{300}{2600 + 300} \right) + \text{コーヒー滓添加量}} \times 100$$

理論密度は次のような計3算式のもとで計算した。


$$\text{理論密度} = \text{理論空孔率} \times \text{試運転で焼結した泥漿の密度}$$



ここで試運転で焼結した泥漿の密度は鑪で計測しやすいように直方体状に削り、質量を計り求めた値であり、その値は6.4773g/cm³であった。故に上式は以下のようである。

$$\text{理論密度} = \text{理論空孔率} \times 6.4773\text{g/cm}^3$$

以下の表3のように各フィルター泥漿の焼結条件、及びその結果等を示す。

表3.方針②に於ける各焼結条件および結果

番号	乾燥泥漿の質量[g]	昇温速度 [K/h]	保持温度 [K]	保持時間 [h]	焼結後の写真	焼結後の質量[g]
1		600	1250	2.0	写真無し	16.781
2		600	1250	2.0		17.005

3		550	1150	4.0		16.838
4		550	1150	4.0		16.948

焼結したフィルターは全て歪に膨張し、その表面はざらついていた。また表面はとても脆く強度に難があった。また泥漿鑄込みの際に底部となる部分にコーヒー滓が密集しており、底部にあたる部分の凹凸の存在が認められた。

一回目の焼結では焼結体は粉々になってしまった為、二回目では相対的にコーヒー滓の添加量を減らして焼結を行ったが濾過能力を認めることはできなかった。三回目ではまたコーヒー滓の添加量を増やし、昇温時間 550K/h にして、1150 度にて 4 時間保持して焼結を行った。フィルターは欠損することはなかったが、100mL のただの水道水を目測で約半分を通すのに 52 分かかった為、根本的に空孔の量が少ないと判断した。四回目ではコーヒー滓の添加量を増やした、フィルターに欠損も見られず 100mL のただの水道水も 30 秒ほどで通すことができた。ここで当初の計画通り四回目の焼結をしたフィルターに 100mL の水と 10g のコーヒー滓の混合液を通した所、液体の濾過に成功した。

6. 考察

方針①では穴が繋がることによって焼結体全体が碎ける、濾過性能が失われるといったことが起きた。これを防ぐには型にはめたまま泥漿を焼結する、泥漿そのものにより多く珪酸ソーダを添加する等して強い泥漿を用意する、そもそも半磁器土のような粒径の細かいものを用いず、粗い粒子のセラミックス素材を用いる等してこの問題は克服できるものと考えられた。しかし、型にはめたままセラミックスを焼結するとなれば型の素材の耐熱性が低いなら使い切りになり、高かったとしても焼結体と癒着する可能性を否めない。また珪酸ソーダの過剰添加はセラミックスを粘り強くする一方で、焼結後に脆くなりやすくなる、耐熱性に偏りがでるなどの事が懸念された。また粗い泥漿を用いるのも同様で、密度にバラツキが出たり焼結後に脆弱性が露見する可能性が高い事から憂慮すべき点が多い。

方針②の焼結体は全てその表面がザラザラとして脆く、また体積膨張が見られたが、これらは焼結に際して炭素が二酸化炭素に変じて気化して抜け出した影響と考えられた。また底部にて生じた凹凸は石膏型の底部に沈殿してしまった比較的大きなコーヒー滓が原因と考えられた。底部の凹凸を解消するにはそもそもコーヒー滓を均一な粒径になるように調整する必要があると考えられたが、不均一な粒径のコーヒー滓が抜け出たからフィルターは濾過能力を得たとも考えられた為、次の機会に実施する要検討である。

焼結体の濾過能力を検証すべく水を通す事を幾度もしたが、この際に水に半磁器土の粉が混ざる事が多々あった。これは素焼き半磁器土から剥離したものであり、そもそもセラミックスでフィルターを製造する試みに於いて、焼結体を素焼きの状態で作成とするのは不適切で、本焼きと呼ばれる更に

高温で長時間焼成する工程が必要不可欠であると思われた。

7. 結言

本研究を通して、当初に計画していた自家用のサイフォンに使えるフィルターの製作という目的は果たせなかったものの、研究開始以前に比べて膨大な量の非金属系セラミックス材料についての知見を得られたのと、何よりも何故セラミックス式のサイフォンフィルターが膾炙していないのかについて臆気ながら理解できてきた。理由としてサイフォン式コーヒーというのがマイナーであることが大きいようだ。それこそ一定の品質でコーヒーを提供する必要がある飲食店での使用ならいざしらず、一般家庭にサイフォンを置いているケースはあまりに少ない。そのうえでフィルターと言うファクターは言えば割とどうとでもなる部品である。それこそサイフォンに於けるフィルターは他の方式のものに比べて小さくなりやすいことから、猶更のことでフィルターを厳選しようという動きは少ない。サイフォンは保管も手入れも大変であり、輪にかけて手入れが大変なセラミックスの器具と言うのは普及しないのも頷ける。そういった手間を大いに楽しむ感性の持ち主がセラミックスのフィルターを求めるぐらいの需要であるのだろう。

セラミックスは極めて大きな可能性を秘めた素材である。本研究に於いては非金属系セラミックスとして半磁器土を主に扱ったが、正直、他の粘土や金属系セラミックスなども試してみれば良かったのではないかと感じている。セラミックスの長所はその応用力の高さであり、似たような組み合わせでも焼結温度が近しければ複合セラミックスとして莫大な種類の焼結体を生成できる。そのみならず、焼結の仕方、成型方法、他薬剤との組み合わせなどで幾らでもその性質を変じ得る。その多様性を知りながらも本研究では手が伸びなかったのは、本当に数が莫大過ぎて選択が難しい事と扱える電気炉のスペックの問題があったからであり、半磁器土で使えるフィルターを形にできなかったのは忸怩たる思いだが、しかしセラミックス素材そのものの可能性に触れられたことだけで本研究に大きな意義があった。

本研究、というよりプロジェクトリサーチを通していえることだが、研究を形にすること、その為に機材や場所、発表への準備などを整えることの難しさを痛感させていただいた約半年だった。これまでは自発的に何か企画を行うにしても、ここまで煩雑で且つ専門的な事をする機会には恵まれていなかったのも、来年度の卒業研究の予行と言う意味でも貴重な体験をさせて頂いたと感謝の念が絶えない。

8. 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々からご支援およびご指導、ご協力を頂きました。電子顕微鏡分析では今井崇人実験講師様より分析のご協力、貴重なご指導を賜りました。感謝申し上げます。指導教員の小寺康博准教授様より、研究の着想を始め様々なご指導を頂きました。感謝申し上げます。小寺研究室4回生の皆様より多くのご支援を頂きました。改めてお礼申し上げます。

9. 参考文献

[1](独)日本学術振興会高温セラミックス材料第124委員会 編(2005年3月31日発行)「先進セラミックスの作り方と使い方」 日刊工業新聞社 発行、p.2