

冷熱蓄熱を活用した大型冷凍機の自動制御システムの開発

—電力消費コスト削減&カーボンニュートラルを目指して—

1. 背景

冷凍冷蔵倉庫業では、倉庫稼働に莫大な電力が消費され、運営費の多くがここに費やされる。ヒアリングを行った企業の中には、高額な電気代を支払っている企業も存在し、解決が急がれる大変大きな課題となっている。さらに我々は 20 社以上の企業へのヒアリングから、冷凍冷蔵倉庫業界では、冷凍機の温度設定には統一された制御手法が存在せず、それが電気料金高騰の問題を深刻化させ経営を悪化させている実態に気づいた。

2. 目的

本プロジェクトでは、冷熱を蓄熱しながら冷凍機を自動で最適に制御するシステムを開発する。具体的には、JEPX（日本卸電力取引所）の電力市場価格や冷凍冷蔵倉庫の翌日の入庫量・出庫量、外気温などの情報を読み取り、電力市場価格が安価な時間帯に冷凍機を稼働させることで冷熱を蓄熱し、高価な時間帯に稼働を止めて放熱する市場連動型のデマンドレスポンスを行うことで、冷凍冷蔵倉庫の運営にかかる電気料金が最も低くなるような最適制御を施す。

また、本プロジェクトで行う冷凍機の最適制御は、カーボンニュートラルへの貢献も期待される。冷凍機の運用を効率化することで省エネを実現することができ、再生可能エネルギーの余剰電力を有効活用することにより、電力需給のバランス化を実現する一助となる。

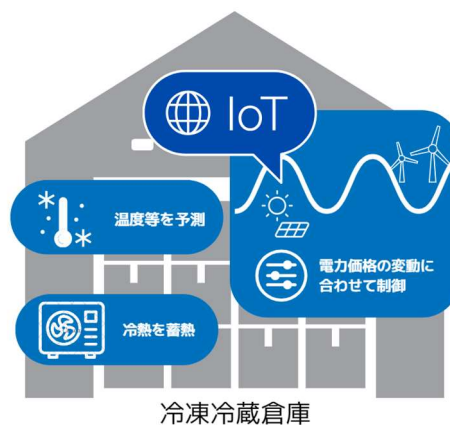


図 1: システムの概要

3. 製品・サービスの内容

開発したシステムは、倉庫に関するデータや電力市場価格を取得し、それらを数理最適化モデルに入力することで翌日の電力利用価格が最低となるような運転計画を出力するというものである。出力された運転計画と実際の温度推移は必ずズレが生じ

るため、温度を常時モニタリングし、規定値を逸脱しないようになっている。

まず、倉庫内の温度推移をモデル化するために、各倉庫についている冷熱機器が ON の場合と OFF の場合の温度推移を可視化し、それぞれ近似を行った。次に、冷熱機器の消費電力（電流値）のモデリングを行った。開発した温度推移モデル、消費電力モデル、また、電気料金単価のデータを用いて、翌日の冷凍機の運転計画を最適化する数理最適化モデルを開発した。このモデルでは電気料金を目的関数とし、温度推移が所定の範囲を超えないようにしつつ、電気料金が最適になるような冷熱機器の運転計画を出力する（図 2）。実際のシミュレーションの様子を図 3 に示す。

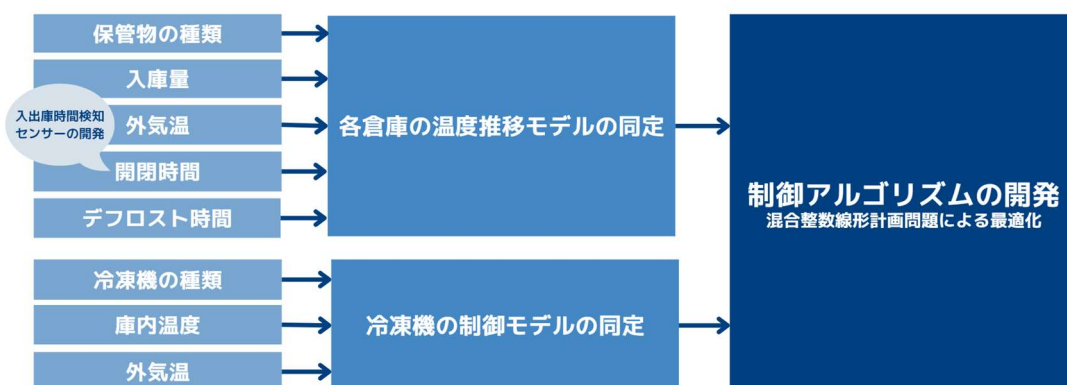


図 2: 数理最適化の流れ

従来手法（電力量料金単価が一定の高圧のプランで最適化なし）に対して、まずプランを変えずに最適化を行うことで 20 パーセントの電気料金の削減、そしてプランを市場連動型に変更することでさらに 6 パーセントの削減をシミュレーション上で実現することができた。

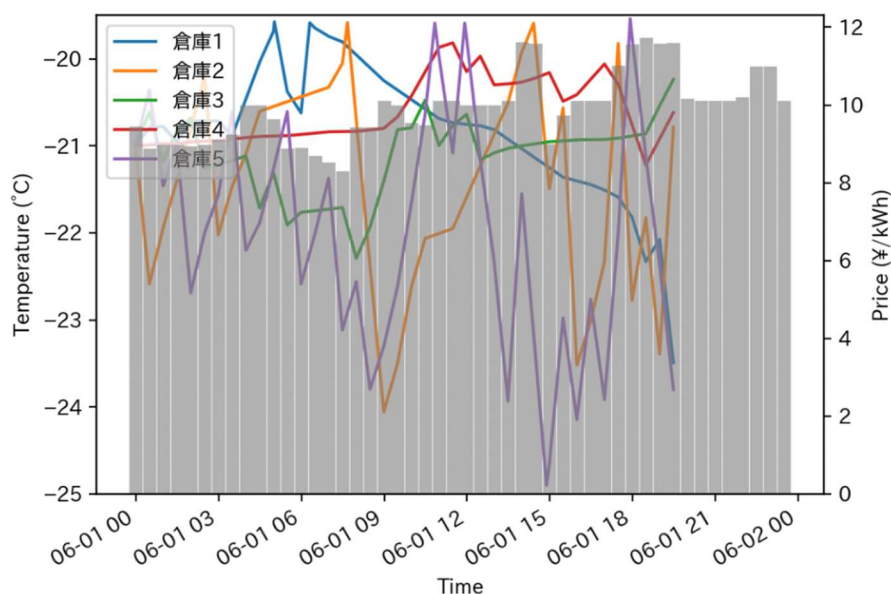


図 3：冷凍機運転の仮想シミュレーション例



図 4：冷凍冷蔵倉庫の様子

今後は、この制御アルゴリズムに基づいて実際の冷凍機の制御を行うことで効果の検証を行うことを目指す。

4. 新規性・優位性

本プロジェクトは、冷熱を蓄熱することで冷凍冷蔵倉庫を蓄電池のように機能させるという全く新しい試みである。倉庫の保管物に冷熱を蓄熱させながら、冷凍機の運用効率化による省エネ運転と、JEPX の価格に応じた制御の最適化による再生可能エネルギーの余剰電力の最大限の活用を行うことによって、初期投資を最大限抑えながらエネルギーコストを最大限削減する市場連動型のデマンドレスポンスを実現している。コア技術については現在特許出願中である。

5. 事業普及（または活用）の見通し

事業期間を通じて、様々な企業・機関に対してヒアリングを実施した。倉庫事業者だけでなく、冷凍機メーカーや新電力などの小売電気事業者などへも視野を広げ、幅広く話を伺った。物流業者や水産業者など、冷凍冷蔵倉庫を所有する企業には、実証先として協力いただけるよう交渉を進め、事業期間中に新たに 2 社獲得することができた。新電力などの小売電気事業者とは、我々のサービスや導入する倉庫との親和性の高い電気料金プランを倉庫事業者に提供する協業の話も進めることができた。

また、自治体や水産業者などと協力して、風力発電などの再生可能エネルギー電源で発生するインバランスを吸収するような冷凍機の制御を行うことも目指している。具体的には、再生可能エネルギーの発電量の実績値が計画値を上回る場合は冷凍機での消費電力を増加させて冷やし込みを行い、発電量が計画より少ない場合は冷凍機の運用を抑制し、事前に蓄熱された冷熱を活用することを検討している（図 5）。

今後も事業を拡大していくため、株式会社 Freezo を設立した。

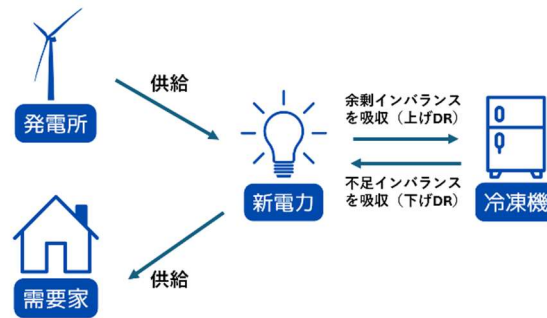


図 5：インバランスを冷凍機で吸収するスキーム図

6. 期待される波及効果

冷凍冷蔵倉庫の庫腹量は約 3400 万 m³ (2015 年) であり、冷凍機の持つ出力のポテンシャルは約 100 万 kW に達する。冷凍冷蔵倉庫の市場は年々拡大しており、冷凍冷蔵倉庫がエネルギー問題を解決する鍵になるのではないかと我々は考えている。全国各地に存在する冷凍冷蔵施設群をアグリゲートし、連動して制御を行うことで、VPP (仮想発電所) を形成することも可能となる。これにより、さらに大規模な形で需給バランスを調整することができ、再生可能エネルギーのさらなる効率的な運用が可能となる。

また、本プロジェクトで開発した技術は、冷凍機だけでなく、冷凍コンテナやデータセンターにも適用可能であり、あらゆる冷熱機器にかかる電力コスト削減に貢献することができる。

7. イノベータ名 (所属)

水野 竣介 (東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻)

和泉 陽大 (東京大学理学部化学科)

穂山 公宏 (東京大学工学部電子情報工学科)

秦 珠実 (東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻)

(参考) 会社紹介ページ : <https://www.freezo.jp/>