

# 電気二重層キャパシタの RC 多段等価回路による充放電効率

峯村 明憲\* 八代 昌大  
辻 俊明 金子 裕良 阿部 茂 (埼玉大学)

## Charge and Discharge Efficiency of Electric Double Layer Capacitors with RC-ladder Equivalent Circuit

Akitoshi Minemura\*, Masahiro Yashiro,  
Toshiaki Tsuji, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe(Saitama University)

New elevators with electric double layer capacitor (EDLC) based energy storage system have been proposed and studied. The charge and discharge efficiency of EDLC is important to design the elevators. We have studied the efficiency in detail using the RC-ladder equivalent circuit, which has a voltage dependent capacitor. The results of simulations and experiments show the efficiency depends mainly on the charge and discharge current values and the time between charge and discharge. The EDLC of low internal-resistance is suited for the elevator and the efficiency about 90% is obtained. This paper shows the method of simulation and its parameter identification.

キーワード：電気二重層キャパシタ，等価回路モデル，充放電効率，エレベータ  
(Electric Double Layer Capacitor, Equivalent circuit, Charge and Discharge Efficiency, Elevator)

### 1. まえがき

電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor、以下 EDLC と記す) は二次電池に比べエネルギー密度は劣るが、出力密度と長寿命の点で優れており<sup>(1)</sup>、自発光道路紙やコピー機、無停電電源装置 (UPS) 等で実用化されている。著者らは EDLC をエレベータへ応用し、省エネ率の拡大と蓄電装置の長寿命化・保守軽減を目的とし研究を進めてきた<sup>(2)~(4)</sup>。電車<sup>(5)(6)</sup>やトラック<sup>(7)</sup>、自動車などでも EDLC 蓄電装置を用いる研究開発が盛んであるが、その充放電効率について詳細に調べた研究はない。

そこで本稿では EDLC の RC 多段等価回路<sup>(1)(8)~(10)</sup>と充放電パターン (EDLC 蓄電式エレベータの電圧電流パターン) から、EDLC の充放電効率について調査した結果を述べる。充放電効率は主に充放電電流値と充電終了から放電開始までの時間により決まること、充電終了から放電開始までの時間が 1 分以上になると RC 多段等価回路を用いる必要があること、充放電実験結果と RC 多段等価回路を用いた計算結果を比較すると電圧電流波形、充放電効率共に良く一致すること、高出力用途では低内部抵抗の EDLC が有利であること、エレベータ用途では低内部抵抗の EDLC を用いると約 90%の充放電効率が得られることなどが明らかとなった。なお、EDLC の等価回路計算には、静電容量の電圧依

存性を考慮したトロポゼイダル則による節点解析プログラムを作成し、解析に使用した。

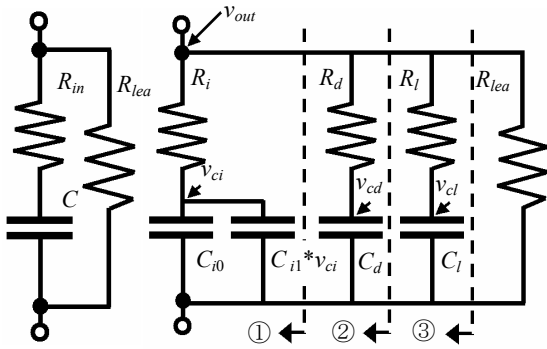
以下、2 章で EDLC の等価回路と回路計算、3 章で EDLC 蓄電式エレベータの充放電パターン、4 章で 2 種 (標準品と低内部抵抗品) の EDLC の充放電実験と回路計算との比較、5 章で考察、6 章でまとめを述べる。

### 2. 電気二重層キャパシタの等価回路

#### 〈2・1〉 等価回路と定数決定法

電気二重層キャパシタの等価回路を Fig.1 に、各等価回路のパラメータの例を Table 1, Table 2 に示す。EDLC は Fig.2 に示すエルナー社製の DEN 100F と DZ 100F を使用した。EDLC は共に耐電圧 2.5V である。Fig.1 の (a) は内部抵抗  $R_{in}$ 、静電容量  $C$ 、漏れ抵抗  $R_{lea}$  からなる一般的なキャパシタの等価回路(以下、簡易等価回路)である。Fig.1 の (b) は RC 多段配列からなる EDLC の等価回路(以下、RC 多段等価回路)である。EDLC の等価回路は様々なモデルが提案されている<sup>(1)(8)~(10)</sup>が、文献(8)の回路を採用した。簡易等価回路及び、RC 多段等価回路の定数決定法は付録にて示す。

Fig.1(b)の RC 多段等価回路において、 $R_i$ ,  $C_0$ ,  $C_1$  は秒単位、 $R_d$ ,  $C_d$  は分単位、 $R_l$ ,  $C_l$  は 10 分以上の特性を決める。図において①、②、③までの回路に  $R_{lea}$  を並列に接続した回路を各々 RC1 モデル、RC2 モデル、RC 3 モデルとする。



(a) Simple circuit (b) RC-ladder circuit

図1 EDLC 等価回路  
Fig. 1. Equivalent circuit of EDLC.



図2 供試 EDLC  
Fig.2. Photograph of the test cells.

表1 供試キャパシタの特性 (サンプル A)

Table 1. EDLC equivalent circuit model parameters (Sample A).

Simple circuit					
$R_m$	9.3mΩ	$C$	124F	$R_{lea}$	16kΩ
RC-ladder circuit					
$R_i$	9.7mΩ	$R_d$	7Ω	$R_l$	62Ω
$C_0$	75F	$C_d$	18F	$C_l$	36F
$C_n$	28F/V	$R_{lea}$	16kΩ		

表2 供試キャパシタの特性 (サンプル B)

Table 2. EDLC equivalent circuit model parameters (Sample B).

Simple circuit					
$R_m$	17mΩ	$C$	140F	$R_{lea}$	20kΩ
RC-ladder circuit					
$R_i$	17mΩ	$R_d$	8Ω	$R_l$	97Ω
$C_0$	89F	$C_d$	14F	$C_l$	25F
$C_n$	32F/V	$R_{lea}$	20kΩ		

## 〈2・2〉 静電容量の電圧依存性と回路計算手法

静電容量の電圧依存性とは印加された電圧により静電容量が変化する現象である<sup>(1)</sup>。簡易等価回路の静電容量は電圧

依存性を考慮しない。RC 多段等価回路では (1) 式のように RC の 1 段目の  $C_n$  のみ電圧依存性を考慮する。RC 多段等価回路は節点解析とトロペジダル則を用い、(2)~(8) 式より計算を行う<sup>(11)</sup>。静電容量は抵抗と電流源で表現し計算する。(3)~(8)式から電流を計算し、(2)式に代入すれば各節点での電圧が算出される。(6)~(8)式の  $C_x$  の値を  $v_{c_i}(t - \Delta t)$  から毎回計算すれば電圧によって変動する静電容量を正確に表現することができる。今回は RC1 段目にのみに電圧依存性を与えるので、(7)式内の  $C_d$  及び、(8)式  $C_l$  は一定値である。

$$C_{diff}(V) = C_{i0} + C_{i1} \times v_{c_i} \dots \dots \dots (1)$$

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ v_{C_i}(t) \\ v_{C_d}(t) \\ v_{C_l}(t) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_{lea}} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_l} & -\frac{1}{R_i} & -\frac{1}{R_d} & -\frac{1}{R_l} \\ -\frac{1}{R_i} & \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{C_i}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_d} & 0 & \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_{C_d}} & 0 \\ -\frac{1}{R_l} & 0 & 0 & \frac{1}{R_l} + \frac{1}{R_{C_l}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} J(t) \\ -J_{C_i}(t - \Delta t) \\ -J_{C_d}(t - \Delta t) \\ -J_{C_l}(t - \Delta t) \end{bmatrix}$$

$$\dots \dots \dots (2)$$

$$-J_{C_i}(t - \Delta t) = \frac{1}{R_i} v(t - \Delta t) + \left( -\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{C_i}} \right) v_{C_i}(t - \Delta t) \dots (3)$$

$$-J_{C_d}(t - \Delta t) = \frac{1}{R_d} v(t - \Delta t) + \left( -\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_{C_d}} \right) v_{C_d}(t - \Delta t) \dots (4)$$

$$-J_{C_l}(t - \Delta t) = \frac{1}{R_l} v(t - \Delta t) + \left( -\frac{1}{R_l} + \frac{1}{R_{C_l}} \right) v_{C_l}(t - \Delta t) \dots (5)$$

$$R_{C_i} = \Delta t / 2C_i \dots \dots \dots (6)$$

$$R_{C_d} = \Delta t / 2C_d \dots \dots \dots (7)$$

$$R_{C_l} = \Delta t / 2C_l \dots \dots \dots (8)$$

## 3. 電気二重層キャパシタ蓄電式エレベータ<sup>(2)</sup>

### 〈3・1〉 システム構成

EDLC 蓄電式エレベータのシステム構成を Fig. 3 に示す。EDLC を直流母線に直接接続し、充放電で電圧  $V$  が変化する特性を利用して EDLC の充放電制御を行う。回生運転時は EDLC の電圧  $V$  が最大電圧  $V_H$  以下であれば必ず EDLC に充電され、力行運転時には EDLC から電力が供給され、電圧が交流電源の整流電圧以下になれば、商用電源から電力が供給される。また回生時に EDLC が最大電圧  $V_H$  以上になる場合には、従来どおり制動抵抗を動作させる。

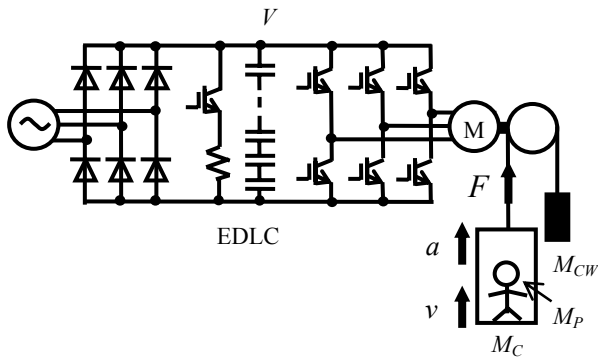


図3 エレベータのシステム構成  
Fig.3. System Configuration.

### 〈3・2〉 エネルギー計算モデル

EDLC 充放電サイクルの電力パターンを得るために、エレベータの力行および回生電力  $P$  を、速度パターンを Fig.4 の台形で近似し、(9)~(13)式を用いて計算する。

$$M_{CP} = M_C + M_P \times i/n \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$M_{CW} = M_C + M_P/2 \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$F = (M_{CP} + M_{CW}) \times a + (M_{CP} + M_{CW}) \times g + F_L \quad \dots\dots(11)$$

$$F_L = (M_P/2) \times g \times (1/\eta - 1) \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$P = F \times v \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 $M_C$ : かご質量、 $M_P$ : 定員乗客質量、 $M_{CP}$ : かごと乗客の質量、 $M_{CW}$ : 釣り合い重りの質量、 $n$ : 定員、 $i$ : 乗客数、 $g$ : 重力加速度、 $a$ : 加速度 (加速時=減速時)、 $v$ : 速度、 $v_0$ : 定格速度、 $N$ : ビル階数-1、 $FD$ : 階間距離、 $\eta$ : 機械系の効率 (定格速度時)、 $P$ : 走行パワー、 $F$ : かごをロープで上に引き上げる力、 $F_L$ : 機械系の効率を摩擦力に換算した値である。

典型的な住宅用エレベータの仕様を Table 3 に示す。住宅用エレベータは平均乗車人数が少なくほぼ空車の上昇 (回生運転) と下降 (力行運転) が繰り返される。空車走行の力行電力と回生電力は Fig. 4 のような形になる。Fig.4 はエレベータが平均走行距離(1階と 4.5階間 12.25m)を空車走行したときの電力パターンである。この電力パターンを各 EDLC の等価回路に与え、充放電シミュレーションを行う。

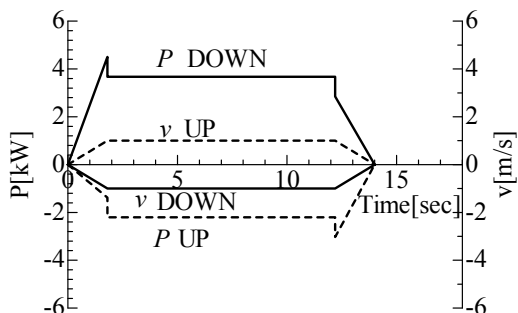


図4 エレベータの速度と電力特性 (空車時)  
Fig.4. Car velocity and power demand.  
(empty car)

表3 住宅用エレベータの仕様

Table 3. Elevator specification.

$N$	6	$FD$	3.5m	$v_0$	1.0m/s
$a$	0.55m/s <sup>2</sup>	$n$	9	$M_C$	600kg
$M_P$	600kg	$M_{CW}$	900kg	$\eta$	0.80

### 〈3・3〉 EDLC の容量

Fig.3 のシステムでは直列 EDLC の容量は、かごが1階から最上階の7階に移動した場合の位置エネルギー変化と、EDLC の電圧が  $V_L=270V$  から  $V_H=380V$  に上昇したときの蓄電エネルギー変化とがほぼ等しくなるように決めている。Table 3 のエレベータでは 2.5V・200F の EDLC を 170セル直列接続する必要がある、本論文では 2 章で用いた 100F の EDLC を 2 並列 170 直列で用いるとする。

## 4. 充放電実験

### 〈4・1〉 充放電サイクル

住宅用エレベータの1日の交通シミュレーションから、平均走行パターンと平均電力パターンを求め、この平均電力パターンで Fig.3 の EDLC に充放電が繰り返されるとして、充放電効率を求めた。1日の交通需要を Fig.5 に示す。この交通需要から、乱数を用いて乗客の乗車階、降車階、呼び発生時刻を決め、作成したイベントベースのシミュレータから、かごの動きと乗車人数を求めた<sup>(2)(3)</sup>。朝7時から夜11時までの間にエレベータが386往復するという結果が得られた。そこで、朝7時から夜11時までの間にかごが平均走行距離 (1階⇔4.5階) を400往復すると仮定すると、1往復 (サイクル) の周期は144秒となり、1サイクルの運転パターンは、上昇回生運転14秒、停止58秒、下降力行運転14秒、停止58秒となる。なお住宅用エレベータは乗客1,2名の運転がほとんどのため、かごは空車として電力計算をした。

### 〈4・2〉 EDLC1セルの充放電電力サイクル

EDLC の充放電シミュレーションと実験は、簡単のため EDLC1セルで行った。Fig.4 と 〈4.1〉 より EDLC1セルあたりの充放電電力サイクルを決定した。シミュレーションではこの電力サイクルを入力として 〈2.2〉 の回路計算手法で、EDLC の電圧と電流を計算した。

### 〈4・3〉 EDLC 充放電実験

シミュレーションから算出された EDLC1セルに流れる電流波形 (Fig.6) にて2種類の EDLC を充放電させ、充放電効率を求めた。以下に実験手順を述べる。

まず EDLC を 1.6V で一定時間 (12時間) 緩和充電させた。これはエレベータのシステム構成上、EDLC モジュールには常に3相交流から270Vで充電されているとし、1セルあたり 1.6V (270V/170cell) が常に充電されると考えたからである。次に Fig.6 の電流波形を用い充電を行い、充電が終了したあとは58秒放置、その後 Fig.6 の電流波形にて放電を行う。放電終了後は58秒放置し、測定された電圧

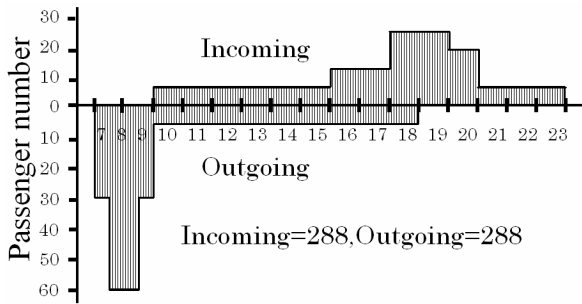


図5 住宅用エレベータの交通需要

Fig.5. Traffic demand of an Elevator.

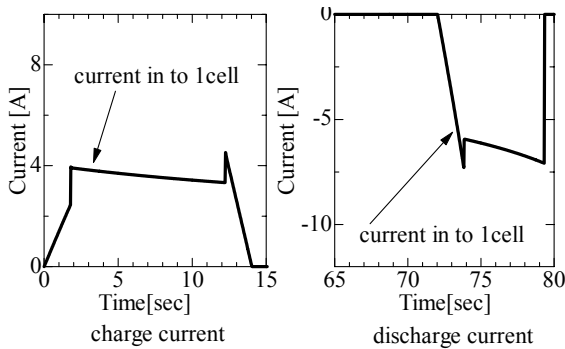


図6 EDLC 充放電電流 (試料 A)

Fig.6. Charge-discharge current(Sample A).

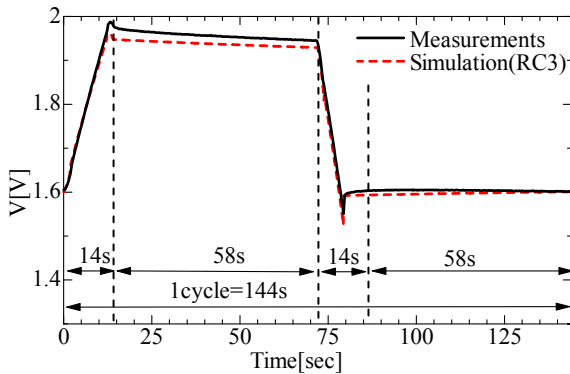


図7 EDLC の充放電特性 (試料 A)

Fig.7. Charge-discharge characteristic of EDLC(Sample A).

波形と電流波形から、(14) (15)式より充放電効率を求めた。

$$U = \int VI dt \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\eta = \frac{U_{out}}{U_{in}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 $\eta$  : 充放電効率、 $U_{in}$  : 入力されたエネルギー量、 $U_{out}$  : 出力されたエネルギー量である。

EDLC1 セルの電圧波形を Fig.7 に示す。また Fig.7 の測定された電圧波形を基準とした、測定値とシミュレーション値(RC3 モデル) との誤差を Fig.8 に示す。等価回路の違いによる電圧波形の相違を Fig.9 に示す。Fig.9 は充放電 1

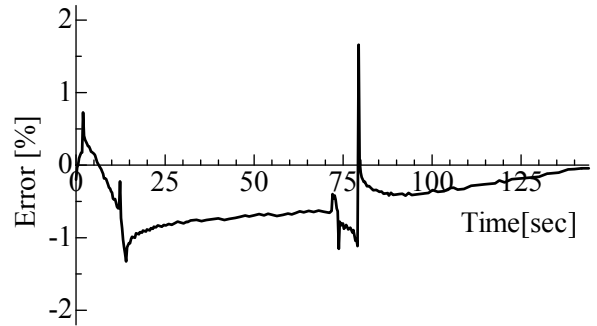


図8 測定値と RC3 等価回路モデルとの比較 (試料 A)

Fig.8. Comparison between experiments and RC3 equivalent circuit model (Sample A).

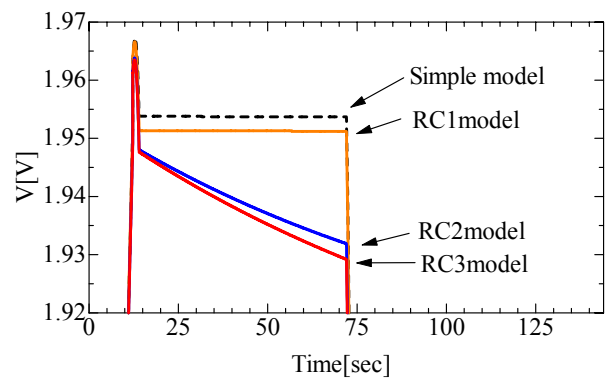


図9 各等価回路の充放電特性 (試料 A)

Fig.9. Charge-discharge characteristics of equivalent circuits (Sample A).

表4 充放電効率

Table 4. Charge and discharge efficiency.

Sample A				
Measured	Simple	RC1	RC2	RC3
89.1%	94.7%	94.7%	90.7%	90.0%
Sample B				
Measured	Simple	RC1	RC2	RC3
84.9%	90.7%	90.7%	87.9%	87.6%

サイクルの内、最も違いが生じた充電終了から放電開始までの期間の拡大図である。

2種類のEDLCの充放電効率のシミュレーションと測定結果を Table 4 に示す。測定値を見ると、低抵抗品は標準品に比べ約4%充放電効率が高い。また簡易等価回路は測定値に比べ約6%の誤差があり、多段等価回路で2段まで考慮した RC2 では誤差が2~3%に減少する。これより今回の充放電パターンの場合少なくとも RC2 段目まで考慮する必要がある。

Fig.9 から充電終了から放電開始までの時間が長い程、各等価回路間の電圧の相違が大きくなり、充放電効率の相違になることが分かる。4 等価回路は全て漏れ抵抗を含んでいるため、充電終了後の電圧降下は漏れ抵抗が主因ではない。

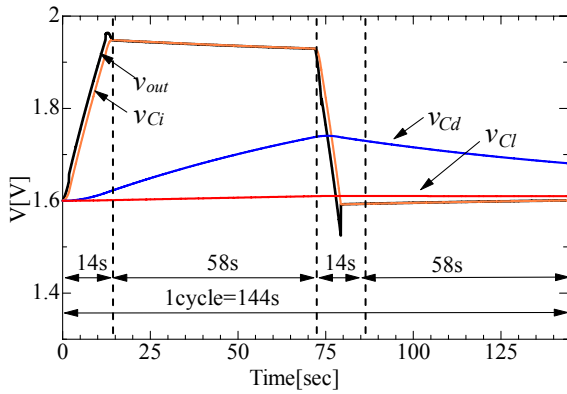


図 10 EDLC 内部電圧の推移 (試料 A)

Fig.10. Transition of internal voltage of EDLC (Sample A).

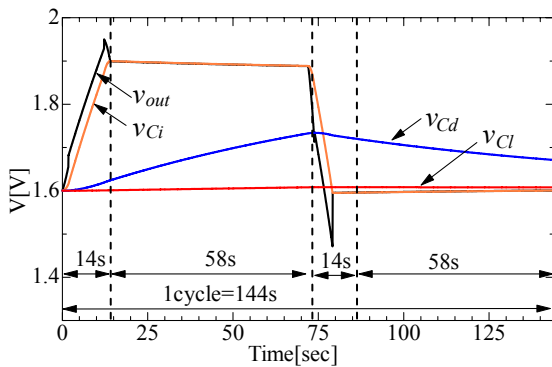


図 11 EDLC 内部電圧の推移 (試料 B)

Fig.11. Transition of internal voltage of EDLC (Sample B).

RC3 モデルの等価回路における、各キャパシタ  $C_i, C_d, C_l$  の電圧推移を Fig.10, 11 に示す。

このシミュレーション結果から、RC2 段目への電荷の移動が確認できるが、RC3 段目への電荷の移動はほとんどない。これは充放電効率にも明確に現れている。このことから等価回路は RC2 段目まで考慮する必要があることがわかる。

## 5. 考察

上記エレベータでは運転パターンを、上昇回生運転 14 秒、停止 58 秒、下降力行運転 14 秒、停止 58 秒とした。そこで、充電期間と放電期間をこの 5 倍に設定 (回生運転 70 秒、停止 58 秒、力行運転 70 秒、停止 58 秒) し、同様に充放電試験を行った。これは、電車など、エレベータより充放電期間が長い場合を想定し、RC1 段目の静電容量の電圧依存性、RC2 段目、RC3 段目が充放電効率に与える影響を明らかにすることが目的である。なお、回生運転・力行運転の時間は文献(6)を参考に決定した。

電力特性を Fig.12 に、EDLC の電圧特性を Fig.13 に示した。また、EDLC 内部電圧の推移を Fig.14 に、充放電効

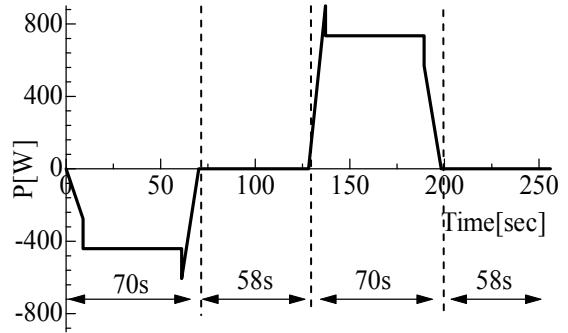


図 12 電力特性

Fig.12. Power demand.

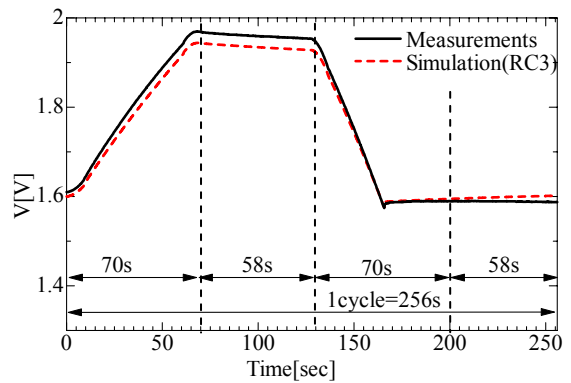


図 13 EDLC の充放電特性 (試料 A)

Fig.13. Charge-discharge characteristic of EDLC(Sample A).

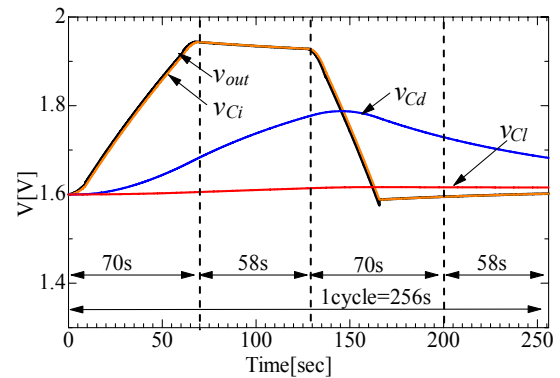


図 14 EDLC 内部電圧の推移 (試料 A)

Fig.14. Transition of internal voltage of EDLC (Sample A).

表 5 充放電効率

Table 5. Charge and discharge efficiency.

Sample A				
Measured	Simple	RC1	RC2	RC3
91.1%	98.9%	98.9%	94.6%	93.0%
Sample B				
Measured	Simple	RC1	RC2	RC3
90.0%	97.9%	97.9%	95.1%	94.6%

率の算出結果を Table 5 に示した。

充電時間が 14 秒から 70 秒に伸び、充放電電流が下がるため、効率は上がるが、RC2 段目が充放電効率へ大きく影響していることがわかる。測定値と RC3 モデルとの電圧の誤差は、試料 A・B 共に±2%以内であった。しかし、試料 B の充放電効率が測定値とシミュレーションで大きく異なっており、等価回路の更なる精度の向上が必要である。

## 6.まとめ

本論文では正確な充放電効率を求めることを目的とし、EDLC の RC 多段等価回路と充放電パターン (EDLC 蓄電式エレベータの電圧電流パターン) を用い、EDLC の充放電効率を調べた。EDLC の等価回路計算には、静電容量の電圧依存性を考慮したトロペゾイダル則による節点解析プログラムを用いた。

その結果、充放電効率は主に充放電電流値と充電終了から放電開始までの時間により決まること、充電終了から放電開始までの時間が 1 分以上になると RC 多段等価回路を用いる必要があること、エレベータ用途では低内部抵抗の EDLC を用いると約 90%の充放電効率が得られることなどが明らかとなった。

## 文 献

- (1) 岡村勉夫:「電気二重層キャパシタと蓄電システム第3版」, 日刊工業新聞社 (2005)
- (2) 岩田・峯村・八代・金子・阿部:「電気二重層コンデンサ蓄電式エレベータの省エネ性能」, 日本機械学会 TRANSLOG2006,S3-2 3215 (2006)
- (3) 峯村・八代・金子・阿部:「直列電気二重層コンデンサの分圧抵抗による電圧バランス化」, H.19 電気学会全国大会 4-018(2007)
- (4) 八代・峯村・金子・阿部:「再生電力蓄電電源用電気二重層コンデンサの充放電効率」, H.19 電気学会全国大会 4-020(2007)
- (5) 安部・曾根・高木・野木:「高速回生車導入時におけるエネルギー蓄電素子の充放電制御一期待される効果と検討一」, 日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 3411(2006)
- (6) 田口・小笠・秦・飯島・大津山・舟木:「インバータ入力直列蓄電装置の動作と効果」, 日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 3409(2006)
- (7) 岡崎・佐々木:「キャパシタ応用による高効率ハイブリッドトラック・バス」, 自動車技術, Vol.61, No.9 (2007)
- (8) Luis Zubieta, Richard Bonert: "Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications", IEEE Transactions on industry applications, Vol.36, No.1, pp199-205 (2000)
- (9) 山田・山城・佐々木・荒木:「電気二重層キャパシタの等価回路モデルに関する一考察」, 電学論 B, 123 巻, 8 号数 pp1011-p1017 (2003)
- (10) 山田・仲村・佐々木・荒木:「高出力密度型電気二重層キャパシタの電気二重層キャパシタ特性に関する考察(5)」, H.14 電気学会全国大会 7-128(2002)
- (11) 雨谷・長岡・馬場・菅:「電気・電子回路解析プログラム EMTP 入門」, 社団法人電気学会(2003)

## 付録

### 1. 簡易等価回路の定数決定法<sup>(1)(3)</sup>

満充電 2.5V から 1Ω の抵抗負荷放電を行い、放電開始直後の電圧降下より、式(16)で内部抵抗  $R_{in}$  を求め、2.5V からの  $R_{out}=10\Omega$  の抵抗負荷放電電圧波形より、式(17)で静電容量  $C$  を求めた。漏れ抵抗  $R_{lea}$  は定格電圧充電後、24 時間緩和充電し、その後 24 時間経過時の自己放電電圧特性より式(18)から求めた。

$$R_{in} = \Delta V / I \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$C = -t / ((R_{in} + R_{out}) \cdot \ln(V_1 / V_0)) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$R_{lea} = -t / (C \cdot \ln(V_3 / V_2)) \quad \dots\dots\dots(18)$$

$R_{in}$ : 内部抵抗、 $\Delta V$ : 放電直後の電圧降下、 $I$ : 電流、 $C$ : 静電容量、 $R_{out}$ : 負荷抵抗、 $V_0$ : 放電開始直前の電圧値、 $V_1$ : 放電終了直後の電圧値、 $R_{lea}$ : 漏れ抵抗、 $V_2$ : 緩和充電終了直後の電圧値、 $V_3$ : 24 時間経過後の電圧値である。

### 2. RC 多段等価回路の定数決定法<sup>(8)(9)</sup>

まず EDLC の端子を短絡させ、12 時間放置する。次に、0V から定電流 10A で満充電 2.5V まで充電し、充電を終了させる。その後 30 分間自然放電を行い、得られた端子電圧波形から各パラメータを算出した。測定された電圧波形を Fig.15 に示す。

$C_0, C_1$  は文献(8)(9)のどちらの方法でも算出結果は同じ値となったが、文献(8)は測定された電圧波形から数点の電圧値を抽出し算出するのに対し、文献(9)は全充電期間の電圧波形を計算対象とし、その結果からパラメータを決定しており、データの変動を受けにくい。

文献(8)は、 $R_d$  は充電終了時の電圧から 50mV 電圧が降下したときの時間と電圧値から算出し、 $R_l$  は、 $C_l$  を決定した時点での電圧値を基準に更に 50mV 電圧が降下したときの時間と電圧値から算出する。これに対し、我々は、セルの電圧降下ではなく、時間に着目し、 $R_d$  は充電終了後 60 秒経過したときの電圧値から、 $R_l$  は充電終了後 600 秒経過したときの電圧値から算出した。我々の算出方法で得られた等価回路 (Type1) と、文献(8)の方法で得られた等価回路 (Type2) を用いたシミュレーション結果を Fig.15 に示す。

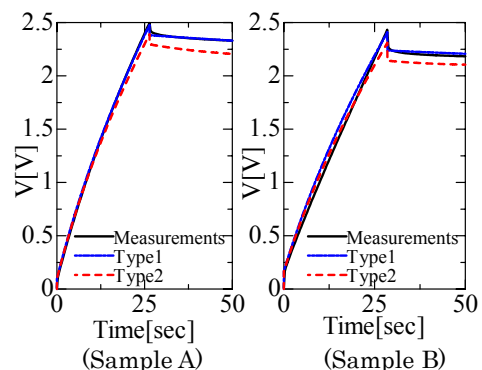


図 15 測定値と計算値との比較

Fig.15. Comparison of actual measurement and simulation.