

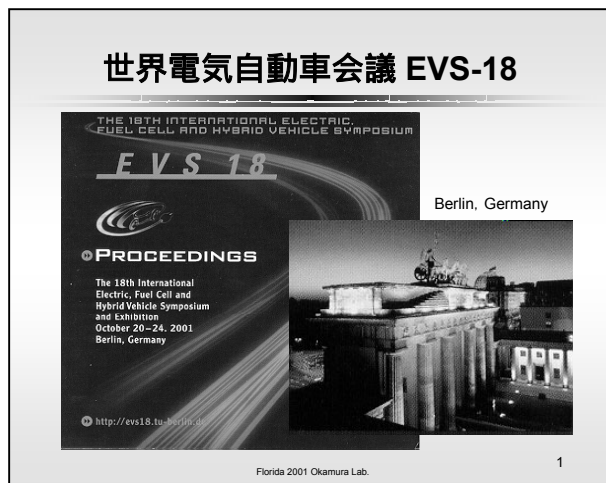
# キャパシタハイブリッド商用車と電源システム

(株)岡村研究所 岡村 逸夫

## まえがき

「電気二重層キャパシタと電子回路を組み合わせた新蓄電システム ECS」にとって 2001 年は画期的であった。10 月ベルリンの EVS-18, そして12月フロリダの第11回電気二重層キャパシタセミナーでの講演は予想以上の反応で, ECS は日本国内だけでなく世界でも充分通用するという感触を得た[1-3]。ここで紹介するキャパシタハイブリッド車の実物が展示されたら, さぞ反響が大きかったと思われる。

この稿は本来, 車両の研究開発製造にあたった日産ディーゼル工業(株)の諸氏によって語られるのが最適だが, 現在ハイブリッドトラックの発売に向けて全力を挙げている最中であるため, 蓄電部分の原理の考案者である筆者が同社の公表資料[4-7]を元にして述べることにする。



## 1. キャパシタハイブリッド車の実例と構成

### 1. 1 シリーズハイブリッド・バス

#### 1) 商用車のハイブリッド化

バスやトラックなど商用車のハイブリッド化は, 乗用車に比べいっそう重い課題を含んでいる。大型な車輛では重量は主として積載量から決まるから, 車体の極端な軽量化や低転がり抵抗のタイヤ, あるいは空気抵抗の少ないボディなどの手段で燃費の改善を図ることが困難で効果が少ない。しかも, 重量の大きな車輛自体の持つ慣性エネルギーが巨大だから回生制動の電力が大きく, その効率的な電には, 二次電池を軽く使う手法のハイブリッドでは不足で, 大幅な燃費の改善は得にくい。

この分野では既に日野自動車(株)がディーゼルエンジンと鉛電池を用いたパラレル・ハイブリッド HIMR を 1989 年に実用化し, その後数回の改良を経て 1999 年の時点で各所で 140 台



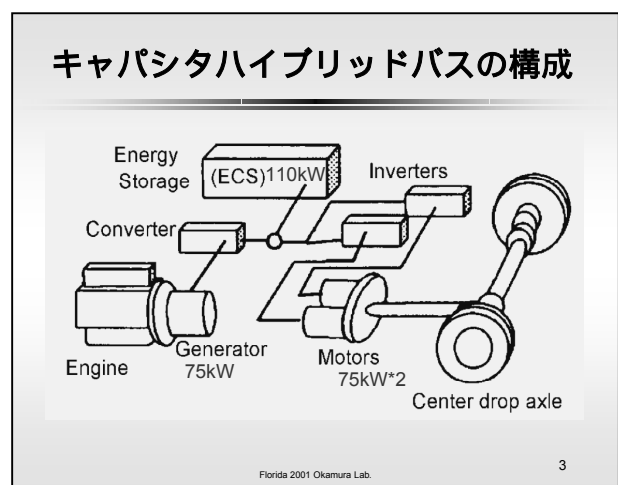
が運行<sup>[8]</sup>するという大きな成果を挙げてた。HIMR では 15 トン級のフルサイズ路線バスの場合 600kg の鉛電池を積載<sup>[9]</sup>し、約 30kW のモーターで 200 kW クラスのエンジンをアシストして黒煙濃度を 62%，粒状物質を 54%減少し、10～15%程度の燃費改善を得<sup>[8]</sup>ている。

## 2) キャパシタハイブリッド車の出発

キャパシタと電子回路を組み合わせた ECS 方式を蓄電装置に用いた商用車の中で、最初に走行実験に成功したのは日産ディーゼル工業(株)による、シリーズハイブリッドバス<sup>[4]</sup>であった。アイデアは自社開発で出発、途中から国家プロジェクト ACE に組み込まれて、第一次の走行試験に成功し、その結果を 2000 年度に公表<sup>[4]</sup>した。図 2 はこのバスが出品された東京モーターショー 2000 の会場風景である。後方に小さく見えるキャパシタハイブリッドトラック<sup>[5]</sup>と共に、内部のキャパシタまで見えるように展示され来場者の人気を博した。

キャパシタ・ハイブリッド車をやろうと議論をはじめた当初、筆者は極力小さなもので試そうと考えていた。ところがその方針で賛成していたはずの日産ディーゼル工業(株)が用意したのは重量 15 トン、長さ 10 m 余の見上げるようなバスである。この人達の「小さい」とはどういうものかと疑った。

今になって思えば、大型バスというのはキャパシタハイブリッドにとって、これ以上はない、うってつけの対象だった。この車が四角な巨体を傾けて挿り鉢型のテストコースを轟進するときになって、それをはじめて認識した。フルブレーキを踏むと後輪のダブルタイヤが唸って 100kW も発電すると、さしもの大容量キャパシタの電圧がみるみる上昇していく。乗用車など他の車種ではとてもこうは行かない。疾走する大型商用車は見方によっては Kinetic Energy そのもので、これこそキャパシタ蓄電の真価を示す絶好の舞台であった。



## 3) キャパシタハイブリッドバスの構造と設計

車両の構成は図 3 に示したシリーズハイブリッド方式で、ベース車両のエンジンの約 1/3 の 4 気筒 4.6L, CNG エンジンで駆動する 75kW 発電機を用いる。これとキャパシタ蓄電装置の出力によって 150kW (75kW\*2)の走行用電動機をドライブする。

制動時に電動機に発生する回生電力はモータードライバがコンバータとして動作し、その最大出力約 100kW がそのままキャパシタを充電する。

この段階で得られた特性は 2000 年度の研究報告<sup>[4]</sup>で詳細に述べてあり、成果は図 4 のように、使用するエンジンの特性によって、ベース

**キャパシタハイブリッド試験結果**

| Test Vehicle Mass | Hybrid Bus to Diesel Bus Ratio |        |        | Vehicle    |
|-------------------|--------------------------------|--------|--------|------------|
| 14000kg(1/2 load) | Fuel                           | CO2    | NOx    | Efficiency |
|                   | [km/kJ]                        | [g/km] | [g/km] | [%]        |
| Diesel Bus        | 1                              | 1      | 1      | 21.8       |
| Hybrid Bus        | Engine-B                       | 1.7    | 0.48   | 37.1       |
|                   | Engine-C                       | 1.82   | 0.42   | 39.7       |
|                   | Hybrid Bus to CNG Bus Ratio    |        |        |            |
| CNG Bus           | 1                              | 1      | 1      | 16.8       |
| Hybrid Bus        | Engine-B                       | 2.21   | 0.4    | 37.1       |
|                   | Engine-C                       | 2.36   | 0.34   | 39.7       |

Engine-B: lean burn only. Engine-C: adjusted timing with catalytic filter

2000年度M15試験結果

JMA0202A Okamura Lab. 4

となった CNG バスに比べ最大 2.36 倍の改善が得られた。

こゝでは低公害化を主眼に置いたため、本来の効率がディーゼルエンジンに劣る CNG エンジンを発電用に用いている。このエンジン自体の熱効率を向上させるための工夫と、研究に用いた 3 種類のエンジンについて同論文<sup>[4]</sup>から次に引用する。

天然ガスエンジンではリーンバーン方式を用いても現状の最高熱効率は 35～36% である。これを 40% 以上に向上させるため吸気管にロータリーバルブを装着して膨張比を高めた 4 気筒 4.6 L のミラーサイクルエンジンを製作した。発電機の運転は熱効率が高く NO<sub>x</sub> レベルが上がらない領域を選んで 1600～1800rpm、発電機出力にして 45～55kW とした。比較の対象となる、原形の CNG バスでは 6 気筒、12.5 L、180kW のエンジンを搭載する。

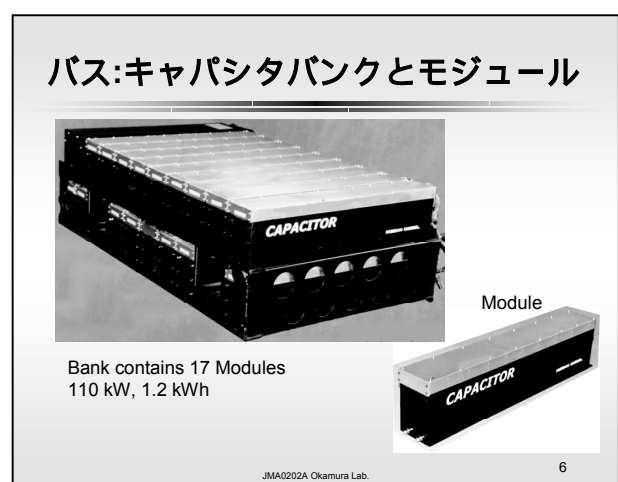
エンジンの設定は表には二つ掲載したが検討対象は A, B, C の三つあり、仕様 A ではベースエンジンにロータリーバルブ機構を装着しターボチャージャーを変更して NO<sub>x</sub> を同レベルに維持できるところまで点火タイミングを進めた。仕様 B は A に対して燃焼室容積を変更し、膨張比を 12 から 16 にあげ、NO<sub>x</sub> を維持するため点火タイミングをベースエンジンと同じまで戻した。これは触媒に頼らずリーンバーンとハイブリッドの効果だけで低 NO<sub>x</sub> 化を狙ったもので、その結果熱効率は 10% 向上して目標の 40% にほど達した。

仕様 C は発電運転領域での排気温度が高いため、ここに NO<sub>x</sub> 触媒を活用できることに着目し、仕様 B に対して NO<sub>x</sub> の最適化を行わずにノッキング限界が広がった分だけ点火のタイミングを進めた。その結果、仕様 C ではベースエンジンに比べ熱効率は 16% 向上し直噴ディーゼル並みの 41% 強を得た。

こうして得られた高効率で低公害な発電エンジンを常に最高効率範囲で運転すると共に、効率の高いキャパシタ蓄電システムを組み合わせた。最大仕様では発電機 75 kW、キャパシタ出力電力 95 kW、回生電力 100 kW である。M15 半積載走行では発電機 50 kW、キャパシタ出力電力 85 kW、回生電力 80 kW 程度で運転された。

#### 4) キャパシタのモジュールとバンク

キャパシタシステムは EC-L タイプで、前出の論文では静電容量 1400 F、内部抵抗 3.3 ΩF 程度と公表<sup>[6]</sup>されているが、これは電流の小さなところでの測定値であろう。70～100 A といった定格最大出力付近では、電流が増すと静電容量が減少し内部抵抗が低下する電気二重層キャパシタの性質から、約 2 ΩF の内部抵抗となる。また同論文には、キャパシタの最大／常用入出力として 680／450 (W/kg) と書かれていたため、他の文献に「キャパシタの出力密度



は 680 W/kg」と引用され電池との性能比較に使われたりした例がある。読者はすでにその区別は明瞭になっていると思うが、上のキャパシタの値は実用値、これに対し電池の公称出力密度は matched impedance 状態での瞬間最大値である場合が多い。前記キャパシタでの瞬間最大出力密度は 5.0 kW/kg 程度となる。

キャパシタは図 5 の中央にある EC-L タイプとほぼ同型の日産ディーゼル工業(株)製で、単セル 45 個または 50 個を直並列に組み合わせて図 6 左のモジュールケースに収容し、セル直列数と同数の並列モジュールを組み込んで最大電圧 40.5V または 67.5V とし、モジュール 17 個を組み合わせて写真のキャパシタバンクを構成した。

さらに 17 個のモジュールを 3 つのバンクにわけ、バンク切換えスイッチを用意して充電レベルによってバンク構成を 2 段に切換えることによってキャパシタ蓄電量の有効な利用を図った<sup>[7]</sup>。利用率の改善には電流ポンプという選択もあったが、効率のよいチョップ型電流ポンプではチョークコイルが必要となり、これを積載すると定格出力 100kW では座席の数を減らさざるをえないほどスペースや重量を占める。それがバンク切換えによってスイッチだけで遥かに小型軽量におさまった。

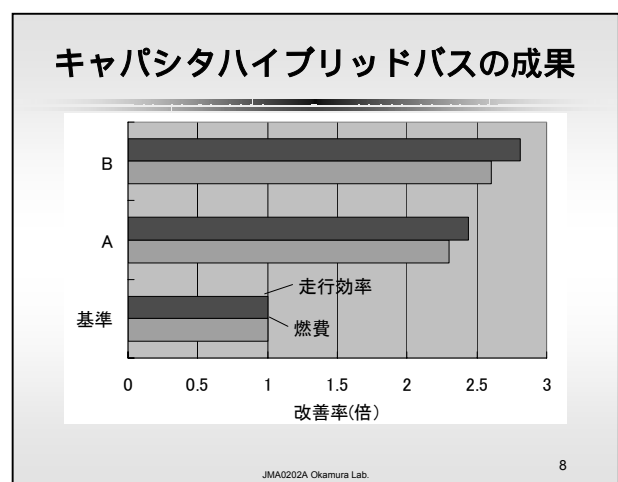
車輛全体としてはハイブリッド化によって、車輛重量が増し利用可能なスペースが少なくなるというのが常識だが、この例ではベースとなった CNG バスよりも大幅に軽量化された。エンジンが小さくなっただけでなく、燃費が半分になったために積載する CNG ボンベの本数も半分になった。ただし屋上に見えるボンベのカバーは同じものを使っているため、外観は変わっていない。

## 5) 得られた成果

日産ディーゼル工業(株)による公表値を文献<sup>[4,7]</sup>から引用すると、燃費低減率は 2000 年度では図 4 の詳細な表と図 8 の A に示したように従来の 2.36 倍、ハイブリッド部だけによる改善効果が 1.8 倍に達している。

さらに同文献<sup>[7]</sup>によると 2001 年度の改良では図 8 の B に示すように 2.66 倍、走行効率で 45.5% を実現し、使用条件の厳しい大型バスでキャパシタによる本格的なハイブリッド車の可能性を実証した。

キャパシタ・シリーズハイブリッドバスは 2002 年にダイムラークライスラー社により発売が予告されている燃料電池バスに比肩できる環境レベルと走行効率 40% 以上を、遥かに低価格でしかも安全に実現<sup>[4,7]</sup>したといえよう。



## 1. 2 パラレルハイブリッド・トラック

### 1) トラックへの応用

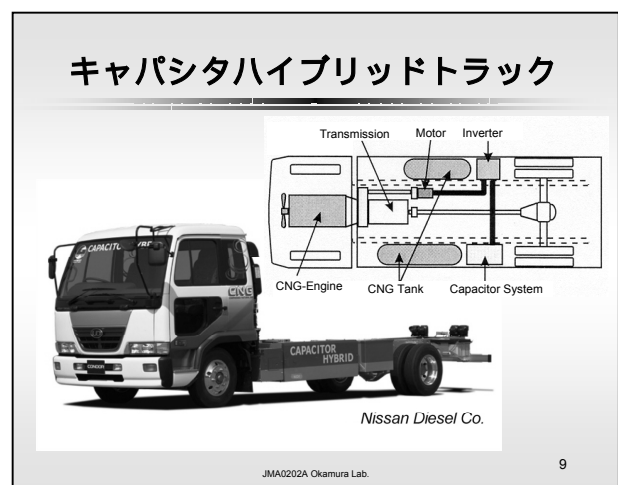
キャパシタによるパラレルハイブリッド方式の中型トラック<sup>[5]</sup>が日産ディーゼル工業(株)により 2000 年 10 月の東京モーターショーに展示され、2001 年度の発売が予告された。このトラックは前出のキャパシタ・ハイブリッドバスで成功したブレーキエネルギーを最大限にキャパシタに回収する技術を応用したもので、次の狙いで開発した<sup>[5]</sup>。

- (a) 効率向上と重量，コストのバランスを確保
- (b) 従来車のエンジンやパワートレイン系を応用したシンプルな構造
- (c) クリーンな天然ガス(CNG)エンジンとの組み合わせが可能
- (d) 燃費は従来車に比べ約 1.5 倍でコストパフォーマンスに優れる
- (e) 商用車に必要な長寿命とメンテナンス性，安全性を確保する

理屈からいってこれらはいずれも当然のように見えるが、実現するとなると容易ではない。たとえばキャパシタの価格が未だ高価な今日 (a)と(d)は難関で、キャパシタの自社生産から手がける必要があった。

(d)の燃費改善率が 1.5 倍という値は前述したシリーズハイブリッドバスが約 2 倍強を出しているから目立たないが、それ以前に他の商用車で公表されている改善率が 1.2 倍程度<sup>[8]</sup>であることから見て易しい目標ではない。

(e)はキャパシタ以外で実現が可能であろうか。こうして、このトラックの設計はほぼ必然的にキャパシタハイブリッドになった。



### 2) ハイブリッドトラックの構成

車の外観と試作車の配置を図 9 に示す。仕様は細部にわたって文献<sup>[5]</sup>に公表されているが、エンジンは CNG 燃料を用いる 154 kW リーンバーン型，電子制御のトランスミッションを介して後輪を駆動する。モーターは 55 kW 高効率な永久磁石同期型を用いクラッチを介してトランスミッションのエンジン側に結合されている。エンジンとトランスミッションの間にもクラッチがあり，回生制動時のエンジンの空転損瞬間最大値失を防ぐ。

図から明らかなように，長円形に見える CNG タンクが比較的嵩張って，車輛の左右の床下部分に入る。肝腎のキャパシタ蓄電部はトラックのために別に開発した自社製 EC-L タイプ単セル 32 個を 2 パラレル 8 直列の構成で，試作車に搭載したキャパシタの総重量は 60.6kg，蓄電量は 380Wh であった。



トラックの性能は、燃費の向上率は M15 での試験値で約 1.6 倍と発表<sup>[5]</sup>されている。燃費の改善の主要なポイントは、都市内走行において走行エネルギーの 60%以上をブレーキエネルギーで失っていたところを、90%以上の高効率で回生可能なキャパシタ蓄電装置と最大効率が 95%の同期電動機による。

商用車では安全性が特に重要なファクターとなるが、これまでに繰り返された各種の試験では、キャパシタは容易に燃えず、外部から強制的に着火あるいは破壊した場合にも爆発の兆候もなく、キャパシタの安全性は高いと発表<sup>[6]</sup>されている。

### 1. 3 燃料電池とキャパシタのハイブリッド車

商用車ではないが燃料電池とキャパシタのシリーズハイブリッド乗用車の現状は一般の関心の的なので簡単に触れておこう。

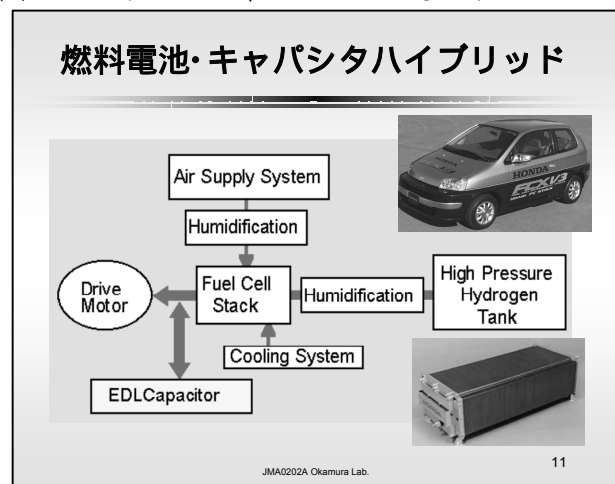
燃料電池の出力は電気だから、図 3 に示したシリーズハイブリッド構成のエンジンと発電機の部分が燃料電池に置き換わる。エンジンとのパラレルハイブリッドでは搭載するモーターのコストや重量を節約してハイブリッドの効果も小さくなる傾向があるが、燃料電池車では走行用の全出力を出せる大きな電動機が必ず存在する。

キャパシタがなくても車は走るが、回生制動で生じた電気を燃料電池を逆にして水素に戻すのは無理だから、エネルギー効率を目指すなら図 1 1 に示したキャパシタによるシリーズ・ハイブリッド構成が合理的である。図の場合、回生電力は 60kW の駆動モーターが発電するので、既に述べた商用車と同様にキャパシタの利点が明白となる。

キャパシタを積んで燃料電池とハイブリッドにするなら第一の目的は回生制動の蓄電にあるが、即応性の利かない燃料電池の発電ギャップを埋めピーク負荷を負担するなどにも活用できる。

図 1 1 は本田技研(株)によるキャパシタを補助電源に用いた燃料電池電気自動車(FCX-V3)

で 4 人乗り、PEFC 型 Ballard 燃料電池 62kW、電動機 60kW、高圧水素 100ℓを積み、車重 1750kg、最高速度 130km と公表<sup>[10]</sup>された。2000 年 11 月から米国での官民合同プロジェクト「カリフォルニア FC パートナーシップ」で抜群の好成績を収め、その後 FCX-V4 が公表され 2003 年の発売が予告されている。



## 2. 二次電池とキャパシタによるハイブリッド車の比較

### 2. 1 キャパシタと二次電池の長短

#### 1) 寿命の要素を加えた比較

キャパシタと二次電池のどちらがハイブリッド車に適するか、議論が盛んになるであろう。車を製造販売している人や関係者は、実はあちらが良いとも言えず製品を擁護せざるを得ない。

また、たとえ原理が勝っていても、それを用いた車種が優秀とは限らず、人気や販売網の強弱も影響する。ここではそうした条件を除いて、純技術的な長短を論じてみよう。

キャパシタは出力密度が大きいと電池に比べてすぐ無くなるといわれる。その状況を図12に図解した。図を描く条件は、従来のキャパシタと ECS の実効エネルギー密度の比は 7.5 倍 (5 倍と 10 倍の間)、キャパシタの出力密度は二次電池の 3 倍、二次電池の実効エネルギー密度は ECS の 2 倍とした。

ECS 以前の、従来のキャパシタはエネルギー密度が 1~3Wh/kg で有効に使いこなす電子回路もなかったため、フルパワー  $P_c$  での加速時間は図で  $T_{cx}$  と記した 3~4 秒間であった。

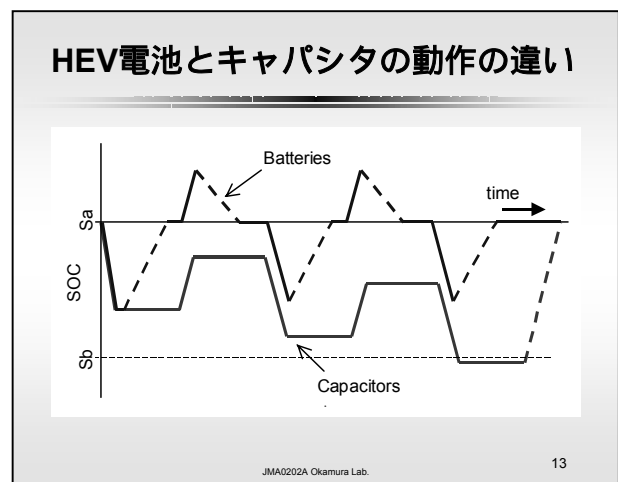
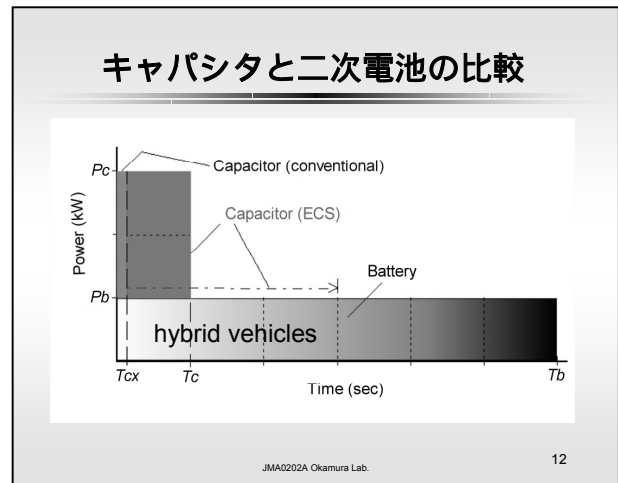
これに対して NiMH や Li イオンなど新型二次電池は、取り出せるパワーは小さく図の  $P_b$ 、つまりキャパシタの 1/3 ほどに留まるが、その出力でなら  $T_b$  まで長時間の走行が可能である。ただし、二次電池は深い充放電サイクルでは寿命が短くなるので、できるだけ浅い充放電で済ませたい。この性質をキャパシタと同じ扱いをしたのでは公平でないから、図ではそれを三次元で表すために電池の放電時間が長くなる右へ行くほど黒く塗った。

さらに最近注目されている ECS では電子回路を併用しキャパシタから取り出せる実効電力量 (Wh) は従来型の 5~10 倍、フルパワー  $P_c$  での加速時間  $T_c$  は 20 秒~1 分間に達しているのを図示した。

二次電池を用いたハイブリッド車の関係者はキャパシタの不利を「エネルギー密度が二次電池に比べて小さい」と指摘する。ほとんどの人は ECS の経験がないから、キャパシタとは在来型で図12の  $T_{cx}$  までの容量を考えたり、あるいは ECS の加速時間の公表値から二次電池の出力  $P_b$  で  $T_c$  までしか加速できないと誤解しやすい。それに比べ二次電池なら図12でいえば6倍も長く走れる、と思込みがちである。

## 2) HEV 電池とキャパシタの動作の違い

他方、二次電池のエネルギー密度は  $T_b$  まであるはずだが、図12の黒い領域まで充放電を繰り返すと寿命が持たない。そのため実際の車では放電した電池はできるだけ細かく図13の点線のように電池に最適な充電レベル  $S_a$  に復帰させ、極力浅い放電深度で使う。こうすれば在来のキャパシタと同等なエネルギー量程度なら、電池をそこなわずに何万回も使える。つまり、せっかくのエネルギー密度は電池が壊れるから極力使わないように制御している。確かに、どうしてもやむを得ない時だけ二次電池の大きな蓄電量に頼るなら、寿命への影響も少ないから二次電池の賢明な利用法といえよう。



これに対してキャパシタは図13のように放電深度  $S_b$  を割り込むまで、点線で示した放電レベル調整用の充放電をしない。キャパシタの容量が小さくて一回の加速で充電が必要になる条件では、大差はない。しかし、ECSのように容量が増え何回分もの加速エネルギーを蓄えていると、図は3回分の例だが、レベル調整用の充放電は遥かに少なく、仮に電池の充放電効率が同等であっても、キャパシタは実働でのエネルギー効率で優位にたつ。

## 2.2 ハイブリッド車の詳細な議論

### 1) 回生率とハイブリッドの名前

図12を見てすぐ分かるのは、キャパシタでは  $P_c$  だけの電力を回生できるが、電池ではその  $1/3$  の  $P_b$  に制限される点である。

二次電池を前提としたシステムを考えた場合、これ以上入れても電池を壊すだけだから、 $P_c$  だけの回生電力を発生させずに機械ブレーに分担させ、モーターを  $1/3$  の大きさで済ませる。その代わり小電力でなら蓄電量の大きくなる特徴を利用して、電池の寿命を縮めない範囲で有効に使う……これは電池を使う限り巧みな設計に違いない。

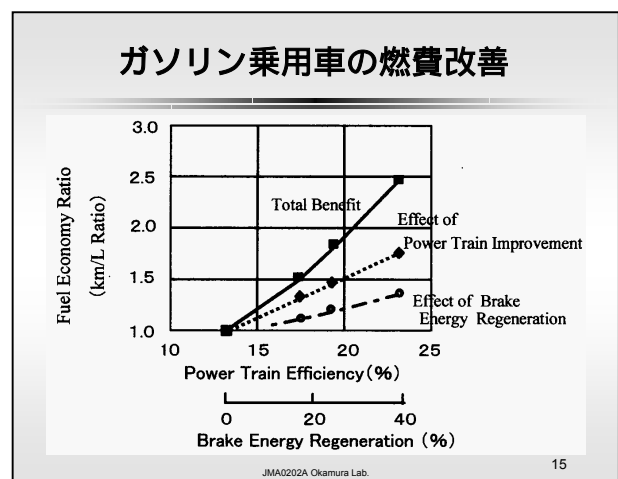
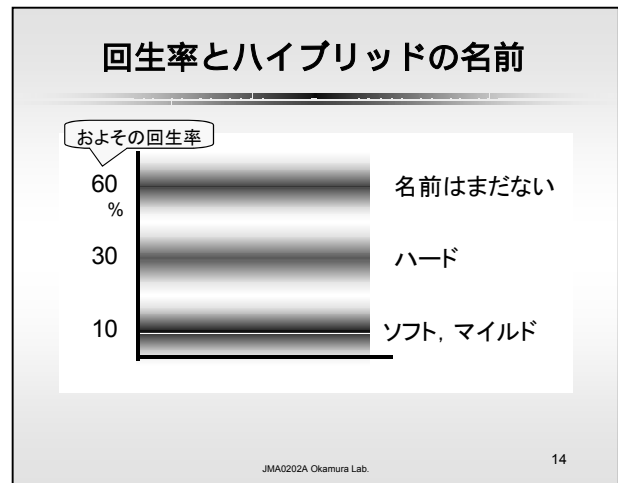
キャパシタを前提としたシステムでは、回生制動電力を完全に効率よく回収し、キャパシタはできるだけ深く、何回でも充放電する使い方がよい。電池は使わない方が長持ちするが、電気二重層キャパシタは自動車より寿命が長いので、「使えば使うほど有利」である。

だが電力  $P_c$  を回収するには、それだけ大きなモーターが要る。シリーズハイブリッドや燃料電池車なら必ず大きなモーターがあるからよいが、パラレルハイブリッドでもキャパシタを有効に使おうと思えば、 $P_c$  を出し入れできる程度の大きさのモーターとモータードライバなどパワーエレ系が必須である。燃料電池車の場合は、全馬力のトラクションモーターやドライバーがすべて既設なので、キャパシタとのハイブリッド化に有利であった。

反対に、思い切り簡便なものにしようという動きがある。乗用車の電源を 42V に移行する機会を利用して、現在のスターターと発電機をいっしょにして 2~5kW くらいとし、アイドルストップとごく低速での加速と回生に用いて簡単なハイブリッドとしソフト・ハイブリッドまたはマイルド・ハイブリッドと呼ぶ。

制動エネルギーの回生率から図14のようにわけて、10%未満のソフト、マイルド級と、30%程度のプリウス級をハード・ハイブリッドと定義するそうだが、これを言い出した人達の頭の中にはキャパシタ・ハイブリッドはなかったらしく、その上のキャパシタ・ハイブリッドには名前がまだない。

環境も  $CO_2$  も大切だが、コスト競争の激しい自動車業界で 1W でも小さなモーターで済ませようと節約に走るのは、我々ユーザーが高価



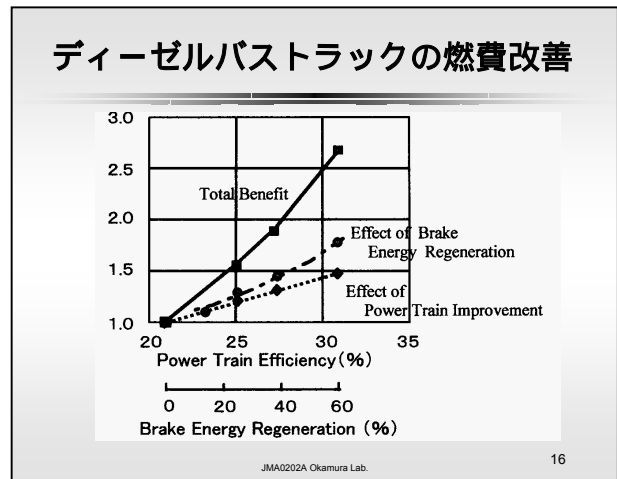


でも環境に良い車を，と考えない限り無理からぬところかも知れない。車を使う側も，大きなRVや高級乗用車を使う人が，安くても名前だけのハイブリッドよりは，その分高くても本格的なハイブリッドを選ぶ気にはならないものだろうか。

## 2) 乗用車と商用車

ハイブリッド車のメリットについて，乗用車と商用車ではその重点が異なると，論文<sup>[7]</sup>に述べているのでその趣旨を次に紹介する。ガソリン乗用車の場合，パワートレイン（エンジンから走行系全体をまとめてこのように呼ぶ）の効率を高めるのと，制動エネルギーを回生する効果を比較したのが図15である。これを商用車つまりディーゼルバスやトラックで見た図16と比べると，その違いが明瞭となる。

乗用車の場合，ブレーキエネルギーの回生が困難で，それに比べて最大馬力より常用馬力が遥かに小さく効率の低いパワートレインを改良するのが燃費に効く。それに対し商用車のパワートレインの効率は既に高いから，重い車重がもたらす大きな運動エネルギーを回生ブレーキで回収すると効果が大きい。回生電力を高効率で蓄電するには非常に入力および出力密度の大きな二次電池が必要で，むしろキャパシタが適している。



## 3. ハイブリッド車に不可欠な蓄電装置の課題と改善策

### 3. 1 電気二重層キャパシタの特性

#### 1) 静電容量密度とエネルギー密度

蓄電装置の課題と改善策は，図17に要約されている。しかし，その前に，現在世間で用いられている電池や電気二重層キャパシタの性能をあらわす数値や定義が混乱しているので，数字だけが一人歩きしている。その点を明確にしておこう<sup>[11]</sup>。

まず静電容量密度がエネルギー密度や出力密度の基本となる。論文等でしばしば用いられる表現は，

(a)重量当り静電容量密度 farad/gram (F/g)

(b)体積当り静電容量密度 farad/mili-liter (F/mL)

研究論文では (b)は電極の作り方による要素を含むため(a)が多用される。だが，キャパシタの性能は(b)で決まるから最終的には(b)を大きくする必要がある。

静電容量密度の表現には

**Energy Capacitor System - ECS**

- エネルギー密度がなぜそれほど重要か？
- キャパシタのエネルギー密度は増せるか？
- ECS用キャパシタは従来型とどう違うか？
- キャパシタを実際の車にどう適用するか？

17

(c)単極容量密度

(d)端子間容量密度

の二種類がある。通常の電気二重層キャパシタでは正負極に同じ電極を使うので、ほぼ等しいキャパシタが正負極に発生し、端子間ではこれらの二つの静電容量が直列になっている。

その結果、端子間容量密度(d)は電極が 2 個分で、静電容量は直列だから 1/2 となるため、単極容量(c)の約 1/4 の値となる。

研究上はしばしば単極で性能の優劣を問題にするため(c)を使う理由はある。論文や特許では(c)(d)どちらなのか、数値だけでは判断がつかない。黙って使うのは故意にだまそうとしていると疑うこともできる。

静電容量密度をエネルギー密度に換算するには耐電圧が二乗で利く。水系電解液や擬似容量タイプのキャパシタでは、有機系電解液による電気二重層キャパシタに比べて静電容量密度が何倍も大きいですが、耐電圧が低い。静電容量 C(farad)で耐電圧 V(volt)のキャパシタが蓄電できるエネルギーU(joule)は、

$$U = CV^2/2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

つまり耐電圧の二乗に比例する。

たとえば水系で静電容量密度が有機系の 3 倍でも、有機系の耐電圧が 3 倍あるから、エネルギー密度では有機系が水系の 3 倍ほどのエネルギー密度となる。この考え方は耐電圧の異なる擬似容量タイプのキャパシタにも適用できる。

ときどき(1)をクーロンやアンペアアワーAh で、

$$Q = CV \quad \dots\dots\dots (2)$$

で計算する人がいる。電池では電圧を一定と見なして Ah で容量をあらわす習慣<sup>[12]</sup>があるが、キャパシタは電圧が大きく変わるので、電力を考えず電流だけで議論したのでは公平な比較にならない。

## 2) 対象は何か

出力密度やエネルギー密度を論じるには、その数値が何を対象にしているかが肝心で、それを無視して数値だけで評価や判断をするのは無意味である。その対象とはたとえば、

(a)電極だけ……単電極法

(b)電極だけ……端子間、両電極を含む

(c)単セル

(d)モジュール

前項で(a)と(b)が 4 倍違いと述べたが、(b)~(d)の間もそれぞれ 1.2~2.0 倍程度の差が、作り方によって生じる<sup>[11]</sup>。これも意図的に、どの段階の値かを明示しない文献に出会うことがある。

こうした例は新しい技術分野では実に多い。たとえば「充放電サイクル寿命何万回」といっても放電の深さがどれほどかで、結果はどうにでもなってしまう。

**静電容量密度とエネルギー密度**

- 重量当り静電容量密度 farad/gram (F/g)
- 体積当り静電容量密度 farad/mili-liter (F/ml)

- 単極容量密度
- 端子間容量密度

$U = CV^2/2 \quad \dots\dots\dots (1)$

18

JMA0202A Okamura Lab.

### 3) 最大出力密度と内部抵抗

上の(1)式とキャパシタの重量や体積がわかれば計算できるエネルギー密度に比べて、出力密度の算定は厄介である。そのため一層さまざまな表現や数値が流通している。

ECS でも最近まで、二次電池の規格にならって 50%DOD (放電深度) での出力密度で表現<sup>[11]</sup>していた。しかし世界に流通しているデータを見ると、満充電における最大出力密度(matched impedance power density) で表しているものが圧倒的に多い。満充電でも半充電でも「最大出力密度」は実際に利用できる電力より遥かに大きな、架空の理論上の値である。同じ理論値ならキャパシタの場合、別に半分の充電状態で議論する必要もないので、満充電時の最大出力密度を使うよう改定する。

図において電源の充電電圧  $V_b$ 、負荷抵抗  $R_p$  に発生する電圧  $V_p$ 、そのときの電流  $I_p$  とすると、負荷に得られる電力  $P_p$  は、

$$P_p = V_p \cdot I_p = V_b^2 \cdot R_p / (R_b + R_p)^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

(3)式で  $R_p$  を変数とすると、 $R_p = R_b$  のとき  $P_p$  は最大となる。この状態を、電池の内部抵抗と負荷の抵抗値が等しくなったという意味で **matched impedance** 状態などと呼ぶ。このときの  $P_p$  の値は、

$$P_p = V_b^2 / (4R_b) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$P_p$  を電池またはキャパシタの体積、あるいは重量で割れば、最大出力密度が得られる。

最大出力密度はキャパシタも電池も同じ方法で、満充電電圧  $V_b$  と内部抵抗  $R_b$  ( $\Omega F$  でなく実抵抗) さえわかれば算出できる。ただし容量は問わないから、この出力は瞬間値で、何秒間続くか関知しない。しかも、この条件下では負荷への電力と同量の発熱が電池の内部で生じ、長く動作させることができる状態ではない。これが架空の理論値と呼んだ理由である。

### 4) 出力密度をエネルギー密度と $\Omega F$ から求める

エネルギー密度と $\Omega F$ が与えられていれば、その数値から出力密度を容易に算出できる。もちろん逆も可能だから実用上便利なので、いささか蛇足だが導出の方法を述べる。

単位は kg 当たりでも L 当たりでも各変数に共通ならばよい。変数はキャパシタの最大出力密度を  $W$ 、エネルギー密度を  $Wh$ 、静電容量  $C$ 、内部抵抗の $\Omega F$  値を $\Omega F$ 、内部抵抗の絶対値を  $R$ 、耐電圧を  $V$  で表す。対象をたとえば 1kg のキャパシタとすると、

$$\text{キャパシタの最大出力密度 } W = V^2 / (4R) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{内部抵抗 } R \text{ は } \Omega F \text{ の定義から } R = \Omega F / C \quad \dots\dots\dots(6)$$

エネルギー密度と静電容量の関係は

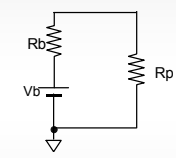
$$C = Wh * 3600 * 2 / V^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

(5)(6)から  $W = V^2 / (4\Omega F / C)$ 、 $C$  を(7)で置き換えると

$$W = Wh * 1800 / \Omega F \quad \dots\dots\dots(8)$$

(8)により、同一重量あるいは体積のキャパシタに対して出力密度  $kW = 1.8 Wh / \Omega F$  という

#### 最大出力密度の考え方，求め方



$$P_p = V_b^2 / (4R_b) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$kW = Wh * 1.8 / \Omega F \quad \dots\dots\dots(8)$$

JMA0202A Okamura Lab. 19

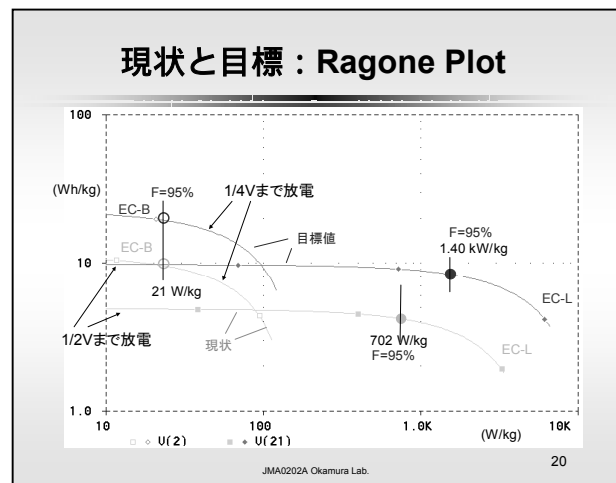
簡単な関係で、エネルギー密度と $\Omega F$ との間で、相互に換算が可能となる。

## 5) ラゴンプロット

キャパシタも二次電池も程度の差こそあれ、大出力で使えば、取り出せる総電力量は小出力の場合より小さくなる。その関係を表すには、出力密度とエネルギー密度をそれぞれ X, Y 軸にとって両者の関係を図のようにプロットする Ragone Plot が有用である。

単位は重量当りで対数目盛りで表示され、Ragone によって提案された当初は縦軸が出力密度だったが、目盛りの範囲が出力密度の側が広く、「エネルギー密度がいくらのものが、出力が変化するとどうなる」という見方をされる場合が多いので、図のようにエネルギー密度を縦軸に用いるのが実用的である。

Ragone Plot を描くには実測することが前提だが、これは設備や実測技術の点で、特に電圧と電流変化の大きなキャパシタでは厄介である。縦軸は公称容量ではなく定電力放電した際の電力量だから、左端の低負荷側でも 1/2 電圧まで放電なら実容量の 75%, 1/4 電圧まで放電しても 94%となる。大負荷側では定電力制御で 2.5V 単セルなら 0.6V といった電圧レベルまで安定に放電する大電力の電子負荷装置は意外に少ない。大出力大容量を唱えるキャパシタの内部抵抗は 1m $\Omega$ 程度だから、精度を 10%以内に保つにさえ配線抵抗の等価的な効果を 0.1m $\Omega$ 以内に収めなくてはならないから実測技術も課題となる。



学問的な研究は別として、実用上は後述するように大電流時の内部抵抗を正確に測定し、その値を使って電子回路シミュレータ SPICE でプロットさせると、十分に正確なデータが得られる。

それよりも留意すべきは、Ragone プロットのどの辺で実際にキャパシタを動作させるかにある。最近の各種文献、カタログの類によく Ragone プロットの掲載してあるものが増えた。特性が明瞭になって喜ばしいのだが、肝心のプロットが最大出力密度を越えて更にその先までずっと続いているのを内外の文献で見かける。この先のほうをどうやって測ったかも興味があるが、いったい何に使うつもりか伺って見たい。

ECS では充放電効率の点から、効率が約 95%になる点を推奨最短放電時間として、EC-L タイプで 1 分間、EC-A タイプでは 10 分間といった目安を提供してきた。Ragone プロットにも図に記したように、充放電効率の概数を目盛ると、どの辺の出力密度で使うとどの程度の効率になるかが明瞭となる。

EVS-18 のベルリン会場で質問があった。「キャパシタハイブリッドバスが 550W/kg ばかりなら NiMH 電池でも出せる、発熱しても空冷してケースの外から見れば効率も高い…」国際会議でさえこんなことを言う人がいるので、答えておこう。電池を 550W/kg で運転すればキャパシタより遥かに最大出力密度に近い、効率の低い状態となり顕著に発熱する。強制空冷すれば温度は下がるが失ったエネルギーは戻りはしない、ファンの損失分が増すだけである。

### 3. 2 高出力でのエネルギー量

#### 1) 内部抵抗の定義と測定

電池の公称エネルギー密度は低出力でしかも新品のときの値で、キャパシタも程度の差こそあれ新品の値を公称している。だが、実際に高出力時にどれだけのエネルギーが使えるか、それは設計寿命の末期にどうあるべきか。これらを正確に評価し、判断しよう。

キャパシタにかぎらず二次電池にもその内部抵抗をインピーダンスブリッジの類を用いて 100 Hz～1 kHz で測定する慣習が、日本ばかりか欧米にも残っている。こうした方法でキャパシタの小信号特性は測れるが、これは蓄電装置として必要な大電流時の特性とは無関係で、係数を乗じるといった手法で換算することも不可能な、実用状態の内部抵抗とはまったく別の測定値が得られてしまう。

また内部抵抗ばかりでなく、放電電流によって静電容量やエネルギー密度も変化する。キャパシタは二次電池に比べて特性の負荷電流による変化は小さいが、それでも低負荷時の値をそのまま大負荷の設計に適用したのでは、無視できない誤差を生じる。

変動する特性をどこで測り、どう表示するか。電気二重層キャパシタの場合は最大推奨負荷のような状態を定め、実際にその辺の電流で測定しておくのが実用的である。測定法はインピーダンスをブリッジで測るのではなく、次の図に示すように実負荷を接続して実際に使われる時間にわたって電流を流し、その際の電圧降下から抵抗を算出し、出力できた電気量の積分値から静電容量を算出する。

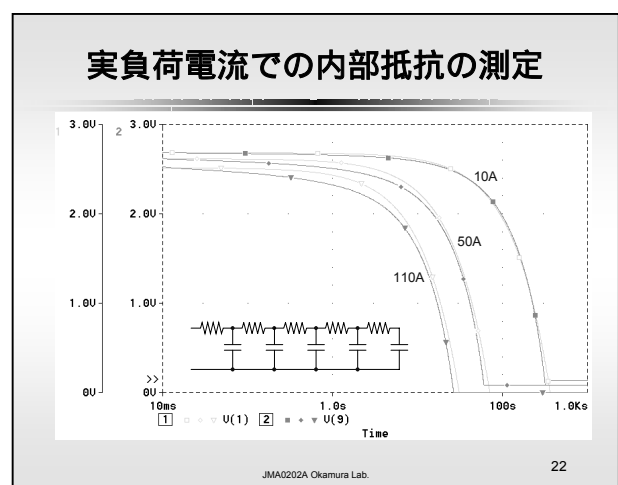
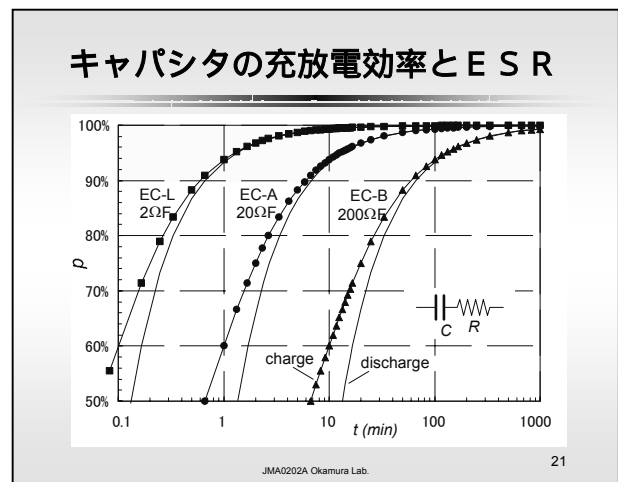
#### 2) 電流による特性の変化

一般に電気二重層キャパシタでは放電電流を増すと、内部抵抗が減少し、利用できる電気量つまり等価的な静電容量も小さくなる。それは図の等価回路で考えるとわかりやすい。

放電、あるいは充電電流を増すということは翻訳すると充放電時間が短くなることに他ならない。充放電時間が短ければ、図の RC 配列で、その時間に間に合うのは前のほうの一部となる。そのために C は減少し、R の平均値も小さくなる。

電流により RC が変化する割合はキャパシタの作り方によって異なり一定ではない。しかし定性的には、電流を増せば必ず等価な端子間の R も C も小さくなるといえる。

この前提があるので、定格最大電流付近で電気二重層キャパシタの静電容量と内部抵抗を測定し、これを用いて Ragone Plot を描けば、あ



まり実態と離れないものが得られる。ただしグラフの左端，出力のもっとも小さい付近では静電容量が増加して，グラフのプロットはその分だけ実物より小さいほうに狂っている可能性があるが，実害はない。

### 3. 3 キャパシタの寿命と安全性

#### 1) 設計寿命と性能

ECS の登場に際して，もう一つ議論があったのは終末特性(life criteria) である。10～20年といった所定の期間を経過して，もうこれで寿命というときの特性をどう設定するか。これがキャパシタの価値を大きく左右する。

ECS が世に出た 1992～5 年当時の電気二重層キャパシタの仕様では寿命の終点は静電容量半分，内部抵抗 2 倍が一つの基準となっていた。しかし，電気自動車を一度設計してみればすぐわかるが，上の値は電子回路用コンデンサのためのもののようで，蓄電装置としては実用的でない。最近の欧米のメーカーのカタログでは C は 80%以上，R は 200%以内となっているが，まだ充分ではない。

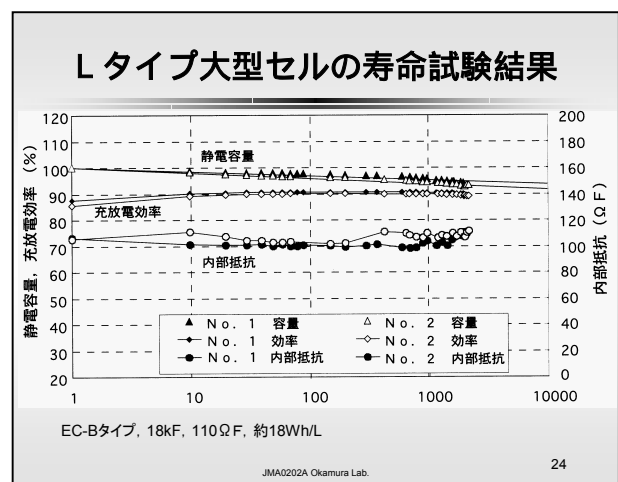
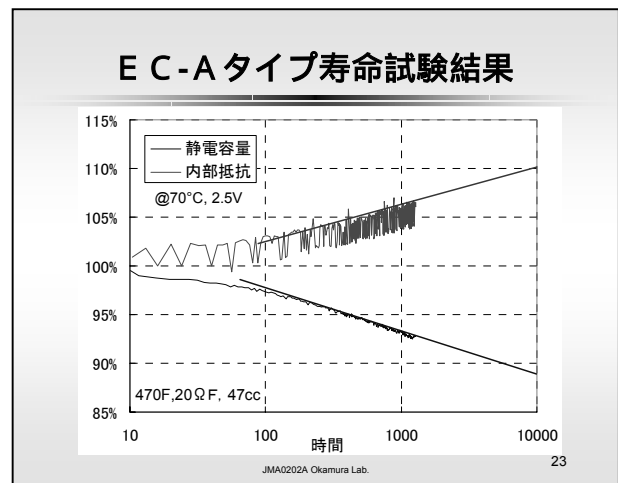
ECS では暫定的なサンプル品は別として大量生産品では C は 85%以上，R は 150%以下を目指し，もうひとつ自己放電率も基準に加えようとデータの収集中である。

#### 2) 寿命をどうやって測るか

寿命を判断する終末特性は前項で述べたように定めていけばよいが，問題は寿命がわかるまでに 20 年待つかという点にある。加速試験の方法として温度を 30℃あたりから 10℃上げごとに 2 倍とするアレニウスの定率をもじった方法が便法として用いられているが，これでよいか。また同じ法則をセルのシールや弁機構などの寿命にも適用できるかが疑問である。

だが，今回欧米の専門家と意見を交換した範囲ではこの他に名案はないようだ。質疑の出た ECS キャパシタの寿命データも時間軸をアレニウスで 18 年間に換算したと説明したところ，世界の専門家の集まった会場で簡単に認められた。

現状ではこれを，やむをえない実用的手法というべきなのであろう。図 2 4<sup>[13]</sup>ではアレニウスに頼らず 3 年の実データを元に 15～30 年を外挿している。生産量が増し，実績が増大するつれてより長い，外挿の比率の少ないデータが蓄積されていくことを期待するとしよう。



### 3) 安全性と電解液

電解液にプロピレンカーボネート PC を溶剤として用いた ECS キャパシタは、二次電池に用いられるのと同様な各種テストを危なげなく通過した。しかし、欧米の各社はいずれも溶剤にアセトニトリル AN を使用している。

私どもの研究では PC に代えて AN で電極を最適化すれば、内部抵抗を同一にした場合エネルギー密度で約 2 倍、エネルギー密度を同等にした場合内部抵抗は 1/3 ほどに改善できることがわかっている。しかも低温特性が圧倒的に、それこそ 10 倍も優れている。

それほど優秀な溶剤を日本のキャパシタメーカーは一社も使わないのは、可燃性と毒性が問題だからである。キャパシタの論文を出すだけなら AN でよいが、量産してお客さんに使っていただくとなると、安心して推奨できない。この問題はまだこの先、議論や進展があると予想される。

### 参考文献

- [1] M. Okamura: "A Progress Report of the Capacitor Hybrid System -ECS" EVS-18, 5D (2001)
- [2] M.Okamura: "Energy Capacitor System - Part 1: Principles and Applications" The 11th international seminar on double layer capacitors and similar energy storage devices. Dec. 3-5, 2001
- [3] M.Okamura and H.Nakamura: "Energy Capacitor System - Part 2: Capacitors and their Control" The 11th international seminar on double layer capacitors and similar energy storage devices. Dec.3-5, 2001
- [4]佐々木正和, 他: キャパシタ式 CNG ハイブリッドバスシステムの開発, 日産ディーゼル工業(株),自動車技術会 2000 年春季学術講演会前刷集 (2000-5-24)
- [5] 野津育郎,他: キャパシタ式蓄電装置搭載中型ハイブリッドトラックの開発,日産ディーゼル工業(株),自動車技術会 2000 年秋季学術講演会前刷集(2000-10-19)
- [6] 荒木修一, 佐々木正和, 野津育郎, 山田良昭, 川治孝之, 小野英雄: ハイブリッド車用電気二重層キャパシタの開発, 日産ディーゼル工業(株), 自動車技術会学術講演会前刷集,(2000-10-19)
- [7] 佐々木正和, 野津育郎, 荒木修一, 宮田達司, 川治孝之: キャパシタハイブリッドバスシステムの開発 (第 2 報), 日産ディーゼル工業(株), 自動車技術会学術講演会前刷集,(2001-10-25)
- [8] 日野自動車工業(株) HIMR カタログ(1999)
- [9] T. Koike et al: "Development of a New Low-Pollution, High Fuel Efficiency Urban Bus Equipped with Diesel Electric Hybrid System", 1E-04, EVS-13, (1996)
- [10] 本田技研工業(株):Press Information, (2000-9-28)
- [11] 岡村勉夫: 電気二重層キャパシタと蓄電システム, 改訂 2 版, 日刊工業新聞社, (2001-2)
- [12] たとえば: B.E.Conway, "Electrochemical Supercapacitors", Kluwer Academic/Plenum Pub. 1999, page 21, Fig. 2.1
- [13] 蓮池 宏, 山岸政章: 電気二重層キャパシタを用いた高効率電力貯蔵システム, 季報エネルギー総合工学, Vol.24, No.2, p57-68 (2001-7)

— ■ —