

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：16201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656387

研究課題名(和文) エレクトロスピンニング法を用いたセラミックマイクロチューブ不織布の開発

研究課題名(英文) Fabrication of SiC micro tube materials through electrospinning method

研究代表者

楠瀬 尚史 (Kusunose, Takafumi)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：60314423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：耐熱不織布は、触媒や断熱材などの広い工業分野で応用が期待される材料である。本研究では耐熱材料としてSiCセラミックスを選択し、セラミックファイバーまたはチューブ構造を作製するために、エレクトロスピンニング法が研究された。バインダーとしてPVBを用い、セラミックス成分としてSiCと焼結助剤を加えたスラリーの溶媒濃度を制御することにより、SiC-バインダーハイブリッドファイバーの作製に成功した。40vol%のセラミックス濃度と焼結助剤を加えることによって、焼結後もファイバー構造の維持に成功した。また、芯鞘ノズルを用い紡糸することにより、チューブ構造を持つSiC焼結体の作製にも成功した。

研究成果の概要(英文)：The refractory nonwoven has attracted many attentions as catalyst carriers and heat insulating materials. The purpose of this study to fabricate SiC microfibers and microtubes by heat treatment of SiC-binder hybrid micro fibers spun by electrospinning method. The SiC-binder hybrid fiber was successfully spun by optimization of composition of ceramics powders, PVB binder, and solvent. The spun SiC-PVB hybrid fibers with solid loading of 40 vol.% maintained fiber structure after heat treatment at 1750 degrees C. Furthermore, the micro tube SiC was also successfully fabricated by electro spinning using core-rim nozzle.

研究分野：材料工学

科研費の分科・細目：無機材料・物性

キーワード：炭化珪素 ファイバー エレクトロスピンニング

### 1. 研究開始当初の背景

近年、高耐熱性多孔体は、ディーゼルエンジンの排気ガスの浄化を行うディーゼル・パーティクル・フィルター (DPF) またはロケットに使われる高温断熱材などの幅広い分野で応用が注目されている。多孔体の作製法には、押し出しハニカム成形や焼結制御で作られる方法が多く報告されているが、DPF や断熱材はファイバー状物質から構成される不織布でも、従来のバルク状多孔体と同等またはそれ以上の断熱効果が得られることが分かっている。さらに、不織布を形成するファイバー状物質を比表面積の高いチューブ状物質に変換することが可能になれば、一層高い効果が期待される。

不織布の作製には、それを構成するファイバー状物質の合成が必要である。近年、このようなファイバー状物質の合成法として、エレクトロスピンニング (ES) 法が有機高分子の分野で注目を集めている。ES 法とは、Fig.1-1 に示すようにファイバーの原料となる液状物質を高電圧の印加された紡糸口から噴射しファイバーを採取する方法であり、捕集方法によっては同時に不織布の製造も可能である。ごく最近では溶液化学反応で合成が可能なアパタイトなどで、有機化合物と混合しマイクロファイバーを製造する試みが行われているが、この ES 法では、アパタイトの様な低温合成可能な酸化物セラミックスばかりでなく、耐熱性の高い非酸化物セラミックスへの応用の可能性も十分に期待される。従来、工業的な耐熱性セラミックスの製造では、熱処理前に製品形状に成形するためにバインダーと呼ばれる有機高分子が加えられる。このバインダー成分は ES 法で紡糸可能な有機高分子が多いことから、セラミックス成分として非酸化物セラミックス粉末を用い、バインダー成分と均一に混合したスラリーを紡糸することにより、セラミックスバインダーハイブリッドファイバーを合成が可能になり、これを焼成し、バインダー成分を焼きとばすことによって、非酸化物セラミックスのみの一次元状焼結体の作製が得られることが期待される (Fig.1-2)。従来、エレクトロスピンニング法を用いた無機ファイバーの合成では、紡糸の容易さなどから、プレカーサーとなる無機成分を 10% 以下の低濃度に押さえていた。そのため、高融点非酸化物粒子の粉末冶金的な焼結には、固体濃度が低すぎて適さないと考えられてきた。しかしながら、高融点の非酸化物セラミックスでも焼結性の優れた粒径の細かい原料粒子を用い、さらに非酸化物の焼結を促進する焼結助剤を加えることによって、一次元ハイブリッドファイバーの紡糸、さらには一次元形状を保ったままの焼結が可能になると考えられる。

また、ES 法では、単純なファイバー構造以外にも、原料を噴射するシリンジの構造を同心二重円構造に改良することによって、同

心二層ファイバー構造の組成を持つファイバーの合成が可能になると考えられる。バインダーとセラミックスからなるスラリーを外側に、また有機バインダー成分のみを内側になるように紡糸することによって、不織布状になった二重構造有機無機ハイブリッドファイバーが合成可能になると予想される。この二重構造を有するファイバーを熱処理することによって、中心部の有機成分を分解・蒸発し、外側の無機部分を残し焼結させたセラミックマイクロチューブからなる不織布の作製も可能になると期待される。

### 2. 研究の目的

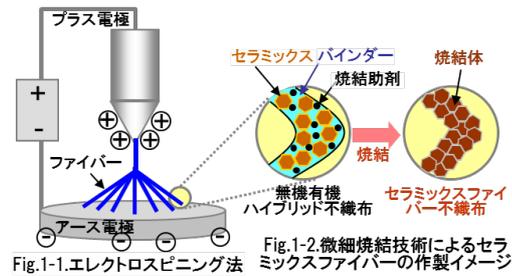


Fig.1-1. エレクトロスピンニング法 Fig.1-2. 微細焼結技術によるセラミックファイバーの不織布の作製イメージ

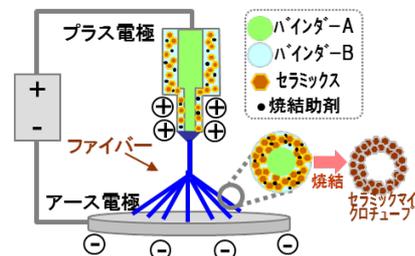


Fig.3-1. 同心二重円構造を持つノズル

本研究では高比表面積を有する耐熱不織布を作製するために、耐熱性セラミックスとして SiC、焼結助剤、バインダーの種類と組成を最適化し、ES 法により SiC-バインダーハイブリッドファイバーを合成し、それを熱処理することにより SiC ファイバーからなる不織布を作製する。次に、得られた実験の知見を元に、内側に有機バインダー成分/外側にセラミックス成分を持つファイバーを合成する。そして、熱処理することによって、チューブ構造を有するマイクロファイバーからなるセラミック不織布を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### 3-1. バインダー種および濃度の検討

本研究では、水溶媒を用いることができるポリビニルアルコール (PVA) と、アルコール溶媒を用いることができるポリビニルブチラル (PVB) を選択した。PVA および PVB ともに市販されている重合度は幅広いが、PVA では重合度の低い重合度 500 (PVB500) と重合度の高い 2000 (PVA2000) を選択し、PVB では重合度 630 (PVB630) と 2400 (PVB2400) を選択した。それぞれのバインダーを濃度 4、8、12vol% になるように溶媒で希釈し、ES 装置 (メック社、NANO-01) を使用し、射出速度 1ml/h、射出電圧 15 ~ 30V、

照射距離 10cm で紡糸可能か検討を行った。  
3-2. SiC-バインダーハイブリッドファイバーの紡糸

SiC の原料としては粒径の小さな平均粒径 (  $d_{50}$  )  $0.45\mu\text{m}$  の SiC 粉末 ( シュタルク社製、UF25 ) を用い、それに焼結助剤として  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( 信越化学、RU ) および  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( 大明化学、TM-DAR ) を添加して、セラミック成分とした。PVA および PVB の濃度を 2 ~ 12vol.% になるように水またはエタノールを加え、完全にバインダーが溶解するように 60 で加熱した。得られた透明の均一なバインダー溶液に、バインダー成分の 25 ~ 40vol.% となるようにセラミック成分を加え、ハイブリッドミキサー ( 株式会社シンキー、あわとり練太郎 ARE-310 ) を用い、均一なスラリーになるように混合した。調整したスラリーをバインダーのみときと類似の条件で紡糸可能か検討を行った。また、紡糸条件に与える影響を調べるために、SEM による紡糸物の組織観察、さらにスラリーの粘度について測定 ( 東機産業株式会社、TV-22 形粘度計 ) を行った。

### 3-3. ハイブリッドファイバーの焼成

上記の実験で紡糸することができたファイバーのみを 1750 でアルゴン雰囲気中 1 時間焼結することにより、セラミックファイバーからなる耐熱不織布の作製を検討した。そして、焼成物の SEM 観察結果から、バインダー種・濃度、セラミック成分の濃度、助剤量が SiC 一次元焼結体に与える影響について調べた。

### 3-4. SiC マイクロチューブの作製

上記の実験の結果を得て、同心二重円構造を持つノズル ( メック社、超極細芯鞘スピナレット ) ( Fig.3-1 ) を用い、外側 ( 鞘 : 外径 2.5/内径 1.2 ) のノズルには SiC とバインダーからなるスラリーを、内部 ( 芯 : 内径 0.8 ) のノズルにはバインダーのみを充填し、3-2 と同様に紡糸を行った。射出速度は内側と外側のノズルの断面積を考慮して、内側を 1ml/h、外側を 7.5ml/h に設定した。紡糸したサンプルを 1750 でアルゴン雰囲気中 1 時間焼結することにより、内部のバインダーを加熱分解し、チューブ状のセラミックファイバーの作製を行った。得られた生成物は SEM により構造を評価した。

## 4. 研究成果

### 4-1. バインダー種および濃度の検討

Fig.4-1、4-2、4-3 にバインダーのみに溶媒を加え、バインダー濃度 4、8、12vol.% の溶液を紡糸したファイバーの SEM 画像を示す。Fig.4-1 の (a)、(b) から分かるように、4vol.% の低濃度において、PVA バインダーでは、ほぼ液状のまま紡糸口から噴射されたため、ファイバー状物質を作製することはできなかった。(c)、(d) より、PVB630 では、不均一な形状のファイバーであったが、PVB2400 では、PVB630 に比べて直径が大きく、

さらに均一な形状のファイバーを紡糸することができた。重合度が高い方が低濃度での

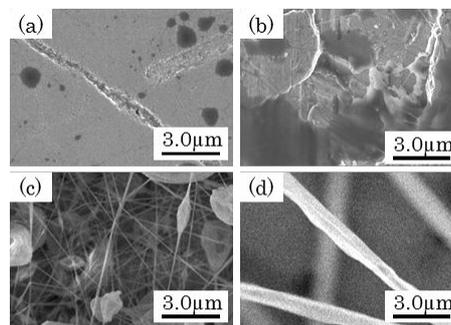


Fig.4-1. ESによる紡糸 : (a)4vol%PVA500  
(b)4vol%PVA2000, (c)4vol%PVB630,  
(d)4vol%PVB2400

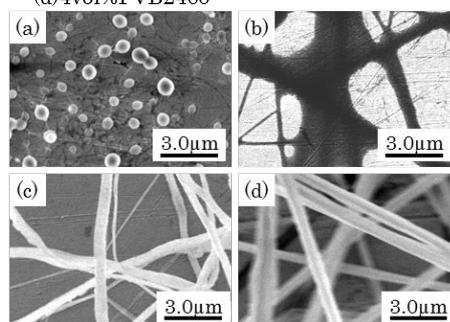


Fig.4-2. ESによる紡糸 : (a)8vol%PVA500,  
(b)8vol%PVA2000, (c)8vol%PVB630,  
(d)8vol%PVB2400

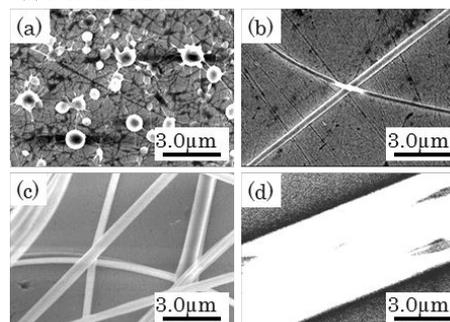


Fig.4-3. ESによる紡糸(a)12vol%PVA500,  
(b)12vol%PVA2000, (c)12vol%PVB630,  
(d)12vol%PVB2400

紡糸に効果的であることが予想される。

Fig.4-2 の (a)、(b) より、8vol.% の濃度において、PVA バインダーでは 4vol.% のときと同様に、液滴または霧状にシリンジより放射され、紡糸することができなかった。(c)、(d) より PVB バインダーでは、重合度に関係なく直径の大きさが均一なファイバーを紡糸することができた。また、これら 2 つのファイバーの直径の大きさはほぼ同じであった。

Fig.4-3 の (a)、(b) より、12vol.% では、PVA500 では液滴状のままであったが、PVA2000 では直径が  $1\mu\text{m}$  以下のファイバーを紡糸することができた。(c)、(d) より、PVB630 では、直径約  $1\mu\text{m}$  程のファイバー、PVB2400 では直径  $3\mu\text{m}$  を超える直径の大きなファイバーを紡糸することができた。

Table 4-1 にエレクトロスピンニング法により紡糸できたバインダー種と濃度を示す。バインダー成分のみで紡糸を行った結果、PVA では重合度 2000 の濃度 12vol.% のみで

ファイバーの紡糸が確認できたが、PVB では重合度 630 の濃度 8、12vol.%、重合度 2400 においては 4~12vol.% の全ての濃度で均一なファイバーを作製することができた。これより PVA よりも PVB の方が紡糸しやすいバインダーであることがわかる。また、PVA、PVB と高重合度のものほど紡糸しやすかった理由としては、より長い分子鎖を持つ物が絡みやすく紡糸しやすくなることと、粘度が影響していることが予想される。以後の実験では、バインダーのみで紡糸が確認できた PVA2000、PVB630、PVB2400 をばうい、セラミックス成分との混合を行った。

#### 4-2. SiC-バインダーハイブリッドファイバーの紡糸

Fig.4-4、4-5、4-6 の SEM 写真は、PVA2000、

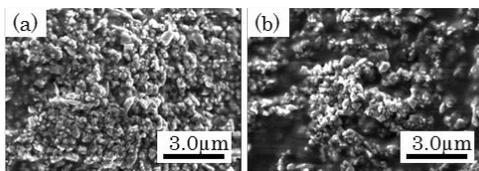


Fig.4-4. ES法による紡糸:  
(a)8vol%PVA2000/40vol%SiC-10YA,  
(b)10vol%PVA2000/40vol%SiC-10YA

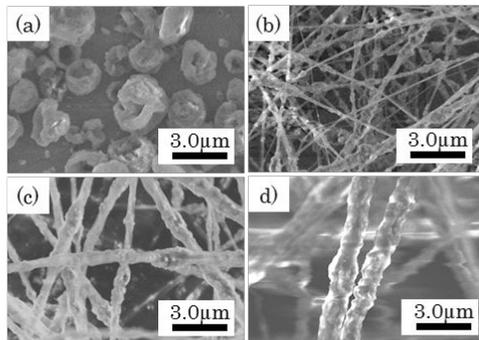


Fig.4-5. ES法による紡糸:(a)4vol%PVB630/40vol%SiC-10YA, (b)6vol%PVB630/40vol%SiC-10YA, (c)8vol%PVB630/40vol%SiC-10YA (d)10vol%PVB630/40vol%SiC-10YA

PVB630、PVB2400 に、セラミックス成分を 40vol.% (60%がバインダー成分) となるようにして調整したスラリーを紡糸した生成物を示している。セラミックス成分は、SiC に助剤として  $Y_2O_3$  と  $Al_2O_3$  を 1:7 のモル比で混合したものを SiC に対して 10vol.% 添加 (SiC-10YA) したものである。

【PVA2000 の紡糸結果】バインダーのみで防止できた PVA2000 濃度 12vol.% のものにセラミックスを混合し紡糸したが、粘性が高すぎるため電圧をかけてもシリンジ先端から照射できなかった。そのため、粘性を下げるために、8、10vol.% の PVA2000 溶液にセラミックス成分を混ぜて照射したが、Fig.4-4 の (a)、(b) に示すように、スラリーが液滴として放出されたため、ファイバーの形態は確認されなかった。PVA2000 バインダーでは、40vol%SiC-10YA を含むナノファイバーを紡糸することはできないと考えられる。

【PVB630 の紡糸結果】Fig.4-5 に PVB630 濃度 4~10vol.% に 40vol%SiC-10YA を添加して調整したスラリーを紡糸した生成物の

SEM 写真を示す。(a)より、4vol%以下においてはスラリーが繋がって照射されず、ファイバー形状にはならなかった。これは、溶媒に対してバインダー濃度が少ないために粘性が低くなったためと考えられる。(b)より、6vol%のときは生成するファイバー直径が小さいため、セラミックス粒子の凝集体が所々に観察されるが、長いファイバーの形成が確認された。(c),(d)より、8、10vol%のときは、6vol%と比較するとファイバー直径が大きいため、セラミックス成分の凝集部分は観察されず、直径は大きい均一なファイバーの生成することがわかった。特に、濃度 10vol% では、直径 1.5 $\mu$ m 程の比較的大きなファイバーが生成していることが観察された。

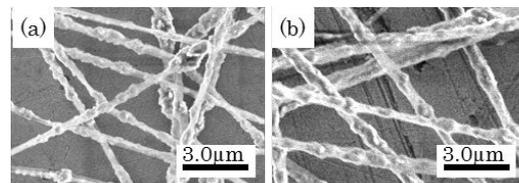


Fig.4-6. ES法による紡糸:  
(a)2vol%PVB2400/40vol%SiC-10YA,  
(b)4vol%PVB2400/40vol%SiC-10YA,  
(c)6vol%PVB2400/40vol%SiC-10YA

Table 4-1. エレクトロスピンニング法によって紡糸できたバインダー濃度

		2 vol%	4 vol%	6 vol%	8 vol%	10 vol%	12 vol%
PVA500	バインダーのみ	-	液滴	液滴	液滴	液滴	-
	SiC粉末入り	-	-	-	-	-	-
PVA2000	バインダーのみ	-	液滴	液滴	△	△	○
	SiC粉末入り	-	-	-	液滴	液滴	×
PVB630	バインダーのみ	×	△	○	○	○	○
	SiC粉末入り	×	液滴	○	○	◎	×
PVB2400	バインダーのみ	×	○	○	○	○	×
	SiC粉末入り	○	○	◎	△	×	×

- : 未試験  
× : 霧状(低濃度側)または照射不可能(高濃度側)  
液滴 : 液滴状  
△ : 防止困難または不均一なファイバー  
◎◎ : 不織布状に紡糸可能

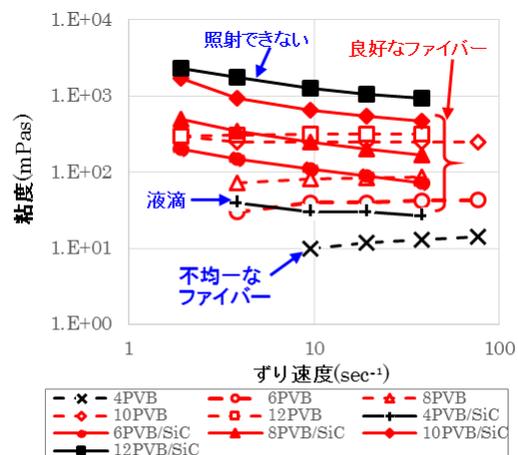


Fig.4-7. バインダーおよびスラリー濃度と粘度の関係

PVB630 では、バインダー濃度の上昇に従って、スラリーの粘性が高くなるため、紡糸されるファイバーの直径も大きくなると考えられる。

【PVB2400 の紡糸結果】 PVB2400 濃度 8vol.% 以上では、ノズルから照射が困難であったが、Fig.4-6 の(a),(b),(c)に示すように、2~6vol.%の濃度で良好なファイバーを得ることができた。以上の ES 法による紡糸結果を Table4-1 に示す。今回の実験で、セラミックス成分を SiC とする場合、PVA では紡糸できなかったが、PVB では比較的広い範囲で紡糸可能であった。重合度が高い物はよりバインダー低濃度側での紡糸が可能であった。

【エレクトロスピンニング法による粘度の影響】 紡糸可能か可能でないかは、分子鎖の長さにもよるが、粘度による影響が大きいことが予想される。そこで、2~12vol.%のバインダー濃度範囲で、霧状から紡糸可能さらに射出不可能まで広い変化を示した PVB630 を用い、バインダーとスラリーの濃度による粘度の変化を Fig.4-7 に示す。バインダーのみの溶液はニュートン性流体であるが、セラミックスを添加したスラリーでは非ニュートン性となるため、ずり速度によって粘度は若干変化するが、30~1000mPas の粘性が (PVB630 では) 紡糸可能な粘度範囲になることが予想される。

#### 4-3. ハイブリッドファイバーの焼成

Fig.4-8、4-9 に紡糸した後、1750 で1時間アルゴン雰囲気中熱処理をして得られた生成物の SEM 写真を示す。【PVB630 の熱処理結果】 Fig.4-8 の (a)、(b)、(c)より、PVB630

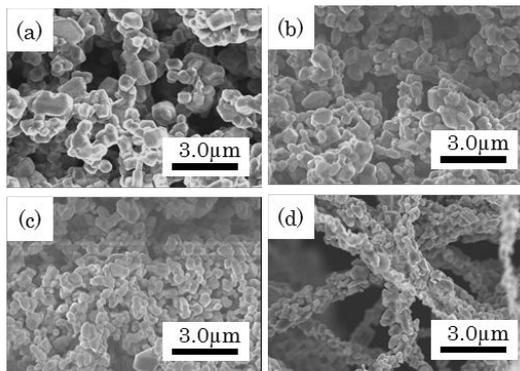


Fig.4-8.紡糸したファイバーを1750°Cで熱処理した生成物：(a)4vol%PVB630/40vol%SiC-10YA, (b)6vol% PVB630/40vol%SiC-10YA, (c)8vol%PVB630/40vol% SiC-10YA, (d)10vol%PVB630/40vol%SiC-10YA

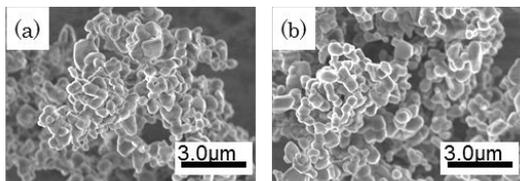


Fig.4-9.紡糸したファイバーを1750°Cで熱処理した生成物：(a)2vol%PVB2400/40vol% SiC/10vol%YA (b)4vol%PVB2400/40vol% SiC/10vol%YA (c)6vol%PVB2400/40vol% SiC/10vol%YA

濃度 4、6、8vol%のときは、比較的小さなサブミクロン SiC 粒子は確認されたが、紡糸直後の形状を保って粒子同士が繋がっている様子は確認できなかった。しかしながら、10vol%のときのみ、SiC がファイバー形状を保ったまま焼結している様子が確認できた。これより、PVB630 では、バインダー濃度を上げることで、焼結後にファイバー形状を維持できる可能性が高くなると考えられる。

【PVB2400 の熱処理結果】 Fig.4-9 に PVB2400 濃度 2、4、6vol.%で紡糸したハイブリッドファイバーの熱処理結果を示す。2、4vol.%ではファイバー形状は維持されなかったが、濃度 6vol%のものではファイバー形状の保持が確認できた。Table4-1 に熱処理後も形状を維持できたものを、で示した。PVB630 と同様に紡糸できたものの中でもバインダー高濃度材料でファイバー構造の維持が確認できている。バインダー高濃度側ではスラリーの粘性が高くなるため、生成するファイバー直径が大きくなる傾向がある。ファイバー直径が大きい場合、焼結に寄与する粒子数が多くなるため、形状の維持に繋がったことが予想される。

【助剤の影響】助剤添加の効果を調べるために、助剤量を 0、10、20vol% (SiC-0YA、SiC-10YA、SiC-20YA) と変化させて実験を行った。得られた紡糸物の SEM 写真を Fig.4-10 (a),(b),(c)に示す。全ての助剤組成において同様に紡糸できていることが確認できたが、熱処理後までファイバー構造が維持できたものは助剤添加した(d)SC-10YA と(f)SC-20YA であった。これより次元方向への SiC の焼結には焼結助剤が必要であることが確認できた。耐熱性を向上させるためには、SiC 成分が多い方が好ましいので、以後の実験ではセラミックス成分を SC-10YA に固定して実験を行った。

【固体(セラミックス)濃度の影響】次に、PVB2400 濃度 6vol.%のバインダー溶液とセラミックス成分 SC-10YA を用いて、熱処理後もファイバー構造が維持できる固体(セラミックス)濃度について調べた。Fig.4-11 には固体濃度 25、30、35、40vol.%(25vol.% SC-10YA、30vol.% SC-10YA、35vol.% SC-10YA、40vol.%SC-10YA)の熱処後の生成物の SEM 写真を示す。熱処理前は、全ての固体濃度においてファイバーが紡糸できたが、25~35vol.%まででは長い連続したファイバーの維持はあまり確認できなかった。唯一 40vol.%で連続した次元の焼結体を観察できた。これより、焼結後もファイバー形状を維持するためには固体濃度 40vol.%以上が必要であることがわかる。この固体濃度 40vol.%は、射出成形体が熱処理後も形状を維持するために必要な固体濃度とほぼ同じであった。

#### 4-4. SiC マイクロチューブの作製

同心二重円構造を持つノズル(芯鞘ノズル)を用いて SiC マイクロチューブの作製につい

て検討を行った。以上の実験を考慮して、外側（鞘側）のノズルには 6vol.%PVB2400/40vol.%SC-10YA スラリーを、内側（芯側）のノズルには加熱分解して空洞になるように 8vol.%PVB2400 バインダー溶液を充填し、ES を行った。得られたハイブリッドファイバーを Fig.4-12(a)に、それを 1750 で 1 時間熱処理した物を(b)(c)に示す。(a)からわかるように直径 10~15 $\mu\text{m}$  の大きなファイバーと 1.5 $\mu\text{m}$  程度の小さなファイバーが観察された。そして、焼成物の写真からは直径 5~8 $\mu\text{m}$  程度の中が空洞か SiC 密度の低いチューブ状の組織が観察された。おそらく、紡糸後に観察された比較的径の小さなファイバー（直径 5 $\mu\text{m}$  以下）はセラミックス部分の壁が薄く、さらに芯部からくるバインダー成分のために固体濃度が低くなり、焼成後にファイバー構造が維持できなくなったと考えられる。(a)で観察された径の小さなファイバーは焼成後に、(b)(c)でファイバー以外の部分にみられる SiC 粒子の凝集体を形成していると予測される。つまり、芯鞘ノズルを用いた場合、鞘部の SiC の壁がある程度厚くできている比較的大きなハイブリッドファイバーのみチューブ構造を焼成後も維持できると考えられる。

#### 4-5.まとめ

以上の結果をまとめると、

- 1.PVB630 濃度 6~10vol.%および PVB2400 濃度 2~6vol.%で SiC-バインダーハイブリッドファイバーの紡糸が可能であったが、熱処理後もファイバー構造を維持できた物は PVB630 濃度 10vol.%と PVB2400 濃度 6vol.%のスラリーであった。
- 2.焼結後に SiC ファイバー構造を維持するためには、紡糸後のファイバーの固体濃度を 40vol%にし、さらに SiC の焼結助剤を添加することが必要であることがわかった。
- 3.同心二重円構造のノズルを使用し、外側のノズルに SiC-バインダースラリーを内側のノズルにバインダーのみのスラリーを充填し照射することにより、大きなファイバー直径を有するもののみ SiC マイクロチューブを作製することが可能であった。

#### 5. 主な発表論文等（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Takafumi Kusunose, Tohru Sekino, "Increasing resistivity of electrically conductive ceramics by insulating," ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol.6, No.4, 2014, pp.2759-2763.

DOI: **10.1021/am4052766**

〔学会発表〕(計 2 件)

楠瀬尚史、井上優衣、工藤万智、関野徹、  
「エレクトロスピング法を用いた一次元構造を有する炭化珪素焼結体の作製」日本セラミックス協会 2014 年年会、2014 年 3 月 17 日、慶応義塾大学

井上優衣、楠瀬尚史、「エレクトロスピン

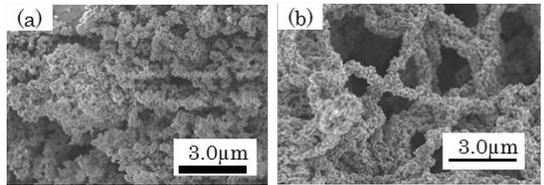


Fig.4-10.紡糸したファイバーを 1750°C で熱処理した生成物:  
(a)6vol%PVB2400/40vol% SiC-0vol%YA  
(b)6vol%PVB2400/40vol% SiC-10vol%YA  
(c)6vol%PVB2400/40vol% SiC-20vol%YA

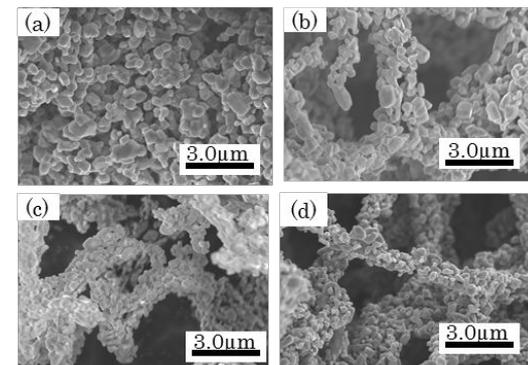


Fig.4-11.紡糸したファイバーを 1750°C で熱処理した生成物:  
(a)6vol%PVB2400/25vol%SiC-10YA, (b)6vol%PVB2400/30vol%SiC-10YA, (c)6vol%PVB2400/35vol%SiC-10YA, (d)6vol%PVB2400/40vol%SiC-10YA

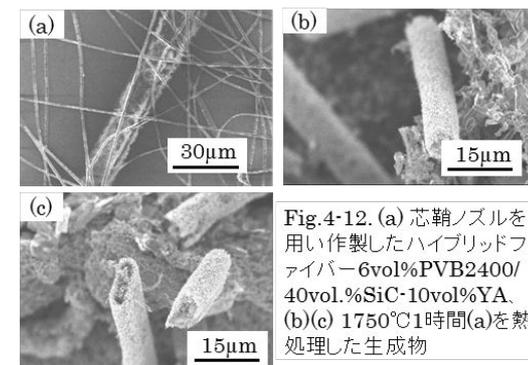


Fig.4-12. (a) 芯鞘ノズルを用い作製したハイブリッドファイバー-6vol%PVB2400/40vol.%SiC-10vol%YA、(b)(c) 1750°C 1 時間(a)を熱処理した生成物

ヤングセラミストミーティング in 中四国、2013 年 12 月 21 日、岡山大学

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

楠瀬 尚史 (Kusunose Takafumi)

香川大学 工学部 准教授

研究者番号: 60314423

##### (2)連携研究者

上利 泰幸 (Agari Yasuyuki)

地方独立行政法人 大阪市立工業研究所  
研究主幹

研究者番号: 70416288

関野 徹 (Sekino Tohru)

大阪大学 産業科学研究所 教授

研究者番号: 2022665