

# 3215 電気二重層コンデンサ蓄電式エレベータの省エネ性能

## Energy Saving Performance of Elevators with Electric Double Layer Capacitor based Energy Storage System

○岩田 将哉 (埼玉大)      峯村 明憲 (埼玉大)      八代 昌大 (埼玉大)  
金子 裕良 (埼玉大)      阿部 茂 (埼玉大)

Masaya IWATA, Saitama University, Shimo-okubo 255, Sakura-ku, Saitama city, Saitama  
Akitoshi MINEMURA, Saitama University  
Masahiro YASHIRO, Saitama University  
Yasuyoshi KANEKO, Saitama University  
Shigeru ABE, Saitama University

The mechanical loss of elevator movement is considerably small and the elevator with few passengers in down movement has high power demand during acceleration, as well as high power restitution during deceleration. In the up movement, the reverse phenomenon is observed. The number of up-down cycle exceeds 300 times in a day. However, the regenerative energy is consumed in the braking resistors. Then, the elevators with Ni-MH battery based energy storage system was developed and in use, but the energy saving is 20~31%. We have studied the elevator with electric double layer capacitor (EDLC) based energy storage system. The EDLC is connected directly to the dc bus which is the input of the inverter. The simulation results shows that the energy saving over 40% is possible even with small EDLC, the EDLC with small inner resistance is important and the voltage balance circuit with resistors can be used.

**Key Words:** Electric double layer capacitor, Elevator, Energy saving, Energy simulation

### 1. まえがき

標準形エレベータは、ビルの回生電力負荷が不足するため、回生電力を制動抵抗で消費している。Ni-MH 電池に蓄電する方式<sup>(1)</sup>が実用化されているが、省エネ率は20~31%と小さい。電気二重層コンデンサ (Electric Double Layer Capacitor, 以下 EDLC と記す) を利用すれば、省エネ率の拡大と蓄電装置の長寿命化・保守軽減が期待できる。回生電力を蓄電し力行時に再利用する乗り物は多いが、エレベータほど駆動系と走行系の損失が小さく、力行回生サイクル数 (約 300 回/日) の多いものはない。さらに住宅用エレベータは平均乗車人員が少なく常に空車運転に近い場合、上昇時の回生運転と下降時の力行運転が交互に繰り返される。このため小容量の EDLC で大きな省エネ効果が期待できる。

我々はエレベータの交通シミュレーション結果をもとに一日のエネルギー計算を行った結果、小容量の EDLC で 40% 以上の省エネ効果が得られた。EDLC の必要容量の計算法、EDLC の内部抵抗と充放電効率、直列 EDLC の電圧バランス化のための分圧抵抗値などの検討結果も紹介する。

### 2. 電気二重層コンデンサ蓄電式エレベータ

#### 2.1 システム構成

回生電力を EDLC に蓄電する回路としては、直流母線に直接接続する方式<sup>(2)</sup>と DC-DC コンバータを介して接続する方式<sup>(3)</sup>がある。Fig. 1 の直接接続方式は DC-DC コンバータの損失がない上、EDLC の充放電で直流電圧  $V$  が変化する特性を利用して EDLC の充放電制御が可能である。すなわち回生運転時は 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。また回生運転時に EDLC が最大電圧  $V_H$  以上になる場合は、従来どおり制動抵抗を動作させればよい。

我々は省エネ率拡大とコスト削減から、直接接続方式を選択した。直接接続方式では EDLC の直列数が 100 以上にもなるが、分圧抵抗で個々の EDLC の電圧バランス化が可能である。これは EDLC が小容量で済むため、分圧抵抗の値が大きくなりその損失が小さくなることと、自然放電の時定数に比べ充放電周期がはるかに短く、自然放電による損失が全体の

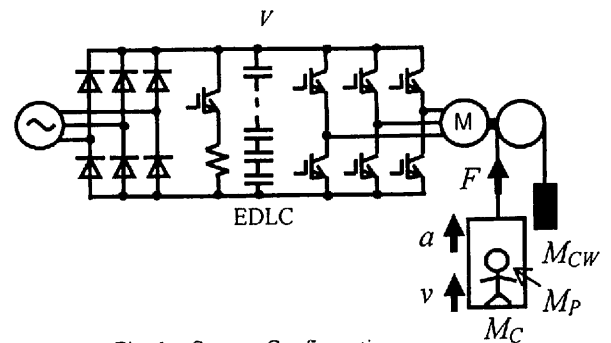


Fig. 1 System Configuration.

効率に与える影響が小さいためである。

またこの方式は停電時でも、EDLC に蓄電されたエネルギーで短時間走行可能なため、従来の停電時自動着床装置が不要となる。

#### 2.2 エネルギー計算モデル<sup>(4)</sup>

エレベータの力行および回生エネルギー  $E$  は、速度パターンを Fig. 2 の台形で近似し、(1)~(4)式を用いて計算した。

$$M_{CP} = M_C + M_P \times i/n \quad M_{CW} = M_C + M_P/2 \quad (1)$$

$$F = (M_{CP} + M_{CW}) \times a + (M_{CP} - M_{CW}) \times g + F_L \quad (2)$$

$$F_L = (M_P/2) \times g \times (1/\eta - 1) \quad (3)$$

$$P = F \times v \quad (4)$$

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 (走行時は定格速度時の値が速度に依らず働くと仮定する)

典型的な住宅用エレベータの仕様を Table 1 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. 2 のような形になる。

Table 1 Apartment house elevator specifications.

$N=6$	$FD=3.5\text{m}$	$v_0=1.0\text{m/s}$	$a=0.55\text{m/s}^2$	$n=9$
$M_c=600\text{kg}$	$M_p=600\text{kg}$	$M_{cW}=900\text{kg}$	$\eta=0.80$	

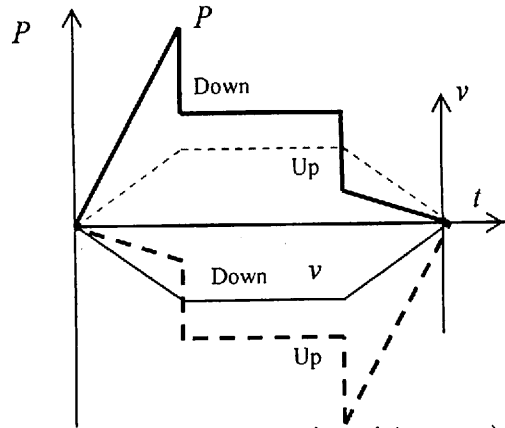


Fig. 2 Car velocity and power demand. (empty car)

### 2.3 電気二重層コンデンサの容量

EDLCは高価なため、小容量で大きな省エネ効果を得たい。そこで空車のかごが1階と最上階を往復する間に、EDLCの電圧が最小と最大になる容量を基準に考える。一日の電力消費の大きな変動は吸収できないが、毎往復の電力平準化が可能で大きな省エネ効果が期待できる。

エレベータの釣合い重り質量  $M_{cW}$  は、定員の50%の乗客が乗った時に釣り合うように決められるので、EDLCの最大電圧を  $V_H$  と最小電圧を  $V_L$  とすれば、EDLCの概略の容量  $C$  は次式で求まる。

$$C(V_H^2 - V_L^2)/2 = (M_p/2) \times g \times FD \times N \quad (5)$$

交流電源を3相200Vとし  $V_H=380\text{V}$ ,  $V_L=270\text{V}$ ,  $M_p=600\text{kg}$ ,  $FD=3.5\text{m}$ ,  $N=6$  とすると、 $C=1.73\text{F}$  となる。また平均階数から  $N=3.5$  とすると、 $C=1.01\text{F}$  となる。 $V_H$  を高く選べば  $C$  は小さくなるので、 $V_H$  はインバータが許容する最大電圧に選ぶと良い。

### 3. エネルギーシミュレーション方法

住宅用エレベータの一日の交通需要として、Fig. 3 に示す需要を仮定した。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、イベントベースのシミュレータでかごの動きと乗車人数を求めた。エレベータは一日で386往復し、その内で乗客が1人の場合は242往復(63%)であった。シミュレーション結果の一部をFig. 4に示す。ここまでは従来の交通シミュレーションと同じである。

エネルギーシミュレーションの手順を次に示す。

- EDLCを270Vに充電する。
- 一走行毎に、出発階と到着階と乗車人数から走行エネルギーを加速、定速、減速の3段階に分けて計算し、それぞれを  $E_i$  ( $i=1,2,3$ ) とする。 $E_i < 0$  なら回生。
- EDLCの電圧を  $V$  とし、 $V_H$  にまで充電する ( $V_L$  まで放電する) に要するエネルギー  $E_M$  を計算する。
- $E_i > 0$   $E_i \leq E_M$  : 放電し(e)へ  
 $E_i > 0$   $E_i > E_M$  :  $E_M$  だけ放電し、残りは交流電源か

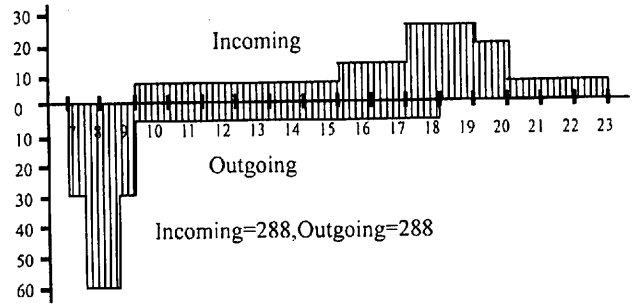


Fig. 3 Traffic demand of an apartment house elevator.

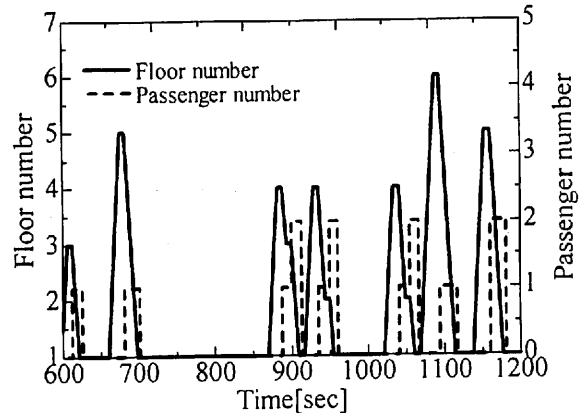


Fig. 4 Traffic simulation results of an apartment house elevator.

Table 2 Office building elevator specifications.

$N=6$	$FD=4.0\text{m}$	$v_0=1.0\text{m/s}$	$a=0.55\text{m/s}^2$	$n=9$
$M_c=600\text{kg}$	$M_p=600\text{kg}$	$M_{cW}=900\text{kg}$	$\eta=0.80$	

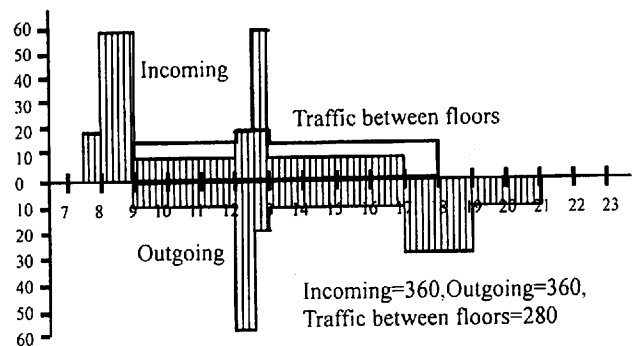


Fig. 5 Traffic demand of an office building elevator.

ら給電し、(e)へ

$$E_i < 0 \quad |E_i| \leq E_M : \text{充電し(e)へ}$$

$$E_i < 0 \quad |E_i| > E_M : E_M \text{ だけ充電し、残りは制動抵抗で}$$

消費し、(e)へ

(e) if ( $i < 3$ ) then  $i=i+1$  (c)へ else (b)へ

なお、インバータ・モータの効率  $\eta_{IM}$  と EDLC の充放電効率  $\eta_C$  を考慮する時は、放電エネルギーを  $1/(\eta_{IM} \times \eta_C)$  倍し、充電エネルギーを  $(\eta_{IM} \times \eta_C)$  倍した。

また、比較のため乗用（オフィス用）エレベータのシミュレーションも行った。乗用エレベータの仕様を Table 2 に、一日の交通需要を Fig. 5 に示す。乗用エレベータの交通需要には階間交通も入れた。

#### 4. シミュレーション結果

##### 4.1 EDLCの充放電効率

EDLCの充放電効率は、内部抵抗と充放電サイクルの電流値で決まる。Table 1のエレベータを空車で約12m一往復させた場合についてFig. 2の電力波形をもとにEDLCの充放電効率を計算した。2.5V, 170Fで内部抵抗5.9mΩ (1ΩF)のEDLCを170個直列接続し、90%電圧(380V)まで使用できるとすると、充電効率が $\eta_{CG}=0.98$ 、放電効率が $\eta_{DC}=0.96$ となった。 $\eta_{CG} > \eta_{DC}$ となるのは放電電流が充電電流より大きいためである。

以下一日のシミュレーション結果について述べる。

##### 4.2 EDLC容量と省エネ率

EDLCの $\eta_{CG}=0.98$ ,  $\eta_{DC}=0.96$ とし、容量を0.5F~2.5Fまで変化させ省エネ率を調べた。計算結果をFig. 6に示す。なお省エネ率は(6)式で計算した。

$$\text{省エネ率} = 1 - \frac{\text{回生有の消費エネルギー}}{\text{回生無の消費エネルギー}} \quad (6)$$

最近のエレベータは機械室レスエレベータであるため、2:1ローピングで $\eta=0.80$ 、永久磁石電動機のギヤレス巻上機とインバータで $\eta_{IM}=0.95 \times 0.95=0.90$ とした。Fig. 6を見れば住宅用エレベータでは $C=1.2F$ 以上で省エネ率が飽和し、EDLCが小容量で良いことが確認できる。乗用エレベータでは住宅用エレベータに比べ、少し大きな容量のEDLCが必要である。これらは2.3の概略計算結果と良く一致している。

##### 4.3 一日の省エネ率の変化

Fig. 7は30分毎の省エネ率の一日の変化である( $C=1.2F$ )。住宅用エレベータの場合、朝は住民の下り需要で回生運転主体となるため、省エネ率は60%以上になり、逆に夜は上り需要で力行運転主体となるため省エネ率が30%まで低下する。一日の平均をとるとFig. 5の42%となる。乗用エレベータの場合は需要パターンが住宅用の逆になるため、一日の省エネ率の変化も住宅用と逆になっている。

##### 4.4 EDLCの充放電効率と省エネ率

住宅用エレベータで充放電効率 $\eta_C = \eta_{CG} = \eta_{DC}$ とし、 $\eta_C=0.90, 0.92, 0.95, 0.97, 1.00$ と変化させたときの省エネ率をFig. 8に示す。EDLCの充放電効率が省エネ率に大きく影響することがわかる。EDLCの充放電効率を上げるには内部抵抗の小さなEDLCを使用することが不可欠である。

文献(1)ではNi-MH電池蓄電方式の省エネ率が31%となっている。この原因はNi-MH電池のバッテリーWh効率 $\eta_B=0.84$ (=充電効率×放電効率)の悪さと、EDLCの直結方式では不要なチョップパ効率の $\eta_{CH}=0.95$ が原因と考えられる。

##### 4.5 EDLCの分圧抵抗

4.1, 4.2の結果から2.5V, 200FのEDLCを170個直列接続(1.2F)し、90%電圧まで使用するとすれば、EDLCの資料では各EDLCに約200Ωの分圧抵抗を入れる必要がある。EDLCの時定数CRは40000秒(約11時間)と充放電間隔に比べ十分長く、損失も $380^2 / (200 \times 170) = 4.2W$ と無視できることが分かる。

#### 5. 考察

##### 5.1 乗客1名平均距離走行の走行エネルギー

Table 1の住宅用エレベータの平均走行距離Dは $D=3.5m \times 3.5=12.25m$ である。インバータ・モータの効率 $\eta_{IM}$ とEDLCの充放電効率 $\eta_C$ を共に100%と仮定し、この距離をエレベータが一往復するときの省エネ率を求めた結果をTable 3に示す。機械系の損失であるロープの曲げやガイドシユウの摩擦抵抗が機械系効率 $\eta$ で反映されている。これを見れば次のことが分かる。

(1) EDLC有と無の差は制動抵抗での損失であり、かなり大

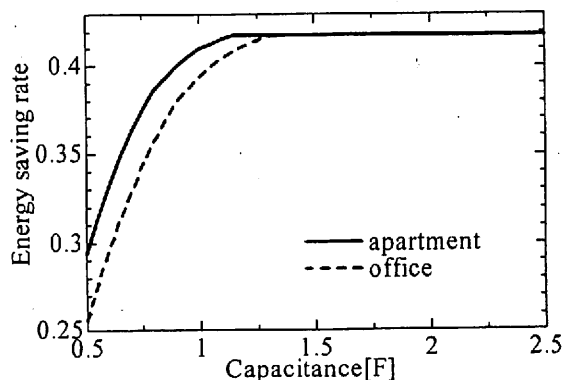


Fig. 6 Relationship between capacitance and energy saving rate.

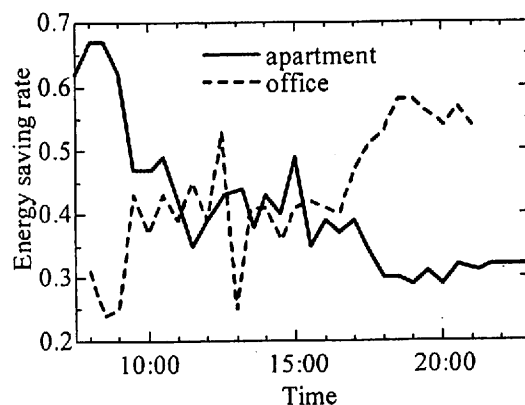


Fig. 7 Energy saving rate during one day operation.

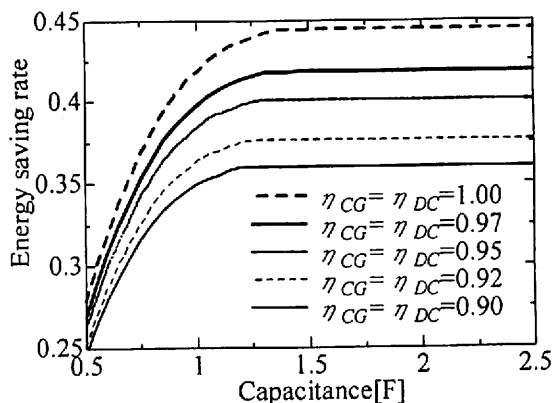


Fig. 8 Relationship between capacitance and energy saving rate. ( $\eta_C = \eta_{CG} = \eta_{DC}$ ,  $\eta_C = 0.90, 0.92, 0.95, 0.97, 1.00$ )

Table 3 Energy consumption of one round trip.

Passenger	With EDLC, Without EDLC, Energy Saving		
A Up=1, Down=0	26011J,	45019J,	42%
B Up=0, Down=1	10004J,	37015J,	73%

きい。

(2) Bの方が省エネ率が高いのは乗客の位置エネルギー変化のためである。乗客1人の位置エネルギーは $(600/9) \times 9.8 \times 12.25 = 8003J$ で、EDLC有の場合はAとBでこの2倍の差が出ている。

(3) EDLC の容量が十分で、朝出かけた人が必ず夜帰宅すれば、一日の省エネ率は 58%が期待できる。 $\eta_{IM}=0.90$ 、 $\eta_C=0.94$  の二乗をかけると、42%となり、Fig. 6 の計算結果と一致する。

### 5.2 エレベータの速度

Fig. 9 にエレベータの定格速度を 1.5m/s とした場合の省エネ率の計算結果を示す。これを見れば定格速度による省エネ率の差はほとんどないことが分かる。

### 5.3 避難用エレベータへ適用<sup>(4)</sup>

筆者らはビル火災時などの避難にエレベータを利用することを検討してきた。そして避難時は下方交通となるため、乗客の位置エネルギーをうまく利用すれば、エレベータは回生電力運転が主となり、小容量の蓄電装置を付加するだけで、停電時でも避難運転が可能となることを示した。

EDLC 蓄電式エレベータは、通常時は省エネで貢献し、非常時は停電でも避難運転可能である。また EDLC が長寿命であることは保守や信頼性の面でも好都合である。

### 6. むすび

電気二重層コンデンサ蓄電式エレベータでは、(1) EDLC を直流部に直結する方式が高効率、充放電制御不要の点で有利であること、(2) 必要な EDLC は小容量つまり安価で、内部抵抗の小さな EDLC を用いれば省エネ率を、40%以上にできること、(3) 必要な EDLC が小容量で、一日の充放電回数が数百回に及ぶため、EDLC の電圧アンバランス対策は安価な分圧抵抗で十分なことなどを明らかにした。この他 EDLC は電池に比べ長寿命で保守が容易なことから、将来の蓄電式エレベータや避難用エレベータに最適と考える。

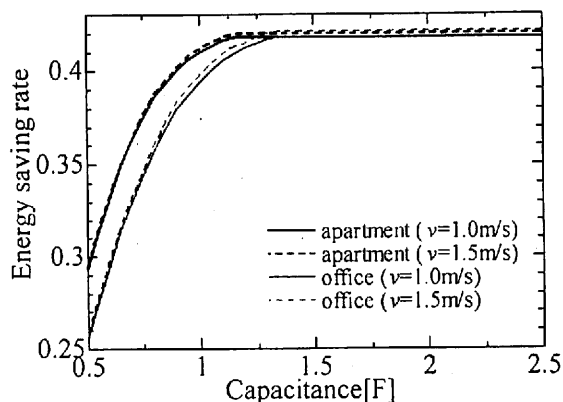


Fig. 9 Relationship between capacitance and energy saving rate.

### 文 献

- (1) 楠間・小林・冨永・菅・荒木・池島・田島, “回生電力蓄電システムによる省エネエレベーターの開発”, 平成 13 年度電気学会全国大会, 4-191, p.1505-1506
- (2) 堺, “キャパシタを使用したエネルギー回生式エレベータシステムの開発”, 建築設備&昇降機 No.8 (1997.7)
- (3) A. Rufer and P. Barrade, “A Supercapacitor-Based Energy-Storage System for Elevators With Soft Commutated Interface”, IEEE TIA, VOL.38, NO.5, (2002)
- (4) 岩田・金子・阿部, “回生蓄電電源による停電時にも運転可能な避難用エレベータの実現可能性”, 平成 18 年度電気学会全国大会, 4-234, p.373-374