

電気二重層キャパシタに用いる活性炭電極に関する研究

下西二郎* 鶴見征則** 由城和弘*** 岩崎由規子***

Investigation on the activated carbon constructing electrodes for EDLC

Jiro SHIMONISHI* Masanori TSURUMI** Kazuhiro YUUKI*** and Noriko IWASAKI***

It is well known that the performance of Electric Double Layer Capacitor(EDLC) strongly depend on the activated carbon which constructs its electrodes. In this paper, we'll investigate the relations between specific surface area and pore diameter of the activated carbon and how to affect the performance on EDLC when these activated carbons were used for its electrodes. The activated carbons used for electrodes here are made under various conditions such as times, temperature for carbonization and temperature, water vapor for activation. Results we got are summarized as follows ① specific surface area of activated carbon are strongly effected by temperature and time for activation. ② The relation between specific surface area and pore diameter of the activated carbon couldn't be clarified and analyzed yet. ③ the specific surface area does not correlate with the capacity of EDLC just like the normal capacitor, $C = \epsilon S/d$.

Key words : EDLC, Activated Carbon, Battery cell, Capacitor

1. はじめに

私たちの日常生活で繰り返し電気を蓄え、放電する手段といえば、鉛蓄電池やニッケル水素、リチウムイオン電池などの二次電池がある。蓄えにくい電気エネルギーを化学エネルギーに変換して蓄え、元に戻して放電するという方式で、高いエネルギー密度を得ているが、二次電池は寿命、充電時間、効率や環境問題などの課題を抱えている¹⁾。

そこで、電気を効率よく蓄え、二次電池の欠点を改善できる蓄電デバイスとしてキャパシタが注目されている。ここでいうキャパシタは非常に大きな表面積を持つ活性炭を電極として、電解液との界面に自然に発生する電気的な絶縁膜、電気二重層に電荷を蓄える電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor : EDLC) である。EDLC は F(ファラド)オーダーの容量を持っているが、耐電圧が低くエネルギー密度が小さいという蓄電デバイスにとって致命的ともいえる欠点がある。その欠点を改善するために EDLC と電子回路を組み合わせた蓄電システム ECS²⁾(Energy Capacitor Systems)が(株)岡村研究所の岡村迪夫氏により、提唱され、将来の蓄電システムとして実用化され始めている。

しかし、蓄電デバイスとなる EDLC の活性炭電極

と静電容量の明らかな相関は得られておらず、その性質の多くが理論的に解明されていない。

ここでは、EDLC の性能を大きく左右する活性炭電極に着目し、活性炭の細孔径分布制御を試みるとともに、活性炭の細孔径と静電容量密度の関係を調べることを目的としている。

本稿では、第 2 章で電気二重層キャパシタの構造と特徴について述べ、第 3 章では、活性炭とそれを用いた電極の作製法についてのべる。さらに第 4、5 章で今回作製した電極の特性測定実験とその結果および結果に対する検討をしている。第 6 章は本論文のまとめであり、本論文で得られたいくつかの知見を述べている。

2. 電気二重層キャパシタとその特性測定

2.1 電気二重層キャパシタ (EDLC)

電気二重層(Electric Double Layer)とは 1879 年に Helmholtz³⁾が発見した現象で、電解液に電極(導体)を浸すと、電解液と電極が接する部分に 1 分子が並んだ薄い層を生じ、その外側の電解液に拡散層が広がる。この内層(1 分子が並んだ薄い層)と外層(拡散層)をまとめて電気二重層といい、電解液と電極の間にいくら電圧を加えても電流が流れない電極を理想分極性電極という。この電流が流れない状態で内層は絶縁状態となり、電極と電解液の界面は平行平板コンデンサとみなせる。これが電気二重層キャパシタである。現実には理想分極性電極は存在しないので、加える電圧を電解液が電気分解を起こす電圧

原稿受付 平成 20 年 8 月 31 日

* 電気電子工学科

**平成 16 年 3 月 電子情報システム工学専攻修了

***(株)アイテック・ツリタニ技術開発課

より低い電圧にして、内層が絶縁物として扱える電圧範囲で EDLC セルを作る. Fig.1 に EDLC セルの原理を示す^{注)}.

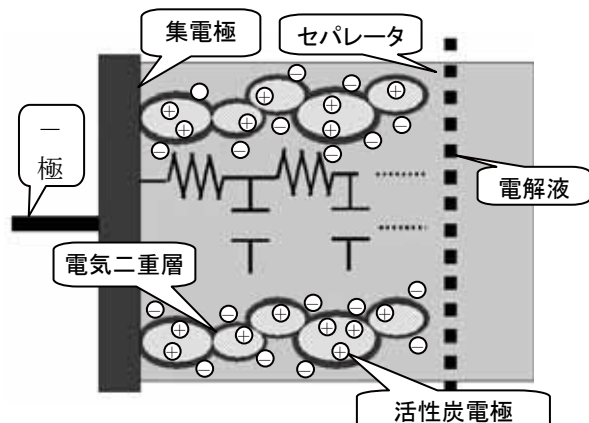


Fig. 1 EDLC の構造と等価回路

図において、EDLC セルでは多くの電気二重層を得るために、電極に表面積の広い活性炭が用いられる。そして、蓄えた電気を効率よく取り出すための集電極と、正負の電極が接触して短絡するのを防ぐためのセパレータが設けられる。さらに、EDLC の等価回路は活性炭電極の抵抗と、電気二重層による静電容量が多段になって配列しているとみなせる⁴⁾。

EDLC セルには次のような特徴がある。

- ① 化学反応を利用せず、電気を電気のまま蓄えるので急速な充放電が可能。
- ② 電解液中のイオンがなくならない限り使用できる。つまり長寿命である。
- ③ 重金属を使用しないので、地球環境にやさしく、低公害である。
- ④ 電圧から電気量の残量が正確に分かる。
- ⑤ 電解液の耐電圧が低く、エネルギー密度が小さい。
- ⑥ 放電していくと電圧が指数関数的に低下していく。

⑤、⑥の欠点を改善するために、EDLC と電子回路を組み合わせた蓄電システム ECS が提唱されている。

3. 活性炭電極

3.1 活性炭について

電気二重層は電極と電解液の界面に生じるので、EDLC セルの電極には表面積の広い活性炭が用いられる。活性炭は、ヤシ殻や石炭あるいはフェノー

ル樹脂など炭素含有量の多い原料を炭化し、次にガスや薬品を用いて賦活して作られる微細孔(直径 10～200[Å])を持つ炭素である。この微細孔は炭素内部に網目状に構成されており、500～2500[m²/g]の表面積を作り出す。

賦活とは炭素材料に水蒸気や薬品を加えて、加熱することにより化学反応を起こさせて、炭素材料の表面や内部に多数の微細な孔をあけ表面積を大きくする処理である。代表的な活性炭の作製工程を Fig.2 に示す。この工程で炭化を省いて、いきなり賦活するとガスや灰になる割合が増え歩留まりが悪くなる。また、最初の炭化を念入りにすると硬く微細な黒鉛構造が発達して頑丈になり、その後いくら賦活しても平気で炭素のかたまりのままということになってしまうことが知られており、活性炭の作製はこのあたりの兼ね合いになる。



Fig. 2 活性炭作製工程

EDLC に使用される活性炭は、細孔径と電解液のイオン径の関係が重要である。その関係を Fig.3 に示す。Fig.3(a)のように、イオン径が細孔径より大きければ電気二重層が生じないために容量が発生しない。(b), (c), (d)のようにイオン径が細孔径より小さければ電気二重層が生じ、容量が発生する。しかし、(d)に関しては中央に余分なスペースがあるので、実際には(b), (c)のような関係が EDLC には適していると考えられる⁵⁾。よって、水系の EDLC セルには水分子の大きさ(3[Å])から考えると、細孔のサイズは 10～20[Å]くらいのものが好ましいと考えられる。

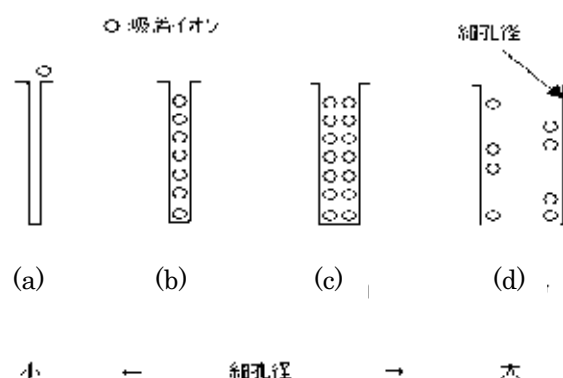


Fig. 3 細孔径とイオン径の関係

3.2 活性炭電極作製

本研究ではいくつかある電極作製法のうち、代表的な粉末混練法⁶⁾を使用する。

粉末混練法は活性炭に導電材(カーボンブラック

^{注)} EDLC によって得られる絶縁膜は電解コンデンサに用いられる人工的なフィルムなどとは異なり、自然に発生するものであり、膜厚は極限である 1 分子まで薄く、ピン・ホールなど皆無で巨大な面積を使った大容量キャパシタの絶縁膜の信頼性はきわめて高い¹²⁾。

など)とバインダー(PTFE: Poly Tetra Fluoro Ethylene ポリテトラフルオロエチレンなど)を混ぜ合わせ、圧延や圧粉成形して電極を作製する方法である。導電材は活性炭同士の電氣的接触を良くするために用いられ、バインダーは活性炭同士を接着するために用いられる。材料を練り合わせた構造は電氣的な不安定さを想像させるが、良い特性のキャパシタが得られ、現状では最も用いられている作製法である。ただ使用するにつれて電極が崩れてくるという問題がある。実際に市販の活性炭に導電材とバインダーを混ぜ、圧延法によって試作した活性炭電極の SEM 写真を Fig.4 に示す。大きな塊が活性炭、糸を引いているのが PTFE で、細かな粒子がカーボンブラックである。

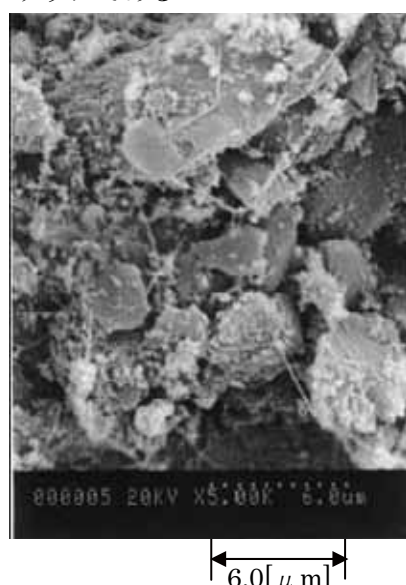


Fig. 4 活性炭電極(圧延法)の SEM 写真: 5000 倍

4. 活性炭電極最適化実験

ここでは、フェノール樹脂を原料として、水蒸気賦活により活性炭を作製し、EDLC 電極としての性能を調べるための実験を行った。

実験”EDLC の性能が活性炭の細孔径に大きく左右される。”という点に着目して、活性炭を作製する際の炉の温度上昇速度、炭化温度と炭化時間、賦活温度と賦活時間、露点(賦活時の水蒸気量)をパラメータとして変化させることにより、活性炭の比表面積や細孔径分布が、これらのパラメータによってどのように変化するのか検討した。さらに、作製した活性炭を電極とする EDLC セルを試作し、活性炭の比表面積、細孔径分布と静電容量密度の関係について検討、考察した。実験には最適値パラメータを得るためにデザイン・ナビゲーション・メソッド(以後 DN 法と記す。付録 I 参照)を用いた。

本研究で行った実験の流れを以下に示す。

- ① 活性炭作製する際の炉の温度上昇速度、炭化温度と炭化時間、賦活温度と賦活時間、露点を設計パラメータとして、直交表に基づき割り振る。その直交表を Table 1 に示す。
 - ② 直交表のパラメータに従い、窒素雰囲気中で炭化、賦活し、活性炭を作製する。
 - ③ 粉末混練法圧粉成形⁷⁾により活性炭電極を作製する。作製した活性炭 0.8[g]にバインダー 0.1[g]、カーボンブラック 0.1[g]の割合で、マグネット式の自動乳鉢により混合し、0.25[g]ずつ取り出しハンドプレスによって圧粉成形した。電極直径は 15[mm]である。
 - ④ 作製した電極を濃度 57[wt%]の H_2SO_4 で約一晩、含浸させる。
 - ⑤ 次に、Fig.5 のように組み立て EDLC セルを作製し、充放電試験を行う。充放電条件は充電電圧 0.8[V]、充放電電流 5[mA]とした。
 - ⑥ 充放電試験より EDLC セルの静電容量密度、内部抵抗、充放電効率を求める。充放電試験の詳細については付録 II を参照されたい。
 - ⑦ 評価項目を静電容量密度として DN 法により最適値を算出した。また DN 法を用いて設計パラメータと細孔径分布の関係、比表面積、細孔径分布と静電容量密度の関係を調べる。
 - ⑧ 得られた結果に基づき、評価、検討する。
- なお、活性炭の比表面積、細孔径分布は大阪府立産業技術総合研究所に依頼し、BET 法⁸⁾により測定した。

Table 1 活性炭最適化における直交表 L18

サンプルNo.	温度上昇速度 [°C/min]	炭化処理		賦活処理	
		炭化温度 [°C]	炭化時間 [min]	露点 [°C]	賦活時間 [min]
L18-1	7	400	20	1	700
L18-2	7	400	40	2	800
L18-3	7	400	60	3	900
L18-4	7	625	20	1	800
L18-5	7	625	40	2	900
L18-6	7	625	60	3	700
L18-7	7	900	20	2	700
L18-8	7	900	40	3	800
L18-9	7	900	60	1	900
L18-10	15	400	20	3	900
L18-11	15	400	40	1	700
L18-12	15	400	60	2	800
L18-13	15	625	20	2	900
L18-14	15	625	40	3	700
L18-15	15	625	60	1	800
L18-16	15	900	20	3	800
L18-17	15	900	40	1	900
L18-18	15	900	60	2	700

ここで、EDLC セルの測定装置には以下の条件が必要となる。

- ① 充電装置は定電流充電が行え、ある設定電圧になったら定電圧充電に切り換わること。
- ② 放電装置には EDLC セルの電圧がゼロになるまで定電流放電が行えること。
- ③ 測定がリアルタイムで行えるデータ測定、収集装

置を備えていること。

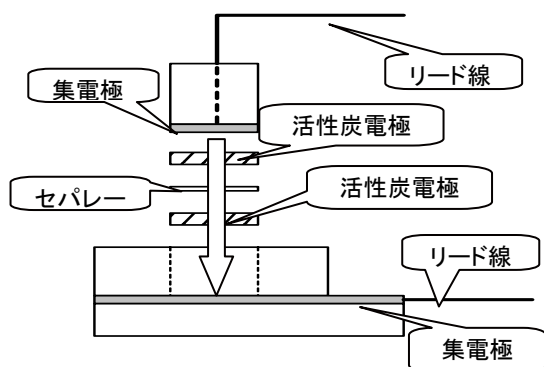


Fig. 5 EDLCセルの組み立て

そこでここでは充電装置に高砂製作所の「KX-100H」、放電装置にKENWOODの電子負荷「PEL151-201」、データ測定、収集装置にKEYENCEの「NR-2000」を用いた。NR-2000は付属ソフトにより測定データの平均値や最大値、積分値などの算出も行える。しかし、電流値の測定が行えないので、今回は電流センサを用いて電流値を電圧値へと変換して測定した。そして、これらの測定装置をKEYENCEのプログラマブルコントローラ「KZ-300」に制御させ自動的に充放電試験が行えるようにした。Fig.6に電気特性測定回路の系統図を示す。

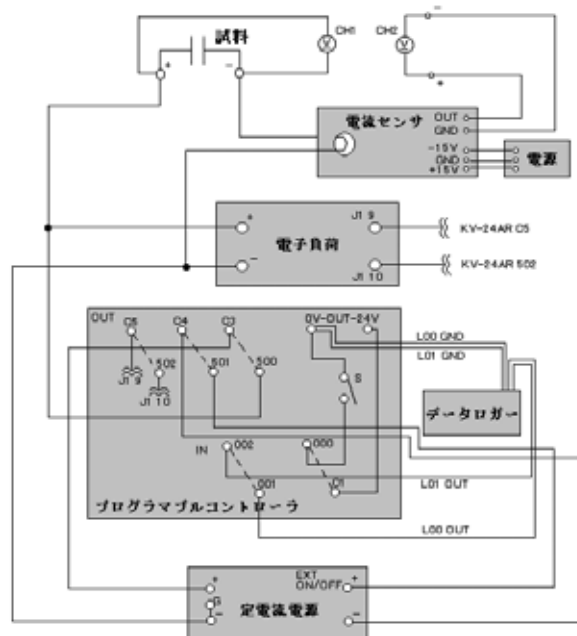


Fig. 6 測定回路系統図

5. 実験結果と考察および検討

作成した賦活性炭の比表面積^{注)}とそれを用いたEDLC素子セルの電気特性、すなわち静電容量密度、内部抵抗、充放電効率をTable 2にまとめた。

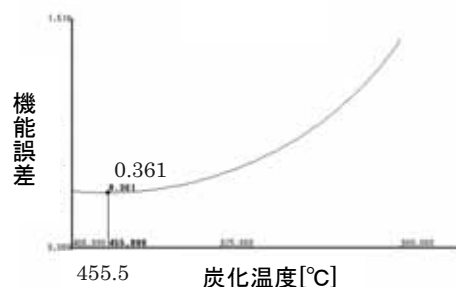
まず、これらのデータを評価項目を静電容量密度にして、その目標値を平均値以上と定め、DN法で解析した。そのときの機能誤差曲線がFig.7である。

Table 2 特性測定結果

サンプル No.	静電容量密度 [F/g]	内部抵抗 [Ω]	充放電効率 [%]	比表面積 [m^2/g]
L18-1	28.97	3.84	84.60	443.13
L18-2	31.81	3.35	44.09	565.38
L18-3	41.70	2.34	67.18	776.74
L18-4	32.64	7.02	47.23	577.36
L18-5	41.46	2.80	62.44	1016.52
L18-6	28.93	7.14	38.38	436.73
L18-7	12.64	6.28	47.47	448.83
L18-8	8.12	1.72	33.56	441.61
L18-9	24.19	1.64	47.03	516.77
L18-10	31.06	1.37	47.06	517.79
L18-11	23.13	2.75	25.30	467.38
L18-12	15.75	3.05	38.13	456.33
L18-13	15.80	2.28	32.91	457.94
L18-14	23.68	4.60	45.00	437.00
L18-15	19.96	7.49	9.05	567.00
L18-16	33.81	2.04	54.43	535.89
L18-17	9.59	1.61	18.92	481.70
L18-18	4.80	2.62	11.38	434.55
平均値	23.78	3.55	41.90	532.15

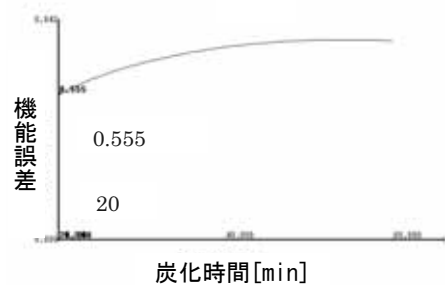


(i) 温度上昇速度

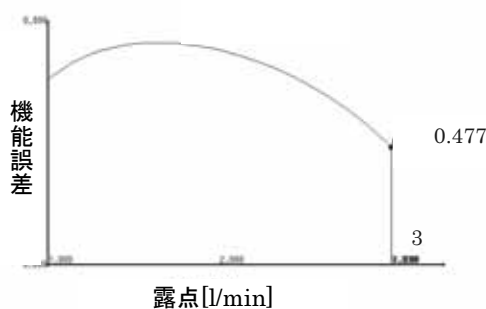


(ii) 炭化温度

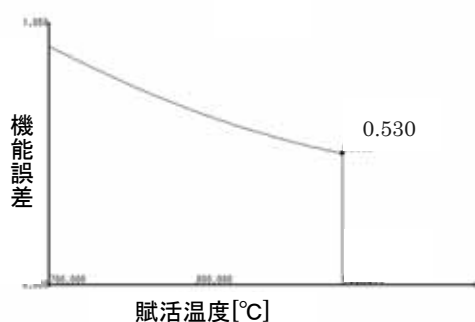
注) 1g当たりの表面積



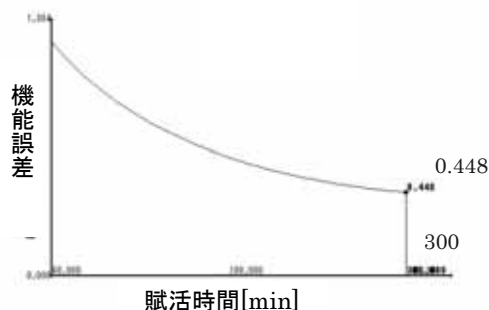
(iii) 炭化時間



(iv) 露点



(v) 賦活温度



(vi) 賦活時間

Fig. 7 静電容量密度に関する機能誤差曲線

DN 法による機能誤差曲線の結果より、このパラメータ範囲内での最適値は下記ようになった。

温度上昇速度	7 [°C/min]
炭化温度	455 [°C]
炭化時間	20 [min]
露点	3 [l/min]
賦活温度	900 [°C]
賦活時間	300 [min]

算出された最適値で活性炭を作製し、充放電試験を行えば、最も高い静電容量密度が得られることを示している。

次に、作製した活性炭の細孔径分布をグラフ化したものを Fig.8 に示す。

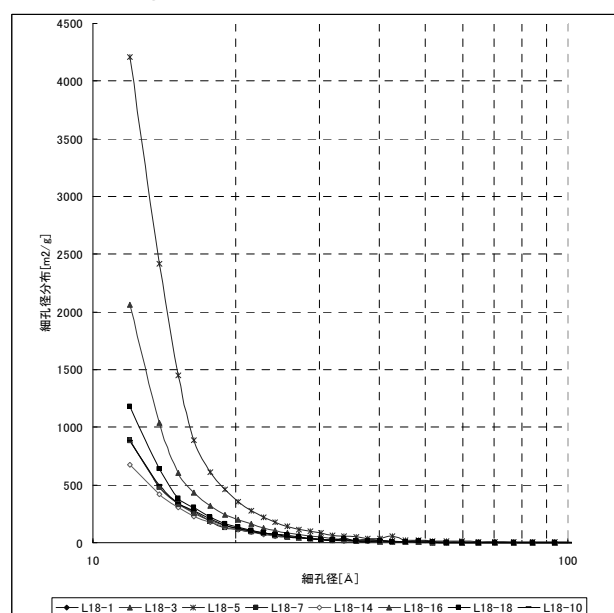
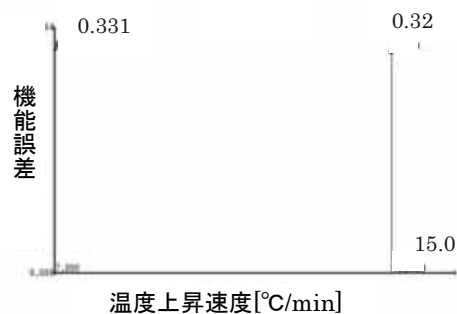
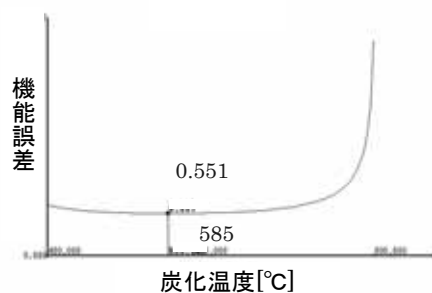


Fig. 8 細孔径分布測定結果

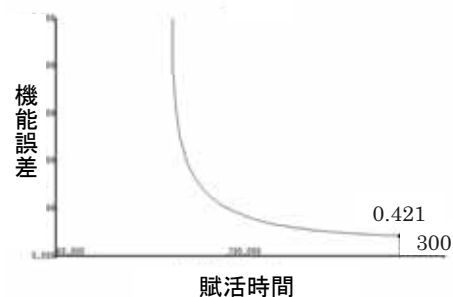
さらに、活性炭試料の評価項目を比表面積として、その目標値を平均値以上に定め、DN 法で解析した。その時の機能誤差曲線を Fig. 9 に示す。



(i) 温度上昇速度



(ii) 炭化温度

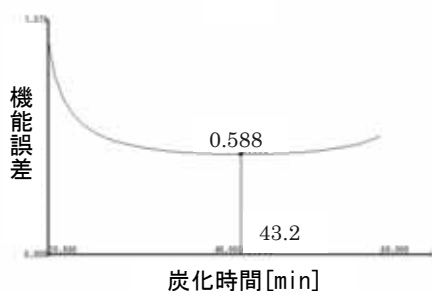


(vi) 賦活時間

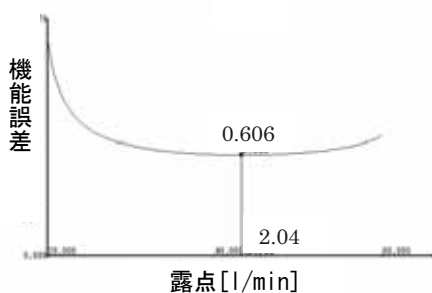
Fig. 9 比表面積に関する機能誤差曲線

機能誤差曲線の結果より、最適条件は次のようになった。この最適値で活性炭を作製すれば最も比表面積の広い活性炭が得られることを示している。

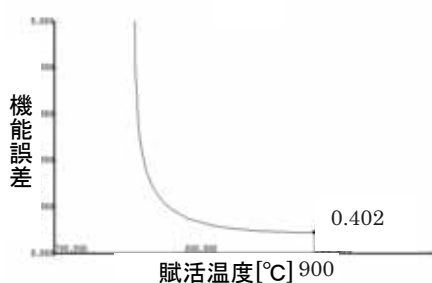
温度上昇速度	15	[°C/min]
炭化温	585	[°C]
炭化時間	43.2	[min]
露点	2.04	[l/min]
賦活温度	900	[°C]
賦活時間	300	[min]



(iii) 炭化時間



(iv) 露点



(v) 賦活温度

また、静電容量密度と比表面積の関係を Fig.10 に、

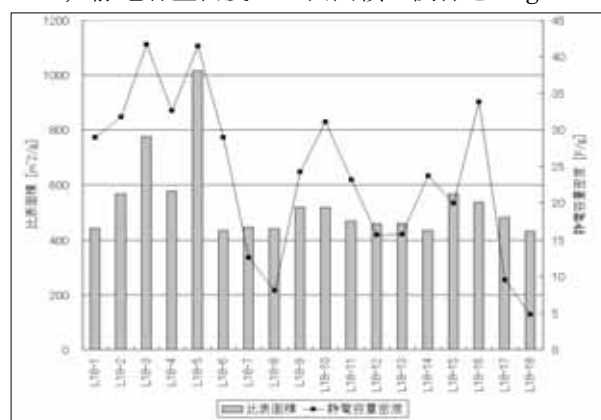


Fig. 10 静電容量密度と比表面積の関係

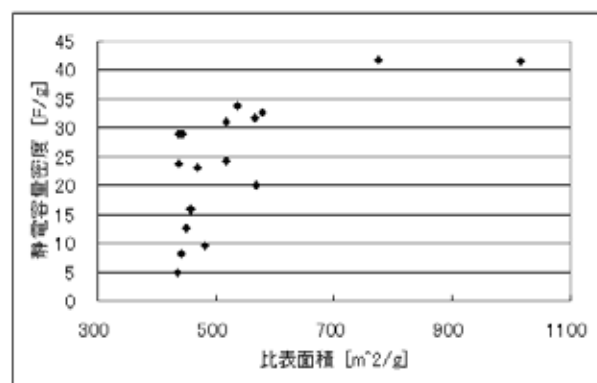


Fig11 静電容量密度と比表面積の相関関係

その相関関係を Fig.11 に示す.

さらに、ここでの EDLC にもっとも関係すると思われる細孔径 10~20[Å]の分布合計と比表面積との相関関係を Fig.12 に示す.

さて、ここではこれらの結果を活性炭の細孔径分布を制御すること、および、活性炭の比表面積、細孔径分布と静電容量密度の関係からの見地から検討を加える.

まず、Fig. 9 の機能誤差曲線 v_i より、機能誤差をさらに小さくする、つまり活性炭の表面積を広げるためには賦活温度を高くして、長い時間賦活してやれば良いということが読み取れる. このこ

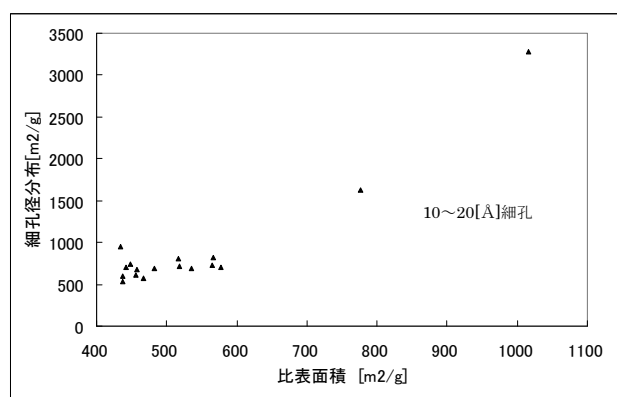


Fig. 12 細孔径分布と比表面積の相関関係

とは賦活温度、賦活時間を変化させることで活性炭の比表面積が制御できる可能性を示唆している.

また、Fig. 12 の相関図は、比表面積が大きいと、10~20[Å]細孔径分布も一般的に大きくなっていることを示している. しかし、Fig. 8 の細孔径分布からわかるように、すべての活性炭においてグラフが同じ形をしており、特定の細孔径が突出しているものはない. すなわち、ここでの設計パラメータを選ぶことによって特定の細孔径を持つ活性炭を作製することはできていない. このことは、比表面積が制御できることと、細孔径分布が制御できることは別問題であることを意味している. 比表面積と細孔径分布の関係を明らかにすることは今後の課題である.

次に、比表面積、細孔径分布と静電容量密度の関係について考察する. 上述のように、10~20[Å]細孔径分布と比表面積の間には相関関係があるものの、Fig.10 を見る限りでは、サンプル L18-3, L18-5 のように比表面積が大きければ (10~20[Å]細孔径分布が大きい) 静電容量密度が大きいというものもあれば、サンプル L18-18 のように比表面積は他とそれほど変わらないが、静電容量密度が小さいというものもある. この関係を比表面積と静電容量密度の相関図にしてみると Fig.11 のようになり、活性炭の比表面積と静電容量密度との明らかな相関は得られず、平行平板コンデンサで成り立つような関係 $C=$

$\epsilon \cdot S/d$ は成立しないことを確認した. この両者の関係は更なる探求が必要である.

6 あとがき

本稿では活性炭を作製して EDLC 電極としての性能を調べた.

活性炭、そして活性炭を作製する過程での条件をパラメータとし、これらの条件が活性炭の細孔径分布や比表面積にどのような変化をもたらすかについて検討した. さらに、作製した活性炭で EDLC セルを試作し、比表面積、細孔径分布とセルの静電容量密度の関係について検討した. 得られた結果は以下の通りである.

- ① 比表面積を制御するには賦活温度、賦活時間が大きく関係している.
- ② 比表面積と細孔径分布との関係は明確にならず、この関係を分析するには至らなかった.
- ③ 活性炭の比表面積と静電容量密度との明らかな相関は得られず、平行平板コンデンサで成り立つような関係 ($C=\epsilon \cdot S/d$) が成立しないことを確認した.

EDLC セルの性能はもちろん耐電圧にも大きく影響される. 水系 EDLC セルの耐電圧は水が電気分解を起こすとされている電圧値 1.23[V]から、不純物による影響などを考慮して約 1.0[V]とされているが、電解液が電気分解を起こす電圧値は使用する電極との関係で変化が生じる^{9),10)}ことがわかっている. これは用いる活性炭電極と電解液の組み合わせで EDLC セルの耐電圧が異なることを意味し、あるセルは 1.0[V]以上充電できるが、あるセルは 0.8[V]までしか充電できないという現象が生じる可能性があることを示す. 現在のところ、この耐電圧測定法は確立されておらず、従来のボルタンメトリーによる測定では、広大な表面積を持つ活性炭には対応できない. そこで、EDLC セルの耐電圧測定法を確立し、電極と電解液の組み合わせを研究し、耐電圧を最大限に利用できるようにすることも EDLC の性能向上に向けて、今後の重要な課題として挙げられる.

以上より、今後の課題をまとめると以下の3点である.

- ① 比表面積と細孔径分布の関係を明らかにすること.
- ② 引き続き、比表面積、細孔径分布と静電容量密度の関係を調べる.
- ③ セルの耐電圧測定法を確立すること.

参考文献

- 1) 岡村勉夫: “電気二重層キャパシタと蓄電システム”, P. 1

～2 日刊工業新聞社(2001 年 2 月)

- 2) 岡村研究所 URL : <http://www.okamura-lab.com/jpn/index.htm>
- 3) H. L. F von Helmholtz, Ann. Physik, 89, 299, ditoo, 6, 377 (1879)
- 4) 岡村勉夫: “電気二重層キャパシタに充電する”, トランジスタ技術, 2 月号, P. 319～320(2001 年 2 月)
- 5) 西野敦: “大容量キャパシタ技術と材料Ⅱ”, P. 73～75, CMC 出版(2003 年 1 月)
- 6) 岡村勉夫: “電気二重層キャパシタと蓄電システム”, P. 39～40 日刊工業新聞社(2001 年 2 月)
- 7) 鶴見征則: “電気二重層キャパシタに用いる活性炭電極に関する研究”, P. 14～15, (2003 年 2 月)
- 8) 島津製作所 URL : <http://www.shimadzu.co.jp/powder/lecture/middle/m02.html>
- 9) 藤嶋, 相澤, 井上: “電気化学測定法(上)”, P. 76～77, 技報堂出版(2001 年 9 月)
- 10) 電気化学会編: “電気化学便覧(基礎編)”, P. 714～716, 丸善出版(2000 年 6 月)
- 11) 中沢弘: “開発設計工学—独創的な商品開発のための工学的手法—”, P. 109～112, 工業調査会(2001 年 3 月)
- 12) 岡村勉夫: “電気二重層キャパシタと蓄電システム”, P. 99～100, 日刊工業新聞社(2001 年 2 月)

〈付録Ⅰ〉 デザイン・ナビゲーション・メソッド¹¹⁾

デザイン・ナビゲーション・メソッド(DN 法)は短期間で, 少ない実験回数で得られた情報を基に, 誰でも良い設計・開発ができる方法として知られている. DN 法はいくつかの設計変数(本稿では温度上昇速度, 炭化温度と炭化時間, 賦活温度と賦活時間, 露点)で試作した製品の評価項目(機能的要求, 本稿では静電容量密度 Fig.7 と比表面積 Fig.9)となる測定データ値と目標(開発の初期段階での機能的要求値)との誤差(機能誤差)を計算, 基準化してそれぞれの設計変数に対してプロットして曲線を描き, 誤差が最も小さくなる設計変数の組合せ(最適値)を探す手法である.

評価項目が複数あっても試作品別に誤差の和を求め, 誤差が最小になるように最適値を探すので評価項目が複数あっても問題はない.

DN 法の特徴を以下に記す.

- ① パラメータの最適値が, どのあたりに最適値が存在するかを判定できる. つまり, 繰り返し実験すれば最適値を見つけられる.
- ② 基本構想や概念設計が不適切であれば, そのことを教えてくれる.
- ③ 複数の評価項目を総合的に考慮して最適値を求めることができる.

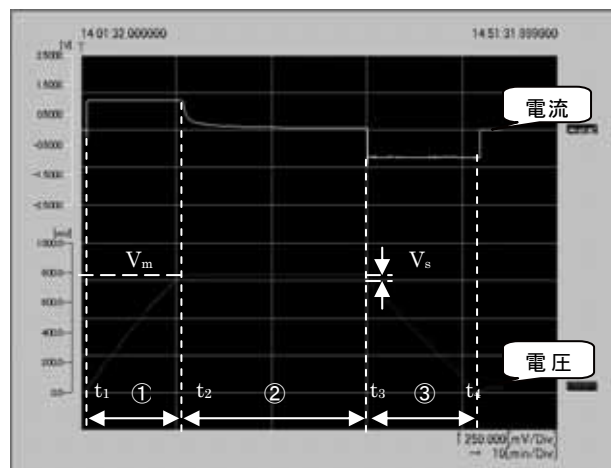
などである.

〈付録Ⅱ〉 EDLC セル充放電試験

ここでは App.Fig.1 充放電特性曲線より EDLC セルの電気特性を以下のように求めた.

A-1) 内部抵抗の測定

内部抵抗は, App.Fig.1 より放電開始直後のステップ状の電圧降下 V_s を放電電流で割ることにより得られる.



App. Fig 1 充放電特性

A-2) 静電容量の算出

静電容量は満充電 V_m [V] から 0[V] までの電圧放電カーブを積分し, その積分値と電流値の積により, 全放電エネルギー U_d [J] を求めて算出する.

$$U_d = I \cdot \int_{t_3}^{t_4} v(t) dt \quad (a-1)$$

内部抵抗による最初の電圧降下 V_s を考慮すると実電圧 V_c は $V_m - V_s$ であり, EDLC セルの静電容量 C は次式より

$$U_d = \frac{1}{2} \cdot C V_c^2 \quad (a-2)$$

$C = 2U_d / V_c^2$ で得られる. このような静電容量の算出方法を「エネルギー換算法」¹²⁾ という.

A-2) 充放電効率の算出

充放電効率 η_U は充電エネルギーに対する放電エネルギーの比より求める. 充電エネルギーは定電流充電エネルギー U_c と, 緩和充電エネルギー U_v の和であり App.Fig.1 より, 定電流充電エネルギー U_c は電圧 0[V] から V_m [V] までの電圧充電カーブを積分し, 電流値との積により求め, 緩和充電エネルギー U_v は $t_2 \sim t_3$ までの電流の積分値と定電圧値 V_m の積により求める. また, 放電エネルギー U_d は (a-1) であり, EDLC セルの充放電効率は以下で計算される.

$$\eta_U = \frac{U_d}{U_c + U_v} \times 100 \quad [\%]$$