キャパシタハイブリッド車の現状と課題

株式会社 岡村研究所 代表

岡 村　廸 夫

１．まえがき

キャパシタハイブリッドの現状は技術的には充分で，実証例もできた。課題はその認識と普及にある。

日本での電気二重層キャパシタは1978年に日本電気㈱と松下電器産業㈱がコイン型など小型セルを発売した記録と多数の特許や論文がある。だが，これら先達の研究や実績は，パワー用として二次電池にとって代わるにはエネルギー密度があまりに小さく，実用への展開はなかった。

二次電池に代わるエネルギー分野での新蓄電技術を目指して1992に筆者等はキャパシタ蓄電の研究をはじめたが，その後20社を上回る企業や公的機関の協力を得て2002年に実用段階に入った。当初ECSと呼んでいた方式[1]も ECaSS® が登録名称となった。

電気二重層キャパシタと呼んでも全部同じものではない。設計によって蓄電用，自動車用等の種類がある。しかも技術が普及していないから，理解の深さ，作り方や使い方によって，その成果は失望から成功までの，大きな差が生じる。

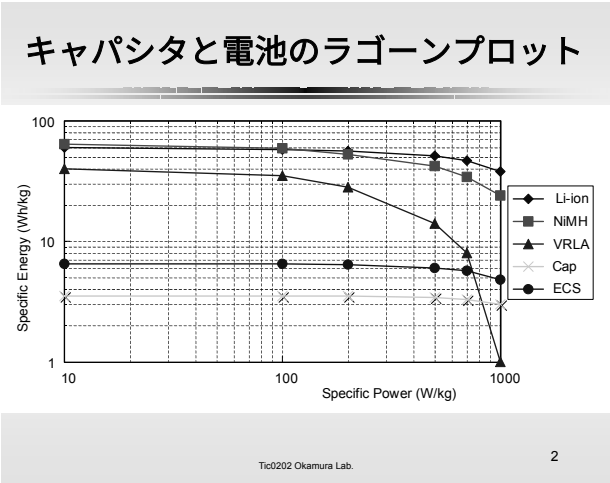
ここでは電気二重層キャパシタを正確に理解することから始め，ECaSS® 固有の手法に触れ，応用は多数あるので分散しすぎないよう，ハイブリッド電気自動車に絞って実例を述べる。

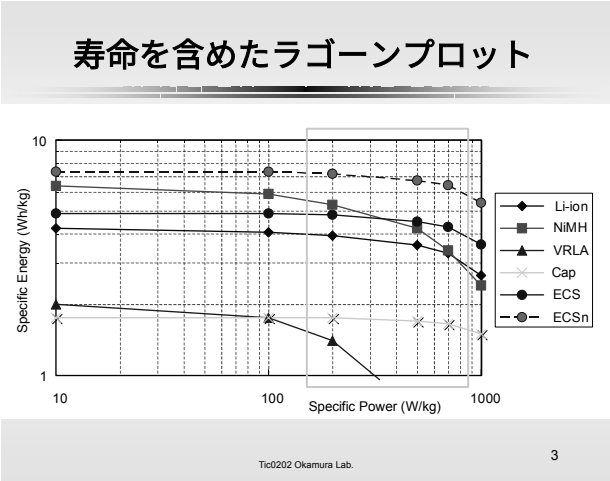
２．キャパシタを二次電池と比べる

2.1 電池を基準に考える誤り

新規なものを導入するときに，必ず起こる問題がある。それは新しいものを従来の枠で定義し，同じマスで測ろうとする誤りである。これは新規なものを理解する手掛かりになるから，一概に悪だともいえない。しかし早期に正確な定義に脱皮しないと，新規なものの長所をつぶし，普及を阻む。

蓄電デバイスの場合，何でも二次電池が基準になってしまうのが問題である。この点を正確に把握しておかないと性能や特徴の比較が公平にできない。具体例を見よう。二次電池の特性を表現する最も適切な手段の一つにラゴーンプロットがある。スライド２に示したのはハイブリッド電気自動車用として公表されている二次電池とキャパシタの特性を縦軸を重量当りのエネルギー量，横軸を重量当り出力電力で表したものである。[2]





これらのプロットを見る限り，二次電池はいずれもハイブリッド車用ということで，一般用の同種類の二次電池よりエネルギー密度を低めに，そして出力密度を大きく設計されていることが分かる。何より明瞭な

のはキャパシタとの違いで，ECaSSがいくら力んでも完全に縦軸上の位置が一桁差がある。

ところが本稿では，それを誤りだというのである。次の**スライド３**をごらん頂きたい。これは前図と同じ二次電池とキャパシタの組み合わせ（開発中の新型ECaSSキャパシタECSnewを追加したが，ここでは重要な論点ではない）で寿命の要素を入れてプロットしたものである。

測って見ることの不可能な寿命のファクターをどのような方法で組み入れたかというと，二次電池の場合には寿命を確保するために放電深度の最適な値があって，そこを中心に浅く充放電する手法が一般に用いられる。その放電の深度をハイブリッド車に適用した論文から採集して，電池あるいはキャパシタのエネルギー密度に掛け算し，実際に利用できるエネルギー量を算出した。（計算に用いた放電深度：Li-ion 7%, NiMH 10%, VRLA 5%, Cap 50%, and ECaSS (ECS and ECSnew) 75%）

前図と比較して詳しく見ると，電池とキャパシタの間に存在した10倍の差は消え，むしろECaSSが優勢となる。

何故そんなことが起こったか，キャパシタを有利にするための誤魔化しではないかという疑問が生じるだろう。しかし前図は二次電池の場合，新しいセルを満充電して，可能な最大限の容量で縦軸上の位置をプロットしている。この容量での充放電を実際に繰り返せば，電池にもよるが数十～数百サイクルしか耐えない。

商用ハイブリッド車では車両の寿命から300万回，乗用車でも数十万～100万回も充放電するという使い方が前提だから，それとはかけ離れたサイクル寿命しか出ない使い方で特性を示すのはおかしい。

2.2 容量と出力の定義

蓄電容量では，たとえば鉛電池で40Wh/kgなどと表す。電池の仕様には条件があって，①10時間かけて放電し（10時間率），②500サイクルの充放電寿命を保証する際は容量の60%までの放電深度で使用すること，などが規定されている。だが，一般にはしばしば上の条件を無視して「鉛電池のエネルギー密度は40Wh/kg」で通ってしまう。

出力についても同様なことがいえる。A. Burke氏が2002年の講演の中で「電池の出力密度は実際には使えない尖頭値を公称し，キャパシタの実用値と比較している」と批判している。

2.3 寿命の考え方と価格の定義

乾電池のような一次電池なら，供給できる電気量は，

容量＝電圧×電流×時間

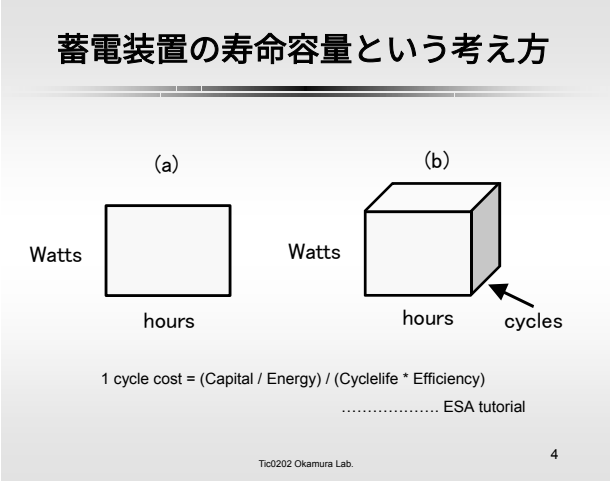
で表される。それなら二次電池は

容量＝電圧×電流×時間×回数

となるはずではないか。それが，どの二次電池も寿命が五十歩百歩だったためか，回数のところはいつのまにか不問にされてしまった。だが，電池以外の種類の蓄電装置の間で比較する場合，寿命つまり回数の部分が10倍も100倍も違うものを同列に論じるのはおかしい。

$$\text{サイクル価格/Wh} = \frac{\text{価格/Wh}}{\text{サイクル寿命} * \text{効率}} \quad \cdots (1)$$

たとえば価格を論じるにしても，Whあたりいくらではなく，式(1)および**スライド４**のように実際に利用できる蓄電量「Whサイクル」あたりいくら，と算定すべきである。



2.4 充放電効率

ECaSS® の固有な技術の一つに充放電効率の高いところで使う，という特徴がある。電気二重層キャパシタは原理上，太陽電池や風力発電に見られるパルス状充電や曇り日の充電で，二次電池に比べて充電効率が高いことが知られている。しかし，ハイブリッド車のような急速充放電の用途でも，後述する設計によって格別な高効率が得られるから，発熱が少なく燃費の改善率に貢献すると共に，前出(1)式で定義したコストを軽減する効果がある。。

３．電気二重層キャパシタと擬似容量

3.1 最近の「動向」という考え方

研究者に，その分野の「動向」を講演せよというのは，学会などでもしばしば見られる。だが，考えてみるとずいぶん失礼な要求ではないか。なぜかというとこの表現は，お前の説ではなく世間全体の動きや通説

を述べよと求めているに他ならない。

もしその研究者の仕事が本当に独創的であれば，その人の考えは世間の通説や動向とは一致しない。世間の通説と一致したことしか考えない，言わない人がいたとすれば，その人は研究者ではない。他人のやった事と同じことを行うのは研究ではなく，勉強である。

世間では良く勉強した人と良い研究者とを混同している。このため，高学歴を目指して独創性のない良く勉強した人を養成するから，社会がその方向に進めば進むほど在来技術に固まった人々が大勢を占め，破りにくい古くて強固な壁ができてしまう。

独創的な研究は，世間の動向や通説とは相容れない。考えて見ればそれが当然なのだが，たとえばECaSSの創生期にキャパシタ蓄電の話を聞いた大部分の人は，「キャパシタで電池の代わりだって？　誰もやっていないじゃないか」という反応を示した。いや，それは過去の話ではなく，つい先月までの欧米での状況さえもこうした傾向だったのである。

3.2 科学は多数決ではない

科学も真理も多数決できめられるものではない。大勢が支持しても，それが正しいとは限らない。そんなことは言われなくても分かっているが，どうも統計に頼って，著名な学校に入り大会社に就職し，成功したプロジェクトの後を追う。

統計に頼って，確率の高い方に進めばよいなら才能も要らず冒険はない。野球でもデータがあれば監督は要らず，阪神の優勝はほとんどない。

一見冷静に見える科学の研究分野は，野球にも増して恣意的であり，統計よりも研究者の意思によって進展が左右されると筆者は思っている。ECaSSのこれまでの経緯も複数の研究者，技術者達による軌跡の例として挙げるべきであろうが，これもまた唯一の道ではなく，ほかに新たな可能性は無数に存在する。

3.3 エネルギー密度を増す方法の捜索

その昔キャパシタ蓄電が普及しなかった原因はエネルギー密度の不足にあった……といっても異論はなかろう。キャパシタ蓄電がどれほど特長があってもエネルギーの蓄積量があまりに小さくては蓄電装置として本来の目的が果せない。

そこで第一の道は，電気二重層キャパシタのエネルギー密度を向上であった。初期目標として，当時約1Wh/kgであったキャパシタ蓄電の実効エネルギー密度を16倍にする計画を立てたが，この道の先達には，16%増しならともかく無理をいうな，と笑われてしまった。だが，その後に大いに発展して今日のECaSSで実用化の先陣はこの方法，つまり正負両極に電気二重層を用いた方式のキャパシタである。

第二の道は，純粋な電気二重層を正負両極に使うのではなく，一部に化学反応を許した「擬似容量」と呼ばれる方式である。いろいろな手段があるが大別すると，

①酸化ルテニウムなど金属薄膜を用いる
②P,Nにドープした導電ポリマーを用いる
③片極に電池，片極に電気二重層を用いる

それぞれの分野について専門の研究が発表されているからご参照いただきたい。

これらの方法の狙いは明確である。電気二重層が無限の寿命を誇っても，エネルギー密度が小さくては使いにくい。二次電池はエネルギー密度が大きくても寿命が短い。この長所を組み合わせて，エネルギー密度は大きく寿命も充分なものを得よう。

だが現実はそう簡単ではない。腕前によっては，電池ほどはエネルギー密度が出ず，キャパシタほどは耐久が持たない代物になる。特に近年のNiMH，Liイオンなど新型電池は熱心に高出力密度への改善を進めているから，これら高出力型二次電池を浅く使って長寿命化を図ったものと，擬似容量との競合は激しくなっている。

４．どうすればエネルギー密度は増すか

4.1 根本的な考え方

ここでは両極とも純粋な電気二重層キャパシタで，どうやってエネルギー密度を増すか，その方法は……という前に考察すべきECaSS® 流ともいえる根本的なポイント[1]を挙げよう。

①放電時間との関係
②システムとしての設計
③性能の定義
④キャパシタの作り方

これを聞いて「余計なゴタクは要らない，キャパシタだけあればよい」と考える人が実に多い。誰もが肝心と思うキャパシタの作り方は最後にしか来ないが，これは前の三つがないと効力を発揮しないからである。

この点はいくら言っても足りない。もう長い間，サンドウィッチはパンだけでなく，全部を一緒に味わうよう，と説明してきた。だが今でも多くの人が④だけに固執してこう求める「もっと内部抵抗が低くて，エネルギー密度が大きいキャパシタが欲しい」。

4.2 放電時間との関係

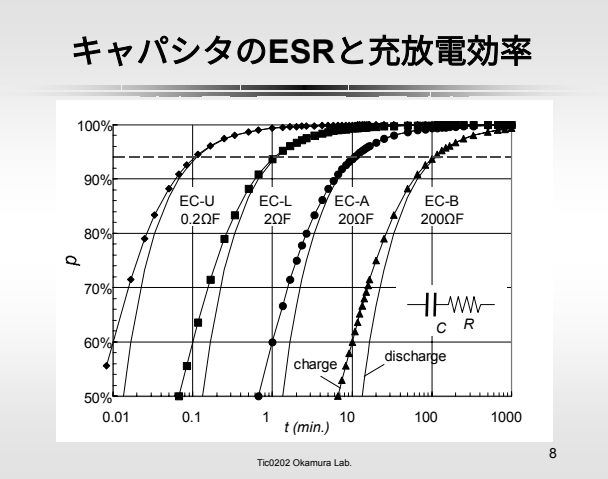
１）オーム・ファラッドという単位

キャパシタの内部抵抗をこのキャパシタは2mΩなどと値で呼んでいたのでは，キャパシタの大きさや直並列数が変わると変化して不便なので，正規化した表

現法はないか考え「静電容量1F当りの電気抵抗」からΩF (ohm-farad) という単位[1]を作った。

1Fあたりの電気伝導率S(Siemens) はS/Fで，SはΩの逆数だから S/F = 1/(ΩF)。 したがって1Fあたりの内部抵抗はそのまた逆数で1/1/(ΩF) = ΩFとなる。

ΩFはRCの積なので時定数と呼ばれることがあるが，1F当り内部抵抗が何Ωあるかを表す正規化した内部抵抗だと考えると利用価値が高い。



２）抵抗があってもロスが減る理屈

キャパシタはパチンと大電流が流せるが，エネルギー密度が小さい……という人が多い。だが，パチンと流れる大電流に耐えるようにセルを作れば，エネルギー密度が低下するのは当然である。

電流源から充電するのはECaSSの１特徴だが，もう一つ飛躍がある。それは「内部抵抗が大きくても必ずしも損失は増えない」という考え方にある。

この表現はよほど消化しにくいらしく，日本に限らず欧米の一流の研究者にも，それでも地球は回っている，みたいに「抵抗があれば絶対にロスは生じるはずだ」と未だに疑念を呈する人がいる。

まず充電効Pcと放電効率Pdを示す次式から，[1]

$$Pc = 1/(1+2CR/t) \qquad .....(4)$$

$$Pd = 1 - 2CR/t \qquad .....(5)$$

ただし，R,CはキャパシタのΩF，t は定電流でキャパシタの満充電からゼロまで放電またはその逆に充電するときの所要時間。

つまり，効率はキャパシタの内部抵抗Rで決まるのではなく2CR/t に依存する。これをプロットしたのが**スライド８**で，効率を高めるには必要な最短充放電時間をできるだけ長く設計し，それに適したR,CつまりΩF値のキャパシタを用いるのが得策と分かる。

さらにもう一歩進めて，

$$t = U/k$$

ただしU:キャパシタの容量Wh，k:比例定数

と置いて上式の肝心の部分を書き換えると，

$$2CR/t = 2k \cdot CR/U \qquad .....(6)$$

つまり，内部抵抗を減らさずに蓄電量をふやしても同じ効率にでき，同じ効率でも蓄電量を増やせば運転時間を長くできるメリットが明瞭となる。

4.3 システムとしての設計

キャパシタを直列にすると電圧配分が均等にならない。そこで，一番高い電圧になるキャパシタ単セルが壊れないように，全体の電圧を低くして使うという方法は良く用いられる。だがこの方法で，容量を±5%，漏れ抵抗を±5%，その他の要素±5%を吸収しようとすると，直列キャパシタの総電圧は70%で運転することになり，蓄電量は49%に低下する。

この解決には後述する「並列モニタ」を用いればキャパシタの定格いっぱいで使えるから，これだけでエネルギー密度を約２倍にした効果がある。前項で述べたキャパシタの電流を制御するには「電流ポンプ」と呼ぶ電流制御型のスイッチングコンバータを用いるか，モータードライバや交直変換機などの周辺機器をキャパシタに対して電流で授受ができるよう設計する。これらの効果は，場合により，比較の基準にも拠って異なるので一概に言えないが，通常1.5～3倍程度の効果がある。以上述べてきた電子回路部の貢献を総合すると４～５倍程度と見積もることができる。

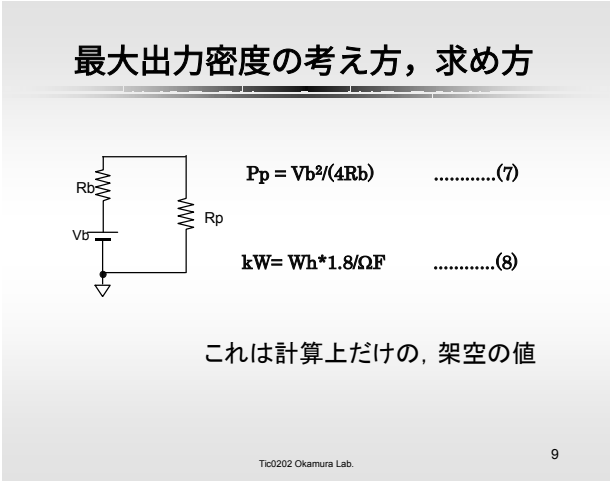
キャパシタそのものでのシステム的設計には，つぎの２つが重要である。

(a) 単セル構造とモジュール構造

(b) 信頼性と故障診断

単セルを設計する際に，単セル自体の製法を考え構造を検討するのは当然だが，単セルは1個だけで使うものではないから，集合したシステムとしての考慮が必須である。

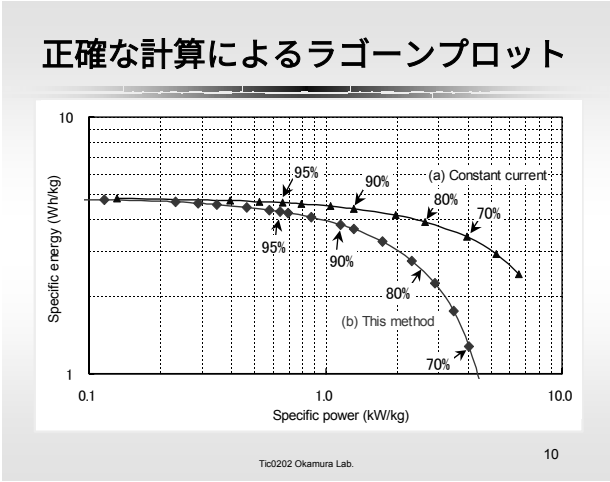
たとえば独立した１セルでの扱いが予想され，かつそれが重要である場合には電解コンデンサのような円筒形電気二重層キャパシタや強固な金属製単セル容器があってもよい。だが多数のセルを用い，エネルギー密度や出力密度が重要なハイブリッド電気自動車や無停電電源では，１セル単位での取扱いや強固さを主張する必要はない。合理的なモジュール設計と，それを前提にしたセル設計によって，エネルギー密度は1.2～1.8倍くらいまでの幅で改善することが可能である。



4.4 性能の定義

キャパシタ蓄電の性能の定義で重要な点は，冒頭に述べたように，二次電池の慣用や定義によって性能を判断しないで，理屈の通った定義や方法で評価すべきだというのである。特にエネルギー密度を二次電池の寿命を無視したワンタイムの値を用いたり，瞬時の尖頭出力を出力密度として慣用するなどの傾向は排除したい。

類似の例はキャパシタにもある。**スライド９**の計算式は頻繁に用いられるが，マッチトインピーダンスにおける最大出力で算定された出力密度は，理論上の最大値だから，これを元にして自動車へのキャパシタ搭載量を計算しては誤りである。詳しく計算すると**スライド１０**の(b)のようになる。[3]

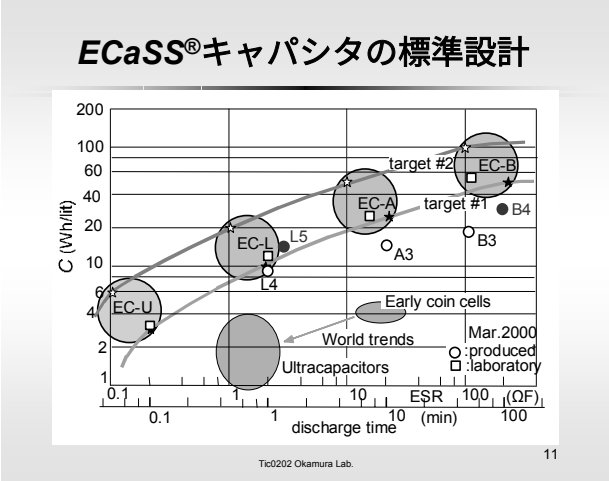


4.5 キャパシタの作り方

これまでに述べてきた条件がそろえば，後はそこを狙ったキャパシタを作るだけとなる。キャパシタの工業的品質はこの部分で決まるが，性能の差はほとんどここまでの条件設定で定まってしまう。いうなればキャパシタの性能は製造の段階で定まる要素は少なく，それ以前の動作条件の設定や設計で定まる。

たしかに良質な活性炭に，不純物のすくない電解液を安価に入手し，キャパシタを経済的に組み立てることは必須である。しかしこれ等は一流の技術者が集中して行えば，必ず達成できる仕事である。そしてこれらの仕事は量産の規模が広がるほど，技術の向上が早まり生産原価ひいては販売価格の低減が可能となる。

種々の可能性を目指したキャパシタの特性を，多品種になりすぎないよう標準化した例を図示する。[1]



５．キャパシタ単体から蓄電システムへ

5.1 好きと嫌いと

ECaSSでは，電子回路をキャパシタと組み合わせて使うのだが，その過程でいくつかの文化的衝突に遭遇した。それは現在まで尾を引いている，やゝ情緒的な課題でもある。主要なものを挙げよう。

第一は化学と電子工学の混用に対する批判である。二次電池の研究開発では，出力電圧が放電の末期まで安定であることを電池の必須の条件として進められてきた。それなのにキャパシタの放電電圧を成り行きに任せて，スイッチングコンバータで定電圧化するのは他技術の混入で邪道であり美しくない，という。

また，キャパシタには定電圧性がないから，直列にした際に不均一に充電されるのであって，性質の改善に手をつけずに電子回路を外付けにして誤魔化そうというのは，主課題の回避であり，迂回だという。

第二は同じ電気でも強電と弱電の混用に対する批判である。電気二重層キャパシタが高信頼性なのは良いが，そのセル１個ごとに半導体回路やICなどをつけたものは強電での用途になじまない。並列モニタなしで3000ボルトに耐えるキャパシタはできないか。

また，単セルはプラスチックの袋に入れるのではなく，ハーメティックシールされた耐圧性の強固な金属容器に入れるべきだ，という。

こうした批判や意見はこれまでも，また今後も大歓

迎である。コメントは必ずしも現在のECaSSの進行方向に賛成する必要はなく，しかも将来の進路の当否を左右する鍵となるであろう。

5.2 どちらを選ぶか

これまでに挙げた課題に対しECaSSはなぜ今日の道を選んだか，簡単に述べよう。

第一の論点だが，科学は大学の１学科に収まるものが美しいとは限らない。電圧を一定にするために寿命を犠牲にして化学反応に頼るのと，外付けの電子回路で定電圧化するのとどちらが妥当か，成果で評価すればよいと思う。

キャパシタに定電圧性を付与したとしても直列接続では，電池に見られるように容量のバラツキは必ず生じる。したがって，化学反応に頼るか電子回路を用いるかはさて置き，何らかの対策が必須である。その手法は後述する。

第二の論点，強電と弱電に関しては，さらに細かくは電力と自動車，鉄道のようにそれぞれの流儀が歴史を背景に存在する。確かに強電では，か細い電子回路との同居は不釣合いで，強電専用の特別太い配線のコンピュータと，もっと大きな粒の電子が欲しい。

だが，発電用原子炉はピコアンペアを測定できる核計装システムで炉内の反応レベルを検出し巨大な炉を制御しており，追尾型のミサイルはCCDからの微小信号をマイクロプロセッサICで処理しエンジンや方向舵を制御して標的を追う。

今日の先端技術では強電と弱電は既に混用され，充分な成果を挙げているといってよかろう。

5.3 モジュールとシステムの構造

容器を角型にするか円筒形か，単セルで自己完結型にするか，モジュールに強度を依存するか，この４種類のどれを選ぶかはECaSSの開発過程でも一本にならなかった。その結果，私達の周辺にはこれら４種類全部の試作品や製品が誕生した。

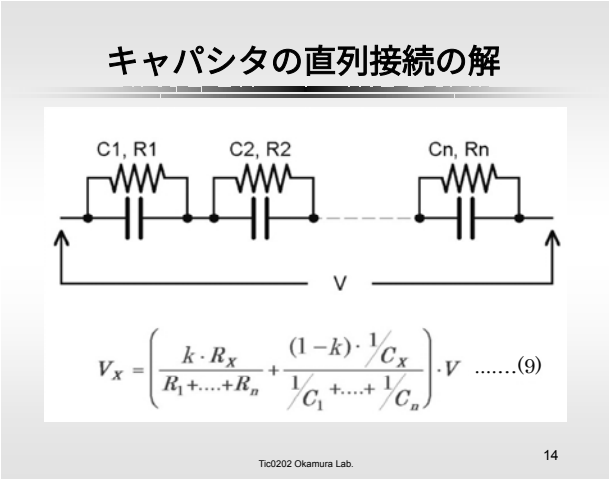
ホンダ，ディーゼル，指月，㈱パワーシステム各社の実例[4-7]がある。いずれも一長一短が認められ，どれが良いとは言いかねるが，製品化までの経験から，それぞれの特長は明瞭になった。

６．電子回路と組み合わせる技術

6.1 キャパシタの直列使用

キャパシタを直列で充電すると電圧配分が均等にならない。「当社の製品はバランス回路が要らない」と表明している例を見かけるが，それが本当か否かは，次式で表す不均衡要因を，どのようにして解決しているか，説明を求めよう。

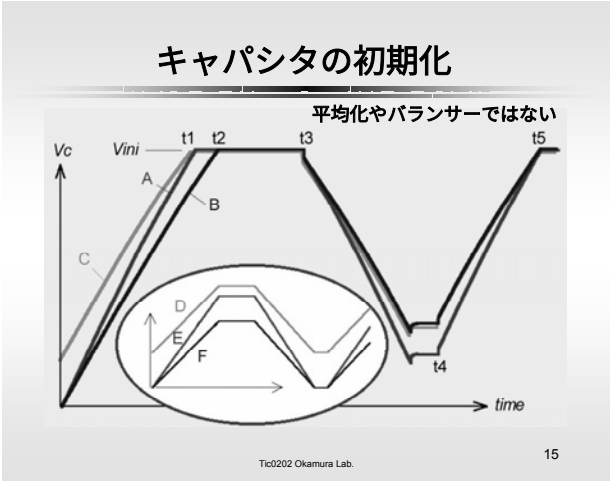
一般に，直列に接続されたn個のキャパシタについて，静電容量C1～Cn 漏れ抵抗R1～Rn のキャパシタを直列接続して電圧V に充電した**スライド１４**のキャパシタXの任意の時間の負担電圧Vx は，定数k ($0 \le k \le 1$)と置くと(2,5)，式(1)で表せる。ここでk=0は充電直後の状態を，またk=1は上記Cn, Rnで生じる時定数に対し充分長時間経過後の状態を与える。[1]



6.2 キャパシタの初期化

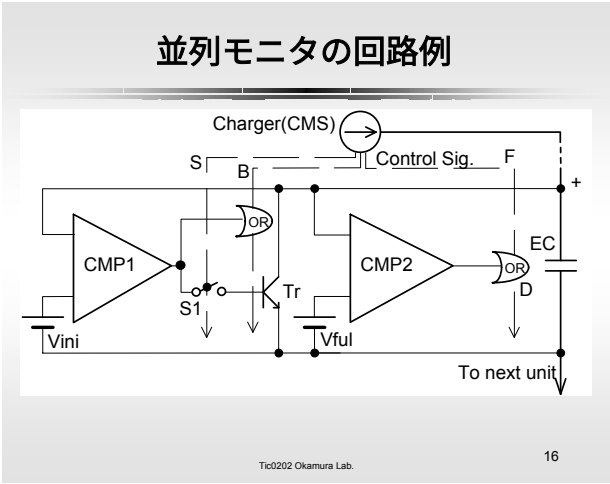
キャパシタの直列使用にECaSSでは並列モニタと呼ぶ電子回路をキャパシタに並列に設け，充電制御を組み合せて用いる。並列モニタは基本から複雑なものまで数種あるが，基本動作は共通で「キャパシタを初期化して用いる」。原理を**スライド１５**に示した。

通常の使い方では円内のように静電容量と，自己放電によって生じる初期電圧のバラツキから，直列に充電したキャパシタはD, E, Fのように異なった電圧に達する。それに対してECaSSではキャパシタを何らかの手段によって満充電電圧Viniに一旦揃える。キャパシタの初期化 initializeと呼ぶこの動作は，電子回路の計算の際にコンデンサに初期電圧を与えるのと同じである。



初期化されたキャパシタは初期電圧Viniを基準にして図のように充放電される。放電したt4やそこまでの途中では，静電容量の小さなキャパシタは他のトレースから離れるが何もせず放置しておく。初期化と平均化あるいは等化が違うのはこの点である。

平均化や均等化の動作は上とは対照的に，次のようになる。放電に際して他のセルから離れたキャパシタの電圧を調節するため容量の小さいAに電力を与えて，t4で揃えたとしよう。すると次の充電のときAは容量が小さいから早く上昇し他のキャパシタから離れるので，今度はAの電荷を他に移す必要が生じる。それはパワーエレクトロニクスを用いれば不可能ではない。損失型の回路も利用できるであろう。だがセル当り100A以上も流れるなかでこうした動作をする回路の規模は，キャパシタのコストを押し上げ，10～30%も充放電効率を下げてしまう。この種の検討を行った結果，やはりキャパシタのバラツキの少ない物を作るに限ると結論付けてしまう文献は珍しくない。



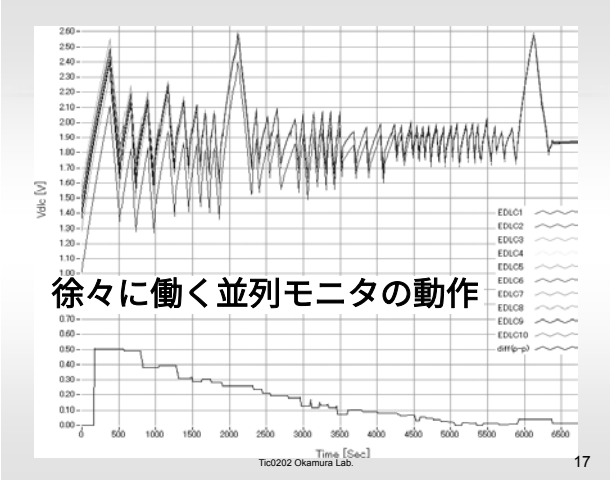
6.3 並列モニタの回路と動作

初期化をすれば，こうした問題はすべて解消する。実用の並列モニタの回路例を**スライド１６**に示す。

初期化はスライド１５のように使用前に一度に行ってもよいが，各セルの充電電圧だけを上限を超えないよう監視して，ばらついているままで使用を開始し，使いながら次第に初期化していくという方法もある。その例をスライド１７に示したが，今ではハイブリッド電気自動車には必須の機能となった。

並列モニタに使用するバイパス用トランジスタTrには10A程度流せるものを充てるが多くの場合，専用の放熱板さえ省ける。この程度の回路であればバイパス用トランジスタ以外の部分は集積化すると，アナログICの耐電圧が許す4～10個のキャパシタを直列にした状態を一つのICで制御する構成にまとめることができる。

このように付加する電子回路の簡素化を特に強調するのは理由がある。電気二重層キャパシタの信頼性はきわめて高いので，巨大な蓄電倉庫を作った場合などの全体に信頼性は，付加した電子回路によって大きく損なわれる。マイクロコンピュータを用いて各キャパシタの電圧や電流をスキャンするといった手法を誰でも思いつくが，そうした回路は増加する配線も含めて，電気二重層キャパシタより遥かに信頼性が低いことを忘れてはならない。



ECaSSでは並列モニタ関連の電子回路とその配線を極力シンプルに，ICパッケージ数を少なくすることにより，付加した電子回路による蓄電システムの信頼性の低下を食い止めることが可能となる。

並列モニタを用いる方法のもう一つの特徴は，キャパシタの直列個数に上限がない点である。単にキャパシタを選別し，厳重な品質管理で直列接続を作ると，性能がランダムに経年変化するなら，直列にするセルの個数が増えるほど統計的に「大きな偏差のセルを１個以上を含む確率」が増す。したがって，こういう手法でキャパシタ直列セットを作ると，25個までで き

た，50個まで動いた，などと積み木の積み上げに成功したようなスリルを味わい，ユーザーに幸運を販売しなければならなくなる。

これに対して並列モニタでは，製品の信頼性…不良品を含まないこと…さえ確実にすれば，800V程度までは既に実績があり，3000Vでも10kVでも絶縁さえ注意すれば不可能な理由はない。

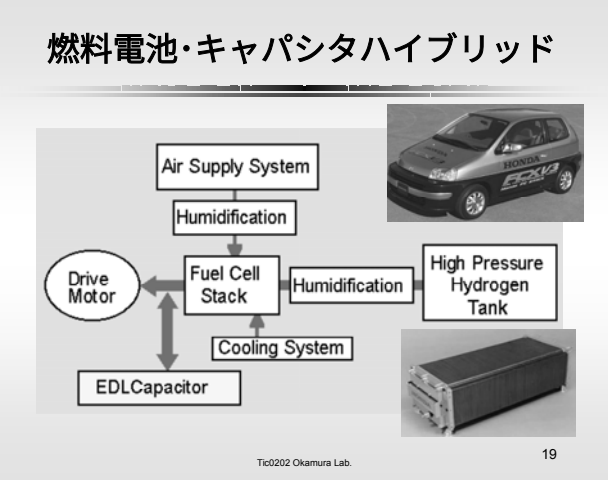
７．ハイブリッド車と燃料電池車の実例

7.1 キャパシタハイブリッドを高級車に

二次電池ではなくキャパシタを使ってハイブリッド電気自動車を作れば，素晴らしいものができるのだがと模索しているうちに，燃料電池車という絶好の機会が与えられた。

かねてから乗用車用のキャパシタハイブリッドは大きな課題を抱えていた。二次電池に比べてこんなに良いぞと主張するにはモーターが大きくなくては違いがでない。エンジンが100kWほどもあるところに5～10kWのモーターでは，そこで使う蓄電効率や回生電力の向上を主張しても，全体から見て大きな差にはならない。

そこで，大きなモーターを積める，多少価格が高くなっても我慢できる大型車，高級車にキャパシタハイブリッドを積むべきだと主張しつづけてきた。そういう意味では大型高級車にマイルドハイブリッドなどを用いるのは反対方向である。これは車のユーザーの問題でもあるのだが，何十万円～何百万円もするオプションを搭載した高級車は売れるのに，形ばかりでなく本当に燃費や地球への貢献ができるシステム搭載に，なぜ僅かな追加出費ができないのであろう。



スライド１９に示した燃料電池車の構成は，キャパシタハイブリッドにおあつらえ向きである。まず，車の全出力をカバーする大きなモーターが初めからついている。燃料電池は直流だからモータードライバとなる交直変換機も積んでいる。ハイブリッドにするために増える部品は，ほとんどキャパシタと並列モニタなどECaSS® の構成要素だけですんでしまう。

7.2 燃料電池キャパシタハイブリッド

ホンダの燃料電池乗用車の場合，試作車のFCX-V1, V2はNiMH電池を使っていた。それがV3でキャパシタに変わり，以降スライド１９の実売車FCXまで図の構成が採用されている。

駆動モーターは60kWなので，キャパシタの実力を発揮するのに不足はない。回生制動もモーターがこれだけあれば，タイヤが滑らない範囲で最大の電力をキャパシタに回収できる。加速性能は，試乗の評判がテレビなどで放送されているが，ドライバーが面食らうほどのものだという。

特に燃料電池とのハイブリッドの場合，もう一つ重要なファクターがある。それは燃料電池の負荷追従特性との関係である。燃料電池の出力を負荷の要求に応じて増減することは，そのつもりで制御すればかなり円滑に急速に,しかも広範囲で可能である。ただし，後で副作用が現れ，効率が下がったり出力が変動したり，場合によっては寿命にまで影響したりする。

図の構成では搭載されたキャパシタによって，燃料電池のほとんど全出力を，燃料電池の動作電圧の全範囲にわたって一時的に肩代わりすることも可能だから，燃料電池出力の増減を緩やかにするキャパシタの効果は大きい。しかも二次電池と異なり，キャパシタの動作電圧は自由だから，任意の状態での燃料電池の出力電圧を中心にして充放電が可能である。このあたりの状況は公表資料[4]によく述べられて。

7.3 使用されたキャパシタ

ホンダ自社製の円筒型で，エネルギー密度3.9Wh/kgと公表されているが，これはほゞ1/2電圧まで放電した際の実出力値なので，キャパシタのエネル

ギー密度としては約5.2Wh/kgとなる。ECaSS® 標準で言えばEC-Lタイプ相当品を円筒形に仕上げた。

実装ではキャパシタ全体を二つのブロックに分け，リヤーシートの背もたれの後ろに取り付けて，室内の空気を循環させる構造となっている。同社の公表資料[8]によれば「同一重量当りのアシスト出力はシビック搭載のNiMH電池に対しキャパシタは２倍ほどあり，発熱も遥かに少ない」と述べている。一般にキャパシタはエネルギー密度が低いため電池より重く，嵩張るだろうと思われやすいが，大出力を必要とする分野では，状況は完全に逆転している。これは二次電池を使った車と両方を販売している製造会社の公式な言い分だから，興味深い。

世界ではじめて発売された燃料電池-キャパシタハイブリッド車にも並列モニタが実装されている。同社の公表資料ではCapacitor protection circuit unitとなっている回路部は，個々のキャパシタセルについて電圧の検出と徐々に行う初期化，それに故障検出の機能を備えている。

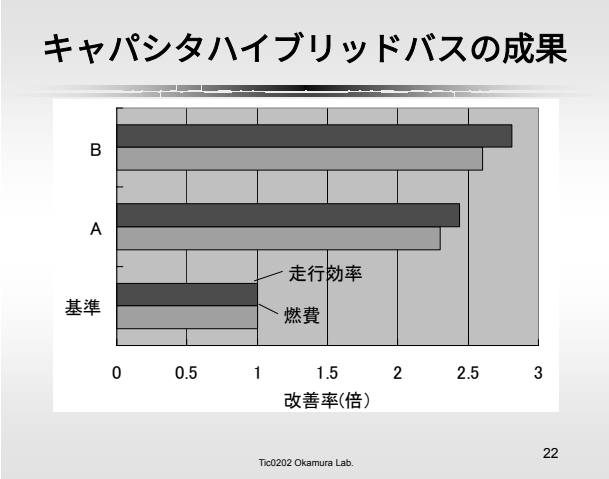
かなり詳細な記事がホームページFCXファクトブック[4]に発表されており，さらにキャパシタハイブリッド関連の4編の論文がホンダ技報[8]に掲載されるから，ご参照いただきたい。

7.4 キャパシタハイブリッドトラックの発売

日産ディーゼル工業㈱によって商品化されたばかりでなく，今年度の省エネ大賞を受賞したので，いっそう社会の脚光を浴びることになった。燃料電池車もよいが，どうも目前の環境改善には間に合いそうもない。目の前を走っている車をどうにかならないか，としばしば問われる。公害吸い取り紙みたいな物を貼り付けて……とはいかないから，根本的な手段としては内燃機関と電気のハイブリッドが最短距離であろう。

この方法を用いれば，モーターのアシストによるエンジンの効率向上と，ブレーキエネルギーの回生との二つの効果によって燃費は大幅に向上する。特に回生効率の向上には大量のブレーキエネルギーを高い効率で充電可能で，寿命を損なう心配のない蓄電装置が必須である。そこに二次電池を用いると，電池の劣化をかばうためどうしても大きな回生電力を捨てる構造となりやすい。その点で大電力での充放電効率が高く，寿命の心配のない電気二重層キャパシタが圧倒的に有利なのである。

しかし，そうしたおあつらえ向きなキャパシタや電子回路がその辺に転がっていたわけではない。理屈しかいわない筆者を手がかりにして実物を完成させるまで，前出２社に代表される各社に，果てしない苦労をかけた。



7.5 キャパシタにもいろいろ

電気二重層キャパシタは活性炭でできているという話が広がって，いろいろな活性炭を頂くことがある。備長炭，消し炭，竹炭，そして間伐材，籾殻，おがくず，コーヒーかす，紅茶の類から作った炭，最近ではナノテクによる各種の炭素……絶対にダメだとはいえないが，研究というのは皆このようなもので，手あたり次第に試したのでは当たる確率は小さい。埋蔵金がどこかにあるはずだから，家の庭でも掘って見ようか，というようなものである。

キャパシタにもいろいろある。日産ディーゼル工業㈱の文献によると，内部抵抗2ΩF，ECaSS® 標準でいえばEC-Lタイプ相当のジャンルで世の中のセルがせいぜい4Wh/kg (AN) のところを同社では6.3Wh/kg (PC) のキャパシタを量産したと述べている。

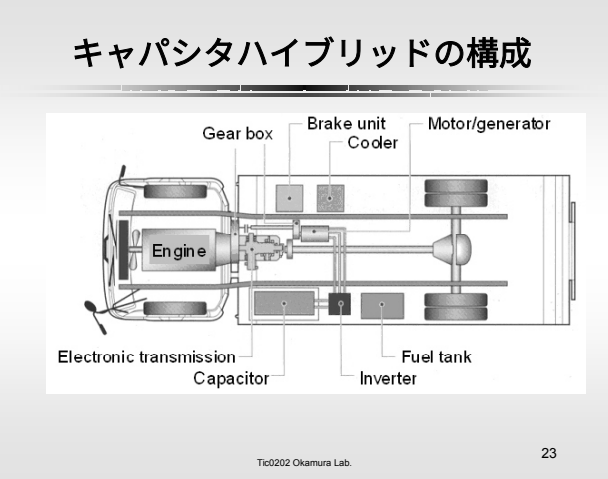
特性の数値だけの比較には留まらない。筆者が知る限り，現在のところ欧米製の有機電解液を用いたキャパシタはすべて電解液にアセトニトリルANを用いている。この電解液の性能は特に優秀で，従来から我々の用いているプロピレンカーボネートPCにくらべて

同一内部抵抗なら約2倍のエネルギー密度，同一エネルギー密度ならほゞ1/2の内部抵抗のキャパシタが得られる。残念なことにANは，引火点5℃で不完全燃焼すると青酸ガスを生じるという性質がある。

本稿に登場した各社のキャパシタは安全性を重視して，性能面での不利を承知でPCを用いて，それでもこのような実用性能を得ている点も評価されるべきであろう。

7.6 開発のポイント

キャパシタ以外の開発のポイントは，エンジンを良く知っている人が，最適な組み合わせとなるエンジンを作ったという点にある。このことはシリーズハイブリッド方式を採ったキャパシタハイブリッドバスで顕著である。その詳細は紙数の関係で本稿では省略[9]するが，M15モードという理想的な試験条件のもととはいえ，スライド２２のように基本となったCNGバスの2.88倍，つまり188%の燃費向上という公式記録は大型車の省燃費の可能性を示す不滅の記録となった。



キャパシタハイブリッド・トラックでは先に発表されたキャパシタハイブリッドバスと異なり，パラレルハイブリッド方式を採った。その構成をスライド２３に掲載する。ブレーキ時の回生エネルギーは電子トランスミッションを経てモーターで電気に変わり，キャパシタを充電する。この際にエンジンはクラッチで切り離され，負荷とならないよう考慮されている。発進はキャパシタのエネルギーで行う。スピードが増してエンジンの効率の良い領域に入るとエンジンで走行する。

使用したキャパシタは角型で公称容量1500F，2.7V，約2ΩF，ECaSS® 標準のEC-Lタイプで，これを128直列にして電子回路「並列モニタ」を含むモジュールにまとめ，3並列で使用している。車載ユニットとしてはモジュール2個で総計384セル，346V，583Wh，定格出力60kWのキャパシタ蓄電システムである。なお，キャパシタの強制空冷は行っていない。

おわりに

「キャパシタが本当に使えるか」という議論は，もう過去のものとなった。さて，これからどうなるか。

もっと使われ，量産が広がり，値段が下がり，さらに使われる……という循環に入るのであろう。

だが，いささか気になることがある。それは日本の企業や研究者が，近年いかにも縮こまっているように見える。ここで国粋主義を強調するつもりはないが，新しいことをやろうという勢いが，中国，韓国，それに欧米の方がむしろ盛んなようだ。

研究も事業もお隣りが豊作だとそれと同じ物を耕作する「隣り百姓」になってはいないか。これまでにないものを実用化するリスクを採る覚悟が不足ではないか。新しいことは何にもやらないのが安全だという，どこかの役所みたいな姿勢が蔓延すると，「将来の展望」などは絵に描いた餅になってしまう。これを克服してもっと希望のある将来を目指す具体策は，いくらでもありそうな気がする。

＝　文献とホームページ　＝

・ホームページの活用について：　本稿の各部分で，本来なら詳細な数値や表を示すべきところだが，最近の各社ホームページの充実振りを勘案して，そちらを参照いただくことにした。

[1]岡村廸夫：電気二重層キャパシタと蓄電システム，日刊工業新聞社，Mar., 1999.

[2]K. Mitsui, H. Nakamura and M. Okamura, “Capacitor-Electronic Systems (ECS) for ISG/Idle Stop Applications” EVS-19, (2002)

[3]M. Okamura and H. Nakamura, “Capacitor Storage System ECaSS™ ~Part 2: Problems and Improvements in Pure EDLCs ” The 12th international seminar on double layer capacitors and similar energy storage devices. Dec.9-11 (2002)

[4] 本田技研㈱ http://www.honda.co.jp/FCX/

[5] 日産ディーゼル㈱ http://www.nissandiesel.co.jp/

[6] 指月電機㈱ http://www.shizuki.co.jp/

[7] ㈱パワーシステムhttp://www.powersystems.co.jp/

[8] Honda R&D Technical Review，発行準備中。

[9] 佐々木正和：キャパシタハイブリッドバス・トラックの開発，電気化学会70年記念大会，2003年4月。

筆者：岡村研究所，URL: http://www.okamura-lab.com/

－■