

強燃性冷媒の室内漏洩時の安全性評価

47-186692 芦原 直也
指導教員 飛原 英治 教授

In this study, we evaluated the safety of a highly flammable refrigerant leaking from air-conditioner and showcase to a room using CFD. First, experiments were conducted assuming refrigerant leakage from these equipment models installed in a room. The experiments were conducted using R744 (CO₂) with similar physical properties of R290 (propane) as a refrigerant. Compared to the experiments, the validity of the numerical simulation model was demonstrated. A space-time product of combustible gas was evaluated based on the numerical simulation, which is important for risk assessment of flammable refrigerants with low-global warming potential. We investigated the effects of the leakage in the room area as well as the refrigerant charge and door-to-floor clearance on the space-time product of combustible gas. We also investigated the effect of refrigerant flammability on the maximum refrigerant charge.

Keywords: Refrigerant leakage, R290, R32, Risk assessment

1 緒言

空調機や冷凍機といった熱交換を必要とする機器には、冷媒が使用されている。現在、代替フロンと呼ばれている HFC 冷媒¹⁾が主流で使用されているが、HFC 冷媒は高い地球温暖化係数（以下、GWP）を有することから、2016 年のモントリオール議定書締約国会議にて、HFC を新たに議定書の規制対象とするキガリ改正²⁾が採択された。そのような中、R290 や R600a などの GWP がゼロに近いノンフロン冷媒が、次世代冷媒として注目されているが、これらの物質は可燃性を有するものが多い。そのため、可燃性冷媒が室内に漏洩した際の火災リスクを定量的に評価する必要がある。

そこで本研究では、家庭用空調機や業務用ショーケースの次世代冷媒として期待されている R290 の漏洩時の火災リスクの評価をする為、室内空間における冷媒漏洩時の濃度分布について実機システムを用いた実験的検証を行う。また、冷媒漏洩実験だけでは大空間の諸状況を考慮することは困難であるため、数値流体解析を用いた計算を行う。研究の方針としては、実証実験と計算の結果から数値計算モデル妥当性を検証した上で、適切な安全性評価を行うためのデータ取得を行うことが本研究の目的である。

Table 1 Physical and flammability properties of refrigerants³⁾⁴⁾

	R32	R290	R744
M [kg/mol]	52.02	44.1	44.01
ρ [kg/m ³]	2.191	1.865	1.839
GWP [-]	675	<3	1
LFL [vol. %]	13.3	1.8	—
UFL [vol. %]	29.3	9.5	—
BV [cm/s]	6.7	38.7	—
MIE [mJ]	15	0.246	—

293.15 K, 0.1013 MPa

2 数値流体解析モデルの妥当性

2.1 計算モデル概要

解析ソフトには Ansys Fluent 18.1 を用いた。家庭用エアコンの実験室モデルの概要は Fig. 1 にまとめた。室内モデルは冷媒漏洩実験のために建設した実験室と同等のサイ

ズである 3800 mm×2400 mm×2550 mm とし、エアコンの対面に、 $\phi 100$ mm の排気口とドア下隙間 900 mm×7 mm を設けた。メッシュは依存性を確認し、最適な数作成しており、境界近傍は細くなるよう設定した。初期条件としては、ゲージ圧力を 0 Pa にし、雰囲気温度は 300 K、濃度は 100 vol. % Air とした。排気口とドア下隙間には、圧力境界を設定した。冷媒の漏洩時間は国際規格⁴⁾より 4 min とし、吹出口濃度は 50 vol. % Ref. とした。

業務用ショーケースの実験室モデルについての概要は Fig. 2 にまとめた。室内モデルは建設した実験室と同等のサイズである 5600 mm×3800 mm×2550 mm とし、ショーケースモデル設置壁の側面の壁に排気口と、ショーケースモデルの対面にドア下隙間を設けた。初期条件としては室内に関しては家庭用エアコンと同様であり、ショーケース庫内に関しては充填量と庫内体積から計算し求められた冷媒濃度 X vol. % Ref. を適宜設定している。スウィング扉の回転速度は、国際規格⁵⁾に基づき 3 s で 60°回転するようにしている。

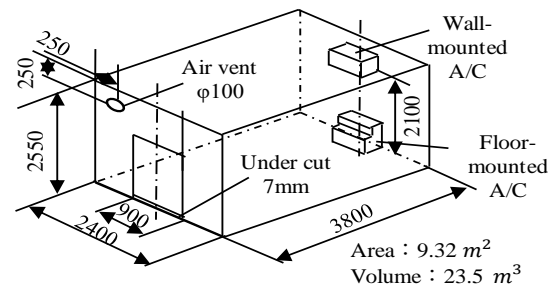


Fig. 1 Modeled room of air-conditioner

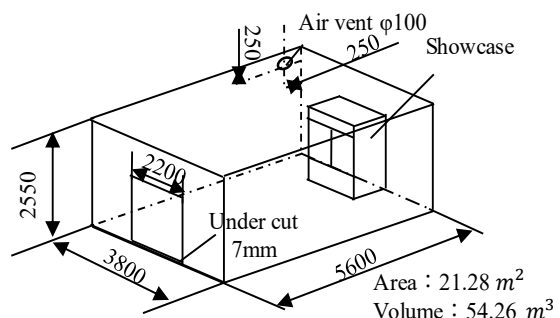


Fig. 2 Modeled room of showcase

2.2 実証実験概要

実験の系統図は Fig. 3 に示す通りである。実験室モデルは家庭用エアコンは Fig. 1 の壁掛けエアコンと、業務用ショーケースは Fig. 2 と同様である。冷媒はエアコンとショーケースの模型に放出し、模型から漏洩する。模型を採用した理由は内部構造を簡略化させるためである。家庭用エアコン模型は、内部に穴付きのアルミ板とハニカム構造を有した整流板を設置し、模型内でガスを攪拌し整流化することで吹出口濃度を均一になるような構造とした。業務用ショーケース模型には、アクチュエータを取り付けることによってスウィング扉の回転速度を制御している。

冷媒は R290 と物性値に近い R744 を用いた。冷媒の漏洩量は過去の研究や使用状況から 200 g~500 g とした⁶⁾。また、家庭用エアコンに関しては現在一般的に使用されている R32 も実験で使用し、冷媒の密度差の影響を確認した。

濃度測定用のセンサにはイチネンジコーの低濃度酸素計 JICO-O2 Ver.3 を使い、酸素濃度の変化から冷媒濃度を算出した。濃度計設置位置は、壁掛けエアコンに関しては Fig. 4 に、業務用ショーケースに関しては Fig. 5 に示す通りであり、Fig. 5 の No. 1~No. 8 は国際規格で定められている。それぞれ計 14 箇所の濃度を較正済みの酸素濃度計を設置し、測定している。数値計算では同位置における冷媒濃度の時間変化を計算する。

流量はフジキン社製マスフローコントローラー FCST1500 を用い制御した。流量は家庭用エアコンにおいては前節にて示した漏洩時間と冷媒の漏洩量から算出した。業務用ショーケースにおいては国際規格⁹⁾より式(1)から算出した。

$$\dot{m} = 0.32 \times \dot{q} \times M \times \left(\frac{476}{\rho_r} \right) = \frac{152\dot{q}M}{\rho_r} \quad (1)$$

ここで、 \dot{m} は冷媒の質量流量 [g/min]、 \dot{q} は質量流束 [(g/min)/mm²]、 ρ_r は 35 °C における冷媒の液密度 [kg/m³]、 M は冷媒充填量 [kg]、0.32 は定数 [mm²/kg]、476 は 35 °C における R290 の液密度 [kg/m³] である。

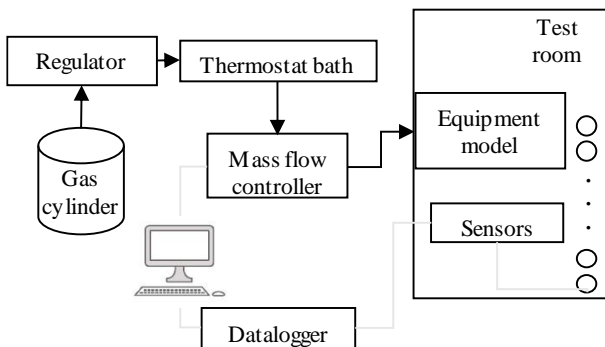


Fig. 3 Schematic of experimental setup

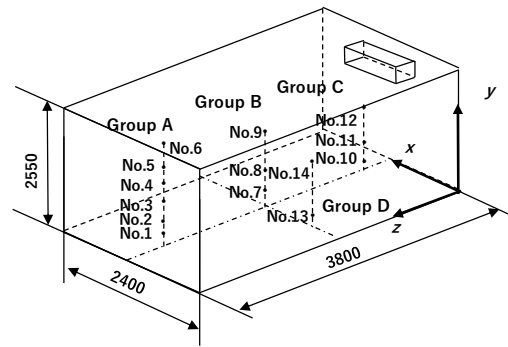


Fig. 4 Concentration measurement points of air-conditioner

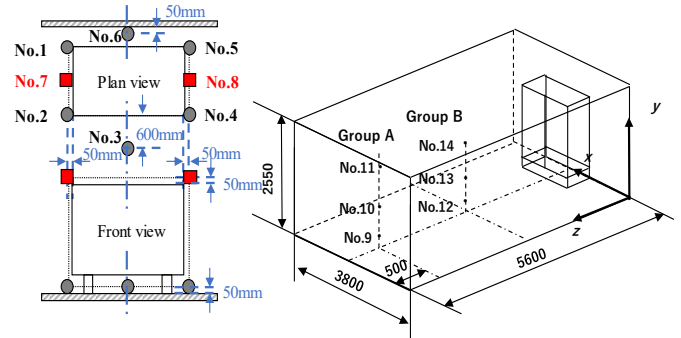


Fig. 5 Concentration measurement points of showcase

2.3 計算と実験の比較

Fig. 6 には壁掛けエアコンにおいて R744 が 500 g 室内に漏洩した際の R744 濃度の時間変化を、Fig. 7 にはショーケースにおいて R744 が 500 g 室内に漏洩した際の計算値 (実線) と実測値 (破線) を示す。家庭用エアコンに関しては Fig. 4 の Group A の結果を、ショーケースに関しては Fig. 5 の No. 1~No. 6 を抜粋し、示している。

壁掛けエアコンでは、吹出し終了時の 240 s までは濃度が上昇し、その後濃度が安定もしくは減少していくという漏洩実験で生じた現象を数値計算にて再現出来ている。冷媒は空気よりも密度が高く、その密度差により下部に滞留する。そのため、必然的に低地点での冷媒濃度が高くなるが、その高濃度点での計算値と実測値の差が特に低いことから、計算の妥当性が高いと考えられる。

業務用ショーケースでは、0 s から 3 s にかけて庫内に充填していた冷媒が室内に放出されるため急激に濃度が上昇する。庫内から流れてくる冷媒によって、室内に対流が発生し、濃度が上下に振幅していく様子が計算上でも再現が出来ている。また、時間の経過とともに対流が収まり、振幅が逡減していく過程も計算上で再現出来ている。業務用ショーケースに関しては、室内にアクチュエータなどを取り付けるための障害物が実験では存在することや、扉のモーション等があるため壁掛けエアコンの結果と比較すると再現性は低いように思われるが、本報に掲載している条件以外の条件においても、同様に計算値と実測値において相関が取れていると考えられるため、計算モデルは一定の妥当性を有しているものと考えた。これら 2 つの機器において、今後の計算ではこれらのモデルを用いて行っていく。

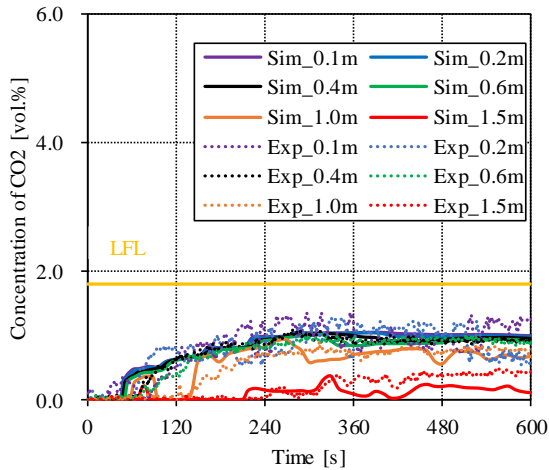


Fig. 6 Results of time change of concentration simulation and experiment of air-conditioner

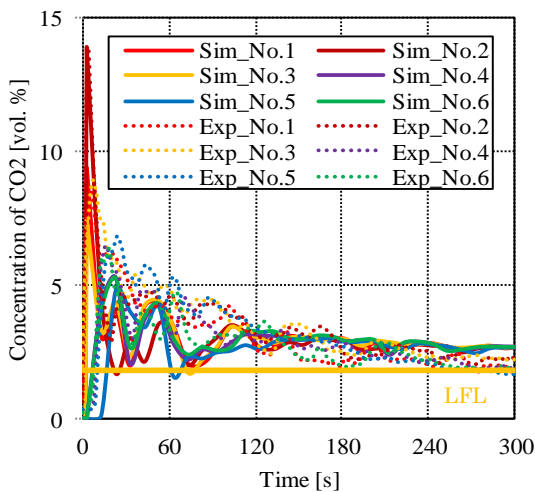


Fig. 7 Results of time change of concentration simulation and experiment of showcase

3 数値流体解析による計算結果

可燃性冷媒の安全性評価において、重要な指標となるものとして、可燃体積の時間積分値 $\int V_{FL} dt$ [$\text{m}^3 \cdot \text{min}$]がある。可燃体積の時間積分値とは、可燃濃度域を体積化した可燃体積 V_{FL} [m^3]がどの程度の時間（消滅時間 t_{pre} [min])存在するかを、空間と時間の積分値で示した指である。各冷媒の可燃濃度域は Table 1 に示す。数値計算ではこれらの値を求め、定量的な評価を行った。

3.1 壁掛けエアコン

国際規格³⁾では式(2)によって可燃性冷媒の最大充填量を定めている。

$$m_{max} = 2.5 \times (LFL)^{(5/4)} \times (A)^{1/2} \times h_0 \quad (2)$$

ここで、LFLは燃焼下限濃度 [kg/m^3]、 h_0 : 吹出口高さ(ただし、吹出口高さが0.6未満の場合0.6とする。本研究では壁掛けエアコンは2.1、床置きエアコンは0.6)、 A : 床面積 [m^2]である。本計算においては式(2)に沿って、床面積と漏洩量を変化させ可燃体積を求めた。Fig. 8にはR290

の可燃体積が漏洩終了後ただちに消滅する最大の漏洩量を○でプロットし、その際の面積と漏洩量の関係を記したものを示す。また、実線は式(2)である。図から5 m^2 未満では現在規定されている最大充填量を計算値が下回るが、5 m^2 以上では計算値が上回ることが示された。また、その差は面積の拡大とともに拡大することが示された。実際、5 m^2 未満の部屋というのはほとんど存在しないため、現在の規定を緩和しても安全に可燃性冷媒を使用できる可能性が示唆された。R32に関しても同様に、5 m^2 未満では現在規定されている最大充填量を計算値が下回るが、5 m^2 以上では計算値が上回ることが示された。

3.2 床置きエアコン

床置きエアコンにおいても前節と同様の作業を行った。Fig. 9にはR290の可燃体積が漏洩終了後ただちに消滅する最大の漏洩量を○でプロットし、その際の面積と漏洩量の関係を記したものを示す。また、実線は式(2)である。図から、10 m^2 未満の面積において現在規定されている式を下回り、10 m^2 以上においてはほぼ程度という結果となった。床置きエアコンに関しては壁掛けエアコンと比較し、数値計算によって算出された濃度と面積との強い相関が見出すことができなかった。

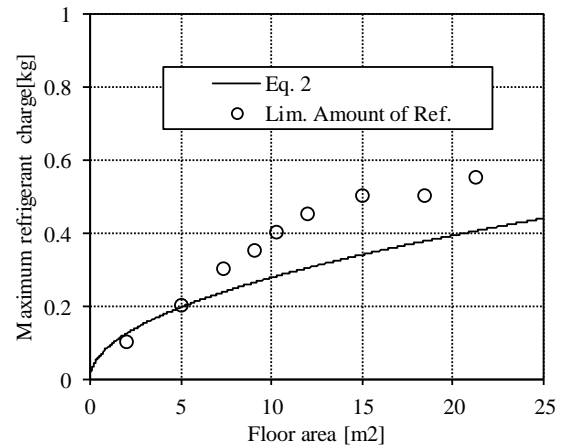


Fig. 8 Comparison of maximum allowable charge between calculated value and eq. 6 (Wall-mounted)

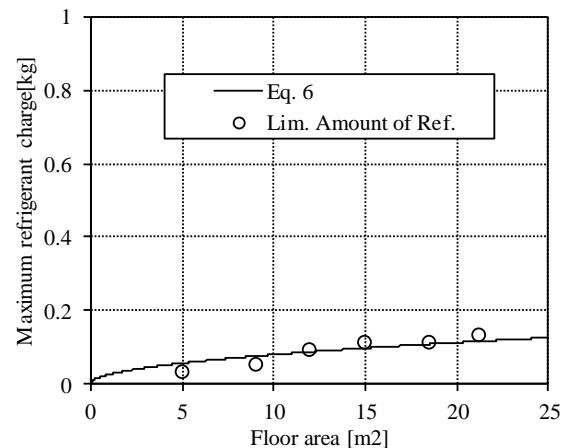


Fig. 9 Comparison of maximum allowable charge between calculated value and eq. 6 (Floor-mounted)

3.3 業務用ショーケース

業務用ショーケースにおいて、国際規格⁵⁾では現状可燃性冷媒を定めた明確な指標が存在しない。そのため、家庭用エアコンと同様のアプローチを試み、床面積と漏洩量を変化させ可燃体積を求めた。面積は実証実験を行った21.29 m²を基準に、面積を縮小したタイプ(15 m²)と拡大したタイプ(30 m²)の計算を行った。Fig. 10には代表して21.29 m²の可燃体積の時間変化を冷媒の漏洩量毎にまとめたものを示す。可燃体積の最大値はスウィング扉が60°開いた3 s付近であり、その後は時間の経過につれ可燃体積は減少していく。図から冷媒の漏洩量の拡大に伴い、消滅時間が長くなることが示された。

Fig. 10には可燃体積の時間積分値と冷媒の漏洩量の関係をまとめ、Fig. 11には消滅時間と漏洩量の関係をまとめたものを示す。これらの結果から、漏洩量と可燃体積の時間積分値及び消滅時間との間に相関があると考えた。また、本報においては代表して21.29 m²の結果しか載せて

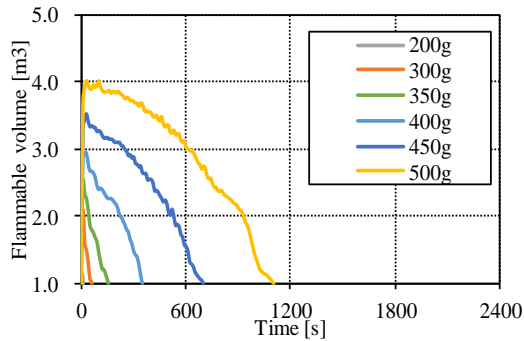


Fig. 10 Flammable volume variation (R290, A=21.29 m²)

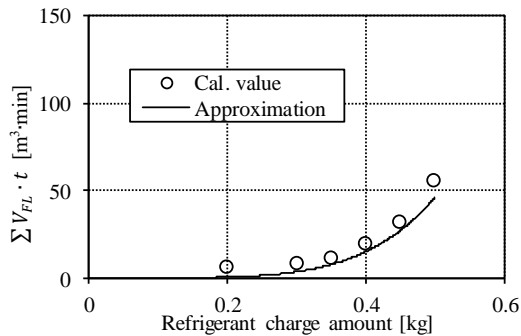


Fig. 11 Correlation between refrigerant leakage amount and time integration of flammable gas volume (R290, A=21.29 m²)

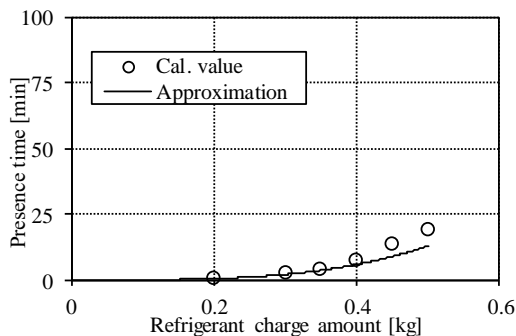


Fig. 12 Correlation between refrigerant leakage amount and presence time (R290, A=21.29 m²)

いないが、それ以外の床面積においても計算を行い、床面積と漏洩量の間にも相関があることが示唆された。そこで、計算値からフィッティングを行い、以下の式(3)及び式(4)の回帰方程式を導出した。

$$\int V_{FL} dt = (5.5 \times 10^4 e^{-1.7A}) \times e^{5m} \quad (3)$$

$$t_{pre} = (5.5 \times 10^3 e^{-1.7A}) \times e^{3.5m} \quad (4)$$

これらの回帰方程式は、Fig. 10とFig. 11の実線に相当する。式(3)及び式(4)は全ての条件において、相関係数R=0.99程度を示しており、非常に強い相関があることが示された。

4 結論

本研究では、家庭用エアコン及び業務用ショーケースの次世代冷媒の候補とされている強燃性冷媒R290が室内に漏洩した際の安全性評価をする為の、数値流体解析による評価手法の妥当性を評価と可燃体積の時間積分値の計算を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 妥当性評価の観点では数値流体解析手法はR744を用いた冷媒漏洩実験との比較の結果から、非常に濃度分布の再現性が高いことが示され、数値計算手法の妥当性が証明された。
- (2) 家庭用エアコンに関しては、国際規格に規定されている可燃性冷媒の最大充填量に関する式と計算値を比較し、現状の規格からの緩和が可能であることが示唆された。
- (3) 業務用ショーケースに関しては、新たな規格策定のための有用性の高い結果を得ることができた。

今後の方針としては、国際規格の改訂に向けより詳細なデータの取得を試みる。R290が家庭用エアコンや業務用ショーケースにおいてHFC冷媒に代わる新たな冷媒となるよう関係各所と協力し取り組んでいきたい。

文献

- 1) X. Wu, et al., : International journal of refrigeration 108, (2019), p. 209-223.
- 2) UNEP, 2016. The Kigali Amendment to the Montreal Protocol : HFC Phase-down, Ozone Action Fact Sheet United Nations Environment Program (UNEP).
- 3) IEC 60335-2-40 : “Household and similar electrical appliance –Safety- Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers”, International Electrotechnical Commission, (2018).
- 4) Sánchez, D., et al., : International Journal of Refrigeration; 2019.
- 5) IEC 60335-2-89, “Household and similar electrical appliance –Safety- Part 2-89: Particular requirements for commercial refrigerating appliances and ice-makers with an incorporated or remote refrigerant unit or motor-compressor”, International Electrotechnical Commission, (2019).
- 6) K. Hattori, et al., : The 24th IIR International Congress of Refrigeration, Yokohama, Japan, (2015).