

再生可能エネルギー導入と電力需給バランスのための 大型冷凍機の実時間最適制御

非会員 水野 竣介^{*a)} 正員 前 匡鴻^{*} 正員 松橋 隆治^{*}

Real-time Optimal Control of Large-scale Refrigeration Systems for Renewable Energy Deployment and Power Supply and Demand Balance

Shunsuke Mizuno^{*a)}, Non-member, Masahiro Mae^{*}, Member, Ryuji Matsushashi^{*}, Member

The increasing penetration of renewable energy is accompanied by a greater need for flexible demand-side balancing. Industrial refrigeration systems are identified as promising demand response (DR) resources. In this paper, a refrigeration control system is developed to support grid stability and renewable energy integration. Temperature and electricity consumption of refrigerated warehouses are modeled, considering ambient temperature and the number of active cooling units. An optimization problem is formulated using JEPX market prices to dynamically adjust cooling schedules and minimize electricity costs. Simulation results show that energy efficiency has been improved while maintaining temperature limits, though demand shifts have remained limited.

キーワード：エネルギー，熱，デマンドレスポンス，最適化，エネルギー貯蔵

Keywords : Energy, Heat, Demand Response, Optimization, Energy Storage

1. 序論

〈1・1〉 電力システムにおける課題

2030年には2013年比で46%のCO₂を削減し、また2050年にカーボンニュートラルを達成するという国の目標実現に向け、CO₂排出量の少ない電力システムの構築が求められている。これらの目標を達成するには、再生可能エネルギーの導入の拡大が不可欠であり、近年では太陽光発電や風力発電などが国内でも急速に普及し始めている。しかし、これらの電源は、天候などによって発電量が大きく変わるため、刻々と変わる天候と発電量に合わせた細やかな需給コントロールが必要になっている⁽¹⁾。そのため、再生可能エネルギーを中心に電源の分散化が加速化している中で、昼間を中心とした電力需給調整のニーズが高まっている。

〈1・2〉 大型冷凍機のポテンシャル

再生可能エネルギーの変動性を受け入れるうえで、電力システムの柔軟性向上は不可欠である。その手段の一つで

あるデマンドレスポンス (Demand Response : DR) が、近年では需要家が持つ需給調整力として注目されており、改正省エネ法でもその活用が位置づけられている⁽²⁾⁽³⁾。DRとは、需要家エネルギーリソースの保有者もしくは第三者が、需要家エネルギーリソースを制御することで、電力需要パターンを変化させることである⁽²⁾。需要を抑制することを下げDR、需要を創出することを上げDRという。その中でも冷凍・冷蔵設備に付随する大型冷凍機は特に消費電力が高く、また一時的に消費電力を増減させて冷熱として電気エネルギーを蓄えることが可能であるため、その活用可能性が高く評価されている。図1に蓄熱槽を活用した大型冷凍機による需給調整の様子を例を示す。

冷凍機は、保管物を一定の温度範囲に保つための装置であり、その運転はある程度の温度許容範囲の中で調整可能である。倉庫における保管温度帯は、倉庫業法の「冷蔵倉庫基準保管温度」で表1のように定められている⁽⁴⁾。一般的な冷凍冷蔵倉庫では、保管温度の上限に達したら冷却を開始し、下限に達したら終了するという制御が行われている。この制御を工夫すれば、運転タイミングをシフトすることで一種の熱的エネルギー貯蔵 (Thermal Energy Storage) のような振る舞いを実現できる⁽⁶⁾。たとえば、電力需要が

a) Correspondence to: Shunsuke Mizuno.

E-mail: mizuno@enesys.t.u-tokyo.ac.jp

* 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

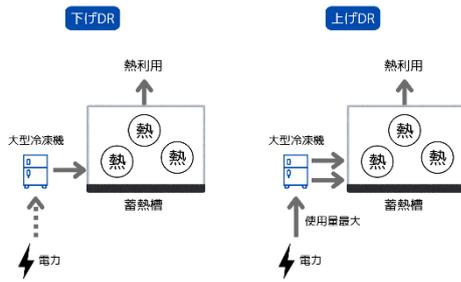


図1 大型冷凍機による需給調整の様子例

Fig. 1 Examples of supply and demand adjustment using freezers

表1 冷凍冷蔵倉庫における温度帯区分⁽⁵⁾

Table 1. Temperature zone standards in refrigerated warehouses⁽⁵⁾

温度帯区分	温度帯
C3	-2℃を超え、+10℃以下
C2	-10℃を超え、+10℃以下
C1	-18℃を超え、-2℃以下
F1	-24℃を超え、-18℃以下
F2	-30℃を超え、-24℃以下
F3	-35℃を超え、-30℃以下
SF1	-40℃を超え、-35℃以下
SF2	-45℃を超え、-40℃以下
SF3	-50℃を超え、-45℃以下
SF4	-50℃以下

高い時間帯（ピーク時間帯）には冷凍機の稼働を抑制し、逆に電力が余剰となる時間帯にはあらかじめ冷却を進めておくことで、需給バランスの調整や再生可能エネルギー由来の余剰電力の吸収が可能となる。

また、大型冷凍機は特に消費電力が高く、電力消費コストが極めて大きいため、近年の燃料価格の上昇による電力価格の高騰により、冷凍冷蔵倉庫を運営する企業の経営がさらに圧迫されている。東京都環境局によると、冷凍倉庫では冷凍・冷蔵設備の電力使用割合が全体の8割近くを占めている⁽⁷⁾。そのため、電力コストの削減という観点でも大型冷凍機を用いたDRの意義は大きい。

〈1・3〉 大型冷凍機によるDRの課題

大型冷凍機の制御に関しては、スーパーマーケット全体の電力ピークを管理するために、冷凍システムの電力需要の制御可能性を検証し、空気と貯蔵品の温度制限を考慮しながら、冷凍機の電力需要を短期的に調整する手法が提案されている⁽⁸⁾。

デンマークのTCL（Thermostatically Controlled Loads）が提供できる需要側の柔軟性について、mFRR（Manual Frequency Restoration Reserve）と負荷シフトの2つの形態のどちらがより魅力的かを検討している文献がある⁽⁹⁾。TCLとして、本文献ではデンマーク国内のスーパーマーケット

の冷凍設備を取り上げ、温度推移をモデリングし、電力価格や需要変動を考慮した確率的混合整数線形計画法を提案している。

また、シンガポール（シンガポール港、ジュロン港）を対象として、再生可能エネルギーを活用しながら港湾のエネルギー利用計画と運用計画を最適化する手法が述べられている⁽¹⁰⁾。港湾には冷却を行うためのリーファーコンテナ（冷凍コンテナ）が設置されており、その運転の最適化も大きな役割を担っている。しかし、電力システムの安定化等を目的として、大型冷凍機を活用したDRを行っている研究は未だ少ない。

〈1・4〉 研究の目的

本論文では、業務用・産業用の大型冷凍機を対象とした実時間最適制御手法の構築を通じて、再生可能エネルギー導入と電力システムの安定化を両立するエネルギーマネジメントシステムの実現を目指す。

従来、冷凍機は単純な温度維持を目的として運転されてきたが、その運転には一定の柔軟性が存在し、適切に制御すれば需要側の調整力として活用可能である。本論文では、この冷凍機の「蓄熱的特性」に着目し、実際の電力需給に応じて、冷凍機の運転をリアルタイムに最適化する制御手法を提案する。

冷凍機のような柔軟な負荷を活用する場合には、需給調整市場⁽¹¹⁾へ参加することによる調整力の提供や、インセンティブ型DR⁽¹²⁾としての運用の選択肢も考えられるが、本論文では、JEPX（Japan Electric Power Exchange）のスポット市場価格に応じて制御を行うことで電力系統安定化への貢献を目指す。JEPX（Japan Electric Power Exchange）とは、電力の取引を行う市場のことであり、そのスポット市場価格は、近年では太陽光発電などの再生可能エネルギーによる余剰電力が発生する昼間に安く、需要が増加する夕方に高くなる傾向がみられる。例として、2024年5月4日から6日におけるJEPXの東京電力エリアの約定価格を図2に示す。

2. 冷凍冷蔵倉庫のモデリング

本論文では、冷凍機的最適制御によるDRを実現するために、制御対象である冷凍冷蔵倉庫の運転状態を適切に表現できるモデルを構築する必要がある。特に、DR制御の実施にあたっては、庫内の温度推移予測および消費電力の予測が前提となる。

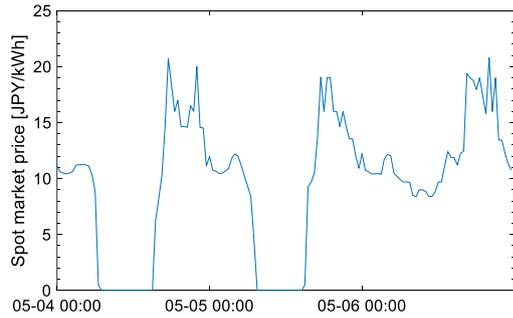


図2 2024年5月4日から6日におけるJEPXの東京電力エリアの約定価格⁽¹³⁾

Fig. 2 JEPX contract prices in the Tokyo area on May 4 to 6 2024⁽¹³⁾

本研究を行うにあたっては物流業者に協力いただき、実際に稼働している業務用冷凍冷蔵倉庫の詳細な設備運転データを提供いただいた。当該倉庫は合計24部屋を保有しており、大型冷凍機（圧縮機）は合計3台設置されている。圧縮機はいずれもNewTon（前川製作所製）である。各圧縮機には冷却器が5台接続されており、室内の温度を制御している。まずは1台の冷凍機（圧縮機）についてモデリングを行う。

(2・1) 冷凍冷蔵倉庫の庫内温度予測

まずは倉庫の庫内温度推移予測を行う。本論文の対象施設では、庫内温度が1分ごとに測定され、 -20°C を上回ると冷却器が作動し、 -22°C まで下がると停止するという制御となっている。しかしながら、庫内温度は、単に冷却器のオン・オフ状態のみに依存するものではなく、以下のようなさまざまな外乱の影響を受けて変動する。

- 外気温の変化
- 倉庫の開閉頻度および開放時間
- 入庫品目・出庫品目
- 入庫量・出庫量
- デフロスト（霜取り）運転による一時的な昇温

これらの外的要因が温度変動に与える影響は大きく、最適な制御を行うためには、それらを加味した予測モデルが必要となる。例えばデフロストは、冷却器の運転時間が12時間に達したタイミングで行われるという設定になっており、考慮が必要である。しかし、本論文の対象施設では、倉庫の開閉については記録が取られていない。また、入庫量・出庫量や入庫品目・出庫品目のデータはあるものの、入出庫のあった詳細な時間までは明記されていない。そこで今回はまず外気温の変化のみを考慮してモデリングを行った。

部屋の一つの温度推移を可視化したものを図3に示す。冷却器がオンになっている時間帯を青、オフになっている時間帯をグレーの範囲で示す。

冷凍冷蔵倉庫における伝熱経路は、熱抵抗(R)と熱容量(C)で構成される熱回路に置き換えて求めることができる⁽¹⁴⁾。

Δt 後の庫内温度 $T_{in}(t + \Delta t)$ は式(1)で表すことができる。

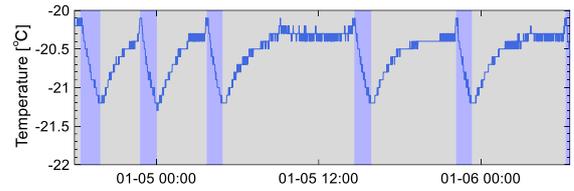


図3 冷凍冷蔵倉庫における温度推移

Fig. 3 Temperature transition in the warehouse

$$T_{in}(t + \Delta t) = T_{in}(t) + \frac{\Delta t}{C} \left(\frac{T_{out}(t) - T_{in}(t)}{R} + Q(t) \right) + e \quad (1)$$

ここで C は庫内の空気及び保管物の熱容量、 $T_{out}(t)$ は時刻 t における外気温の温度、 R は外気との熱抵抗、 $Q(t)$ は冷却器による熱除去を示しており、冷却器がONなら一定値（負の値）、OFFなら0を示す。

式(1)は以下の式(2)のように書き換えることができる。

$$T_{in}(t + \Delta t) = aT_{in}(t) + bT_{out}(t) + du(t) + e \quad (2)$$

ここで、 $a = 1 - \frac{\Delta t}{CR}$ 、 $b = \frac{\Delta t}{CR}$ であり、 $d = \frac{Q_{cool}\Delta t}{C}$ であ

る。 Q_{cool} は冷却能力を示し、 $Q(t) = Q_{cool} \times u(t)$ で定義される。 $u(t)$ は冷却器がONなら1、OFFなら0を示す。

実際のデータを基に、 a 、 b 、 d に加えて定数項 e を、線形回帰を用いて推定する。定数項 e は、内部発熱や設備起因の微小な熱流を考慮するために設定している。今回は対象データに対して、前後5分間の移動平均を適用し、短期的な変動を平滑化した。本論文ではPythonのsklearnを用いた。2024年1月4日から6日を検証期間とし、学習にはその直前の4日分のデータを用いた。結果は $a=0.9890$ 、 $b=0.0000$ 、 $d=-0.0370$ 、 $e=-0.2212$ となった。

この結果を用いて、初期値 $T_{in}(0)$ と外気温 $T_{out}(t)$ 、冷却器のON/OFFの情報である $u(t)$ に基づいて再帰的に温度推移を求め、検証を行った。2024年1月4日から6日における、庫内温度の実測値と予測値の比較を図4に示す。このモデルにおけるMAE (Mean Absolute Error)は 0.063°C 、RMSE (Root Mean Squared Error)は 0.076°C となった。また、決定係数は0.945となった。

他の階の部屋についても同様にパラメータの推定を行った。結果を表2に示す。1階部分のみ、C級（チルド帯）の部屋であり、荷捌きを行っている影響で庫内温度の予測が難しいため、本論文では対象外とした。

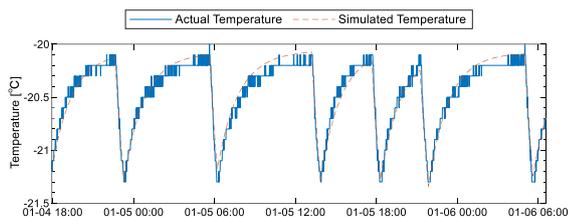


図4 庫内温度の実測値と予測値の比較

Fig. 4 Comparison of temperature transition between measured and simulated values

表2 各部屋のパラメータの値

Table 2. Value of parameters in each room

Room	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
A	0.9922	-0.0001	-0.0159	-0.1565
B	0.9925	0.0000	-0.0148	-0.1517
C	0.9890	0.0000	-0.0370	-0.2212

(2・2) 冷凍機の消費電力予測

続いて、冷凍機（圧縮機）の消費電力の予測を行う。本論文の対象施設では1台の圧縮機に対して5台の冷却器が接続されている。1台の冷却器あたり基本的には1つの部屋を冷却しているが、1階部分にある1部屋のみ2台の冷却器で冷却が行われている。

2024年1月4日から6日における、冷却器の稼働台数に対する圧縮機の出力の様子を図5に示す。1階部分のみ2台の冷却器が設置されており、それらは2階から4階にあるその他の冷却器の半分の出力であるため、1階部分にある冷却器は1台あたり0.5台分としている。グラフから、冷却器の稼働台数と圧縮機の出力には相関があることが分かる。また、冷却器の稼働台数が変化していない時間帯は圧縮機の出力がほぼ変わらないことが分かる。そこで、冷却器の稼働台数ごとの圧縮機の出力を平均してまとめた。冷却器の稼働台数に対する圧縮機の出力の変化を図6に示す。

図6から、冷却器の稼働台数が2台以下の場合と2台以上の場合で出力の上昇傾向に違いがみられることが読み取れる。つまり、冷却器の稼働台数が多ければ多いほど、冷却器1台あたりに必要な消費電力が小さくなるため冷却効率が高く、冷凍機の省エネルギー運転につながっていることが分かる。これらの結果から、時刻 *t* での冷却器の稼働台数を *m* とし、以下の式(3)(4)のように冷凍機の出力 *W(t)* をモデル化する。

$$W(t) = 26.7m(t) + 7.72 \quad (m(t) \leq 2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$W(t) = 6.28m(t) + 48.0 \quad (m(t) \geq 2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

3. JEPX のスポット市場価格を考慮した大型冷凍機のリアルタイム最適制御

冷凍冷蔵倉庫の温度推移モデルおよび消費電力モデルを用いて、大型冷凍機における制御の最適化モデルの構築を行った。東京電力管内を対象として、2023年度に存在した

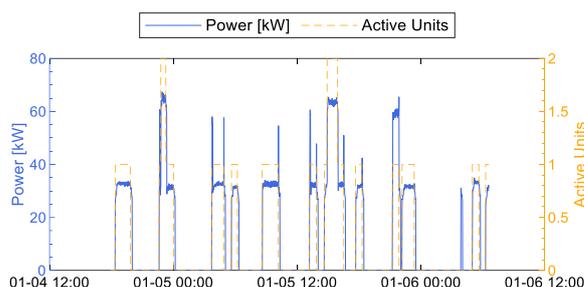


図5 冷却器の稼働台数に対する圧縮機の出力の変化

Fig. 5 Active coolers in operation and their power consumption

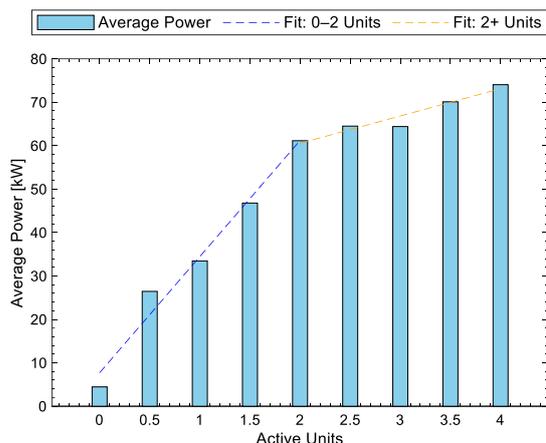


図6 冷却器の稼働台数に対する圧縮機の出力の変化

Fig. 6 Modeling of power consumption of freezers based on the number of active coolers

市場連動型の料金メニューである【市場ハイブリッドプラン(市場連動100%)】のプランをもとに最適化モデルを構築した⁽¹⁵⁾。この電気料金プランは、高圧、特別高圧の事業者を対象としたもので、電気料金の算出方法を図7に示す。

本来はこれに別途再生可能エネルギー発電促進賦課金が加わるが、最適化のプロセスにはほとんど影響しないため、本論文では考慮しない。基本料金は、式(5)に示すように、東京電力の定める基本料金単価に契約電力(市場連動契約電力)を乗じ、力率による割引・割増を加味して算定している。

$$\text{基本料金} = \text{市場連動契約電力} \times \text{基本料金単価} \times (\text{力率割引または割増}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

基本料金単価は2175.71円/kWとし、力率割引の値は0.85とした。電力量料金は、式(6)に示すようにJEPXのスポット市場価格に対応する料金体系となる。

$$\begin{aligned} &\text{電力量料金} = \text{使用電力量} \\ &\quad \times (\text{託送供給等約款の電力量料金単価} \\ &+ \frac{\text{市場平均価格}}{1 - \text{損失率}} + \text{消費税等相当額}) \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

表 3 最適化モデルに用いた変数

Table 3. Values of variables used in the optimization model

変数・引数名	内容	単位
k	1日の中での1分タイムスロットを表す番号 (1,2,...,1440)	-
t	1日の中での15分タイムスロットを表す番号 (1,2,...,96)	-
$W(t)$	冷凍機の消費電力	kW
W_{\max}	冷凍機の最大電力	kW
$Price(t)$	各タイムスロットの東京エリアのスポット市場価格	JPY/kWh
$T_{i,k}$	時刻 k における部屋 i の庫内温度	℃
T_k^{out}	時刻 k における外気温	℃
$u_{i,k}$	時刻 k において冷却器のスイッチがオンかオフかを示す二値変数 (オン時:1, オフ時:0)	-
$num(t)$	時刻 t でオンになっている冷却器の個数	-
M	非常に大きな定数 (ここでは 1×10^3)	-
ε	非常に小さな定数 (ここでは 1×10^{-3})	-
$z(t)$	冷却器の稼働台数を示す二値変数 (3台以上で1, 2台以下で0)	-
a_i, b_i, d_i, e_i	回帰により推定された, 部屋 i の庫内温度を予測するための係数	-
m_x, b_x, m_y, b_y	回帰により推定された係数 $z(t)=0$ の時に m_x, b_x $z(t)=1$ の時に m_y, b_y が用いられる)	-

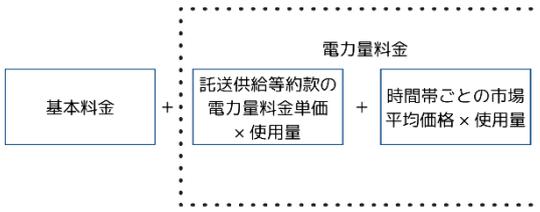


図 7 電気料金の算出方法

Fig. 7 Method for calculating electricity charges

託送供給等約款の電力量料金単価は、昼間時間で4.87円/kWh、夜間時間で4.63円/kWhである⁽¹⁶⁾。消費税は10%、損失率は3.9% (高圧) である⁽¹⁷⁾。モデルを組むにあたって、MATLAB Optimization Toolbox の `intlinprog` 関数を用いた。2024年1月4日の1日の電気料金を目的関数とし、その最小化を行った。最適化モデルに用いた変数を表3に示す。

〈3・1〉 目的関数

式(7)に目的関数を示す。今回は簡単のため、託送供給等約款の電力量料金単価の平均化を行い、一定であるとみなした。

$$Fee = \frac{2175.71 \times W_{\max} \times 0.85}{31} + \sum_{t=1}^{96} \left(\frac{Price(t)}{1-0.039} \times 1.1 + 4.75 \right) \times$$

$$W(t) \times 0.25 \dots \dots \dots (7)$$

以下制約条件について述べる。

〈3・2〉 庫内温度推移に関する制約条件

各部屋の庫内温度の1分ごとの推移は、式(8)により近似される。

また、温度範囲に関する制約を式(9)に示す。本来の庫内温度の上限値は-20℃であるが、実際の庫内温度が振動する可能性を考えて、ここでは上限を-20.3℃とすることで余裕を持った運用とした。

$$T_{i,k+1} = a_i T_{i,k} + b_i T_k^{\text{out}} + d_i u_{i,k} + e_i \dots \dots \dots (8)$$

$$-22 \leq T_{i,k} \leq -20.3 \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 $T_{i,k}$ は時刻 k における部屋 i の庫内温度[℃]、 T_k^{out} は外気温、 $u_{i,k} \in \{0,1\}$ は冷却器の ON/OFF 状態、 a_i, b_i, d_i, e_i は回帰により推定された係数である。

〈3・3〉 冷凍機の消費電力に関する制約条件

冷凍機の消費電力に関する制約条件を式(10)から(17)に示す。

$$num(t) = \sum_{i=1}^3 u_{i,t} + 1 \dots \dots \dots (10)$$

$$W(t) \leq m_x \times num(t) + b_x + M \times z(t) \dots \dots \dots (11)$$

$$W(t) \geq m_x \times num(t) + b_x - M \times z(t) \dots \dots \dots (12)$$

$$W(t) \leq m_y \times num(t) + b_y + M \times (1 - z(t)) \dots \dots \dots (13)$$

$$W(t) \geq m_y \times num(t) + b_y - M \times (1 - z(t)) \dots \dots \dots (14)$$

$$num(t) - 2 \leq M \times z(t) \dots \dots \dots (15)$$

$$num(t) - 2 \geq \varepsilon - M \times (1 - z(t)) \dots \dots \dots (16)$$

$$W(t) \leq W_{\max} \dots \dots \dots (17)$$

式(10)では、同時に稼働する冷却器の台数を定義して

いる。 $z(t)$ は、冷却器の稼働台数を示す二値変数であり、式(15)と式(16)のように、稼働台数が3台より多い場合で1, 2台以下で0になるように設定することで、稼働台数による消費電力モデルの場合分けを実現している。

M は非常に大きな定数であり、式(11)から式(14)のように、 $z(t)=0$ の時は $W(t) = m_x \times num(t) + b_x$ 、 $z(t)=1$ の時は $W(t) = m_y \times num(t) + b_y$ が成り立つ。 m_x, b_x, m_y, b_y は回帰により推定された係数である。なお、1階部分はC級(チルド帯)の部屋になっており部屋の開放時間が長く熱の流出量が大きいため、冷却器は常にオンであるものとした。

〈3・4〉 最適化問題の結果と考察

最適化を行った際の各部屋の温度推移を図8に、冷凍機の消費電力及びその時の東京エリアのJEPX価格を図9に示す。この時の一日の電気料金は22300円となり、最適化していない時(29131円)と比べて約24%の電気料金を削減することができることが分かった。図9から、部屋ごとに異なる制御が行われているが、冷却器が3台以上稼働している時間帯が多く、冷却効率の良い運転が行われていることが分かる。このことから、冷却器の稼働台数を多くすることがコストメリットにつながる可以说。しかし、

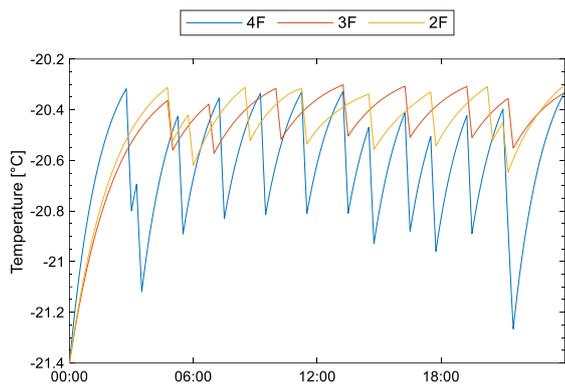


図8 各部屋の温度推移

Fig. 8 Optimized temperature transition

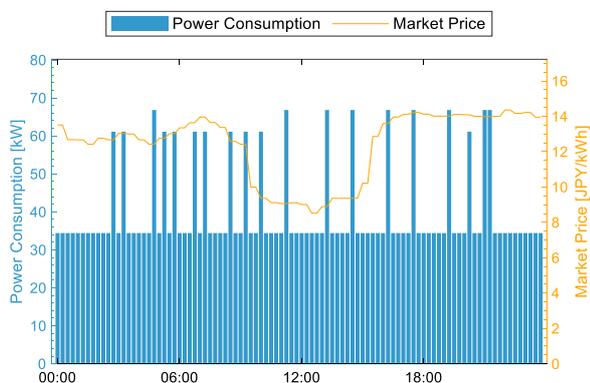


図9 冷凍機の消費電力及びその時の東京エリアの JEPX 価格

Fig. 9 Electricity market price and power consumption under optimization
冷却器が稼働している時間帯は全体的にばらけており、価格の比較的安い昼間の稼働が多いとは言えない。冷却器の稼働時間帯をずらすことは、電力消費コスト削減にはあまり寄与しないことが分かる。

4. 結論

本論文では、再生可能エネルギーの導入促進および電力系統の安定化を目指し、大型冷凍機を活用した再生可能エネルギーの効率的な消費を促進するシステムの設計を試みた。大型冷凍冷蔵倉庫を対象に庫内温度推移および消費電力のモデリングを行い、さらに日本卸電力取引所 (JEPX) のスポット市場価格を考慮した運転スケジュールの最適化を実施した。結果から、同時帯に稼働する冷却器の台数を多くすることにより、省エネルギーに資する運転が実現できることが確認された。特に、庫内温度を許容範囲内に保ちながら、冷却器の稼働タイミングを調整することで、電力消費コストの削減に一定の効果が得られた。しかし一方で、JEPX 市場価格が安価となる時間帯に十分に需要をシフトできていないことも確認された。

現在は 15 分単位でのオン・オフ切り替えを行っているが、今後は連続時間の制約をかけたうえでさらに柔軟に切り替えが行われるようにしたい。また、入出庫に起因する庫内温度変動やデフロスト運転のスケジュールについてもモデ

ルに組み込むことで、精度をさらに高めたい。

文 献

- (1) 資源エネルギー庁: これからの需給バランスのカギは、電気を使う私たち〜「ダイヤモンド・リスポンス」とは? (2022), <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/dr.html> (アクセス日 2025/04/18).
- (2) 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター: 蓄熱システムを活用した DR 対応と電力取引市場について (2023).
- (3) 資源エネルギー庁: 省エネ法の概要 (2022), https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/enterprise/overview/amendment/ (アクセス日 2025/04/30).
- (4) OPENLOGI: 3 温度帯とは? 4 温度帯との違いや倉庫の保管温度の基準を解説 (2024) https://service.openlogi.com/openlogi_mag/temperature-zone/ (アクセス日 2025/04/19).
- (5) 中国運輸局: 令和 6 年 4 月 1 日から「冷蔵倉庫の温度帯区分」が変わります! (2024), <https://www.tb.mlit.go.jp/chugoku/content/000321726.pdf> (アクセス日 2025/04/19).
- (6) Doug Scott, K. L. B. D., Rafael Castillo and Olsen, D.: Refrigerated Warehouse Demand Response Strategy Guide, Technical report, Lawrence Berkeley National Laboratory (2015).
- (7) 東京都環境局: 冷凍冷蔵倉庫の省エネルギー対策 (2016), <https://www.tokyo-co2down.jp/assets/company/seminar/type/text/warehouse.pdf> (アクセス日 2025/04/19).
- (8) Glavan, M., Gradišar, D., Humar, I. and Vrančić, D.: Refrigeration Control Algorithm for Managing Supermarket's Overall Peak Power Demand, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 27, pp. 2279–2286 (2019).
- (9) Gade, P. A., Skjøtskift, T., Ziras, C., Bindner, H. W. and Kazempour, J.: Load shifting versus manual frequency reserve: Which one is more appealing to thermostatically controlled loads in Denmark?, Electric Power Systems Research, Vol. 232, (2024).
- (10) Iris, Çağatay and Lam, J. S. L.: Optimal energy management and operations planning in seaports with smart grid while harnessing renewable energy under uncertainty, Omega (United Kingdom), Vol. 103, (2021).
- (11) 送配電網用協議会: 需給調整市場とは (2022), <https://www.tdgc.jp/jukyuchoseishijo/outline/outline.html> (アクセス日 2025/04/19).
- (12) 資源エネルギー庁: デイモンド・リスポンスってなに? (2022), https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electricity_measures/dr/dr.html (アクセス日 2025/04/19).
- (13) 一般社団法人日本卸電力取引所: 取引市場データ (2023), <https://www.jepx.jp/electricpower/market-data/spot/> (アクセス日 2025/04/19).
- (14) 基礎技術研究所: 熱回路網法の伝熱モデル (2021), https://www.kyb.co.jp/technical_report/data/no62j/01_glossary.pdf (アクセス日 2025/04/22).
- (15) 東京電力エナジーパートナー: 市場連動型の料金メニューについて【市場ハイブリッドプラン (市場連動 100%)】 (2023), https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/support_h2/download2.html (アクセス日 2023/09/21).
- (16) 東京電力パワーグリッド: 託送供給等約款の見直し概要 (2023), <https://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/press/2022/pdf/221227j0101.pdf> (アクセス日 2025/04/24).
- (17) 東京電力パワーグリッド: 託送供給等約款 (2021), https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/notification/pdf/takusou_yakkan0716.pdf (アクセス日 2025/04/24).