A142 冷蔵ショーケースにおけるエアカーテン流れの最適化

藤生 達郎[○] (東京電機大学大学院) 中山 真太 (東京電機大学)
増子 翔 (東京電機大学) 国吉 光 (東京電機大学)

Optimization of the Air Curtain Flow in a Refrigeration Showcase

Tatsuro FUJIIU, Shinta NAKAYAMA,
Shou MASUKO, Hikaru KUNYOSHI

ABSTRACT

For global warming prevention, energy saving is called for also at the supermarket or the convenience store. In this research, the visualization model of the same size as the system and form was manufactured. It changed and experimented in internal and external double air curtain velocity. The Ar+ laser light sheet was illuminated from the front of a showcase, and the flow in an air curtain and a shelf space was visualized with using dry ice mist for the tracer. PIV was used for the analysis of a flow. The swirl in a leakage and shelf space of an air curtain were evaluated synthetically. As a result, the air curtain leakage has been reduced by making inner side wind velocity increase. Inflow on the shelf of the upper row of an air curtain was one of the causes of a leakage. It became clear that the conditions of the air curtain of a system are satisfactory.

Keywords : Display case refrigeration, Visualization model, Air curtain, PIV, Leakage

1. 緒言

近年, 地球温暖化防止の見地から, スーパーマーケットやコンビニエンスストアにおいても省エネルギー化が求められている。最近の小売業界では, 24 時間営業の店舗が多く, また消費者もこれに慣れ親しんでしまっている。そのため, 店舗の個々の機器の省エネルギー化が非常に重要である。しかしながら, 商品の陳列, そして鮮度の維持に欠かせない冷蔵ショーケースは, 店舗における年間のエネルギー使用比率の約 60%を占めている。さらに, ショーケースの使用エネルギーの中でもエアカーテンによる外気侵入負荷が約 70%と高い割合を占めている。そこで, 本研究では, 実機と同じ大きさの可視化モデルを設計・製作し, PIV を用いて流れの解析を行った。エアカーテン流れの一般的な特性を明らかにし, 流れの最適化を目的とする。

2. 冷蔵ショーケースの問題点

理想の冷蔵ショーケースとは, 庫内の温度分布が設定温度範囲内で均一になることである。しかし, 実際は Fig.1 のように流れるエアカーテンが庫内外の温度差のため内側に湾曲し, 棚にぶつかり各棚の間で空気が滞る。そのため, 庫内温度分布が不均一となる。また現在使用されている冷蔵ショーケースでは, 吹出されたエアカーテンが吸込み口に全て吸収されず, 庫外へと漏れてしまっている。これによりショーケース前面の通路に冷気溜り(コールドアイル)が生じ, 客に不快を与えるだけでなく, エネルギーの損失も大きい。

Fig.1 The visualization model (side view)

Table 1 Size of visualization model

Wide (m)	1.24
Depth (m)	0.88
Height (m)	1.935

3. 実験装置および方法

Fig.1 は実験に用いる可視化モデルで, 実機と同様な構造である。前面下部ファンで空気が循環され, 上部整流器を通してエアカーテンを形成する。二重エアカーテンは内外独立した流路を持ち, 内側流路のみドライアイスで冷却することで, 温度差を設けた。これはエアカーテン内の温度勾配を緩やかにすることで, 外気から庫内への熱侵入を少なくするためである⁽²⁾。

実験条件は、内側吹出し角度 $\alpha=5^\circ$ (外側 $\alpha=0^\circ$)、吹出し風速は、内側風速 u_i と外側風速 u_o について、 $0.6\sim 1.8\text{m/s}$ の組み合わせで、全 16 条件である。トレーサにはドライアイスを選定した³⁾。庫内外の温度差を $10^\circ\text{C}(\pm 1^\circ\text{C})$ として、ショーケース前面よりレーザーライトシートを照射、ビデオカメラで撮影し、映像を PIV によって解析した。撮影はエアカーテンを上下方向に 3 分割、棚を 1 段ずつ、漏れ部を個々で行った。実験断面はショーケースの中央とした。

4. 棚への流入

Fig.2 は内側風速 $u_i=0.6\text{m/s}$ 、外側風速 $u_o=0.6\text{m/s}$ の流れ全体の解析結果である。エアカーテンが棚にぶつかり、棚間に流入したエアカーテンが渦を形成する。そして、吸込み口付近ではエアカーテンが全て吸込まれず、漏れている。

次に、棚間の渦・滞留を独自の評価法(渦の大きさと速さを組み合わせた評価)を用いて、棚へ流入するエアカーテンを比較した。その一例が、Fig.2 の右端の大文字アルファベットである。A が最もエアカーテンの影響が強く、順に $B\rightarrow C\rightarrow\dots, F$ で最も小さいとした。

各条件を同様に比較した結果、1 段目(上段から 1, 2, 3... とし、その棚の上の空間を○段目と呼ぶ)は、風速が上がると棚前面に衝突するエアカーテンが増すため、影響は大きくなる。しかし、他の棚に比べて影響はほとんどなく、渦のでき方や流れ方は同じである。

2 段目では、内側風速の値が大きいほど影響が大きくなる。それは湾曲したエアカーテンの内側が、棚に衝突しているためである。

3, 4 段目は外側風速の値が大きいほど影響が大きくなる。とくに 4 段目では、吸込み口付近であるため、内外のエアカーテンが一体化するため、吹出し流量によっても左右される。

5 段目は、1 段目と同様に吹出し流量で決まるが、渦の回転方向はまちまちで、棚全体で渦を形成する場合が多い。

Table 2 は棚への影響の比較結果の一覧である。とくに注目すべきは、 $u_i=1.8(\text{m/s})$ 、 $u_o=0.6(\text{m/s})$ と $u_i=0.6(\text{m/s})$ 、 $u_o=1.8(\text{m/s})$ の結果で、3 段目以下の棚への影響に大きな差が生じている。棚への影響は吹出し風量で決まらず、内・外のエアカーテンの吹出し風速が影響を与えている。外側風速が増加すると、各条件で棚への影響が強くなる。しかし、内側風速の増加に対しては、外側風速の増加ほど影響は少ない。内側風速も $1.8(\text{m/s})$ では棚への影響は大きい、内側エアカーテンは棚前面を沿うように流れるため当然の結果と考えられる。ここで、内側エアカーテンが外側エアカーテンに与える影響について考えると、内側エアカーテンが増加することにより、棚前面で安定した流れを形成することができ、各棚で大きな影響の差を生じにくい。

この結果を踏まえて、各条件のエアカーテンの漏れの比較を行い、エアカーテンの流れの特性を明らかにしていく。

Fig.2 Flow in the whole refrigeration showcase

Table 2 Comparison of influence on a shelf

Outer air curtain velocity u_o (m/s)	Inner air curtain velocity u_i (m/s)				shelf
	0.6	0.9	1.2	1.8	
0.6	F	F	F	F	1
	C	E	E	E	2
	E	E	D	D	3
	E	E	D	C	4
	E	E	E	C	5
0.9	F	F	F	F	1
	C	C	D	D	2
	C	C	B	B	3
	C	B	B	B	4
	C	C	C	B	5
1.2	E	E	E	C	1
	D	D	C	A	2
	C	B	C	A	3
	C	B	C	A	4
	C	C	B	B	5
1.8	E	D	D	C	1
	E	C	B	B	2
	B	C	B	A	3
	B	C	B	A	4
	A	B	B	B	5

5 庫外への漏れ

エアカーテンを評価する上で最も重要なのが漏れである。まず、エアカーテンの漏れの定義を Fig.3 に示す。漏れ量 Q は、Fig.3 の吸込み口前面(ショーケース前面)を外側に通過するエアカーテンの風速を、解析画像より積算して求める。なおショーケース幅方向にエアカーテンの吹出し風速が一樣であることを、予め確認できたため、1 断面の解析結果より、ショーケース全体の漏れを算出することが可能である。その値を吹出し流量で割ることで、漏れ率 X と定義した。

Fig.3 The definition of air curtain leakage

5.1 内側風速を一定にした場合

内側風速を一定にし、外側風速を変えた場合で、エアカーテンの漏れがどのように変わるかを Fig.4 の漏れ率と Fig.5 の漏れ量から考察する。

Fig.4 の漏れ率から、内側風速が速い方が全体的に漏れ率は低いことがわかる。例外は内側風速が 0.6m/s と 0.9m/s の一部でそれが逆になっている。理由として、内側風速が 0.9m/s のみ他の内側風速の特性と異なっていることである。内側風速 0.9m/s の場合、外側風速が 1.2m/s のときに漏れ率が増加していなく、外側風速の増加に伴い漏れ率が低下している。

Fig.4 The rate of air curtain leakage

Fig.5 の漏れ量では、外側風速の増加に伴い漏れ量が増加している。しかし、内側風速が 1.2m/s と 1.8m/s では、外側風速が 1.8m/s のときに漏れ量が減少している。エアカーテンの吹出し流量が多い 1.8m/s で、漏れ量が減少するのは吸込み口での負圧の増加が考えられる。また、内側風速が速い条件の方が漏れ率が低かったことを考えると、内側風速の増加は漏れ率の低減には有効である。

Fig.5 The amount of air curtain leakage

5.2 外側風速を一定にした場合

外側風速を一定とし内側風速を変えた場合で、エアカーテンの漏れがどのように変わるかを Fig.6 の漏れ率と Fig.7 の漏れ量から考察する。

Fig.6 の漏れ率から、外側風速が 0.6m/s と 0.9m/s そして 1.2m/s と 1.8m/s の特性がそれぞれ似ていることがわかる。前者の方は内側風速が 0.9m/s で最大値を示し、山形の図である。後者の方は、右肩下がりの特性が同じである。また、外側風速が 1.2m/s の方が漏れ率は多く、それ以外の条件では内側風速が 1.8m/s で漏れ率が 10%以下を示すが、外側風速 1.2m/s は漏れ率の変動も少ない。

Fig.7 の漏れ量では、外側風速が増加することにより漏れ量が増加している。とくに、内側風速が 0.6m/s での漏れ率がほぼ同じ値であるのに対して、漏れ量は外側風速の増加に伴っている。さらに漏れ率の様に右肩下がりでないため、内側風速の増加による吹出し流量の増加が漏れ量を増加させている。漏れ量を低減させるためには、外側風速の低下が有効的である。

Fig.6 The rate of air curtain leakage

6. 条件別の漏れの比較

漏れの評価に、(1)式に示すような風速比 ϕ を用いて、内外のエアカーテンの風速と合わせて、最適な吹出し風速の条件について考察する。

$$\phi = \frac{u_i}{u_o} \quad (1)$$

6.1 吹出し風速と漏れ率

解析結果より実機で起こっているエアカーテンの湾曲、棚間で発生する渦、そしてエアカーテンの漏れが確認できた。そこでエネルギー損失の主な原因である漏れに着目し、各条件について比較した。漏れの比較には2章でも述べたように、漏れ量を噴出し流量で割った漏れ率 χ を用いた。その結果をFig.8に示す。縦軸に内側風速、横軸に外側風速をとった。この図を内側風速 u_i を0.9m/sを境にして2つの領域に分ける(一点鎖線)と、 $u_i=0.9$ m/s以下の領域において結果は悪く、両領域の漏れ率の平均を比較すると約3.3%の差が表れた。このことより、内側風速が1.2m/s以上の実験条件で漏れ率は小さく、良好である。

6.2 吹出し風速と漏れ量

上記より漏れ率が低い良い条件と、高い悪い条件について領域別で特定できた。しかし、漏れ率はあくまで割合であり、漏れの絶対量を比較する必要がある。Fig.9に漏れ量 ζ を示す。

外側風速 u_o を1.2m/sで2つの領域に分ける(一点鎖線)と、 $u_o=1.2$ m/s以上の領域で結果が悪化する。両領域の漏れ量の平均を比較すると約0.007m³/sの差がある。このことより、 u_o が0.9m/s以下で実験条件で漏れ量は少なく良好である。

6.3 風速比による比較

内側風速を外側風速で割った風速比 ϕ と漏れの関係をFig.9に示す。 $u_i=0.9$ m/sおよび $u_o=1.2$ m/sにより4つの領域に分ける(一点鎖線)。漏れ率・漏れ量ともに良好な結果が得られた $u_i=1.2$ m/s以上 $u_o=0.9$ m/s以下の領域では風速比 $\phi=2.08$ となり、内側風速は外側風速の約2倍である。どちらか一方で良好な結果が得られた右上および左下の領域では風速比 $\phi=1.04$ となった。また漏れ率・漏れ量ともに悪い結果となった $u_i=0.9$ m/s以上 $u_o=1.2$ m/s以下の右下の領域では、風速比 $\phi=0.52$ となり内側風速は外側風速の約半分となった。

7. まとめ

冷蔵ショーケースのエアカーテンの棚への流入と漏れに着目し、PIVを用いて解析を行い、以下の結果を得た。

- (1) エアカーテンの棚への流入は、吹出し流量により大きく左右され、上部1, 2段目への流入がエアカーテンの流れを乱し、漏れを引き起こしている。
- (2) 漏れを低減するためには、エアカーテンの吹出し速速比

Fig.7 The amount of air curtain leakage

Fig.8 The rate of air curtain leakage

Fig.9 The amount of air curtain leakage

ϕ を1以上にすると良い。

今後、最適化を計る上で、この条件を満たし、速度比を考慮していく必要がある。また、可視化モデルの吹出し位置、内側吹出し角度などの変更も必要になると考えられる。

8. 参考文献

- (1) 福島宣弘: 最近のショーケース, 冷凍, Vol.75, (2000), 4
- (2) 水野順之: 日本冷凍空調学会, No61・700, (1986・2), 160, 161
- (3) 相川, 国吉: 冷凍・冷蔵ショーケースにおけるエアカーテンの解析, 鹿児島地方講演会講演論文集, No.038-2(2003), 235, 236