

オープンショーケースの省エネルギーを実現する熱流体シミュレーション技術

Thermo-Fluid Simulation Technique for Achieving Energy Saving in Open Showcases

中島 正登 NAKAJIMA, Masato

浅田 規 ASADA, Tadashi

スーパーマーケットやコンビニエンスストアなどの店舗で使われるオープンショーケースでは、前面開口部からの侵入熱が負荷の大半を占めており、省エネルギー化のためには、この熱侵入を抑えるエアカーテンの性能の向上が重要である。エアカーテンの性能は、蒸発器の着霜の影響により時間とともに変化する。富士電機は、この現象を明らかにするための熱流体シミュレーション技術を開発するとともに、この技術を用いて新エアカーテン方式を開発した。実証機により評価した結果、従来方式に比べて30%以上の省エネルギー化が実現できた。

More than half of the electric power load in open showcases used in stores such as supermarkets and convenience stores is heat invasion that comes from the front opening of the displays. In order to save energy on the showcases, it is necessary to improve the performance of air curtains that suppress this heat invasion. Air curtain performance changes over time based on the impact of frost formation on the evaporator. Fuji Electric has developed a thermal-fluid simulation technique for elucidating this phenomenon, and based on this technique, we have developed a new air curtain system. Demonstration results achieved improved energy saving of more than 30% compared with conventional systems.

① まえがき

スーパーマーケットやコンビニエンスストアなどの店舗では、「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」（省エネ法）の改正・施行に伴い省エネルギー（省エネ）化が求められている。富士電機では、エネルギーを有効に活用して店舗全体を省エネ化する“スマート店舗”を提供している。店舗の中で最も電力を消費する機器は、オープンショーケースなどの冷凍冷蔵機器である。オープンショーケースでは、熱負荷の約8割がエアカーテンからの侵入熱であり、このエアカーテンの性能の向上が重要である。エアカーテンの性能は、蒸発器における霜の付着（着霜）の影響で時間とともに変化する。富士電機は、このエアカーテンの経時変化を明らかにするための熱流体シミュレーション技術を開発した。また、この技術を用いて省エネ化のための新エアカーテン方式を開発した。

② オープンショーケースの構成

オープンショーケースの構造を図1に示す。オープンショーケースには扉がないため、前面開口部から侵入する暖かい空気をエアカーテンで遮断して商品を保冷している。ダクト内に設置した蒸発器で冷気を生成し、冷気をファンによりエアカーテン吹出口と背面パネルに設けた背面吹出口から吹き出し、吸込口から吸い込むことでエアカーテンを形成する。冷気を生成する蒸発器は、エアカーテンから湿気を含んだ暖かい空気が侵入するため、図2のように時間の経過とともに着霜する。付着した霜は風路抵抗となって循環風量を低下させるのでエアカーテンの性能が低下し、前面開口部からの空気の侵入が増える。したがって、オープンショーケースの開発においては、霜の経時変化を考慮

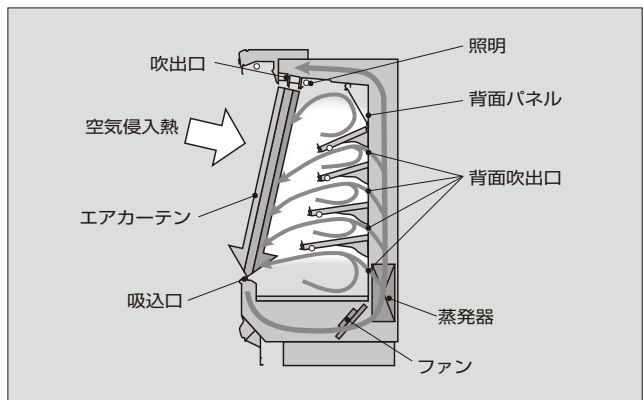


図1 オープンショーケースの構造

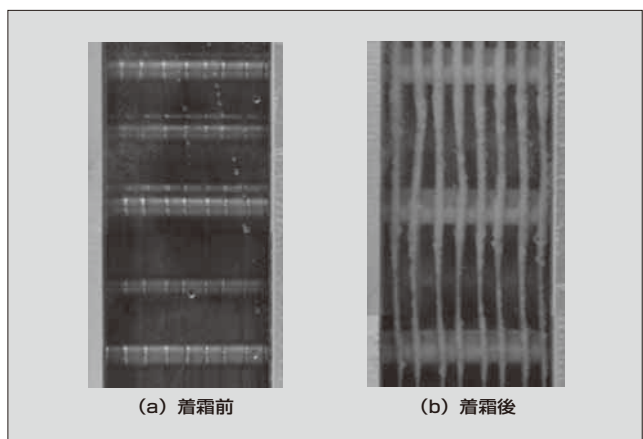


図2 蒸発器の着霜現象

したエアカーテンの気流制御が重要である。

3 シミュレーション技術

3.1 着霜の影響の組込み

開発したシミュレーションのフローを図3に示す。従来のように熱流体シミュレーションだけでは霜の経時変化の影響が考慮できないため、霜の成長を予測する着霜シミュレータを独自に開発し、導入した。まず初めに無着霜状態の初期条件で熱流体シミュレーションを行い、蒸発器への吸込み風の温湿度と風速を求める。その温湿度と風速を基に、着霜シミュレータ内で霜の厚さに応じた風速、霜の表面温度および蒸発器からの吹出し風の湿度を計算し、熱流体シミュレーションの境界条件として再設定する。この操作を繰り返し、蒸発器の吸込み風の温湿度変化が収束した状態で次の時間の計算へと進み、規定時間を経過した時点で計算終了とした。

着霜シミュレータにおける霜計算モデルを図4に示す。霜の成長は、冷却面の温度および蒸発器を通過する空気(1)の温湿度と風速の影響が大きく、それらをパラメータとした霜計算モデルを構築した。着霜時は冷却面の温度に代わり

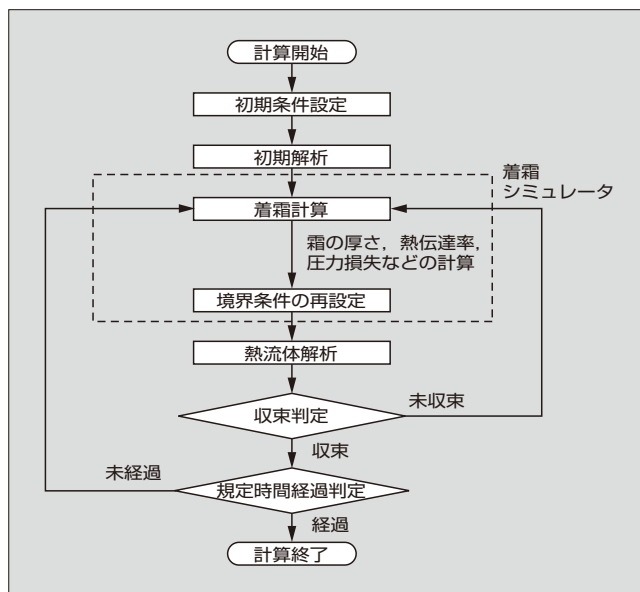


図3 シミュレーションのフロー

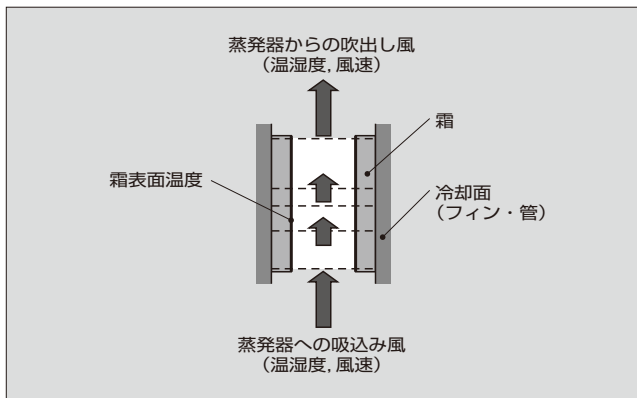


図4 霜計算モデル

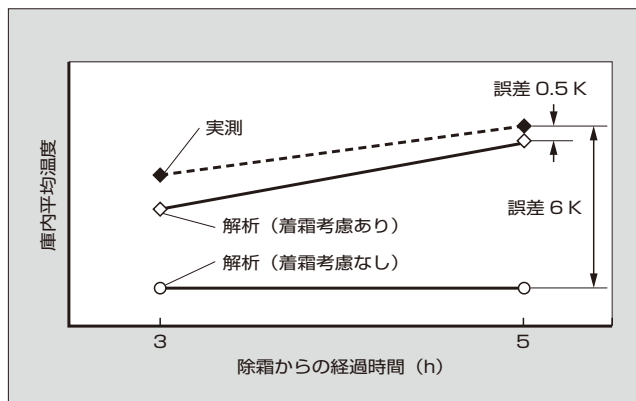


図5 庫内平均温度の経時変化の例

霜表面温度を用いる。着霜は蒸発器の流れ方向に分布して生じる。空気が最も高温多湿となる入口側に、特に多く付着する。このため、着霜の予測精度の向上には蒸発器の流れ方向における霜の分布を模擬する必要がある。そこで、蒸発器を流れ方向にいくつかの区間に分割したモデルとし、それぞれの区間で吸込み風の温湿度を基に霜の厚さや熱伝達率を予測した。その霜の厚さから蒸発器の圧力損失と除湿後の湿度を計算し、算出した空気の温湿度を次の区間に受け渡し、全区間において計算を実施するモデルとした。

着霜を考慮した庫内平均温度の経時変化をシミュレーションにより算出し、実測結果との比較検証を行った(図5)。着霜を考慮しない場合は庫内温度に変化はないが、着霜を考慮することにより、経過時間とともに庫内温度が上昇することが分かり、実測の傾向と一致した。庫内温度の上昇は、着霜により蒸発器と循環空気の熱交換量が低下したことに加え、エアカーテンの風速が低下して前面開口部からの空気の侵入が増加したことによる。

3.2 最適化設計技術

図6に示すように、オープンショーケースのエアカーテン気流制御に関わる因子は多数あり、それらのバランスを取るための最適化設計技術を開発した。図7に本技術を用いた設計フローを示す。オープンショーケースは機種数が多く機種ごとに因子数が異なること、および多因子に対応するため、因子数を自由に決定できるラテン超方格法(LHD: Latin Hypercube Design)に基づき計算サンプルのパラメータを決定した。次に、配置した計算サンプルに基づき、3.1節で述べた熱流体シミュレーション技術を用いたショーケース設計ツール(図8)で解析モデルの作成と解析を実行する。そして、解析結果(特性値)を用いて放射基底関数(RBF: Radical Basis Function)ネットワークを用いた応答曲面近似を実施し、粒子群最適化法(PSO: Particle Swarm Optimization)により最適解を求めた。例えば、図6に示した因子数が12個のオープンショーケースの設計では、最適解を得るのに66種類の条件のサンプルを計算した。

多数のサンプルのモデル作成と解析時間の短縮を狙って開発したショーケース設計ツールは、図8に示すよう

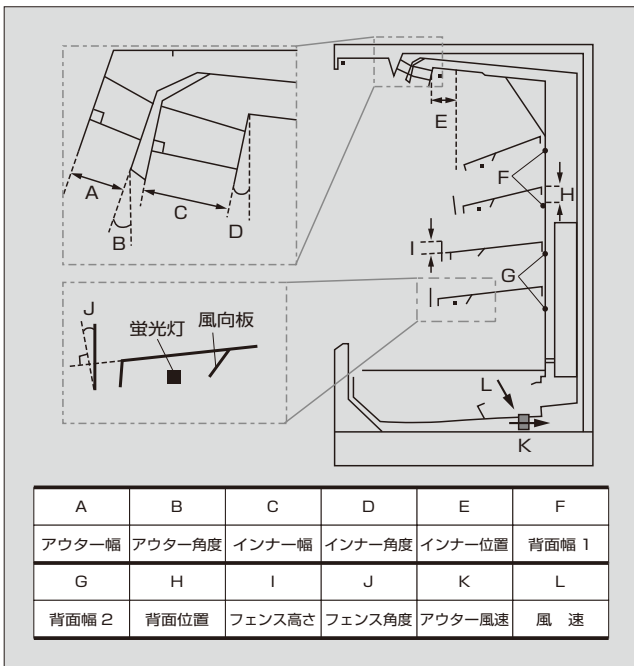


図6 オープンショーケースのエアカーテン気流制御に関わる因子

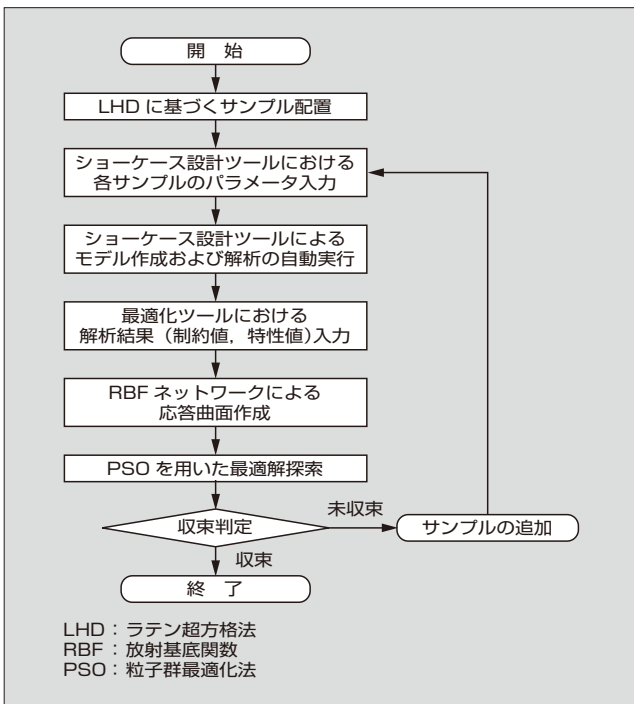


図7 最適化設計技術による設計フロー

に、汎用ソフトウェア (Excel) を用いて各サンプルのパラメータを入力するだけで、メッシュ作成や解析実行、結果表示まで行うことができる。

<注> Excel: 米国 Microsoft Corporation の商標または登録商標

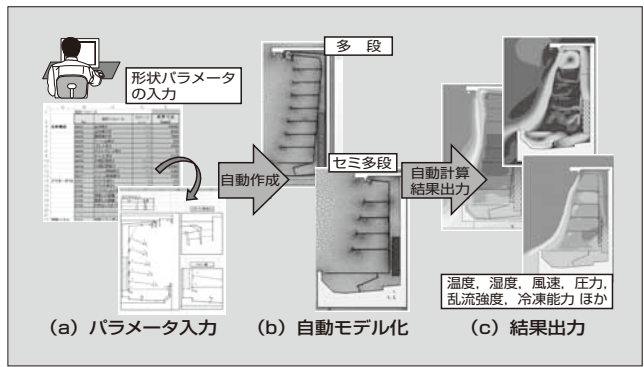


図8 ショーケース設計ツール

4 シミュレーション技術の適用効果

最適化設計技術を用いて開発した新エアカーテン方式と従来方式について、風速分布と乱流エネルギー分布のシミュレーションを行った (図9, 図10)。従来方式は、エアカーテン吹出口から吸込口まで外気遮断性能を維持するために風速が大きい。これに伴い乱流エネルギーも高くなり、前面開口部での暖かい空気の巻込み量が多くなっている。一方、新エアカーテン方式では、背面吹出口からの冷気をエアカーテンに徐々に合流させているためエアカーテン吹出し風速が小さくなり、乱流エネルギーも小さくなって暖かい空気の巻込み量が減少した。

このシミュレーション結果を基に実証機を製作し、評価を行った結果、従来方式に比べて30%以上の省エネ化が

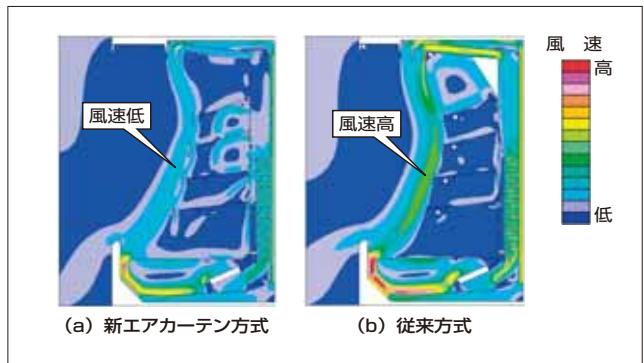


図9 風速分布のシミュレーション結果

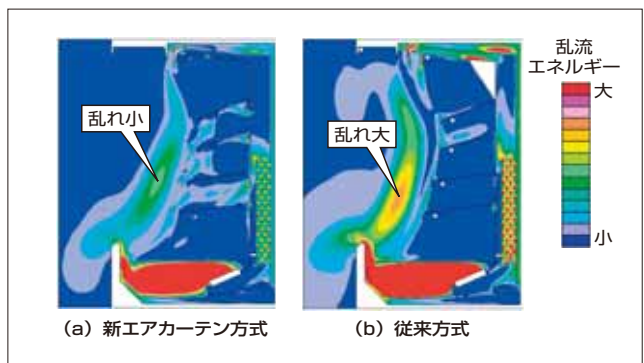


図10 乱流エネルギー分布のシミュレーション結果

実現できた。また、前面開口部からの空気の侵入が減ったことに伴って冷媒の蒸発温度を約 4K 上昇させることができ、着霜量が少なくなったことも省エネ化に寄与したと考えられる。

⑤ シミュレーション技術の今後の展開

富士電機は、オープンショーケースについて、さらなる省エネ化や、二次元断面では模擬できないショーケースの設計を目指し、三次元熱流体シミュレーション技術を開発している。図 11 に三次元熱流体シミュレーションによる気流解析の例を示す。三次元のシミュレーションにより、エアカーテンの長手方向の風速分布が均一となるような構造を開発している。このように、エアカーテンやダクト内の三次元方向の気流を検証する技術を今後確立し、オープンショーケースのさらなる省エネ化を行う。

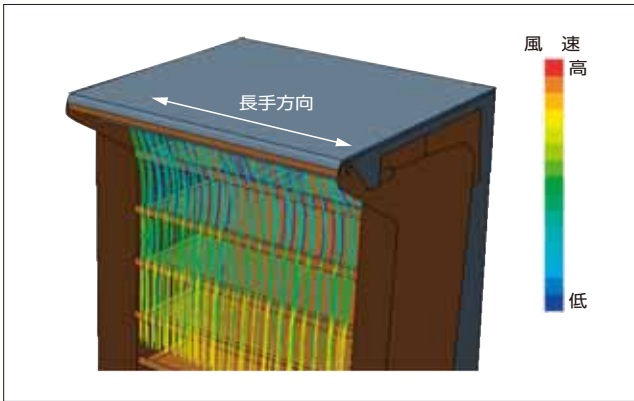


図 11 三次元シミュレーションによる気流解析の例

⑥ あとがき

オープンショーケースにおいて、着霜を考慮した熱流体シミュレーション技術を開発し、最適化設計技術を用いた新エアカーテン方式により省エネルギー化を実現した。今後は、このシミュレーション技術の開発設計への活用をさらに進め、よりいっそう地球環境にやさしい省エネルギー対応のオープンショーケースを提供していく所存である。

参考文献

- (1) 浅田規. オープンショーケースにおけるエアカーテンの熱流体解析. 冷凍. 2009, 4 (981), p.43-48.
- (2) 北山哲士ほか. BFネットワークによる逐次近似最適化(サンプル関数の基礎的検討). 日本機械学会論文集C編. 2010, vol.76, no.768, p.1978-1987.



中島 正登

ショーケース、要冷倉庫などの冷熱関係の研究開発に従事。富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター熱応用システム研究部主任。



浅田 規

ショーケース、要冷倉庫などの冷熱関係の研究開発に従事。富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター熱応用システム研究部マネージャー。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。