

# パルススプレーコーティングシステムを用いた 電気二重層キャパシタの分極性電極作製

靱木 崇<sup>a)</sup>・田島 大輔<sup>b)</sup>・林 則行<sup>c)</sup>

## Preparation of Polarized Electrode of an Electric Double Layer Capacitor using a Spray Pyrolysis Technique

Takashi MOMIKI, Daisuke TASHIMA, Noriyuki HAYASHI

### Abstract

As the purpose of this research, preparation method of polarized electrode was carried out using a spray pyrolysis technique. The solid phase is precipitated from the liquid phase on the heated substrate, which is one of the chemical methods for preparing, thin films. This method is based on the principle of the atomizer, when the spray towards the substrate or space that is overheating of a material solution, the chemical reaction and thermal decomposition of the solute and evaporation of the solvent occurs, thin film was formed. Polarized electrodes were prepared as substrate collector electrode made of aluminum by varying the conditions spray coating such as the number of times applied with a coating solvent mixed with activated carbon, Ketjenblack, and the Polytetrafluoroethylene. Polarized electrodes prepared by spray pyrolysis method have been able to confirm that the conductive material has been evenly spread extensively. In addition, the charge-discharge test was significantly improved in performance as compared to a rolling process in general.

**Keywords:** Electric double layer capacitor, Polarized Electrode, Spray Pyrolysis Technique

### 1. はじめに

人類の文明はエネルギーを消費し発展し続けたが、その反面それは地球を汚染する歴史でもあった。45年後には世界人口が90億人に達すると予測されている今日、地球温暖化による危険信号が世界中で灯っている。北極の氷はこの40年間に40%縮小、今後50~70年で北極は消滅し、水位は6m上昇する。この4半世紀の間に発生した鳥インフルエンザやSARSといった奇病、猛威を振るったハリケーン・カトリーナは、偶然起きたものではない<sup>(1)</sup>。このため、節約や省エネをすることで、エネルギー消費を最小限にしなが、化石燃料やウランなどの再生不能資源利用から太陽光や太陽熱、風力エネルギーなどの再生可能資源利用型に転換することを急がねばならない。図1.2に示すように、世界の各エネルギー資源確認可採埋蔵量に対する可採年数は、石油54年、石炭112年、天然ガス64年と見込まれ化石燃料の大量消費に伴うエネルギー資源の枯渇問題への対策は急務となっている。そこで、エネルギー問題を解決する手段として、無公害で無尽蔵にある太陽光エネルギーの本格的な利用が強く望まれている<sup>(2)(3)</sup>。日本国内においては、これに加えて2011年3月11日に発生した

東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)を機に、太陽光発電と電力貯蔵デバイスを組み合わせて日常的な自家消費を目的とした住宅用蓄電システムの市場が日本国内においても本格的に立ち上がり、需要が拡大している。太陽光発電に組み合わせる電力貯蔵デバイスとして、現在は化学反応を伴う鉛蓄電池、リチウムイオン二次電池などの化学電池が多く利用されているが、コンシューマ向け製品である住宅用蓄電システムの電力貯蔵デバイスに要求される性能として、安全性の高さ、交換頻度・メンテナンスの低減が挙げられ、これらの化学電池は充放電時の化学変化により劣化が生じ、サイクル寿命が短いという欠点を有する。そこで、新たな電力貯蔵デバイスとして、化学変化を伴わない物理電池である電気二重層キャパシタの二次電池としての利用が注目されている。電気二重層キャパシタの特徴として急速大電流充放電が可能であり、サイクル寿命が長いなどの、化学反応を伴う二次電池には無い利点を有している。また、CdやPbといった環境負荷の大きい有害物質を含んでおらず、Liのような産出国に限られた希少金属も含まないといった利点もある<sup>(4)</sup>。しかし、実際に使用されている電気二重層キャパシタは使用条件や環境により劣化が報告され、また、エネルギー密度が主流の化学電池に比べて2桁程低く実用化への問題などがある。電気二重層キャパシタの性能の大半は分極性電極と呼ばれる活性炭を主成分とした電極により決まり、未だ最適

a)電気電子工学専攻 大学院生

b)IR 推進機構 IRO 特任助教

c)工学教育研究部 教授

な製法は確立されていない。分極性電極の作製法は電気二重層キャパシタの性能を左右する不安定要素であり、盛んに研究が行われている。そこで本研究では、新たな作製法として高密度であり電解液含浸性に優れた分極性電極作製に適するとされるスプレー法に着目し分極性電極の高密度化、低抵抗化を目的とした分極性電極作製の検討を行った。塗布用溶媒の作成過程において、超音波ホモジナイザーを用いた活性炭、導電性材料、バインダーの破碎・拡散を行いその効果を溶媒粘度や、活性炭の比表面積等から評価した。その後、パルススプレーコーティングシステムを用いて作製した分極性電極を使って電解液に非水系である有機系電解液を用いた電気二重層キャパシタを組み、その静電容量と内部抵抗を測定した。また、試料表面の原子の結合性の変化や、結晶性の解析を行った。これらの結果から、電気二重層キャパシタの分極性電極作製におけるスプレー法の有用性について評価を行った。

## 2. 分極性電極の構成材料

電気二重層キャパシタに用いられる分極性電極は、細孔構造が発達した活性炭や活性炭繊維と高比表面積で導電回路の形成に寄与する導電性材料、これらをつなぎ合わせるバインダーとしての役割を果たす材料から成り立っている。本実験ではこれらの材料に、800℃にて水蒸気賦活処理を行った比表面積2000m<sup>2</sup>/g程度の活性炭(宝泉株式会社製)を用いた。導電性材料にはケッチェンブラック(KB: Ketjenblack) EC-600JDを用いた。また、バインダーとしてポリテトラフルオロエチレン(PTFE: Polytetrafluoroethylene)を用いた。

## 3. 塗布溶媒の作製検討

### 3.1 超音波ホモジナイザー

スプレー塗布溶媒の作製過程において、活性炭、KB、PTFEを均一に混合また、分散させるために超音波ホモジナイザーを用いた破碎・拡散処理を施した。超音波ホモジナイザーを用いることで溶液中を超音波が伝搬するときにキャビティと呼ばれる空洞が形成されいづれ圧壊する。

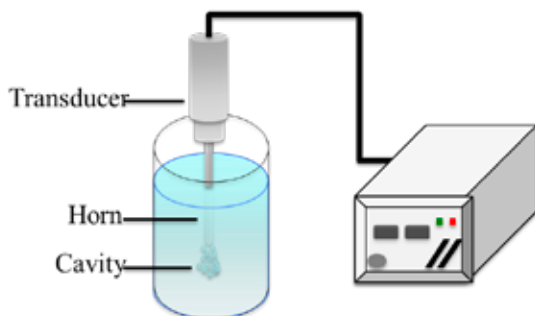


図1. 超音波ホモジナイザー

この時、溶媒中に高温・高圧・高速流動の極限状態が数百μmの領域にμ秒の寿命で生じる<sup>(6)</sup>。ホモジナイザーには図1に示すAZ ONE製ビオラモ超音波ホモジナイザー sonicstar 85 を用いて行った。

### 3.2 実験方法

本実験では、電気二重層キャパシタの分極性電極の構成材料として2節で述べた活性炭、KB、PTFEを用いている。これらの材料内に付着している水分を極力取り除くため、日陶科学株式会社製の卓上小型電気炉(NHK-170)を用いて110℃で24時間以上加熱した。分極性電極の配合量はPTFEの量を分極性電極の全重量に対して10wt%一定とし、活性炭を80wt%、KBを10wt%とした。溶媒には粘度が比較的高く、蒸留水よりも低温で気化する2-プロパノールを用いた。破碎・拡散処理は2-プロパノールに、活性炭とKBのみを投入した溶媒に対して超音波ホモジナイザーの出力を55W一定とし5分間の処理を3回に分けて間欠処理を行った(計15分間)。処理中は溶媒温度が上昇するのを防ぐため、AZ ONE製クールスター CSB-900N series-2を用いて冷却し、溶媒温度を0℃に制御した。バインダーが溶媒中で凝集するのを防ぐために、1回目の破碎・拡散処理が終わった後にPTFEを投入した。実験パラメータをまとめたものを表1に示す。溶媒作製後、超音波ホモジナイザーの効果を分析するべく、以下の各種分析を行った。溶媒の粘度をエー・アンド・ディ製音叉型振動式粘度計SV-10Aを用いて測定した。また、活性炭への影響を観るため、粒径を日立製作所製走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning electron microscope, S-5500)を用いて撮影し、比表面積及び細孔径分布を島津製作所製自動比表面積/細孔径分布測定装置トライスター3000を用いて評価した。分極電極作製にはこの実験パラメータと同条件下のスプレー塗布溶媒を用いた。

表1. 実験パラメータ

Solvent	2-propanol
Carbon material (A)	Activated carbon
Conducting material (B)	KB (Ketjenblack)
Binder (C)	PTFE (Polytetrafluoroethylene)
Compounding ratio (A:B:C)	8.0 : 1.0 : 1.0
Output of homogenizer [w]	55
Processing time [min]	15
Solvent temperature [°C]	0

### 3.3 音叉型振動式粘度計を用いた評価

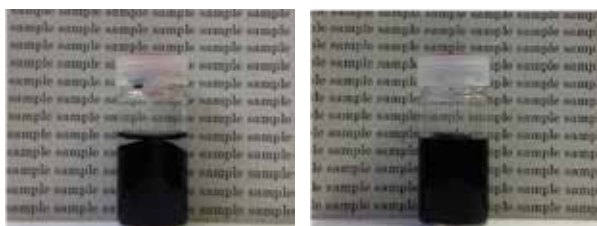
破碎・拡散処理を施したスプレー塗布溶媒における処理前後の粘度変化を分析するため、音叉型振動式粘度計を用いて測定を行った。測定中はクールスターを用いて溶媒温度を25℃一定に制御し行った。超音波ホモジナイザーにより破碎・拡散処理を施したスプレー塗布溶媒における処理前後の粘度変化の分析結果を表2に示す。処理前の

粘度は  $9.0\text{mPa}\cdot\text{s}$  で、処理後の粘度は  $46.7\text{mPa}\cdot\text{s}$  となり超音波ホモジナイザーを用いて破碎・拡散処理を施すことで、約 5 倍程度も溶媒粘度が高くなることを確認した（水温  $25^\circ\text{C}$  における純水の粘度は  $0.89\text{mPa}\cdot\text{s}$  である）。

表 2. 破碎・拡散処理前後の粘度測定結果

	Untreated	Treated
Solvent viscosity ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	9.0	46.7

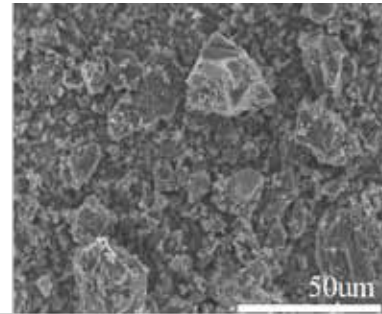
また、超音波ホモジナイザーにより破碎・拡散処理を施す前後の Sample を図 2 に示す。超音波ホモジナイザーによる破碎・拡散処理を施していないものは溶媒と溶質が分離してしまっているのに対して、破碎・拡散処理を施したものは溶媒表面から中央が盛り上がるほどに状態が変化しており液体に粒子が混ざり込んだスラリー状になっていることが目視による観察によってわかる。これは破碎・拡散処理により溶媒中で発生したキャビテーションによって、炭素材料が破碎され更に低粒子化し、また PTFE が溶媒中で細かく分散したことによる影響であると考えられる<sup>(5)(6)</sup>。



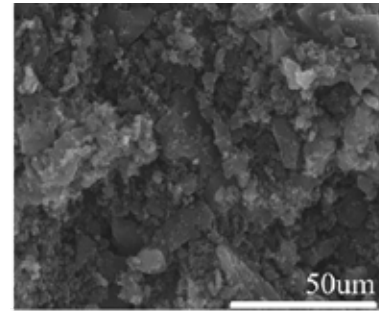
(a) Untreated (b) Treated  
図 2. 破碎・拡散処理前後のスプレー塗布溶媒

### 3.4 走査型電子顕微鏡を用いた評価

破碎・拡散処理が活性炭に及ぼす影響を分析するために、走査型電子顕微鏡(SEM:S-5500)を用いて処理前後の活性炭粒径の観察を行った。加速電圧に  $20.0\text{kV}$  を印加して観察を行った。超音波ホモジナイザーにより破碎・拡散処理を施した活性炭の処理前後の SEM による観察像を図 3 に示す。まずこれらの観察像より、本実験で使用した宝泉株式会社製の活性炭の粒径は、 $1\mu\text{m}$  以下の非常に小さいものから約  $40\mu\text{m}$  程度の比較的に大きなものまでが含まれており、バラつきがあることが分かる。超音波ホモジナイザーによる破碎・拡散処理を施す前の活性炭の観察像において粒径が約  $40\mu\text{m}$  程度の粒子が多く存在しているのに対して、破碎・拡散処理を施した活性炭の観察像では最も大きな粒子でも約  $20\mu\text{m}$  程度で、ほとんどの粒子が約  $5\sim 10\mu\text{m}$  程度の大きさに粉砕されていることが見て取れる。これは溶液中を超音波が伝搬するとき発生するキャビティが圧壊する際に発生した剪断応力によるものであると推察できる。



(a) Untreated



(b) Treated

図 3. 破碎・拡散処理前後の活性炭 SEM 観察像

### 3.5 比表面積/細孔径分布測定装置を用いた評価

3.4 節における走査型電子顕微鏡を用いた実験結果より、活性炭の破碎による低粒子化を確認できたが、活性炭の破碎によって電気二重層キャパシタの性能向上に大きく関わる炭素材料の比表面積や細孔構造が変化している可能性がある。このため、本実験では自動比表面積/細孔径分布測定装置トライスター3000 を用いて処理前後の活性炭の比表面積、メソ孔容積、マイクロ孔容積の測定を行った。 $77\text{K}$  における窒素吸着等温線を測定し、得られた窒素吸着等温線から比表面積及びメソ孔容積、マイクロ孔容積を BET(Brunauer, Emmet, Teller) 法、BJH(Brrett, Joyner, Halenda)法、t-plot 法により求めた。超音波ホモジナイザーにより破碎・拡散処理を施した活性炭の処理前後の活性炭の窒素吸着等温線を図 4 に示し、表 3 に比表面積、マイクロ孔容積、メソ孔容積を示す。また、図 5 及び図 6 にマイクロ孔細孔径分布、メソ孔細孔径分布を示す。図 4 より、本実験で使用した宝泉株式会社製の活性炭の窒素吸着等温線は国際純正・応用化学連合(IUPAC: International union of pure and applied chemistry)の定義から IV 型のメソ孔発達型であることが推測される。また、構造は破碎・拡散処理前後で変化せずしっかりとメソ孔発達型の細孔構造を保っている。表 3 から、超音波ホモジナイザーを用いて破碎・拡散処理を施すことで活性炭の比表面積が  $381\text{m}^2/\text{g}$  も増加する結果が得られた。これにより、キャビテーションにより活性炭の破碎が確実に行われたことが推察できる。また、図 5、図 6 からマイクロ孔容積、メソ孔容積ともに増加していることから、キャビテーションによる破碎効果は活性炭の粒径の大きさに関係なく有効であることが分かった。

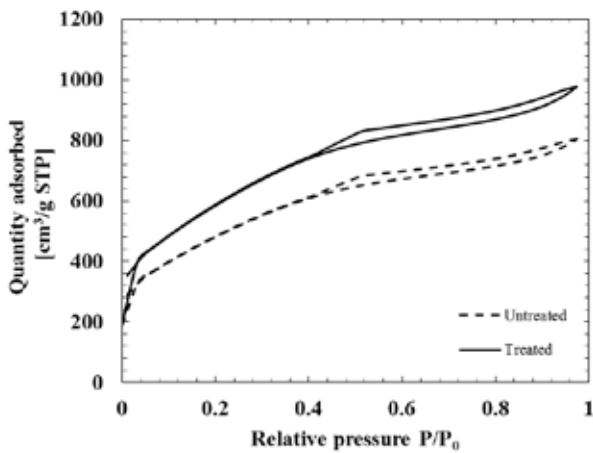


図4. 窒素吸着等温線

表3. 破碎・拡散処理前後の比表面積、細孔孔容積

Sample	BET surface	Micropore	Mesopore
	area [m²/g]	volume [cm³/g]	volume [cm³/g]
Untreated	1766	0.531	1.761
Treated	2147	0.623	2.129

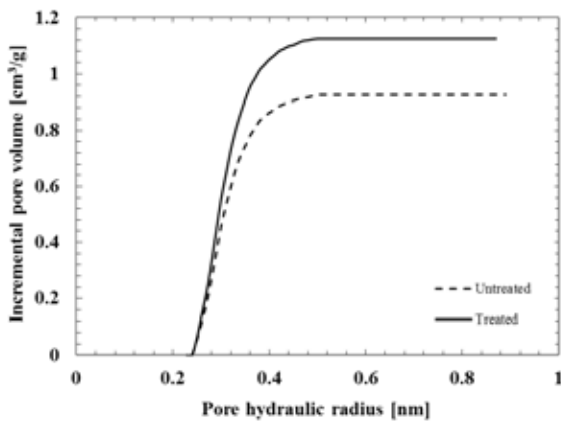


図5. ミクロ孔容積

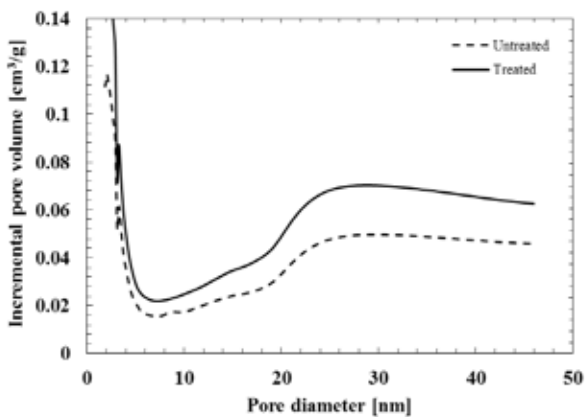


図6. メソ孔容積

## 4. スプレー法を用いた分極性電極の作製検討

### 4.1 スプレー塗布法

スプレー法は原料溶液を加熱した基板に向けて霧吹き状に噴霧し、溶媒の蒸発により液相から固相を析出させることで薄膜層を形成する手法である。スプレー法は古くから行われている作製法であり、他の積層法に比べて簡便で設備コストも安いことから多分野で応用されている。作製には、ノードソン製パルススプレー式溶媒塗布装置(1B-1363)を用いて行った。パルススプレー式の特徴として、基板に対してパルス状に溶媒を噴霧するため凹凸面への均一コーティングや細かな膜厚の制御が可能なが挙げられる。この概要を図7に示す。

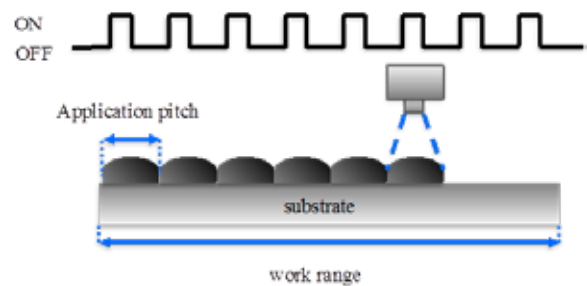


図7. パルススプレー式の概要

### 4.2 実験方法

本実験では、分極性電極の作製に高密度であり、電解液含浸性に優れる電極作製に適するとされるスプレー法を用いて行った。塗布溶媒には、3節にてPTFEの量を分極性電極の全重量に対して10wt%一定とし活性炭を80wt%、KBを10wt%として配合し、溶媒に2-プロパノールを用いて作製したものを用いた。厚さ30 $\mu$ mのアルミニウム集電極を基板に温度を約50 $^{\circ}$ Cまで加熱し直径15mmの金属製マスクを介してスプレー塗布し、塗布回数を変化させて実験を行った。スプレー条件をまとめたものを表4に示す。

表4. スプレー条件

Nitrogen secondary pressure [MPa]	0.6
Ink pressure [KPa]	4
Atomization air pressure [MPa]	0.15
Swirl pressure [MPa]	0.15
Substrate	Aluminum
Substrate temperature [ $^{\circ}$ C]	50

分極性電極の作製後、各種測定及び、分析を行った。表面及び、断面の観察にはSEM(S-4100及びS-5500)を用いた。試料の結晶性を観るべくX線回折装置(XRD: X-Ray Diffraction)にて平行法による測定を行った。試料表面の化学結合状態の測定には、X線光電子分光装置(XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy)を用いて行った。また、北斗電工株式会社製の充放電試験装置HJ1001SD8を用いた充放電試験により、静電容量及び、内部抵抗を求めた。静電容

量及び内部抵抗の算出はエネルギー換算法及び直流抵抗法を用いた。

### 4.3 分極性電極の表面及び、断面の評価

スプレー法を用いて作製した電気二重層キャパシタの分極性電極の表面及び、断面の観察を行った。試料表面の観察を、3.4節で用いた走査型電子顕微鏡(S-5500)により行い、試料断面の観察を日立製作所製走査型電子顕微鏡(S-4100)を用いて行った。どちらも、加速電圧に20.0kVを印加して観察を行った。分極性電極の表面観察像を図8に示す。また、一般的な製法の一つである圧粉成形法にて作製した分極性電極の表面観察像を図9に示す。粒径が約5~15 $\mu\text{m}$ 程度の粒子が活性炭であり、その表面にスポンジ状に粒子が凝集しているのが導電性材料のKBである。圧粉成形法にて作製した分極性電極の表面観察像では、活性炭の表面にほとんどKBが観られず疎らにしか存在しないことが分かる。これに対して、スプレー法にて作製した分極性電極の表面ではKBが一部に偏ることなく、表面全体に均一に分散していることが分かる。

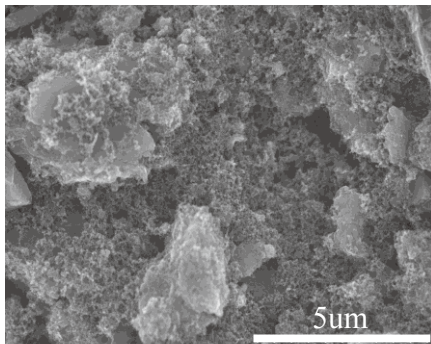


図8. Spray (Surface)

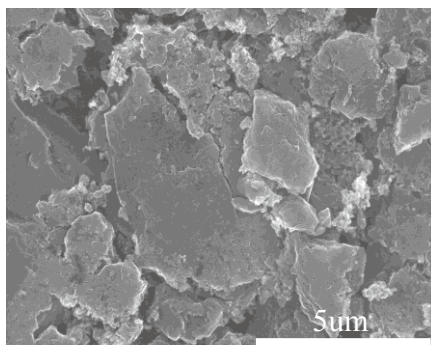


図9. Hot Press (Surface)

また、図10にスプレー法にて作製した分極性電極の断面観察像を示す。図10において点線から下が基板のアルミニウム集電極であり、その上に堆積している黒い薄膜状のものが分極性電極である。この観察像よりアルミニウム集電極と分極性電極の界面に空洞はなく、集電極表面の凹凸に合わせてしっかりと分極性電極が形成されていることが分かる。また、分極性電極の断面にも大きな孔やクラックは観られず、非常に高密度に形成されていることが分かっ

た。

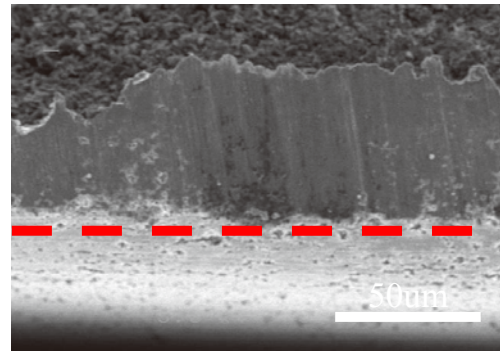


図10. Spray (Cross Section)

### 4.4 X線回折装置を用いた評価

スプレー法にて作製した電気二重層キャパシタの分極性電極において積層回数を変化させ、結晶構造分析を行った。実験にはスペクトリス製X'Part PRO MRDを使用し、平行法を用いた薄膜における $\theta$ -2 $\theta$ の測定を行った。X線出力条件は、電源電圧45kV、電流40mA、測定開始角度5.0deg、測定終了角度90.0deg、サンプリングステップ角度0.0251degとした。水分を除去するため、電気炉にて110 $^{\circ}\text{C}$ で24時間乾燥を行った。図11にスプレー法にて作製した電気二重層キャパシタの分極性電極のXRDプロファイルを示す。図11より、作製過程で積層回数を変化させてもXRDプロファイルは変化していないことが分かる。低角側のブロードなピークが炭素材料のピークであり、そのほかの鋭いピークが基板であるアルミニウム集電極によるものであると考えられる。各ピーク強度に差異があるが、ピーク位置に変化はないことが分かる。これは、試料に照射するX線の角度などにより、大きくずれが生じるためである。このことから、作製過程で積層回数を変化させることにより生じる基板温度の変化は結晶性に影響を与えないことが分かった。

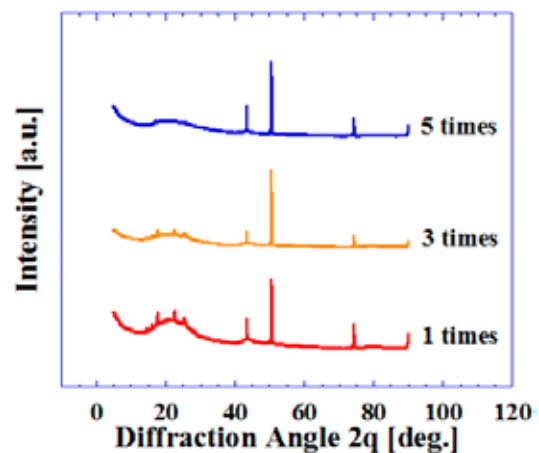


図11. 分極性電極のXRDプロファイル

#### 4.5 X線光電子分光分析装置を用いた評価

スプレー法にて作製した電気二重層キャパシタの分極性電極において積層回数を変化させ、試料表面の元素及び、化学結合状態の測定を行った。測定には島津製作所製X線光電子分光分析装置KRATOS AXIS-HSを用いた。励起用X線銃の設定は、電圧15kV、電流10mA、アノード源をMgK $\alpha$ とした。水分を除去するため、電気炉にて150°Cで24時間乾燥を行った後に測定を行った。図12にスプレー法にて作製した電気二重層キャパシタの分極性電極のワイドスペクトルを示す。図12より、分極性電極の炭素に由来するC1s、CKLLのピークが観測された。また、バインダーであるPTFEの主成分であるフッ素由来のF1sが存在している。導電性材料であるKBは結晶の末端が活性であるため、酸素と結合しやすい状態にあるが、酸素由来のピークは検出されなかった。また、積層回数を変えてもスペクトルの強度及び、ピーク位置に変化がないことが分かる。これより、作製過程で積層回数を変化させることにより生じる基板温度の変化は試料表面の化学結合状態に影響を与えないことが分かった。

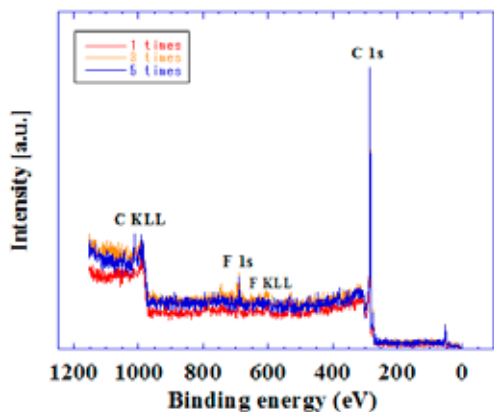


図12. 分極性電極のワイドスペクトル

#### 4.6 静電容量、内部抵抗の評価

スプレー法にて作製した分極性電極を用いて電気二重層キャパシタセルを組んで充放電試験を行い静電容量及び、内部抵抗の評価を行った。図13に本実験で用いた試験セル内部の構造を示す。

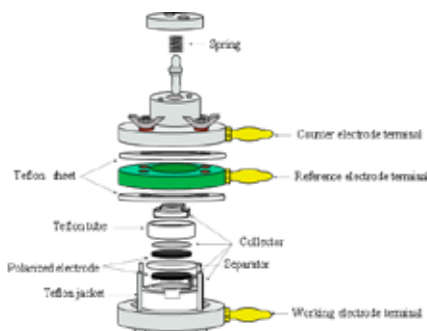
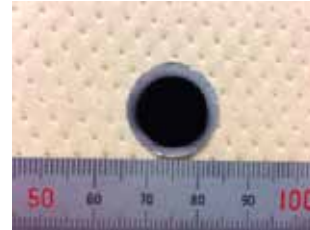


図13. 試験セルの内部構造

スプレー法にて作製した分極性電極を用い、集電極とリ

ード線にはアルミニウム、セパレータにはセルロースを用いた。電解液には有機系電解液である、テトラエチルアンモニウムテトラフルオロボレート(TEA-BF<sub>4</sub>)を使用した。TEA-BF<sub>4</sub>はカチオンにテトラエチルアンモニウムイオン(TEA<sup>+</sup>)を、アニオンにテトラフルオロボレート(BF<sub>4</sub><sup>-</sup>)から成っている。これら電気二重層キャパシタセル構成材料の写真を図14にまとめる。



(a). スプレー法により作製した分極性電極



(b). セパレータ



(c). 有機系電解液

図14. 電気二重層キャパシタセル構成材料

充放電試験には、北斗電工株式会社製の充放電試験装置HJ1001SD8を使用した。試験中は、福島工業株式会社製低温インキュベータ(FMU-0531)を用いて、20°Cに温度を保持した。充放電試験の測定条件として、電極1g当たりの電流値が0.125A、0.25A、0.5A、0.75A、1.0A、1.5A、3.0Aとなるように充放電電流の値を変化させ、充放電時間180s、休止時間30sとし、充電電圧を2.5Vに設定した。表5及び、図15にスプレー法にて作製した分極性電極を用いた電気二重層キャパシタセルの静電容量及び、内部抵抗の評価結果を示す。

表5. 電気二重層キャパシタセルの性能評価

Current density [mA/g]	Capacitance [F/g]	Internal resistance [ $\Omega$ ]
125	47.02	16.56
250	47.15	15.25
500	47.19	14.21
750	47.59	13.73
1000	48.05	11.31
1500	48.89	11.31
3000	51.73	11.22

スプレー法にて作製した分極性電極を用いることで、内部抵抗が約10~15 $\Omega$ であり約50F/gと高い静電容量を得ることができた。同条件下において圧粉成形法で作製した分極性電極を用いた電気二重層キャパシタセルの静電容量は20~30F/g程度で、内部抵抗は約25 $\Omega$ 前後である。これよ

り、電気二重層キャパシタの分極性電極作製法にスプレー法を用いることで性能を向上を確認した。

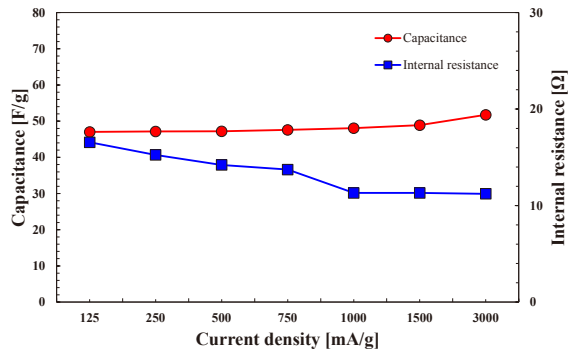


図15. 静電容量と内部抵抗の評価結果

## 5. まとめ

本研究では、新たな作製法として高密度であり電解液含浸性に優れる分極性電極作製に適するとされるスプレー法に着目し分極性電極の高密度化、低抵抗化を目的とした分極性電極作製の検討を行った。活性炭、KB、PTFEを均一に混合また、分散させるためにスプレー塗布溶媒作製過程に超音波ホモジナイザーを用いた破碎・拡散処理を施すことで、キャビテーションにより活性炭の低粒子化及び、バインダーの拡散性を促進させることで、液体に粒子が混ざりこんだスラリー状に変質することが確認できた。また、スプレー法により電気二重層キャパシタの分極性電極を作製することで、高密度であり導電性材料の拡散性に優れた電極を得ることができ、これを用いた電気二重層キャパシタセルにおいて、高い静電容量を得ることができ性能向上を確認した。

- (1) 超音波ホモジナイザーを用いて破碎・拡散処理を施すことで、約5倍程度も溶媒粘度が高く上昇することを確認した（水温25℃における純水の粘度は0.89 mPa・sである）。破碎・拡散処理により溶媒中で発生したキャビテーションによって、炭素材料が破碎され更に低粒子化し、またPTFEが溶媒中で細かく分散したことによって、液体に粒子が混ざり込んだスラリー状に変質することを確認した。
- (2) 溶液中を超音波が伝搬するときに発生するキャビテーション（空洞）が圧壊する際に発生した剪断応力による活性炭の破碎を確認した。構造は処理前後で変化せずしっかりとメソ孔発達型の細孔構造を保持しており、比表面積が増加する結果が得られた。マイクロ孔容積、メソ孔容積ともに増加していることから、キャビテーションによる破碎効果は活性炭の粒径の大きさに関係なく有効であることが分かった。
- (3) スプレー法にて作製した分極性電極の表面ではKBが

一部に偏ることなく、表面全体に均一に分散していることを確認。また、分極性電極断面にも大きな空孔やクラックは観られず、非常に高密度に形成されていることが分かった。作製過程で積層回数を変化させることにより生じる基板温度の変化は結晶性及び、試料表面の化学結合状態に影響を与えないことが分かった。

- (4) スプレー法にて作製した分極性電極を用いることで、内部抵抗が約10~15 Ωであり約50F/gと高い静電容量を持った電気二重層キャパシタセルを得ることができた。電気二重層キャパシタの分極性電極作製法にスプレー法を用いることで性能を向上させることができたことを確認した。

## 謝辞

本研究は文部科学省からのテニュア・トラック普及定着事業及び、宮崎大学からの戦略重点経費(題目:エネルギー高度利用を目指した燃料電池及び蓄電デバイスとしての電気二重層キャパシタの開発、代表者:田島 大輔)により行われたことを記し、関係者に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) アル ゴア: 不都合な真実, ランダムハウス講談社, p.1, 2007.
- 2) BP public limited company: Statistical review of world energy 2012, p.6, p.20, p.30, 2012.
- 3) OECD, International atomic energy agency: Uranium 2011, p.18, p.60, 2012.
- 4) 松田好晴、逢坂哲彌、佐藤祐一: キャパシタ便覧, 丸善株式会社, p.222, 2009.
- 5) Naoki Omura, Yuji Hotta, Kimiyasu Sato, Yoshiaki Kinemushi, Shoichi Kume, and Koji Watari: "Planetary homogenizing of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slurries", Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.113, pp.753-757, 2005.
- 6) Keiji Yasuda: "Decomposition of chemical compounds by ultrasound and development of sonochemical reactor", The Chemical Times, Vol.212, pp.2-7, 2009.