

A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースのリスクアセスメントのための 冷媒漏えい解析

Refrigerant Leak Analysis for Risk Assessment of Built-in Refrigerated Display Cabinet using A3 Refrigerants

山下浩司, 加藤俊匡, 池田真治, 阪江覚, 石原茂樹, 小林章,
海沼秀和, 長谷川敬春, 出野裕, 永井洋, 保坂恵子
一般社団法人 日本冷凍空調工業会

Koji YAMASHITA, Toshimasa KATO, Shinji IKEDA, Satoru SAKAE, Shigeki ISHIHARA, Akira KOBAYASHI,
Hidekazu KAINUMA, Takaharu HASEGAWA, Hiroshi DENO, Hiroshi NAGAI and Keiko HOSAKA
The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association
Kikai Shinko Bldg. 201, 3-5-8, Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011, Japan

In Japan, risk assessments of various appliances had been carried out to establish methods for ensuring the safe use of products using A2L refrigerants, followed by product launches in Japanese market. However, further shift to lower GWP refrigerants is desired in response to the Kigali Amendment. Most of the refrigerants with low GWP are A3 refrigerants with high flammability. Therefore, the Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association have been carried out the risk assessments of built-in refrigerated display cabinets using A3 refrigerants. Refrigerant leak analyses of the reach-in refrigerated display cabinet and the horizontal refrigerated display cabinet were performed to determine the duration of the flammable region and the mean flammable volume. The details are explained in this paper.

Key Word: Refrigerant leak analysis, Flammable Volume, Duration, Display Cabinet, Risk Assessment

1. はじめに

日本では、2011 年から A2L 冷媒を使用した各種機器のリスクアセスメントを行い、安全に運用する方法を確立し、その後、順次製品展開を行っている。しかし、モントリオール議定書のキガリ改正を受け、更なる GWP 値の小さい冷媒への転換が望まれている。GWP 値の小さい冷媒には、LFL (Lower Flammability Limit) が小さく、燃焼性が強い A3 冷媒が多い。

日本冷凍空調工業会 (日冷工) では 2016 年 7 月から A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースのリスクアセスメントを行っている。着火確率の計算には、可燃域継続時間 (可燃域が持続する時間)、平均可燃空間体積 (可燃域継続時間内の可燃空間体積の平均値) 及び可燃空間時空積 (可燃域継続時間と平均可燃空間体積の積) が必要となる。この論文では、これらの値を求めるために行ったリーチインショーケース及び平行ショーケースの冷媒漏えい解析について説明する。なお、解析で

は、ソルバーは STAR CCM+ を使い、乱流モデルは Realizable $k-\epsilon$ モデルを使用した。なお、解析コードはルームエアコンに対する漏えい測定結果¹⁾を用いて検証済みである。

2. リーチインショーケースの庫内漏えい解析

リーチインショーケースの庫内に全冷媒量が漏えい後、扉を急開放する解析を行った。リーチインショーケースの解析モデルを Fig. 1 に示す。ショーケースは、高さ 2.0 m、幅 1.542 m、奥行 0.7 m、庫内体積 1.08 m³ であり、下部には圧縮機、凝縮器及びファンが内蔵された凝縮器ユニットがあり、ショーケースの前面から吸気し、背面を通り、ショーケースの上部に排気する構造となっている。凝縮器ユニットは、開口部面積 8.3×10^{-2} m²、風量 $0 \sim 0.249$ m³/s (風速 $0 \sim 3$ m/s) とした。正方形店舗内の壁際中央にショーケースを設置し、その対面側の天井両隅に 0.4 m × 0.4 m の圧力境界を設置した。庫内均一の冷媒濃度の状態から解析を

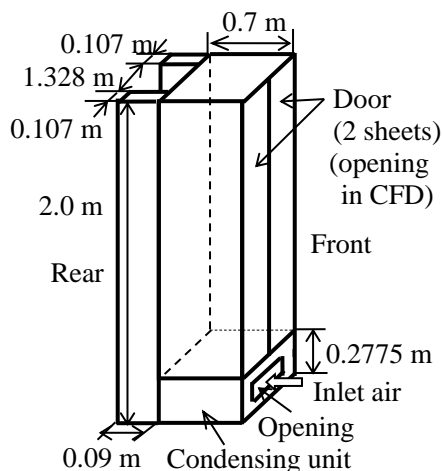


Fig.1 Analysis model of reach-in refrigerated display cabinet

開始し、扉がないものとした。庫内前面の上部から下部に向かって流れるエアカーテンの吹出部は、開口部面積 $6.58 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 、風量 $0.137 \text{ m}^3/\text{s}$ （風速 2.08 m/s ）とし、エアカーテン有無の解析を行った。店舗は、天井高さを 2.2 m とし、床面積を $17.14, 24.01, 36, 64, 100 \text{ m}^2$ と変化させ、冷媒量 0.358 kg 又は 0.5 kg とした。

冷媒量 0.5 kg 、床面積 24.01 m^2 の時の扉開放 10 秒後のショーケース中央での冷媒濃度分布を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) の風量 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ の時は、漏えい冷媒がショーケースから直線的に対面壁まで移動し床面に広く可燃域が広がっている。庫内に漏えいした全冷媒量が扉の開放によって庫外に一気に漏えいするため漏えい速度が速く、周囲への冷媒拡散が冷媒の移動に間に合わないことが原因と考えられる。Fig. 2 (b) のエアカーテン有かつ風量が $0.166 \text{ m}^3/\text{s}$ の時でも床面及び天井面の広い領域に短時間で可燃域が広がっている。

冷媒量 0.5 kg ・エアカーテン無の場合に、凝縮器ユニットの風量及び床面積を変化させた場合の可燃空間体積の経時変化を Fig. 3 に示す。図の (a) は床面積 24.01 m^2 、(b) は床面積 100 m^2 の時である。凝縮器ユニットの風量を大きくした場合、可燃域継続時間は小さくなるが、可燃域は無ならず、可燃空間体積の最大値は殆ど減らない。風量が $0 \text{ m}^3/\text{s}$ の時は、床面積によって可燃空間体積の経時変化が大きく異なるが、風量が $0.083 \text{ m}^3/\text{s}$

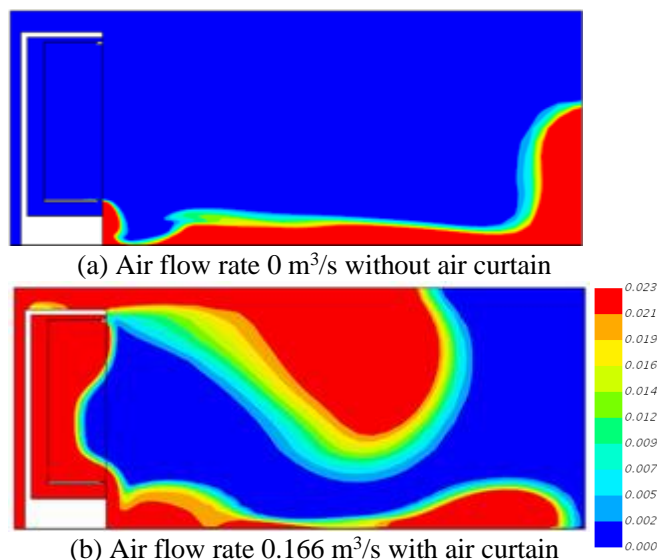
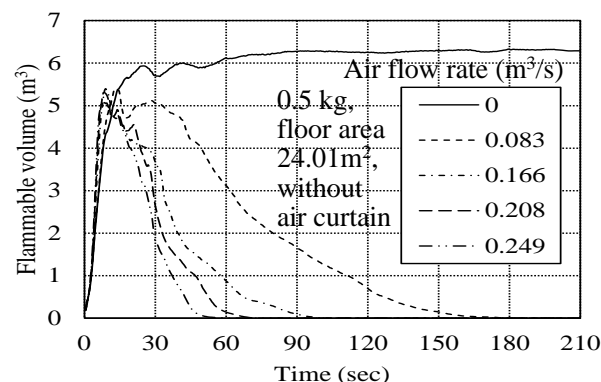
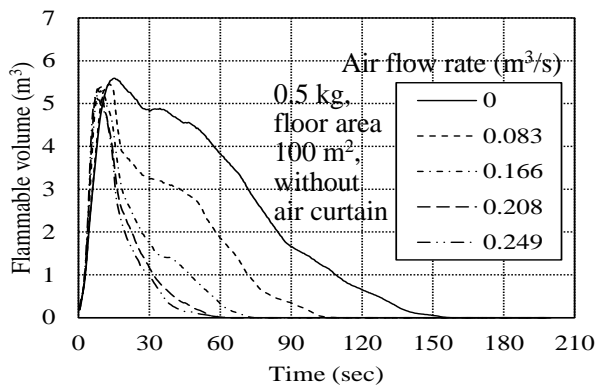


Fig. 2 Concentration distribution after 10 s from door opening (refrigerant 0.5 kg ; floor area 24.01 m^2)



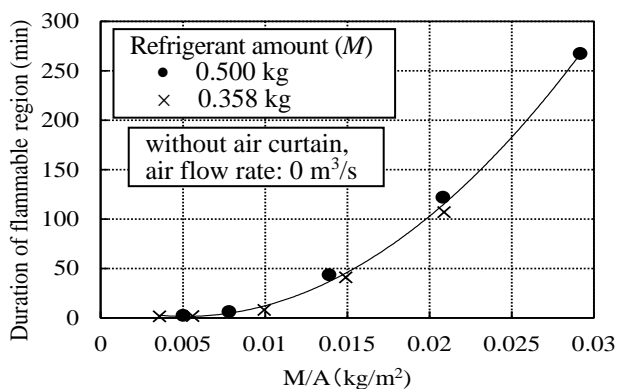
(a) 0.5 kg and floor area 24.01 m^2 without air curtain



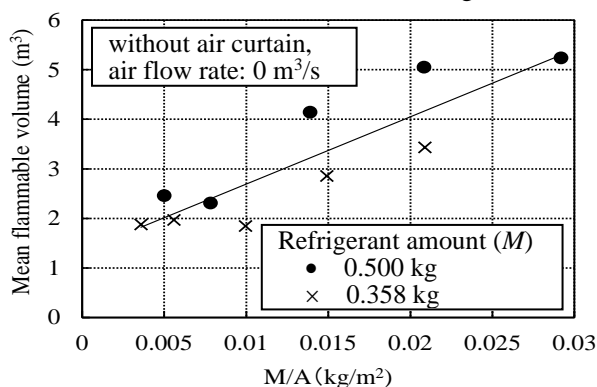
(b) 0.5 kg and floor area 100 m^2 without air curtain

Fig.3 Change with time in flammable volume when floor area and condenser air flow rate are varied

以上の時は、床面積が可燃空間体積に与える影響はそれほど大きく無い。A3 冷媒では、静電気や電気機器のリレー等が着火源となるため、可燃域の生成が短時間であっても、可燃域内に着火源が存在すれば容易に着火に至る可能性がある。しかし、IEC 60335-2-89²⁾では、扉開放開始から 5 分以内に

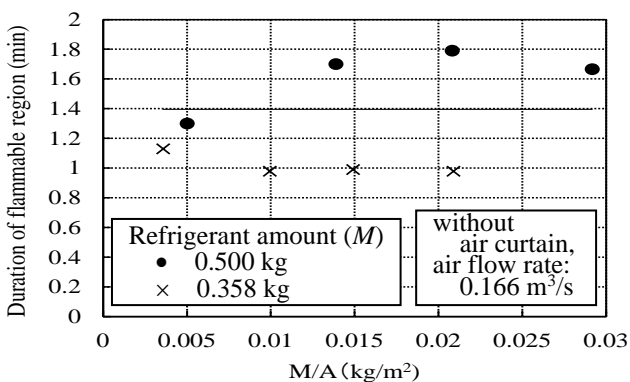


(a) Duration of the flammable region

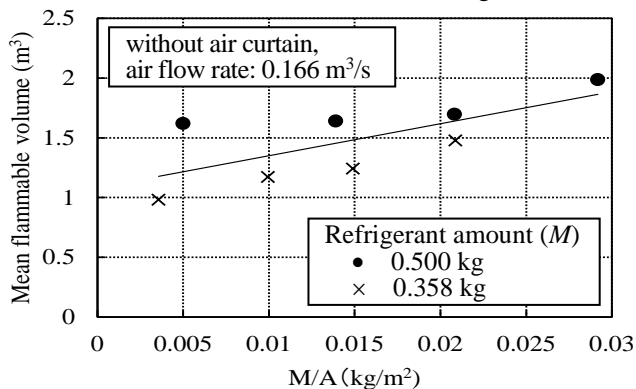


(b) Mean flammable volume

Fig. 4 Calculation results for a reach-in refrigerated display cabinet at air flow rate of 0 m³/s without air curtain



(a) Duration of the flammable region



(b) Mean flammable volume

Fig. 5 Calculation results for a reach-in refrigerated display cabinet at air flow rate of 0.166 m³/s without air curtain

大きな可燃空間が生成されても、可燃域が生成されないといみなされてしまう。

エアカーテン無時の可燃域継続時間及び平均可燃空間体積の解析結果を Fig. 4 及び Fig. 5 に示す。図は、それぞれ凝縮器ユニットの風量が 0 m³/s、及び 0.166 m³/s (風速 2.0m/s) の場合の解析結果であり、図の横軸は冷媒量を床面積で除した値 (M/A) である。M/A の関数として求めた可燃域継続時間及び平均可燃空間体積の最小二乗近似式を式(1)～式(4)及び Fig. 4, Fig. 5 の実線で示す。

air flow rate 0 m³/s;

$$T_v = 4.61 \times 10^5 \times (M/A)^2 - 4.76 \times 10^3 \times (M/A) + 1.38 \times 10^1 \quad (1)$$

$$V_v = 1.36 \times 10^2 \times (M/A) + 1.34 \quad (2)$$

air flow rate 0.166 m³/s;

$$T_v = 1.40 \quad (3)$$

$$V_v = 2.68 \times 10^1 \times (M/A) + 1.08 \quad (4)$$

リーチインショーケースには、庫内の前面に上部から下部に向けた気流が形成されるエアカーテン方式や庫内の背面から前面に向けた気流が形成される背面吹出方式等、庫内の気流が異なる幾つかの種類がある。日冷工のリスクアセスメントでは、想定可能な最悪状態を想定し、エアカーテン方式でのエアカーテン無の時の解析結果を用いることとし、凝縮器ユニットの風量有及び無の時の値をそれぞれ運転時及び停止時の値として使用する。

3. 平形ショーケースの凝縮器ユニット漏えい解析

平形ショーケースの下部の凝縮器ユニットからの冷媒漏えい解析を行った。平形ショーケースの解析モデルを Fig. 6 に示す。平形ショーケースは、高さ 0.81 m、幅 1.8m、奥行 1.09 m とした。凝縮器ユニットは、一方の開口部から吸気し他方の開口部から排気する。凝縮器ユニットの空気の入出口の開口部の面積は双方とも $6.89 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ (幅 0.733 m × 高さ 0.094 m) とし、解析では開口部の風量を 0~0.207 m³/s (風速 0~3 m/s) の間で変化させた。ショーケースは正方形の店舗内の中央に

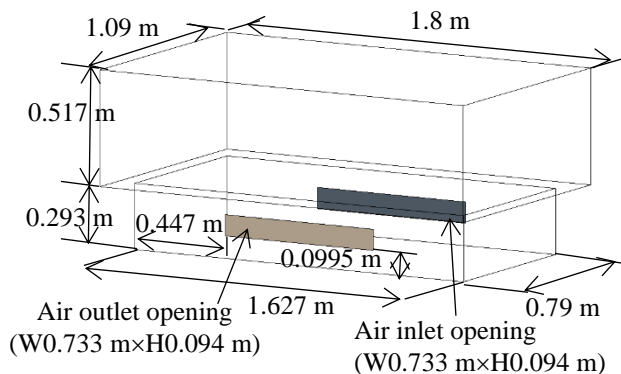


Fig. 6 Analysis model of horizontal refrigerated display cabinet

設置し、店舗内一面の天井両隅に 0.4 m×0.4 m の圧力境界を設置した。凝縮器ユニットの開口部では、風量 0 m³/s の時は、開口部の吸込口及び吹出口の双方から均等に漏えいさせ、開口部の冷媒濃度を 100% とし、風量が 0 m³/s よりも大きい時は、吹出口から漏えいさせ、開口部の冷媒濃度は計算値を使用した。漏えい速度は 4 分で全冷媒量を漏えいさせる値 (4 分全量漏れ) とした。店舗内の床面積を 15.21, 24.01, 36, 64, 100 m² と変化させ、冷媒量を 0.358 kg と 0.5 kg で変化させた。店舗内の天井高さは 2.2 m とした。

凝縮器ユニットの風量が 0 m³/s の場合の可燃域継続時間及び平均可燃空間体積の解析結果を Fig. 7 に示す。図の横軸は冷媒量を床面積で除した値 (M/A) である。M/A の関数として求めた可燃域継続時間及び平均可燃空間体積の最小二乗近似式をそれぞれ式(5)、式(6)及び Fig. 7 の実線で示す。なお、R600a での漏えい解析も行った結果、可燃空間時空積が R290 よりも約 10% 大きかった。

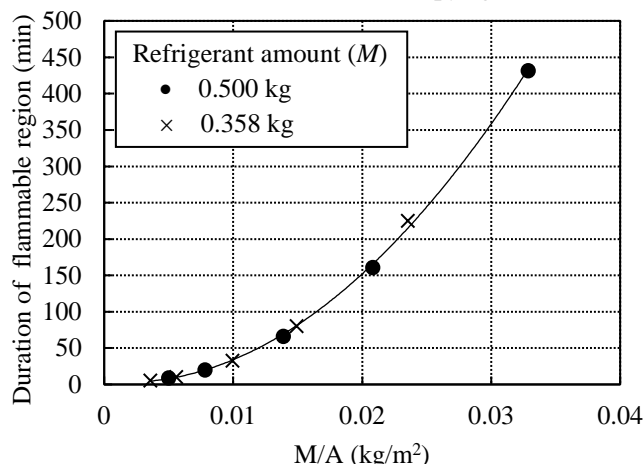
air flow rate 0 m³/s;

$$T_v = 4.41 \times 10^5 \times (M/A)^2 - 1.42 \times 10^3 \times (M/A) + 3.94 \quad (5)$$

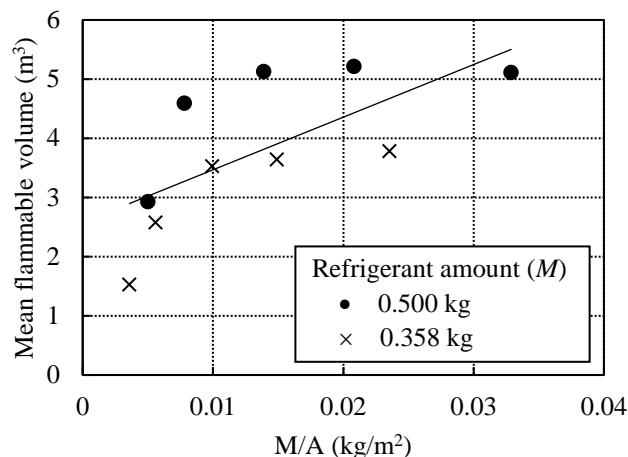
$$V_v = 8.90 \times 10^1 \times (M/A) + 2.58 \quad (6)$$

凝縮器ユニットからの漏えい冷媒の攪拌について、可燃域を生成しない風量として式(7)が提案されている³⁾。

$$Q = \frac{5 \times \sqrt{A_0} \times w^{3/4}}{h_0^{1/8} \times \{G \times (1 - F)\}^{5/8}} \quad (7)$$



(a) Duration of the flammable region



(b) Mean flammable volume

Fig. 7 Calculation results for a horizontal refrigerated display cabinet at air flow rate of 0 m³/s

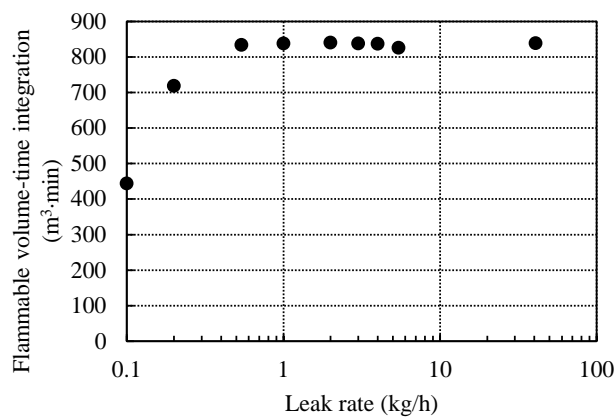


Fig. 8 Calculation results of flammable volume-time integration when leak rate varies

床面積 24.01 m², R290 が 0.5 kg, 漏えい速度 7.5 kg/h の時、式(7)の風量である 0.150 m³/s (風速 2.182 m/s) 及び 8.4% 小さい風量 0.138 m³/s (風速 2.0 m/s) で可燃域が生成されなかった。R600a でも同様の解析を行い、式(7)の風量及び 9.8% 小さい風量で

可燃域が生成されなかった。

次に、床面積 24.01 m²、R290 が 0.5 kg、風量 0 m³/s の時、漏えい速度を 0.1~40.71 kg/h と変化させた場合の可燃空間時空積の計算結果を Fig. 8 に示す。可燃空間時空積は、漏えい速度が 0.54 kg/h 以上では殆ど変わらず、それよりも遅いと値が小さくなるが、0.1 kg/h でも漏えい速度が 0.54 kg/h の時の約 50% の値がある。よって、微少漏れ (R290 では 0.54 kg/h 以下) でも大きな可燃空間が形成される。従って、リスクアセスメントでは、微少漏れを含む全ての漏えいを考慮して着火確率を計算する必要がある。なお、リスクアセスメントは 4 分全量漏れ (0.5 kg の R290 の場合は 7.5 kg/h) の時の可燃空間時空積を用いて行うが、解析結果から、この設定に大きな問題はないことも分かった。

4. ドア上下隙間の影響

店舗のドア上下隙間有のドアを設置したモデル図を Fig. 9 に示す。Fig. 1 に示すリーチインショーケース (エアカーテン無、凝縮器ユニット風量 0 m³/s) を正方形の店舗内の壁際中央に、Fig. 6 に示す平行ショーケース (凝縮器ユニット風量 0 m³/s) を店舗内の中央に設置し、リーチインショーケースの対面側の天井両隅に 0.4 m×0.4 m の圧力境界を設置した。なお、解析では、いずれかのショーケースのみを設置した。店舗内のドアは、幅 0.8 m、高さ 1.875 m (隙間含む)、ドア上隙間 10 mm、ドア下隙間 10 mm とし、リーチインショ

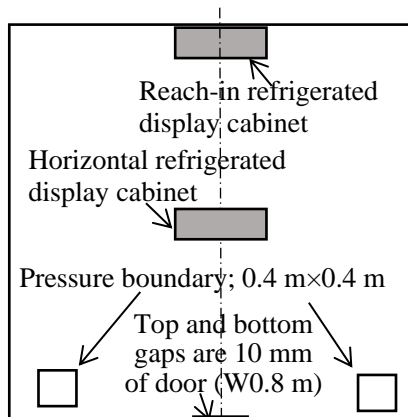
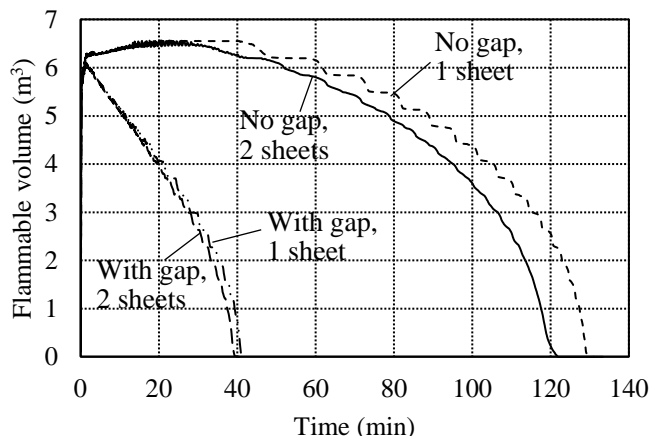


Fig. 9 Analysis model of store with door

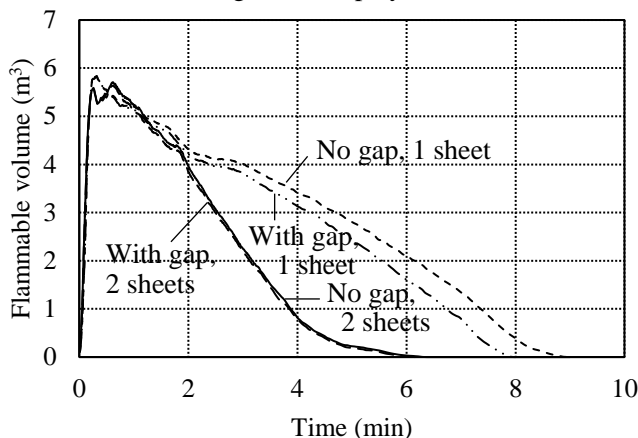
ーケースの対面側の壁の中央又は平行ショーケースの長手方向に平行な方向に配置した。リーチインショーケースの解析では、扉の急開放枚数を変化させ、急開放枚数が 1 枚の時は、向かって右側の扉を急開放した。R290 が 0.5 kg、店舗天井高さは 2.2 m とし、床面積を 24.01, 36, 64, 100 m² と変化させた。

床面積 24.01, 64 m² の時のリーチインショーケースの可燃空間体積の経時変化を Fig. 10 に示す。床面積による可燃空間体積の最大値の差は殆どなかった。24.01 m² の時は、可燃域継続時間は、急開放枚数 1 枚の方が長く、ドア上下隙間無の方が長い。64 m² ではドア上下隙間有無による差は微少になる。なお、100 m² になるとドア上下隙間有無の差は殆ど無くなり、急開放枚数による違いも更に小さくなる。

床面積 24.01, 64 m² の時の平行ショーケースの

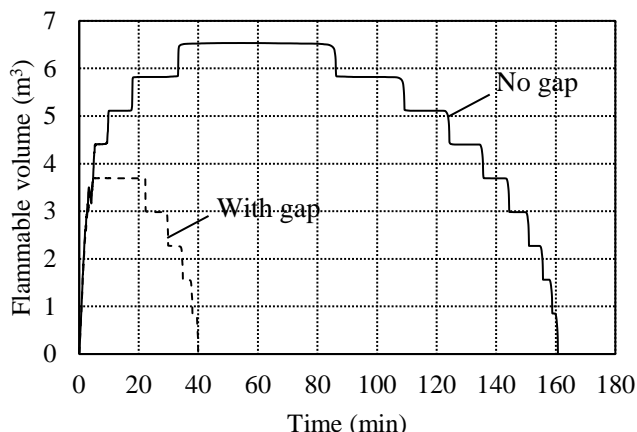


(a) Reach-in refrigerated display cabinet at 24.01 m²

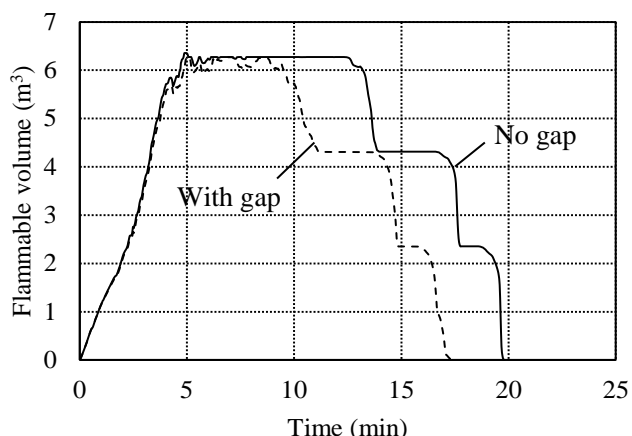


(b) Reach-in refrigerated display cabinet at 64 m²

Fig. 10 Change with time in flammable volume (reach-in refrigerated display cabinet)



(a) Horizontal refrigerated display cabinet at 24.01 m²



(b) Horizontal refrigerated display cabinet at 64 m²

Fig. 11 Change with time in flammable volume (horizontal refrigerated display cabinet)

可燃空間体積の経時変化を Fig. 11 に示す。リーチインショーケースの場合とは異なり、床面積 24.01 m² では、最大可燃空間体積・可燃域継続時間ともに、ドア上下隙間有無による差がみられる。ドア上下隙間が有る時は無い時に対して、最大可燃空間体積が 55.4%、可燃域継続時間が 25.0% になる。床面積 64 m² では、ドア上下隙間による最大可燃空間体積の差は殆ど無くなり、可燃域継続時間は隙間無に対して 85.6% とあまり差は無い。なお、100 m² になると、可燃域継続時間の差は殆ど無くなる。

リスクアセスメントを行うコンビニエンスストアは、床面積が 84.7 m² であり、その面積では、リーチインショーケース、平行ショーケースともにドア上下隙間の影響が少なく、密閉空間に対して求めた値を使用してリスクアセスメントを行っても問題ない。

5. 実店舗モデルでの漏えい解析

コンビニエンスストアの実店舗を想定した店舗モデル図を Fig. 12 に示す。図の左側には、高さ 850 mm の壁で仕切られたレジカウンター（厚み無しに設定）があり、その中央付近には幅 600 mm の扉（Fig. 12 の Door 5）がある。図の店舗面積は 112 m²、レジ内を除いた面積は 102 m²、天井高さは 2.2 m で、店舗には次の仕様のドアが 5 箇所ある。Door 1 は事務所で幅 0.8 m × 高さ 1.875 m [隙間：上 6 mm、下 15 mm]、Door 2 はバックヤードで幅 0.8 m × 高さ 1.875 m [隙間：上 10 mm、下 20 mm]、Door 3 はトイレで幅 0.7 m × 高さ 1.875 m [隙間：上 6 mm、下 15 mm]、Door 4 は店舗入口で幅 1.6 m × 高さ 1.875 m [隙間：無]、Door 5 はレジで幅 0.6 m × 高さ 0.8 m [隙間：下 75 mm] とした。店舗内の中央左側に 0.25 m × 0.25 m の圧力境界を設定した。リーチインショーケースは、図の右下外側及び図の右上外側に設置し、平行ショーケースは店舗内の中央付近に店舗入口ドアと平行な方向に長手方向を設置した。解析では、いずれかのショーケースのみを設置した。また、店舗全体の寸法を変化させて面積を小さくした場合の解析も行った。この場合の店舗面積は 75.4 m²、レジ内を除いた面積は 57.4 m² であった。リーチインショーケースは Fig. 1 (エアカーテン無、凝縮器ユニット風量 0 m³/s) に示すものを使用し、庫内に全冷媒量漏えい後、2 枚扉の内の右側の扉を急開放させた。平行ショーケースは Fig. 6 (凝縮

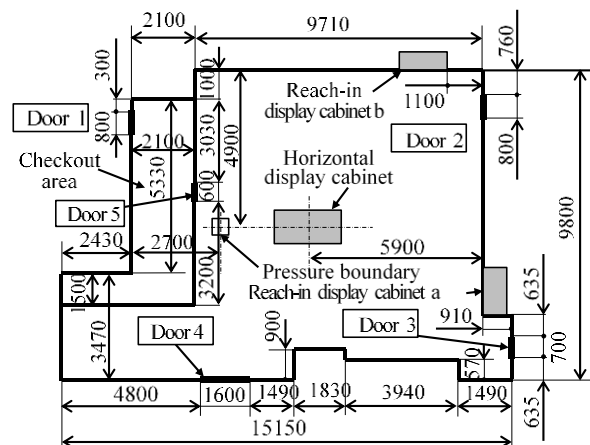


Fig. 12 Convenience store model (unit: mm)

器ユニット風量 $0 \text{ m}^3/\text{s}$) に示すものを使用し、漏えい速度は 4 分全量漏れとした。冷媒は R290 が 0.5 kg とした。

リーチインショーケースにおいて、実店舗モデルのレジ内を除いた床面積を A とした場合の実店舗モデルの解析結果と正方形空間の解析結果の比較を Fig. 13 に示す。概ね正方形空間と実店舗モデルは同様の傾向を示している。従って、リーチインショーケースの庫内漏れに関して、実店舗モデルでは、床面積としてレジ内を除いた値を使用するのが適切と思われる。リーチインショーケースでは、庫内の冷媒が一気に外部に漏れ出し、実質の漏えい速度が速いため、漏えい冷媒が周囲に拡散するよりも直進する方が速く、床面近辺に滞留する冷媒がレジ内に冷媒が流れ込まないものと思われる。なお、凝縮器ユニットのファンで冷

媒を攪拌した場合は、冷媒が店舗内に拡散されるため、床面積としてレジ内も含めた値を使用するのが適切である。

次に、平形ショーケースにおいて、実店舗モデルのレジ内も含めた床面積を A とした場合の実店舗モデルの解析結果と正方形空間の解析結果の比較を Fig. 14 に示す。概ね正方形空間と実店舗モデルは同様の傾向を示している。従って、平形ショーケースの凝縮器漏えいに関して、実店舗モデルでは床面積としてレジ内も含めた値を使用するのが適切と思われる。平形ショーケースでは、漏えい速度が 4 分全量漏れであり、冷媒が周囲に拡散しレジ内にも流れ込んだものと思われる。

これらの結果から、本来はリーチインショーケースの庫内漏えいにおいて凝縮器ユニットのファンで漏えい冷媒を攪拌しない場合のみ、レジ内を除いた値を床面積とすべきである。しかし、評価において、床面積は統一した値とした方がよいので、リスクアセスメント及び安全規格では、店舗のレジ内も含めた値を床面積とする。

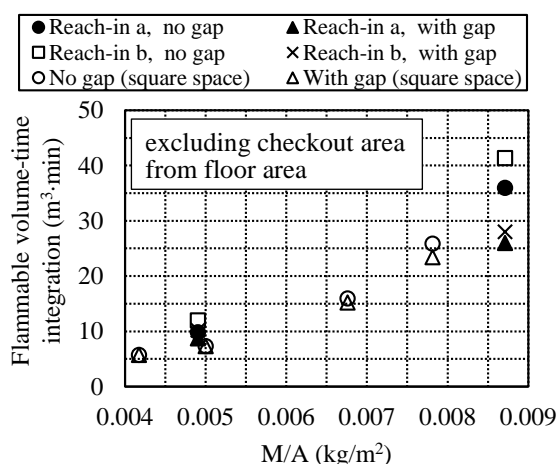


Fig. 13 Reach-in refrigerated display cabinet excluding cash resister from store floor area

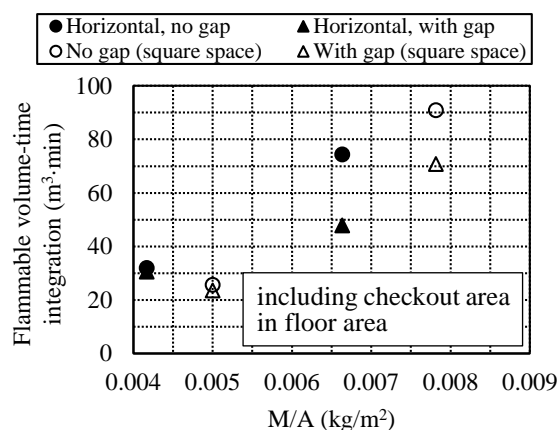


Fig. 14 Horizontal refrigerated display cabinet including cash resister from store floor area

6. まとめ

A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースのリスクアセスメントを行うために、リーチインショーケース及び平形ショーケースの冷媒漏えい解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) リーチインショーケースの庫内漏れは、漏えい後の扉急開放によって庫外に必ず可燃域が形成され、凝縮器ユニットの風量及び床面積を変化させても、可燃空間体積の最大値は殆ど変わらない。A3 冷媒では、可燃域の生成が短時間であっても、可燃域に着火源が存在すれば容易に着火に至る可能性がある。しかし、IEC 規格では、扉開放開始から 5 分以内に大きな可燃域が生成されても、可燃域は生成されないとみなされてしまう。
- (2) 平形ショーケースの凝縮器ユニット漏えいでは、風量を Colbourne らの提案式以上にすると可燃域が形成されない。

- (3) 密閉空間において、リーチインショーケースの庫内漏れに関し、庫内エアカーテン無、凝縮器ユニットの風量有無の時の可燃域継続時間及び平均可燃空間体積の近似式を導出した。また、平行ショーケースの凝縮器ユニット漏れに関し、凝縮器ユニットの風量無の時の可燃域継続時間及び平均可燃空間体積の近似式を導出した。
- (4) ショーケース下部の凝縮器ユニットからの漏えいにおいて、漏えい速度がかなり遅くなくても可燃空間時空積の値に殆ど変化はなかった。従って、微少漏れを含む全ての漏えいを考慮して着火確率を計算する必要がある。また、リスクアセスメントは、4分全量漏れの時の可燃空間時空積を用いて行いが、この設定に大きな問題はないことが分かった。
- (5) ドア上下隙間有無の時のリーチインショーケースの庫内漏れ及び平行ショーケースの凝縮器ユニット漏れの解析を行った結果、コンビニエンスストアの床面積 84.7 m^2 では、ドア上下隙間の影響が少なく、密閉空間に対して求めた近似式を使用してリスクアセスメントを行っても問題ないことが分かった。
- (6) コンビニエンスストア実店舗を想定した漏えい解析を行い、リーチインショーケースの庫内漏れで凝縮器ユニットのファンで冷媒を攪拌した場合及び平行ショーケースの凝縮器ユニット漏れの場合は、レジ内を含めた値を床面積とし、リーチインショーケースの庫内漏れで凝縮器ユニットのファンで冷媒を攪拌しない場合はレジ内を除いた値を床面積とするのが適切であることが分かった。しかし、評価では床面積を統一した方がよいため、リスクアセスメント及び安全規格では店舗のレジ内も含めた値を床面積とすることとした。

謝辞

本研究は、日冷工参加企業である三菱電機、オカムラ、サンデン・リテールシステム、ダイキン工業、東芝キャリア、中野冷機、パナソニック、

フクシマガリレイ、富士電機、ホシザキ、三菱電機冷熱応用システムの各社の委員によって実施された。また、オブザーバとして、堀和貴様、山口広一様、半田誠様、小野口昌宏様、白井瑛一様、堀田丈智様のご協力を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

NOMENCLATURE

A	: floor area, m^2
A_0	: area of air outlet, m^2
F	: coefficient (safety factor), equal to 0.25
G	: LFL, kg/m^3
h_0	: height of centerline of air outlet, m
M	: refrigerant amount, kg
Q	: air flow rate of outlet air, m^3/s
T_v	: duration of the flammable region, s
V_v	: mean flammable volume, m^3
w	: refrigerant leak rate, kg/s

参考文献

- 1) N. Ashihara, M. Ito, C. Dang, E. Hihara and Y. Chen, "Numerical Simulation of Strongly Flammable Refrigerant Leakage from a Split Air Conditioner", Proc. 14th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, 1202 (2020).
- 2) IEC 60335-2-89:2019: "Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-89: Particular requirements for commercial refrigerating appliances and ice-makers with an incorporated or remote refrigerant unit or motor-compressor", (2019.6).
- 3) D. Colbourne and K. O. Suen: "Minimum Airflow Rates to Dilute R290 Concentrations Arising from Leaks in Room Air Conditioners", Proc. 13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, 1104 (2018).