

動的稼働台数制御による エレベーター群管理システムの省エネ機能

Elevator-Group Control System to Reduce Energy Consumption by Dynamic Control of Number of Running Cars

坂巻 慶行 杉原 俊雄 田中 俊明
 ■ SAKAMAKI Yoshiyuki ■ SUGIHARA Toshio ■ TANAKA Toshiaki

多数のかごが設置されているエレベーターシステムは、利用者が多くない時間帯であっても複数のかごを運行させることがある。その結果、利用者の待ち時間を必要以上に短くして電力をむだに消費してしまう。時間帯によって変化する交通需要に応じて、トレードオフの関係にある待ち時間と省エネのバランスを考慮した省エネ方式が必要である。

東芝は、エレベーター群管理システムにおいて、階間の交通需要に応じてかごの稼働台数（以下、稼働台数と記す）を動的に調整する省エネ機能を開発した。学習アルゴリズムを適用し、数分周期で平均稼働台数を制御することで、待ち時間と省エネのバランスをとることができる。

In elevator systems with many cars, multiple cars continue to run in order to decrease waiting times even during time zones of lower traffic demand, resulting in wasted energy consumption. As traffic demand in an office building varies throughout the day, it is necessary to establish an adequate energy-saving function considering the tradeoff between waiting time and energy consumption under various traffic demand conditions.

Toshiba has developed an elevator-group control system that provides such an energy-saving function using dynamic control of the number of running cars (DCNRC). DCNRC increases or decreases the number of running cars at intervals of every few minutes, adjusting the average number of running cars to achieve a balance between waiting time and energy consumption.

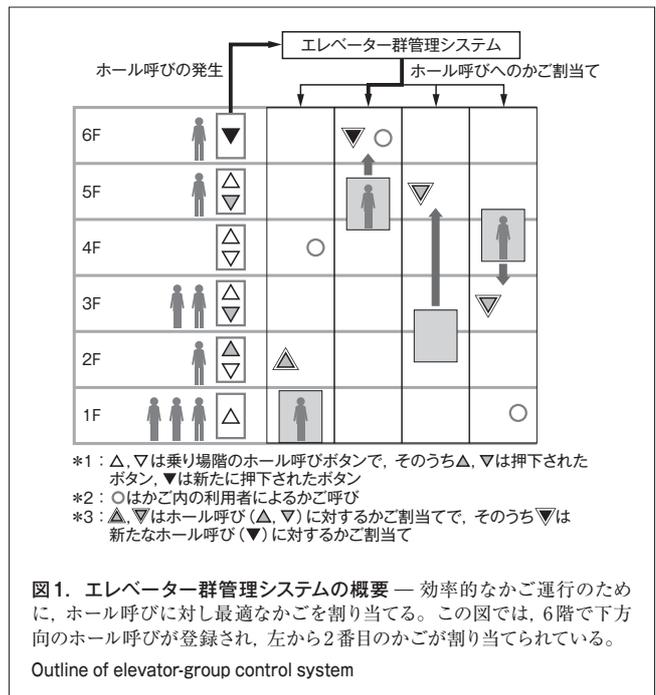
1 まえがき

階間の交通量が多い大規模ビルでは、輸送力向上のために多数のエレベーターかごが設置される。これらのかごを効率的に運行制御するためのシステムをエレベーター群管理システムと呼ぶ（図1）。

エレベーターの利用者が乗り場階に設置される上下ボタンを押下する（以下、ホール呼びと記す）と、システムはその階床にかごを割り当てて移動させる。かごが到着しドアが開くと、利用者はかごに乗車する。利用者がかご内で行先階に対応するボタンを押下する（以下、かご呼びと記す）と、ドアが閉じた後にシステムはかごを行先階に移動させる。

ホール呼びに対して割り当てるかごを決める手法（かご割当制御方式）によって、エレベーターのサービス性能や省エネ性能が変化する。したがって、かご割当制御方式について多くの研究が行われている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

利用者が乗り場に到着してからかごに乗り込むまでの時間を待ち時間と呼び、それはサービス性能を表す代表的な指標となっている。かご設置台数は出勤時間帯などの最繁時の待ち時間を考慮して定められる。かご設置台数が多いと、交通量が多くない時間帯であっても複数のかごを運行させることがある。これにより、利用者の待ち時間を必要以上に短くして電力をむだに消費してしまう問題がある。そのため、時間帯によって変化する交通需要に応じて、トレードオフ関係にある待ち



時間と省エネのバランスを考慮した省エネ方式が必要である。東芝は、今回新たに動的稼働台数制御を用いた省エネ機能を開発した⁽⁵⁾。通常の間引き運転では稼働台数を離散値として設定するが、開発した動的稼働台数制御では、数分ごとの短い周期のなかで稼働台数を切り替えることで、平均稼働台

数を連続値で設定できる。開発した省エネ機能は、利用者の待ち時間が許容範囲を逸脱しないように、交通需要に応じて平均稼働台数を学習し、その学習結果に基づいて動的稼働台数制御を行う。交通需要に応じてきめ細かく稼働台数を自動で調整でき、待ち時間と省エネのバランスがとれたかご運行制御を行うことができる。

ここでは、動的稼働台数制御を用いた省エネ機能の概要と、この機能の製品化への取組みについて述べる。

2 従来のエレベーター省エネ機能の課題

エレベーターにおける従来の省エネでは、かごの速度を落としたり、ドアの開いている時間を長くしたりする機能が用いられることがあるが、利用者に違和感を与えるおそれがあるといった問題がある。そこで、このように直接的な省エネ機能ではなく、群管理によるかご割当てを応用した省エネが行われることがある。

一般に、エレベーター群管理システムは、利用者の待ち時間が短いことが商品性として重視される。待ち時間を短縮するかご割当て制御方式について、多数の研究が行われており、人工知能 (AI: Artificial Intelligence) や、ファジィ、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) などを応用した様々な手法が提案されている⁽³⁾。当社でも、将来交通需要を考慮し待ち時間を短縮するかご割当て制御方式を開発している⁽¹⁾。

しかし、このようなかご割当て制御方式では待ち時間の短縮を追求するなかで、利用者が多くない場合でも利用者の待ち時間を必要以上に短くすることで、エネルギーをむだに消費して多数のかごを運行させることがある。このため、利用状況を考慮した省エネ対策が行われる。

オフィスビルのように交通需要のパターンが定まっている場合、利用者の少ない閑散時に稼働するかごを減らす間引き運転が手動設定で行われることがある。しかし、一般的にはエレベーターの管理者が交通需要に応じて台数を適切に設定することは困難で、設定誤りによって待ち時間が悪化するリスクもある。

また、省エネを考慮したかご割当て制御方式として、走行距離を短縮することで消費電力量を抑制する方式が開発されている⁽²⁾。しかし、このような方式では、ビル個別にパラメータ調整が必要になる。

管理者の手を煩わせることなく、ビルの交通需要に応じて適切に省エネを行うことが課題である。

3 動的稼働台数制御による新省エネ機能

今回開発した省エネ機能は、交通需要に応じて数分周期で適切な平均稼働台数を学習し、学習結果に基づいて動的稼働

台数制御を行う。これにより、管理者の設定の手間を抑え、交通需要に応じたきめ細かな省エネが可能になる。

ここでは、動的稼働台数制御とそれを用いた省エネ機能の概要について述べる。

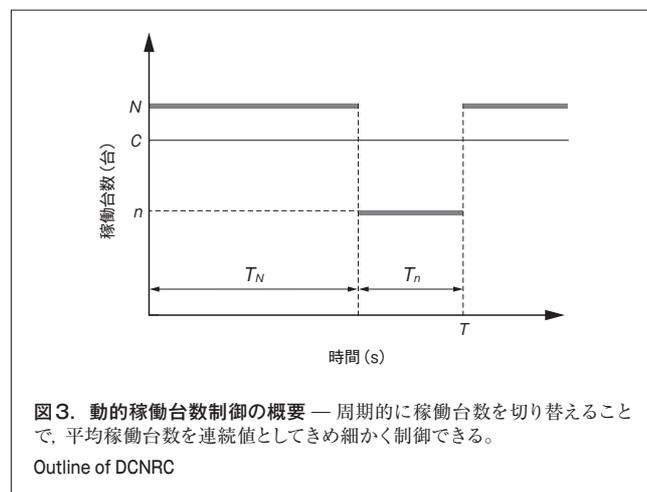
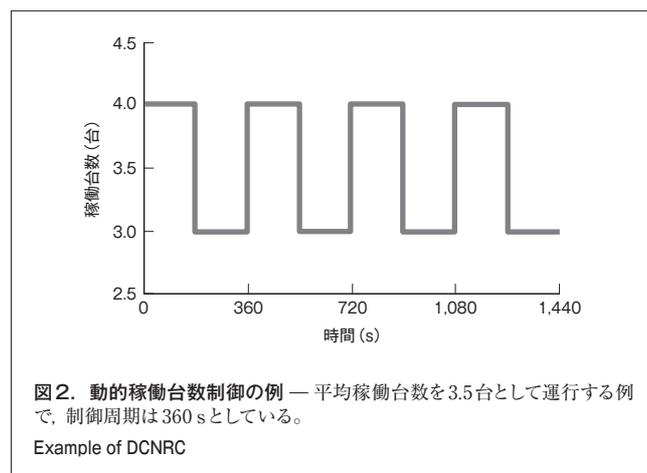
3.1 動的稼働台数制御の概要

動的稼働台数制御は、所定の時間周期で複数台のかごの一部を稼働させたり停止させたりすることで平均稼働台数を調整する。動的稼働台数制御の例を図2に示す。360 sの期間中に、最初の180 sは4台、残りの180 sは3台で稼働すると平均3.5台が稼働することになる。動的稼働台数制御は周期的にこのような台数制御を行い、疑似的に連続値として稼働台数を設定できる。

制御周期 T 、平均稼働台数 C で稼働させたい場合を考える (図3)。その前半の時間での稼働台数を N 、後半の時間での稼働台数を n とすると、 N 台で稼働する時間 T_N 、及び n 台で稼働する時間 T_n は、それぞれ式(1)、式(2)で表される。

$$T_N = T(C - n) / (N - n) \quad (1)$$

$$T_n = T(N - C) / (N - n) \quad (2)$$



これにより、所定の N と n の下で、 T_N と T_n を制御することで、1周期 T の間に平均 C 台のかごを稼働することになる。ただし、サービス性能に変動が生じる可能性があるため通常は N と n の差は1とする。

3.2 動的稼働台数制御の特長

従来の間引き運転を用いると、例えば、4台稼働では消費電力量が多すぎ、3台稼働では平均待ち時間が長すぎるような状況が発生することがある。動的稼働台数制御では、平均稼働台数を連続値で調整できるため、待ち時間と省エネのバランスのよい最適な稼働台数を設定できる。

動的稼働台数制御の計算機シミュレーションを行った結果を図4に示す。1時間当たり利用者数300人(閑散時)と900人(混雑時)の交通需要それぞれについて、動的稼働台数制御により平均稼働台数を3~4台の間で0.2台ずつ変化させたときに、利用者の平均待ち時間とかごの運行で生じる消費電力量をプロットした。ここで消費電力量は、4台稼働で900人利用したときの消費電力量を100%として正規化した。また、動的稼働台数制御の制御周期は360sとしている。待ち時間と消費電力量の間には、稼働台数に応じてほぼ線形の関係がある。利用者が少ないとき、もともと稼働するかご台数自体が少ないため、稼働台数を減らしてもそれほど消費電力量に変化が見られないが、利用者が多くなると省エネと待ち時間のトレードオフ関係が顕著に表れる。稼働台数の変更による省エネ効果はある程度の交通需要があるときに発揮されることがわかる。

3.3 動的稼働台数制御による省エネ機能

オフィスビルのように、日々の時間帯に応じた階間交通パターンがある程度定まっている場合は、利用者の平均待ち時間が許容範囲に収まるように、適切に平均稼働台数を決めることで、サービス性能の変動を抑えながら、消費電力量を削減できる。

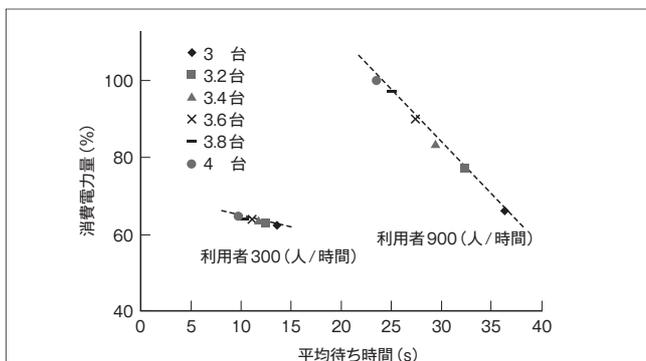


図4. 平均待ち時間と消費電力量の関係 — 計算機で動的稼働台数制御をシミュレーションした結果。閑散時と混雑時ともに、平均稼働台数を変化させると平均待ち時間と消費電力量はトレードオフの関係にあることがわかる。

Relationship between average waiting time and energy consumption

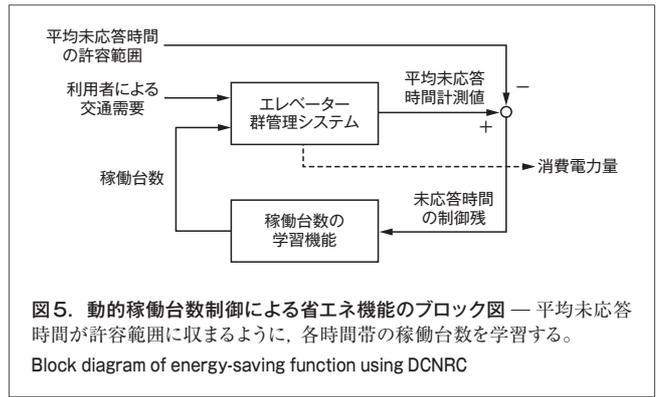


図5. 動的稼働台数制御による省エネ機能のブロック図 — 平均未応答時間が許容範囲に収まるように、各時間帯の稼働台数を学習する。

Block diagram of energy-saving function using DCNRC

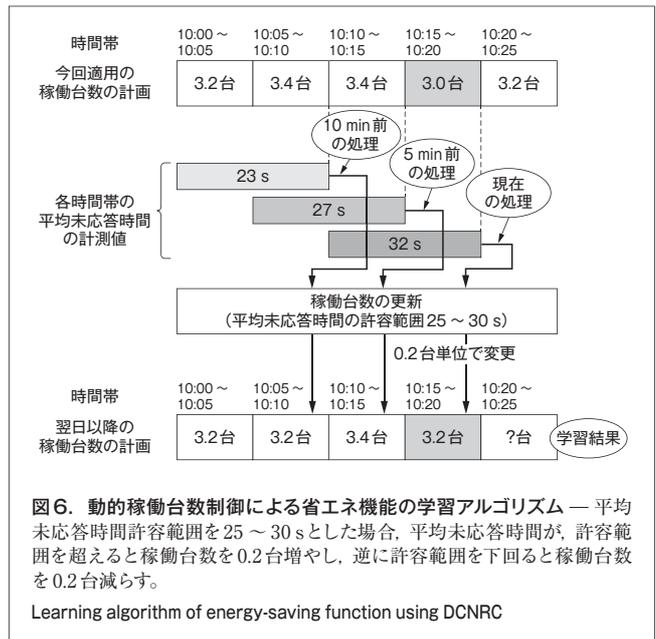


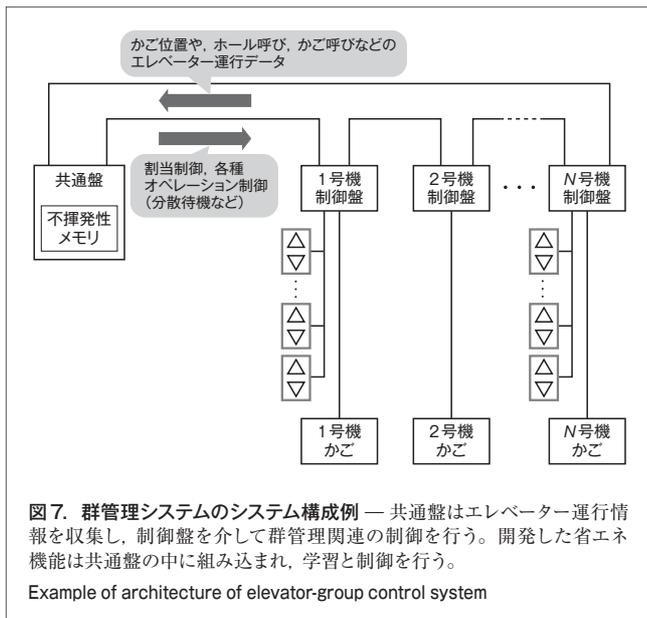
図6. 動的稼働台数制御による省エネ機能の学習アルゴリズム — 平均未応答時間許容範囲を25~30sとした場合、平均未応答時間が、許容範囲を超えると稼働台数を0.2台増やし、逆に許容範囲を下回ると稼働台数を0.2台減らす。

Learning algorithm of energy-saving function using DCNRC

動的稼働台数制御を用いた省エネ機能のブロック図を図5に、省エネ機能の学習アルゴリズムの例を図6に示す。エレベーターシステムは個々の利用者の待ち時間を把握することができないため、利用者がホール呼びを登録してからかごが到着して戸開を始めるまでの時間(以下、未応答時間と記す)を用いて、利用者の待ち時間を推測する。事前に、平均未応答時間に許容範囲を設けておく。日々の時間帯ごとの平均未応答時間を計測し、許容範囲を逸脱する場合は平均稼働台数を操作するフィードバック制御を行い、翌日以降の同じ時刻の動的稼働台数制御に反映させる。このようにして、未応答時間を許容範囲に収めるように、交通需要に応じた稼働台数を適切に学習し制御する。

4 省エネ機能の製品化への取組み

群管理システムにおける省エネ性能の向上を目指し、この方式の製品化に取り組んできた。群管理システムのシステム構



成例を図7に示す。共通盤には、ホール呼び登録やホール呼びへの応答状況などのエレベーター群管理制御に関わる情報が集まる。共通盤は得られた情報に従って、各かごの制御盤に対して割当制御や分散待機などの各種オペレーション制御の指令を行う。

開発した省エネ機能では、日々の同じ時間帯の平均未応答時間を計測し、平均未応答時間が許容範囲に収まるように適切な平均稼働台数を学習していく。平均稼働台数の学習や制御は共通盤で実施し、平均未応答時間に応じて稼働台数を学習していく。時間帯ごとの平均稼働台数の学習結果は、共通盤に設置される不揮発性メモリに保存する。

動的稼働台数制御ではかごの割当て可否を周期的に変更することで、所定の平均稼働台数で運行させる。このとき、どのかごの割当てを可能にし、どのかごの割当てを不可能にするかを決めなければならない。開発した機能では、省エネ効果と利用者へのサービス性能に留意し、利用状況に応じてかごの割当て可否を設定する工夫を行っている。

例えば、稼働台数を減らす際には、割当て不可とするかごは、呼びへの応答を終えて停止状態となったものとする。そのようなかごがない場合は、運行予定時間が最短のかごを選択する。かごが止まっている時間をより長くとれるため、省エネ効果を高めることができる。逆に、稼働台数を増やす際は、一時的にどのかごにも割当て可能とする。待ち時間がもっとも短くなるかごに割当てが行われるため、利用者へのサービス性能が考慮される。

一方、利用者が殺到したときなど、待ち時間が長くなる場合が明らかな場合は、省エネ機能を中断して利用者へのサービス性能を優先する。

また、交通需要が少ないときに、相対的に乗車が多い階へ

あらかじめ配車を行う分散待機機能は、少ない利用者に対して多くのエネルギーを消費することにつながるため、最小限の動作にとどめるようにしている。

5 あとがき

動的稼働台数制御を用いたエレベーター群管理システムの省エネ機能を開発した。

トレードオフの関係にある省エネ性能と利用者の待ち時間には、かご稼働台数が大きく影響する。動的稼働台数制御は、数分周期のなかで稼働台数を切り替えることで、連続値として平均稼働台数を調整でき、省エネ性能と待ち時間の制御をきめ細かく行うことができる。

今回開発した省エネ機能は、平均待ち時間が許容範囲を逸脱しないように、各時間帯の交通需要に適切な平均稼働台数を学習し、動的稼働台数制御を行う。これにより、交通需要に応じてきめ細かくかつ自動的に稼働台数を調整でき、省エネ性能と待ち時間のバランスをとることが可能になった。

文献

- (1) 山田尚史 他. 将来交通需要も考慮したエレベーター群管理システムでの次世代割当制御方式. 東芝レビュー. 65, 11, 2010, p.16 - 19.
- (2) Kobori, S. et al. Elevator Group Control for Reducing Total Running Distance. IEEJ Transactions on Industry Applications. 132, 11, 2012, p.1016 - 1023.
- (3) 木治潤一. エレベーター運行のスケジューリング. オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学. 46, 9, 2001, p.475 - 480.
- (4) Barney, G. Elevator Traffic Handbook: Theory and Practice. Routledge, 2003, 456p.
- (5) Sakamaki, Y. et al. Design of Elevator-Group Control System to Save Energy Consumption by Dynamically Controlling the Number of Running Cars. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. E98-A, 2, 2015, p.612 - 617.



坂巻 慶行 SAKAMAKI Yoshiyuki, Ph.D.

研究開発統括部 研究開発センター システム技術ラボラトリー 研究主務, 博士 (機能数理学)。数理最適化分野の研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。System Engineering Lab.



杉原 俊雄 SUGIHARA Toshio, Ph.D.

東芝エレベータ(株) 技術本部 開発部, 博士 (工学)。エレベーター群管理システムのソフトウェア開発に従事。Toshiba Elevator and Building Systems Corp.



田中 俊明 TANAKA Toshiaki

東芝リサーチ・コンサルティング(株) エキスパート。最適化、及びスケジューリングシステムの研究・開発に従事。情報処理学会, 電子情報通信学会会員。Toshiba Research Consulting Corp.