次世代冷媒・冷凍空調技術の基本性能・最適化・評価手法および安全性・リスク評価

第2部 次世代冷媒の安全性・リスク評価

WGⅡの進捗

公益社団法人日本冷凍空調学会 次世代冷媒に関する調査委員会

2020年3月31日

目 次

第1章	よじめに	
1.1 NE	DO プロジェクトの概要	4
1.2 次	世代冷媒に関する調査委員会 WSIIの活動	6
1.3 本	報告書について	7
免責事	頁	8
参考文	伏	8
第2章 〕	 東京大学の進捗	9
2.1 tt	じめに	9
2.2 家	毎月ルームエアコンからの冷媒漏洩	
2.2.1	数値流体解析の方法	
2.2.2	冷雄漏洩実験によるシミュレーションモデルの妥当性検討	11
2.2.3	数値計算による可燃性冷媒の最大許容充埴量の検討	
2.2.4	まとめ	15
23 業	※日ショーケースからの冷雄漏洩	15
2.3 1	数値流体解析の方法	15
2.3.1	※他MF/F/1927日 冷 成漏 演 宝 齢 に 上 ろ シミュ レーション モデ ルの 妥当 性 給 封	15
2.3.2	物体制質に上ろ可燃性冷雄の最大許容をす最の検討	10
2.3.3	まとめ	
2.5. 4	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
2.4 /2	コーノーンのホンノノクン内のノイ これな元の時間	
2.4.1	宇殿壮置と宇殿冬州	
2.4.2	天歌表直と天歌木叶	
2.4.3	天歌和木	23
2.4.4 会去立	$\mathcal{L} \subset \mathcal{W}$	25
◎ つ 入 『 笛 3 音 /	☆	20
おり半 」		27 27
3.1 (x)	CのC 研空の構成	
3.2 平	り元♡′併成 水酒の地出と差水能力の減価毛注	27
3.3 但	へ派の加山と有人能力の計画子伝 気スパーカにトスプロパンの差ル桝評価	
3.4 电	≪ヘハ、クによるノロハンの有八日計画 「 右控占Ⅱ」レーで仕じる雪気フパークに上ろ差ル枡の評価	
2.4.1	有後点サレーて生しる电気ハバ、サによる有八日の計画	29
2.4.2	フランモークで生しる电気ハバークによる有八日の計画	
5.4.5 2.4.4	照明ヘイソノの操作で生しる电気ヘバックによる有八任の計画 電瓶プラガの抜き主しで生じる電気スパークによる有八任の計画	
2.4.4	电源ノノクの扱き左して生しる电気ハバ、クによる有八任の計画 整要与フパーカに上る差ル州の証価	
5.4.5 25 友:	肝电スヘハ・ クによる自八江の叶屾 話電与幽聖にトスプロパンの差ル州	
3.3 行	浬电×(成品によるノロハンの有八注 泪効五によるプロパンの差止州	
3.0 同	□□ 	
2.6.2		
5.0.2 27 主	- 天歌の慨安 しめし本公の罪賄	
J./ よ 271	このこう夜の味趣 電気フパニカにトス差ル州の証価	
5.7.1	电スヘハークによる有代性の評価	
5.1.2 ★≭-++±	向価山による有久注り計1 :4	
弗 4草 应	E 美	
4 4 3 3	18 12 1-	

4.2 室内機内での急速漏洩時の拡散挙動計測	43
4.2.1 冷凍空調機器からの冷媒漏洩事故事例の検討と漏えい条件のモデル化	43
4.2.2 濃度分布計測の実験手法	43
4.2.3 濃度分布計測の結果	45
4.2.4 濃度分布計測のまとめ	50
4.3 可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価	50
4.3.1 評価対象機器の選別	50
4.3.2 点火能評価の実験手法	50
4.3.3 点火能評価の実験結果	50
4.3.4 点火能評価の予定	51
参考文献	51
第5章 産業技術総合研究所機能化学研究部門の進捗	
5.1 はじめに	
5.2 低 GWP 混合冷媒の燃焼限界の評価	52
5.2 低 GWP 混合冷媒の燃焼速度の評価 5.3 低 GWP 混合冷媒の燃焼速度の評価	53
5.4 低 GWP 混合冷媒の消炎距離の評価	54
关老文献	
第6章 日本冷凍空調工業会に上る Δ3 冷槻のルームエアコンのリスク評価の進捗	
$ + 0 = 1 $ 中本市体主調工来去による $ + 0 $ 市衆のル ニュー $ = 2 $ の $ + 0 $ 力 市 画の 進扬 $ \dots \dots $	56
0.1 はしめに 6.2 安内におけろ相定される差止酒	
6.2 主府における心足されの有人你	
0.2.1 夾座町	
0.2.2 ロリフク	
0.2.3 ての他の株久	
0.3 局温衣囬について	
6.4 $A = - 2 + 2 + 4 = - 2 + 4 = - 2 + 4 = 2 + 4 =$	
0.4.1 静電気による人体への帝電	
6.4.2 その他の帝電	
6.4.3 フランモータ	
6.4.4 サーモスタット	
6.4.5 リレー	59
6.4.6 コンセントの抜き差し	59
6.4.7 照明用の壁スイッチ	59
6.5 想定される着火源の整理	60
6.6 着火源存在高さ	60
6.7 その他着火源の存在高さ	61
6.7.1 ガスコンロ, カセットコンロ	61
6.7.2 石油ストーブ	61
6.7.3 ロウソク(仏壇用,アロマテラピー用)	61
6.7.4 調理家電	62
6.7.5 ドアノブ(静電気)	62
6.7.6 照明用の壁スイッチ	62
6.8 冷媒漏えい時の室内可燃空間	62
6.9 まとめ	63
参考文献	63
第7章 日本冷凍空調工業会によるA3冷媒の内蔵ショーケースのリスク評価の進捗	65
7.1 はじめに	65
7.2 安全規格の見直し	65
7.2.1 最大冷媒充填量	65
7.2.2 最小設置床面積	

7.2.4	IEC60335-2-89 に対する日冷工の考え方	66
7.3 빗	スクアセスメント	66
7.3.1	リスクアセスメントのプロセス	66
7.3.2	内蔵ショーケースのリスクモデルの設定	67
7.3.3	着火確率の算出式	67
7.3.4	許容レベルの設定	67
7.3.5	冷媒漏えい発生確率について	68
7.3.6	CFD 解析	68
7.4 各ス	ペテージの検討	69
7.4.1	輸送ステージ	69
7.4.2	保管ステージ	69
7.4.3	設置ステージ	70
7.4.4	使用ステージ	71
7.4.5	修理ステージ	72
7.4.6	廃棄ステージ	73
7.5 可	燃性冷媒を使用した内蔵ショーケースの普及に向けた活動	73
7.5.1	廃棄マニュアルの作成	73
7.5.2	高圧ガス保安法の改正検討	73
7.6 ま	とめ	74
参考文薩	献	74

第1章 はじめに

1.1 NEDO プロジェクトの概要

フロン排出抑制法の指定製品制度により,部門ごとに低 GWP 冷媒の普及が求められている.しかし,炭化 水素のような強燃性冷媒の安全性評価・リスク評価の手法は確立されていない.したがって,次世代冷媒の基 本特性を把握し,同時に次世代冷媒の持つ課題に対する安全性・リスク評価方法を確立し,国内安全基準の策 定や国際規格化・標準化策定に取り組むことで,省エネルギーかつ低温室効果を実現する次世代冷媒適用冷凍 空調機器等の開発を支援することが重要である.こうした状況をふまえ,本事業では,次世代冷媒を使用した 省エネ冷凍空調機器の開発基盤を整備し,2026 年を目途とする冷媒及び冷凍空調機器製品の市場投入に貢献 することをねらいとしている.そのために業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を主とする中小型規模の 冷凍空調機器に使用する次世代冷媒の安全性・リスク評価手法を確立することを目指している.

NEDO プロジェクト「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発」の中の項目「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」においては、東京大学、公立諏訪東京理科大学、産業技術総合研究所(安全科学研究部門)が共同提案し、受託している.3機関の可燃性冷媒の燃焼事故時の安全評価に関する研究項目を列挙すると、以下のようになる.

【東京大学】

・可燃性冷媒漏洩時のリスクの評価

・可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の評価

【公立諏訪東京理科大学】

- ・着火源のスクリーニングと着火源モデルの構築
- ・各種着火源のフィジカルリスク評価
- 【產業技術総合研究所(安全科学研究部門)】
 - ・冷凍空調機器からの冷媒漏洩事故事例の検討と漏えい条件のモデル化
 - ・可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価
 - ・少量長時間漏洩時の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価
 - ・室内機内での急速漏洩時の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価

上記3機関の共同提案とは別に,産業技術総合研究所(機能化学研究部門)は低GWP低燃焼性混合冷媒の 安全性評価を行うことを目的としてNEDOから研究を受託している.研究項目は以下のとおりである.

【產業技術総合研究所(機能化学研究部門)】

・混合冷媒の燃焼特性評価

・混合冷媒の実用上の燃焼安全性評価

家電製品のリスクを評価する手法として, R-Map が知られている. これは, リスクを6つの発生頻度と5つ の危害度からなる 6×5 のマトリクス上で表現するものである. 文部科学省所管の(財)日本科学技術連盟が開 発したものである. Fig. 1-1 に R-Map 例 ¹⁻¹⁾を示す. A 領域は許容できないリスク領域でリコールしなければ ならないものに該当する. B 領域は最低限のリスクまで発生頻度を低減すべき領域である. C 領域はリスクが 無視でき,そのまま流通できる領域である. 事故の発生頻度に関しては,家電製品などの消費生活用製品につ いては,100 年に1 回の死亡事故が発生しても安全と見なす (C 領域と見なす) という基準が示されている. 例えば,わが国のルームエアコンのように1 億台流通している場合は,許容される事故発生頻度は10⁻¹⁰ (件/ 台・年) となる. Fig. 1-1 の発生頻度は 100 万台流通している場合の例である.

以上のように、製品のリスク評価を行うためには、事故の発生頻度評価と危害度の評価を行う必要がある. 冷凍空調機器から可燃性冷媒が漏えいして火災事故になるためには Fig. 1-2 に示すような 3 条件(冷媒の急速 漏洩、可燃空間の存在、着火源の存在)が重なる必要がある.3 条件を独立事象と仮定すると、火災事故の発 生確率は、冷媒の急速漏洩の発生確率と可燃空間の存在確率と着火源が存在する確率の積となるので、火災事 故の発生確率を求めるためには 3 要素のそれぞれの発生確率を求める必要がある.

		(件/台·年)	頻発する	C	P2	۸1	12	A2
	5	10-4超	現光する	0	60	AI	AZ	AO
発	4	10-4以下 ~10-5	しばしば 発生する	С	B2	B3	A1	A2
生	3	10-5以下 ~10-6	時々 発生する	С	B1	B2	В3	A1
頻	2	10-6以下 ~10-7	起りそうに ない	С	С	B1	B2	В3
度	1	10-7以下 ~10 - 8	まず 起りえない	С	С	С	B1	B2
	0	10-8以下	考えられ ない	С	С	С	С	С
				無傷	軽微	中程度	重大	致命的
				なし	軽傷	通院加療	重傷 入院治療	死亡
				なし	製品発煙	製品発火 製品焼損	火災 (周辺焼損)	火災 (建物延焼)
				0	I fi	I も害の程	亜	IV

Fig. 1-1 R-Map for Consumer Products when 1 million units are distributed.¹⁻¹⁾



Fig. 1-2 Conditions for fire accident occurrence

本事業では、火災事故が発生する頻度のための研究と、事故時の危害度評価のための研究を行っている.当面は冷媒としてプロパンを冷媒とし、ルームエアコンおよび独立型ショーケースからの冷媒漏洩に伴う火災事故を研究対象としている.3機関の研究項目の関係をFig.1-3に示す.相互に協力しながら研究を進めてゆく計画となっている.最終的なリスク評価は日本冷凍空調工業会と協力しながら実施する予定である.



Fig.1-3 Research flows in this project

1.2 次世代冷媒に関する調査委員会 WS IIの活動

低 GWP 冷媒は微燃性を有することが多いため、低 GWP 冷媒の使用を促進するため、科学的知見に基づいた 微燃性冷媒のリスク評価の必要性が叫ばれ、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発」プロジェクト(2018~2020年)の中で、公立諏訪東京理科大学、東京大学、産業技術総合研究所などが冷媒の安全性の研究を進めている.一方、(一社)日本冷凍空調工業会は 2016 年から冷凍空調機器に強燃性冷媒(A3 冷媒)を適用するときのリスク評価を始めている.日本冷凍空調工業会では、設置条件の影響や着火源の存在になどについて個別に審議している.これら知見を集約し、第三者の目で客観的な評価を行う目的で、2018 年から NEDO の調査事業として、(公社)日本冷凍空調学会の中に「次世代冷媒に関する調査委員会」が設置された。当該調査委員会の中のワーキンググループII(WGII)において可燃性冷媒の安全性とリスク評価が審議されている.WGIIの審議体制は Fig. 1-4 に示すように、産官学の協力体制が構築されている.委員構成は Table 1-1 に示すとおりである.



Fig. 1-4 Deliberation system for risk assessment of flammable refrigerants

	所	属	部	署	役	職	氏	名
主査	東京大学		大学院新領域創成	科学研究科	教授		飛原	英治
委員	公立諏訪東京	理科大学	工学部機械工学科		准教授		今村	友彦
	産業技術総合	研究所	機能化学研究部門		主任研究	『貝	滝澤	殿一 貝一
	産業技術総合	研究所	安全科学研究部門		主任研究	『貝	椎名	拡海
オブザーバ	日本冷凍空調	工業会	パナソニック㈱				室園	宏治
			パナソニック(株)				高市	健二
			サンデン・リテー	ルシステム(株)		坂本	圭久
			三菱電機㈱				山下	浩司
			東芝キヤリア(株)				山口	広一
			ダイキン工業㈱				藤本	悟
			ダイキン工業㈱				平良	繁治
			日立ジョンソンコ	ントロールズ	空調㈱		佐々ス	木 俊治
			三菱重工サーマル	システムズ(株)		松田	憲兒
			技術部		部長/参	≽事	酒井	猛
					参事		長谷	川 一広
	東京大学		大学院新領域創成	科学研究科	准教授		党超	鋲
					特任研究	員	伊藤	誠
	公立諏訪東京	理科大学	工学部機械工学科		講師		上矢	恭子
	東京海洋大学		海洋電子機械工学	部門	教授		井上	順広
	産業技術総合	研究所	安全科学研究部門		グルーフ	°長	久保	田 士郎
	新エネルギー	·産業技術	環境部		統括研究	員	藤垣	聡
	総合開発機構				主任研究	員	阿部	正道
					主査		市川	直喜
					主任		二関	洋子
事務局	日本冷凍空調	学会					上村	茂弘
							西口	章

Table 1-1 Investigation Committee on Next-Generation Refrigerants, WSII Committee List as of March 1, 2020

1.3 本報告書について

本報告書は、次世代冷媒に関する調査委員会 WG2 の 2019 年度の成果をまとめたものである.本研究会の活動にあたって経済的なご支援をいただいた国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構には心よりお礼申し上げます.また、執筆にご協力いただいた委員、執筆協力者各位にもお礼申し上げます.

本報告書は公開物です.著作権は分担執筆者が有しているので,引用の際には出典を明記するようにお願いいたします.

Table 1-2 Author list				
章。 章	執筆者			
第1章 はじめに	飛原英治(東京大学)			
第2章 東京大学の進捗	飛原英治(東京大学), 党超鋲, 伊藤誠, 芦原直也			
第3章 公立諏訪東京理科大学の進捗	今村友彦(公立諏訪東京理科大学)			
第4章 産業技術総合研究所安全科学研 究部門の進捗	椎名拡海(産業技術総合研究所),高橋良尭,松木亮,佐分利 禎,久保田士郎			
第5章 産業技術総合研究所機能化学研 究部門の進捗	滝澤賢二(産業技術総合研究所)			
第6章 日本冷凍空調工業会によるA3 冷媒のルームエアコンのリスク評価の進 捗	高市健二(パナソニック㈱)			
第7章 日本冷凍空調工業会による A3 冷媒の内蔵ショーケースのリスク評価の 進捗	坂本圭久(サンデン・リテールシステム㈱)			

免責事項

本報告書に掲載されている情報の正確性については万全を期していますが,著者および当学会は利用者が本 報告書の情報を用いて行う一切の行為について,何らの責任を負うものではありません.本報告書の利用に起 因して利用者に生じた損害につき,著者および当学会としては責任を負いかねますので御了承ください.

参考文献

1-1) リスクアセスメント・ハンドブック実務編:経済産業省,2011年6月

第2章 東京大学の進捗

2.1 はじめに

東京大学では、可燃性冷媒の燃焼に係る安全性とリスク評価の研究を受託している.この研究は可燃性冷媒 がルームエアコン室内機から漏洩する時と業務用ショーケースから漏洩するときのリスクの研究とルームエ アコンのポンプダウン時のディーゼル爆発の抑制の研究の3項目で構成されている.

可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究に関しては、可燃性冷媒を用いるルームエアコンや業務用ショーケースから冷媒が室内に漏洩したときの冷媒濃度の拡散をシミュレーションし、可燃濃度をもつガスの体積の時間的な推移を計算することを目的としている.この結果を用いて、可燃性冷媒が室内に漏洩したときの着火確率を計算することができる.本研究では、まず二酸化炭素などの安全でGWPの小さいガスを用いた漏えい実験を行い、その結果を用いてシミュレーションモデルの妥当性を検証した.その上で、ルームエアコンの室内機からの漏洩シミュレーションを行い、可燃性冷媒の最大充填量規制の妥当性評価を行った.

業務用ショーケースからの可燃性冷媒の漏洩については、まず、二酸化炭素を用いた漏洩実験を実施し、その結果とシミュレーション結果との比較を行い、シミュレーションモデルの妥当性を検証した.その上で、業務用ショーケースからの漏洩シミュレーションを行い、可燃性冷媒の最大充填量の評価を行った.

ヒートポンプにおける冷媒回収時にはポンプダウンを行うが、その際に想定される事故として、冷媒潤滑油 混合気に空気が混入、断熱圧縮され温度上昇し、自己着火燃焼(ディーゼル爆発)が考えられる.ルームエア コン冷媒回収時の室外機破壊事故の報告例もある.低 GWP 冷媒として注目されている R290、R1234yf、R32 は燃焼性を持つため、従来の不燃性冷媒 R410A と比較して、ディーゼル爆発が起きやすくなることが懸念さ れている.本研究ではディーゼル爆発を想定した実験装置を製作し、燃焼を抑制する物質を潤滑油に添加し、 ディーゼル爆発の発生を抑制する研究を行った.

2.2 家庭用ルームエアコンからの冷媒漏洩

2.2.1 数値流体解析の方法

エアコン室内機から漏洩した冷媒ガスが室内の空気と混合しながら拡散してゆく過程を数値計算する.3次 元空間での混合物の移流拡散問題の基礎方程式は質量保存の式(2-1),ナビエストークスの方程式(2-2),移流拡 散方程式(2-3),理想気体の状態方程式(2-4),である.数値計算ではANSYS社のFluent 18.1を用いた.計算条 件は Table 2-1 にまとめている.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \right) = 0 \tag{2-1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j u_i - \tau_{ij} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i (\rho - \rho_o) \tag{2-2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_m) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j Y_m - \rho Y_m \frac{D}{X_m} \nabla X_m\right) = 0 \qquad (2-3)$$

$$\rho = \frac{p}{RT\left(\frac{Y_A}{M_A} + \frac{Y_B}{M_B}\right)} \tag{2-4}$$

ただし、 τ_{ij} :ストレステンソル、 X_m :モル濃度、 Y_m 、 Y_A 、 Y_B :質量濃度、 M_A 、 M_B :分子量、D:拡散係数 また、冷媒拡散時の分子拡散係数は以下の式(2-5)^[2-1]より算出し、温度、圧力によらず一定とみなした.

$$D_{AB} = \frac{1.5 \times 10^{-5} T^{1.81}}{p (T_{CA} \cdot T_{CB})^{0.1405} \cdot (V_{CA}^{0.4} + V_{CB}^{0.4})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}$$
(2-5)

ただし、 T_{CA} 、 T_{CB} : 臨界温度 K、 V_{CA} 、 V_{CB} : 臨界比体積 cm³/mol.

本研究にて使用する各冷媒と空気の拡散係数を Table 2-2 に示す.

Table 2-1 Simulation outline				
Software	ANSYS Fluent 18.1			
Simulation	Unsteady and compressible flow			
Species transport	2 components (Air - Refrigerants)			
Turbulence model	Realizable k-ε			
Solver	SIMPLE			
Scheme	2nd order upwind			

Table 2-2 Diffusion coefficient				
	R290-Air	R32-Air	R744-Air	
Diffusion coefficient [m ² /s]	1.11×10^{-5}	1.35×10 ⁻⁵	1.59×10^{-5}	

壁掛け式室内機と床置き式室内機の詳細を Fig.2-2, Fig.2-3 に示す. どちらも吸い込み口と吹き出し口をもっている.境界条件として,吸い込み口では自由流出条件を与え,吹き出し口では一様流速条件を設定している. 室内機内部は計算を行っていない.

冷媒漏洩後に室内空気を攪拌するために室内機ファンを稼働させる時の条件を Table 2-4 にまとめた.ファンの風量は式(2-6)^[2-3]から算出した. R290の場合のファン風量は 185m³/h となり, 壁掛け式室内機の場合のファン風速は 0.75m/s である.ファンの稼働開始時刻は漏洩開始 30s後とした.室内機の構造として,吸い込み口と吹き出し口があり,吹き出し口から冷媒を放出すると,吸い込み口から室内空気を吸引する.その結果,吹き出し口の冷媒は吸引された空気と混合する.実験の実測値を参考にして,本解析では吹き出し口の冷媒濃度を 50% とした.

$$Q_{min} = 3600 \frac{5Y \sqrt{A_0} \dot{m}_{leak}^{3/4}}{h_0^{1/8} [LFL(1-F)]^{5/8}}$$
(2-6)

ただし, Q_{min} : 必要な空気流量 m³/h, Y: 定数=1, A_o : 空気流の開口面積 m², \dot{m}_{leak} : 冷媒流量 kg/s, LFL: 燃焼下限界 kg/m³, F: 定数=0.5.



Fig. 2-1 Modeled room



Fig. 2-2 Details of wall-mounted indoor unit model



Fig. 2-3 Details of floor-standing indoor unit model

	Table 2-3 S	imulation condition			
	Refrigerant	R290 and R32			
	Leak amount	Evaluated			
	Leak time	4 min			
	Boundary of A/C model	1 outlet and 1 inlet			
	Floor Area	Evaluated			
	Ventilation	Exist (Vent and Door gap)			
	Table 2-	4 Fan condition			
Flow rate	Equation (2-6)				
Direction	Vertical direction for wall-mount	Vertical direction for wall-mounted unit, horizontal direction for floor-mounted unit			
Process	Process 1: 0~30 s: Refrigerant lea	Process 1: 0~30 s: Refrigerant leak			
	Process 2: 30 - 240 s: Refrigerant leak with fan operation				
	Process 3: 240 s - : Fan operation	1			

2.2.2 冷媒漏洩実験によるシミュレーションモデルの妥当性検討

本研究では冷媒漏洩試験によって濃度分布測定を行い,数値計算により求められた同位置での冷媒濃度と比較することによりモデルの妥当性の検証を行った.実験室の構造は,Fig. 2-1 に示す通りである.壁面には断熱板を貼り付け,ドリフトが発生しないように注意した.使用した冷媒はR32とR744である.冷媒の供給系統はFig. 2-4 に示す通りであり,使用した機器の仕様をTable 2-5 にまとめた.マスフローコントローラはR32用であるが,R744の実験のときは流量係数値を修正した.冷媒を放出させる室内機は壁掛け式のみである.内部構造を簡単化し,吹き出し口から冷媒を均一に放出させるために,模型を製作した.模型の詳細図をFig. 2-5 に示す.吹き出し口は 688mm×100mmの大きさである.吸い込み口はついていないので,濃度 100%の冷媒が均一な速度で放出される.また,冷媒濃度を測定し記録するセンサを入手できなかったので,酸素濃度計を用いて,酸素濃度の減少量から冷媒濃度を推定する方法を用いた.冷媒濃度*X_{ref}*は酸素濃度*X₀₂と初期酸素濃度X₀₂と初期酸素濃度X₀₂と初期酸素濃度<i>X₀₂*に算出した.

$$X_{ref} = \frac{X_{02,atm} - X_{02}}{X_{02,atm}}$$
(2 - 7)

14 個すべての酸素濃度計について, R744 を用いて酸素濃度計の読み取りから式(2-7)を用いて計算される R744 濃度について較正を行い,冷媒濃度を測定値の±2%の精度で測定できることを確認した.設置位置は Fig. 2-6 に示すとおり 14 箇所とした.実験条件に関しては Table 2-6 にまとめた.



Fig. 2-4 Schematic of experimental setup



Fig. 2-5 Internal structure of wall-mounted air conditioner

	Table 2-5 Equipment specification				
Name	Туре	Specifications			
Mass flow controller	Fujikin	Gas: CH ₂ F ₂			
	(FCST1500)m ³	Range: $0 \sim 250$ SML			
		Accuracy: $\pm 2\%$ F.S.			
Oximeters	ICHINEN JIKO	Gas: Oxygen			
	$(JKO-O_2 Ver.3)$	Principle: Galvanic battery type			
		Resolution: 0.01%			
		Accuracy: $\pm 0.5\%$ (≥ 10 vol%),			
		±0.01% (<10 vol%)			

Table 2-6	Table 2-6 Experimental conditions for validation of CFD model						
No	Pofrigorant	Air	Refrigerant				
INO.	Kenngerant	vent	amount (g)				
1-1			200				
1-2	D744	aviat	300				
1-3	K/44	exist	400				
1-4			500				
2	R744	none	500				
3	R32	exist	500				



Fig. 2-6 Concentration measurement points

Fig. 2-7 には Table 2-6 における試験条件 No. 1-4, No. 2, No. 3 の測定点 Group A における計算値と実測値の 比較を示す.縦軸は試験ガス濃度,横軸は時間である.図から冷媒の漏洩開始から漏洩終了時(240 s)の間は各 点において冷媒濃度が上昇していき,240 s 以降は冷媒濃度は徐々に低下していく.研究当初は実測値と計算 値に乖離が見られたが,エアコン室内機の吹き出し口近傍,換気口近傍,ドアした隙間近傍のメッシュを細か くし,滑らかにガスが流入あるいは流出するように壁の形状を工夫することによって,乖離が少なくなること を確認した.結果的には,Fig.2-7 に示すように,実測値と計算値は合理的な精度で一致しており,実際の物理 現象を再現出来ていると考えられ,本計算モデルの妥当性が高いことが示された.



Fig. 2-7 Validation of calculation model (Comparisons of concentrations between calculation and measurements)

2.2.3 数値計算による可燃性冷媒の最大許容充填量の検討

妥当性が示された数値計算手法を用いて室内機からの漏洩冷媒挙動の数値計算を行った.計算対象としては、壁掛け式エアコン及び床置き式エアコンとした.可燃性冷媒の最大充填量の規制値は,IEC 60335-2-40: 2018^[2-2]に規定されている式

$$m_{max} = 2.5 \times LFL^{(5/4)} \times A^{1/2} \times h_0 \tag{2-8}$$

冷媒漏洩時に空調機のファンを稼働させることを前提とする可燃性冷媒の最大許容充填量に関する式[2-3]

$$m_{max} = F \times LFL \times A \times 2.2 \tag{2-9}$$

の評価を行った.

(1) 壁掛け式室内機からの漏洩

シミュレーション結果から時々刻々変化する可燃ガス体積V_{FL}の算出を行った.冷媒充填量が少ないときに は漏洩終了後(240 s)ただちに可燃ガス体積が消滅するが,充填量が増えると漏洩終了後も可燃ガス体積が存続 する.その限界の冷媒充填量を最大許容充填量として床面積毎に求め,式(2-8)及び式(2-9)との比較を R290, R32 それぞれ行った結果を Fig. 2-8 に示す.図中のシンボル〇は,冷媒漏洩が終了するとすぐに可燃ガスが消 滅する最大充填量である.このシンボル以上の量を漏洩すると,冷媒漏洩終了後も可燃ガスが残ることを意味 する.Fig. 2-8 から R290 も R32 も計算値が式(2-8)を上回り,式(2-8) は妥当な見積もりをしていることが分 かった.式(2-9)について評価すると,R32 の場合はすべての広さで安全側に見積もる.しかし,R290 につい ては,7.5 m²以上の面積では危険な見積もりとなることが分かった.したがって,この時には室内機ファンに よる撹拌が必須となる.式(2-6)で与えられる風量で室内機ファンを駆動すると,冷媒漏洩終了とともに可燃体 積が消滅することを確認した.



Fig. 2-8 Comparison of maximum allowable refrigerant charge (Wall-mounted air-conditioner)

(2) 床置き式室内機からの漏洩

床置きエアコンについても、計算により最大許容充填量を床面積毎に求め、式(2-8)及び式(2-9)との比較を R290, R32 について行った結果を Fig. 2-9 に示す. R290 について計算結果を式(2-8)と比較すると、式(2-8)は ほぼ妥当な推定を与えている. R32 については、式(2-8)は全ての面積において計算値を下回るという結果とな り安全が確認された.式(2-9)は、R290、R32 ともに計算値より大幅に上回っているものが多く、危険であるこ とが分かった.

以上のことを踏まえ, R290 と R32 の各面積におけるファンによる可燃濃度域の攪拌の影響を計算により求めた. 室内機ファンが稼働すると, 可燃ガス体積は徐々に減少していくが, 壁掛けエアコンのときとは異なり, 減少に時間を要した. R290 に関しては 5 m² 及び 9.12 m² のとき, R32 に関しては 12 m²以下のとき, 可燃ガスはファンの攪拌により完全に消滅する. しかし, R290 が 15 m²以上のとき, R32 が 21.28 m² のときには冷媒 は冷媒漏洩終了後も可燃ガスは少し残ることあるが, その量は多くない.



Fig. 2-9 Comparison of maximum allowable refrigerant charge (Floor-mounted air-conditioner)

2.2.4 まとめ

家庭用エアコンの次世代冷媒の候補とされている R290 が室内に漏洩した際のリスク評価をする為に,数値 流体解析によって最大許容充填量の評価をおこなった.本研究から得られた知見は以下のとおりである.

- 1) 本研究にて用いた数値流体解析手法は, R744 及び R32 を用いて行った冷媒漏洩実験の結果の比較から濃度分布の再現性が高いことが示され,計算手法の妥当性が確認された.
- 2) 最大許容充填量式(2-8)について,壁掛け式エアコンに関しては本計算結果から R290, R32 ともに適切に 運用できることが分かった.床置き式エアコンに関しては,計算から求めた最大許容充填量からは R32 に ついては十分に安全と判断できるが, R290 では危険とは言えないが,安全余裕はないことが分かった.
- 3) 最大許容充填量式(2-9)について,壁掛けエアコンに関しては可燃ガス体積がファン稼働と同時に直ちに消滅もしくは吹き出し口の直下にのみ発生することから、リスク低減に非常に効果があることが示された. 床置きエアコンに関しては,冷媒漏洩が続いている間はファン稼働後にも可燃ガス体積が局所的発生するが,冷媒漏洩終了後には直ちに消滅することが分かった.漏洩を感知しての室内機ファンの駆動が安全確保上で不可欠であること,漏洩開始30秒後にファン稼働を開始した場合広い部屋では可燃ガスが少し残ることが分かった.

2.3 業務用ショーケースからの冷媒漏洩

2.3.1 数値流体解析の方法

数値計算手法は 2.2.1 項で説明されているものと同じである.実験室モデルについて,部屋の概要を Fig. 2-10 に示す.計算モデルは後述する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.大きさは 5600 mm×3800 mm×2550 mm で,ショーケース模型を設置した壁の側面の壁に φ 100 mm の排気口と,ショーケースモデルの対面にドア下隙間 2200 mm×7 mm を設けた.ショーケースが設置される店舗においては,必ず扉があり扉の下には隙間があるとともに,換気口があるからである.メッシュは境界近傍が細かくなるようにした.室内の初期条件は,ゲージ圧力を 0Pa,温度は 300 K とし,ショーケース庫内には充填量と庫内体積から計算し求められた冷媒濃度を適宜設定している.換気口とドア下隙間には,圧力境界を設定した.また,冷 媒漏洩実験との比較の際には,R290 の代わりに R744 を用いた.

業務用ショーケースモデルの詳細を Fig. 2-11 に示す.ショーケースには 2 枚の扉が設けられており,漏洩 試験においては、2 枚両方が開く.冷凍機はショーケースの下部,あるいは上部に設置されており,運転中は 冷凍機に付属する凝縮器ファンが動く. Fig. 2-11 は冷凍機が上部に設置されている場合である.ショーケース は壁面から 100 mm 離し、ショーケースの中心線と実験室モデルの中心線が一致するように設置される.冷媒 に関しては、通常の計算では R290 を対象とした.スウィング扉の回転速度は、国際規格に基づき 3 秒で 60° 回転するようにしている.冷媒漏洩後に室内空気を攪拌するために凝縮器ファンを稼働させる時には、ファン の風速をパラメータとした.ファンの稼働開始時刻は漏洩開始 30 s 後とした.



Fig. 2-10 Modeled room



Fig. 2-11 Details of display case

2.3.2 冷媒漏洩実験によるシミュレーションモデルの妥当性検討

本研究では冷媒漏洩試験によって濃度分布測定を行い、数値計算結果と実験結果とを比較することによりモデルの妥当性の検証を行った.実験室は、Fig. 2-10の計算モデルと同じ形状である.実験室内の壁には、全面断熱材を張り、外部温度の影響を受けないようにしてある.冷媒供給装置の全体図は Fig. 2-4 と同じである. 使用するガスは R290 と物性値の近い R744 である.

濃度計の取り付け位置を Table 2-7 及び Fig. 2-12 に示す. 濃度計は IEC 規格に規定されている 8 箇所と,室内の冷媒濃度分布を測定するための 6 箇所の計 14 箇所とした. 後者の 6 個のセンサに関して,その取り付け地点を Group A と Group B に分けた. モデルの妥当性検討では,この 14 箇所の濃度の時間変化の計算結果と実測値との比較を行った.

Fig. 2-13 に示すようなショーケース模型を作製した.ショーケースの内部は空洞である.2つの扉には,そ れぞれリニアアクチュエータを取り付け,扉の開閉を行った.アクチュエータはストローク 300 mm,最高速 度 100 mm/s で,3秒で 60 度開くことは可能である.扉の全辺にマグネットパッキンを取り付け,本体にはマ グネットシールを取り付けることにより,閉じたときには冷媒の漏洩が少なくなるように工夫している.

冷媒の封入は Fig. 2-13 に示すように、後方下部に設置したホースから庫内へ冷媒を封入する.封入時に、庫内から空気を抜く必要がある.冷媒に使用する R744 は空気より密度が高いため、庫内下部に留まることから、上部から空気を排出する.排出したガスは、実験室内に放出されないよう室外に放出する.庫内には、冷媒の 攪拌用のファンを取り付けており、封入後電磁弁によって排出口を閉じ、庫内を攪拌し、冷媒が均一になるよ うにしている.



Fig. 2-12 Concentration measurement



Fig. 2-13 Internal structure of showcase model

Group A		Group B		
9	(1900, 100, 5100)	12	(1900, 100, 2800)	
10	(1900, 400, 5100)	13	(1900, 400, 2800)	
11	(1900, 1000, 5100)	14	(1900, 1000, 2800)	

Table 2-7 Locations of oxygen concentration sensors [mm]

IEC60335-2-89: 2019 によると、可燃性冷媒の最大充填量は、スプリットシステムの場合は 150g が上限であり、モーターコンプレッサが内蔵されているシステムでは、LFL の 13 倍か 1.2kg のうち小さいほうと規定されている. R290 の LFL は 0.038 kg/m³ なので、最大冷媒充填量は 494g となる. これらを踏まえ、本実験にて冷媒の漏洩量は 200~500 g とした. 実験条件を Table 2-8 にまとめた. 冷媒は安全性を確保するために、R744 で代替した.

Table 2-8 Experimental conditions					
Case	Case Refrigerant				
А		200			
В	DELL	300			
С	R/44	400			
D		500			

冷媒として R744 を採用し, 排気口及びドア下隙間を解放した状態で測定した実測値と計算を比較した結果の例として Case D を Fig. 2-14 に示す.図(a)及び図(b)は IEC60335-2-89: 2019 に規定されている測定箇所の結果であるが,(a)に関しては一様に計算値と実測値の差が小さく,計算にて実験と同様の状況を概ね再現出来ていると思われる.扉回転時にすべての点,とりわけセンサ No.2の濃度が急上昇し,扉が開いた後,濃度は上昇と下降を繰り返しながら徐々に減少していく.(b)に関しては高地点計算値も測定値も非常に小さいことから,実験で使用しているセンサの測定精度では評価が難しいと考えられる.計算結果はいずれの実験条件でも濃度はほとんど 0%で,実測結果は 0.3%以内であることから,差は問題とならないと思われる.

図(c)及び(d)に関しては,独自で設定した室内の各点での測定結果であるが,計算値と実測値の大きな差は 見受けられない.冷媒の方が空気よりも密度が大きいため,その密度差により部屋の下部に冷媒は滞留するこ とが示されている.

業務用ショーケースからの漏洩に関しては,扉の開放という動作により冷媒漏洩が始まるので,シミュレーションにより漏洩の挙動を再現するのは容易ではない.計算モデルは一定の妥当性を有しているものと考えた.本研究においてはこれらの手法を用いて計算を行った.



Fig. 2-14 Comparison of simulation and experiments on concentration change (Case D)

2.3.3 数値計算による可燃性冷媒の最大許容充填量の検討

旧 IEC 60335-2-89 では、補助的な安全機器を動作させなくても安全が確保される条件として、*m*_{max}=150g と されていたが、2019 年に改正され、IEC 60335-2-89:2019¹²⁻⁴¹では冷媒漏洩時に空調機のファンを稼働させることを前提とする可燃性冷媒の最大許容充填量に関する式が決まっている.

$$m_{max} = 13 \times LFL \tag{2-10}$$

R290のLFLは0.038 kg/m³なので、最大冷媒充填量は494gとなる.本研究では式(2-10)の評価を行った.

IEC60335-2-89:2019 によれば, Fig. 2-12 の No. 1~No. 8 のどの測定点においても,5 分経過以降は LFL の 50% の濃度を超えてはならないとなっている.床面積 21.28 m²の冷媒量毎の測定点 No. 1~No. 8 の濃度分布に関し ての評価を行い,まとめたものを Fig. 2-15 に示す.また,図中には 5 min (300 s) と LFL の 50 %の濃度を記した.図から,漏洩量が 300~500 g のとき,漏洩開始から 5 min 後 LFL の 50 %を No. 1~No. 6 の測定点で上回っ ている.それに対し,漏洩量が 200 g のとき,No. 1~No. 6 は LFL の 50 %近傍の値を示している.これらの結果から,ファンが稼働しないときには,可燃性冷媒の最大充填量は 150 g が妥当な指標であることが分かった.



Fig. 2-15 Results of time change of concentration simulation and experiment (R290, A=21.28 m²)

これまでの検討から、凝縮器のファンが動いていない状態では、ショーケースシステムに充填する冷媒量を 多くすると危険であることが分かった.そこで、ファンによる攪拌の効果について検討する.業務用ショーケ ースでは凝縮器の設置個所は上下2箇所が想定されるため、上ユニットと下ユニットの両方を対象とした.床 面積21.28 m²にて、R290を500g充填したときの可燃ガス体積の時間変化をFig.2-16に示す.Fig.2-16(a)、 (b)は凝縮器ユニットがそれぞれ下部、上部にある場合の結果である.下部にファンがある場合には、ファン速 度が上昇するにしたがって、可燃ガス体積の消滅は早まることがわかる.しかし、上部にファンがある場合に は、低風速では撹拌効果が小さく、可燃ガスの消滅は早まらない.ファン風速が2.4m/s以上になると、ファン の風が対面の壁に到達し、戻ってくる流れなどにより有効な撹拌をするようになる.下ユニットおよび上ユニ ットの場合の可燃ガス体積の時間積分値をFig.2-17に示す.図中には計算結果から導出した回帰方程式を示 している.

以上の結果から、漏洩時のリスクを低減するには、凝縮器ファンの効果がおおきいことが分かった.当然、 凝縮器ファンが下部に設置されているほうが、撹拌効果は大きくなる.床面積 21.28 m² でファン風速 v>2.5 m/s の時には、凝縮器を上部においても下部においても撹拌効果の差異は小さいことが分かった.しかし、上部に 凝縮器ファンを設置するときには、ショーケースの周りにおかれた他の冷凍空調機器がファンの流れを阻害 する可能性もあるので、撹拌効果は削減される.安全のためには、凝縮器ユニットは下部設置に限定するほう



Fig. 2-16 Flammable gas volume variation



Fig. 2-17 Effect of fan flow rate on time integral of flammable gas volume

がよい.

2.3.4 まとめ

業務用ショーケースの次世代冷媒の候補とされている R290 が室内に漏洩した際のリスクアセスメントをする為に、数値流体解析により国際規格の最大充填量評価をおこなった.本研究から以下のような知見が得られた.

- 本研究にて用いた数値流体解析手法の妥当性の検証のために、ショーケース模型を床面積 21m²の部 屋に設置し、R744 を用いて冷媒漏洩実験を行った.扉を開放することによりショーケース内に充填 した冷媒を漏洩させ、濃度の変化を実測し、シミュレーション結果と比較した.その結果、シミュレ ーションの濃度分布の再現性が高いことが示された.
- 2) 凝縮器ファンが稼働していないときの冷媒漏洩シミュレーションを行い,可燃ガス体積の時間積分値 と可燃ガス体積の消滅時間について調査した.凝縮器ファンが稼働しない場合は,可燃ガスが長時間 滞留し,危険であることが判明した.
- 3) 凝縮器ファンの効果を検討するために、凝縮器がショーケース上部に設置されている場合と下部に設置されている場合について、ファン風量を変化させて、可燃ガス体積の時間積分値と可燃ガスの消滅時間を計算した.ファンの稼働により室内での着火リスクを大きく低減できる可能性が示された.当然のことながら、凝縮器をショーケース下部に設置する方が少ないファン風量で可燃ガスを早期に消滅させることができる.凝縮器をショーケース上部に設置する場合には、撹拌専用のファンを下部に設置すべきである.

2.4 ルームエアコンのポンプダウン時のディーゼル爆発の抑制

2.4.1 はじめに

冷媒に関係したエアコンの圧縮機の破裂事故があり、この事故報告は少くない.これはエアコンの移設ある いは撤去や廃棄の際の冷媒ガスを室外機に回収する作業中に(ポンプダウンという)、圧縮機が異常な高圧に なり破裂する事故である.東ら^[2-5]は、圧縮機の破裂事故の要因として空気の混入が必要であると考え、圧縮機 を模型エンジンで模擬して空気、冷媒、潤滑油の混合物をディーゼル爆発を発生させる実験を行った.そして、 彼らは低冷媒濃度域において燃焼が起こり圧力上昇が発生すること、燃焼には潤滑油が必要であると報告し ている.また、東ら^{[2-6][2-7]}は、ディーゼル爆発実験において、潤滑油の種類を変えて実験を行い、潤滑油中の 添加剤の影響を調べた.そして、彼らは、潤滑油の燃焼性が爆発の発生条件に影響することを示し、燃焼性の 低い POE のほうが PAG よりも爆発的な燃焼は発生しにくく、添加剤が燃焼範囲を減少させたことを報告し た.本研究では、エアコンの圧縮機を模擬したモデルエンジンを用いて、冷媒、空気、潤滑剤の混合物の圧縮 燃焼実験を行い、燃焼抑制剤濃度が燃焼に及ぼす影響を調べた.

冷凍空調機器の圧縮機の潤滑に用いられる潤滑油の性状は,潤滑の基本特性である潤滑性,冷媒との共存や 長期間の油の安定性などが求められ,その機能を維持するために油(ベースオイル)に添加剤が加えられてい る.添加剤には目的に応じて,酸化防止剤,安定剤,耐摩耗剤などの種類がある.これまでの研究により,油 (ベースオイル)の燃焼が冷媒に伝播しさらに圧力が上昇することがわかっている.潤滑油の燃焼を抑止でき れば,圧縮機の爆発事故の被害を小さく,あるいは防止することができる.油の着火は,ラジカルを生成し酸 化の連鎖反応を引き起こして持続的な燃焼に至ると考えられる.添加剤はラジカルを捕捉することにより連 鎖反応を抑制することが期待されることから,これまでフェノール系酸化防止剤(A1),エポキシ系安定化剤 (A2)の入った潤滑油(POE)で実験を行った.そして,添加剤は燃焼抑制効果があり,圧縮機の爆発の確率

(A2)の八ろた酒宿福(FOE) で実験を行ろた、そじて, 添加剤は燃焼抑制効果があり, 圧縮機の爆発の確率 を低下させると報告している.本研究では, 燃焼抑制効果について, フェノール系酸化防止剤(A1)とリン系 耐摩耗剤(P1)に注目し, 添加剤の濃度, 添加剤と冷媒との組み合わせによる影響をそれぞれ実験的に調べた.

2.4.2 実験装置と実験条件

Fig. 2-18 は、エアコンのポンプダウン時に発生するコンプレッサー爆発事故時の様子を模擬した実験装置である.装置は主に冷媒圧縮機と駆動する系、冷媒を供給する系、空気を供給する系、潤滑油を供給する系と計測と制御系から成っている.冷媒圧縮機と駆動システムについては、冷媒圧縮機は小型模型エンジン(ENYA R155-4C 改造エンジン)で模擬し(以後、「模擬圧縮機」と呼ぶ.)、エンジンクランクシャフトに直接接続さ

れた電気モーター(三菱電機 AC 汎用 AC サーボ HP-JP203)で駆動した.

冷媒を供給する系については、マスフローコントローラで流量制御された冷媒は冷媒ボンベから配管を通 じて模擬圧縮機に供給される.空気を供給する系については、空気圧縮機から供給される圧縮空気をマスフロ ーコントローラ(コフロック製 MODEL8550MC-0-0-1-1)で制御し、除湿機を介して配管から模擬圧縮機に供 給している.冷媒と空気は管路途中で合流し、電気ヒータにより所定の温度に上昇し模擬圧縮機に供給される. 潤滑油を供給する系は、タンクから供給された潤滑油を油圧ポンプで昇圧し、オイル噴射システム (FC デザ イン、燃料噴射システム)のインジェクタから模擬圧縮機の吸気管に噴射する.エンコーダとストロークセン サでピストンの位相を読み取り、ピストンの位相角が 90°(吸気の上死点位置を 0°)の時にオイルを噴射した. 当量比(\$\phi)は、実際のオイルの質量とエンジンの行程容積の空気と完全燃焼するオイルの質量の比で定義さ れている.理論空燃比はエンジンの行程容積の空気とオイルの CHO 質量分率から求めた.オイル噴射圧力は 100MPa であり、オイル噴射時間とオイル質量の関係は予め実測して校正した.モーターの制御はパソコンに よりサーボアンプを介して行った.エンジン内の圧力は圧電式圧力センサ(キスラー6045A)で電気信号に変 換し、排ガス温度は排気管に設置した K型シース熱電対(0.5mm-OD)で電気信号に変換した.圧力、温度の 電気信号とオイル噴射装置の信号(エンコーダ、ストロークセンサ、オイル噴射信号)はデータロガーを介し てパソコンに記録した.Table 2-9, 2-10, 2-11 に実験条件、潤滑油と添加剤の物性値と冷媒の性質をそれぞれ示 した.



Fig.2-18 Experimental apparatus

, 1	
Compressor	Model engine(4 stroke engine) ENYA R155-4C(modified)
Compression ratio [-]	16
Stroke volume [cc]	25
Engine revolution [rpm]	1500
Mixture gas flow rate [L min ⁻¹]	18.8
Oil injection timing [degree]	90 (at crank angle)
Inlet gas temperature [°C]	260±5
Oil equivalent ratio [-]	1
Refrigeration concentration [vol%]	0-64.9

Lubricating oil	Polyol ester (POE)		
Viscosity grade	68		
Ignition point [°C]	408		
CHO ratio [mass%]	70.1:10.8:19.1		
Theoretical air-fuel ratio [kg kg ⁻¹]	10.91		
Additive	A1:Penolic antioxidant,		
Additive	P1:Phosphorus antiwear agent		
Additive mixing ratio [wt%]	0,1,5		

Table 2-10 Properties of lubricant and additives

Table 2-11	Properties	of refrigerants
------------	------------	-----------------

Refrigerant	Global warming potential (GWP)	Minimum oxidative decomposition temperature [°C]*	Combustion range [vol%]	ASHRAE safety classification
R1234yf	<1	560-580	6.2-12.3	A2L:mildly flammable
R32	677	580-600	13.3-29.3	A2L:mildly flammable
R22	1760	460-510	-	A1:non flammable
R290	3	-	2.1-9.5	A3:intense flammable

*from Ito et all. (2018)[4]

実験は次の順序で行った. エンジンの回転数 50rpm で運転しながら,指定の空気量を模擬圧縮機に供給する. 模擬圧縮機入口の空気温度が所定の温度になるまでパイプに巻かれた電気ヒータの電圧を上げ,温度が安定した後に所定の冷媒量を流す. 模擬圧縮機回転数を 1500rpm に変更した後,オイル噴霧システムを稼働してオイルを噴射する. オイルが噴射し数秒後にパソコンでデータを収録し始める. 実験は,異なる冷媒,添加剤とその濃度,当量比(φ)1の潤滑油(POE)で行った.

2.4.3 実験結果

(1) 冷媒がない場合

潤滑油の燃焼に対する添加剤濃度の影響を調べるために,空気と潤滑油($\phi = 1$)の混合ガスのディーゼル 爆発実験を行った.濃度が0,1,5wt%の添加剤P1とA1を使用した.これらの条件では,潤滑油と空気の混合 ガスは自己着火燃焼しその発熱量により大きな圧力上昇があった.ちなみに,空気のみの圧縮の最高圧力は約 2 MPa である. Fig. 2-19 は各添加剤濃度について 8~16 回の実験を行いその結果を示した.図の縦軸は混合ガ スの最高圧力で横軸は添加剤濃度である.図から,添加剤A1とP1の最高圧力は添加剤濃度の増加と共に圧 力が減少することが分かる.つまり,添加剤は燃焼を抑制し発熱量の減少が圧力上昇を抑える.添加剤A1と P1の違いによる燃焼抑制効果に大きな差は見られない.



Fig. 2-19 Relationship between maximum pressure and additive concentration

(2) フェノール系酸化防止剤(A1)を添加する場合

Fig. 2-20 (a)-(d)に添加剤濃度をパラメータにして、それぞれ R22, R32, R1234yf, R290 の冷媒濃度に対する無 次元最高圧力を示した.これまでの実験結果より、低冷媒濃度で無次元圧力が約 1.5 以上の高圧領域は自己着 火燃焼が起こっている. Fig. 2-20 (a)において、R22 の燃焼範囲の上限の冷媒濃度を比較すると、添加剤無し (0wt%は base oil)は 32vol%、そして添加剤(A1)の 1wt%と 5wt%はそれぞれ 22vol%と 5vol%であり、添加剤濃度 の増加と共に上限値は低下する.添加剤濃度が増加すると燃焼範囲は顕著に小さくなるが分かる.また、0wt% の添加剤(A1)のときの無次元最高圧力は 3.4、1wt%のときは 3.2、5wt%のときは 2.3 であり、最高圧力は添加 剤濃度の増加と共に低下している. R32 の燃焼範囲の冷媒濃度は 0-20vol%で R22 の 0-30vol%でより狭く、 R1234yf の 0-6vol%より広い、つまり燃焼範囲は冷媒により異なる. R32 と R1234yf において、添加剤濃度の 影響ははっきりしないが燃焼範囲のわずかな縮小が見て取れる. R290 においては、燃焼範囲は 0-2.5vol%で小 さく、無次元最高圧力は 0wt%の添加剤で 3.3、1wt%で 2.7、5wt%で 2.4 より、最高圧力は添加剤濃度の増加と 共に低下している. ところで、燃焼範囲と圧力波形変化の範囲を添加剤 1wt%で比較してみると、R22 の燃焼 の上限と圧力変化の上限は 22vol%と 25vol%であり、R32 では 15vol%と 20vol%、そして R1234yf では 6vol% と 10vol%である. つまり、圧力波形の変化は燃焼範囲より高冷媒濃度に現れる.実際のポンプダウンでは、 圧縮機入口の冷媒濃度は徐々に低くなることから、圧力波形の変化は燃焼の前兆となる.前兆をとらえること により事故を未然に防止することが期待される.



Fig. 2-20 Relationship between maximum pressure of combustion gas and refrigerant concentration (A1)

⁽³⁾ リン系摩耗抑制剤(P1)を添加する場合

Fig. 2-21(a)-(c)に添加剤(P1)を添加した場合の実験結果を示した. 燃焼に対する添加剤(P1)濃度の影響は添加剤(A1)と同様な傾向を示した. 冷媒 R22 において,添加剤の濃度別に燃焼範囲の上限を比較すると,添加剤無し(0wt%, base oil)は 32vol%,そして添加剤(P1)の 1wt%と 5wt%はそれぞれ 25vol%と 20vol%であり,それらの上限と無次元最高圧力は添加剤濃度の増加と共に低下した. しかしながら,添加剤(P1)による燃焼および圧力の抑制効果は添加剤(A1)のそれより小さい. R32と R290 について,添加剤(P1)による燃焼および圧力の抑制効果は添加剤(A1)とほぼ同程度である.



Fig. 2-21 Relationship between maximum pressure of combustion gas and refrigerant concentration (P1)

2.4.4 まとめ

添加剤を含む潤滑油(POE)と冷媒 R22, R32, R1234yf, R290の組み合わせでディーゼル圧縮実験を行った. 添加剤はフェノール系酸化防止剤(A1)とリン系摩耗防止剤(P1)でそれらの濃度は1,5wt%である. 実験結果より以下の知見が得られた.

- 添加剤は燃焼範囲と最高圧力に影響し、添加剤濃度の増加と共に燃焼範囲は狭くなり最高圧力は低下す るようになる.従って、添加剤濃度の増加は、燃焼抑制効果を増し爆発の破壊力を低下することから、 冷媒圧縮機の爆発事故の発生確率の低下と被害の大きさの縮小が期待される.
- 2) 燃焼抑制効果は添加剤と冷媒の組み合わせにより異なり、添加剤(A1)と R22 の組み合わせのとき、添加剤の燃焼抑制効果は顕著であった.しかし、他の組み合わせでは燃焼抑制効果は小さかった.
- 3) R290 については、他の冷媒に比較してディーゼル爆発の発生範囲は非常に狭い.

添加剤は多くの種類がある. 燃焼抑制効果は, 冷媒と添加剤の組み合わせにより異なることから, さらに他の添加物との組み合わせによる研究が望まれる.

参考文献

- 5-1) Kirk, R.E. and Othmer, D.F., 1999. Concise Encyclopedia of Chemical Technology, Wiley.
- 5-2) IEC 60335-2-40: 2018. Household and similar electrical appliance Safety Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers. I.E.C.
- 5-3) IEC 60335-2-40 61D/421/CD, 2019. Amendment 1 Household and similar electrical appliances Safety Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers (f1). I.E.C.
- 5-4) 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 moter-compressor", International Electrotechnical Commission, (2019).
- 5-5) Higashi, T., Saitoh, S., Dang, C., Hihara, E., 2017. Diesel combustion of oil and refrigerant mixture during pump-down of air conditioners. Int. J. Refrigeration 75, 300-310.
- 5-6) Higashi, T., Tamai, S., Saitoh, S., Dang, C., Hihara, E., 2017. Effect of lubricating oil on explosion accidents of compressor during pump-down of air conditioner. Trans of the JSRAE 34(3), 181-191. Doi: <u>https://doi.org/10.11322/tjsrae.17-17</u>.
- 5-7) Higashi, T., Tamai, Dang, C., Hihara, E., Shitara, Y., 2018. Effect of additives to suppress the combustion of oil on pumpdown accidents, JRAIA International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology.

第3章 公立諏訪東京理科大学の進捗

3.1 はじめに

2016年のモントリオール議定書キガリ改正³⁻¹⁾を受け、わが国は2011-13年度比で85%のHFC排出削減を 求められている.現行冷媒をそのまま適用するのであれば、2029年にはこの目標値をクリアできなくなると されており³⁻²⁾、HFC削減は待ったなしの状況となっている.そこで抜本的な対策として、現行冷媒からプロ パン等の次世代冷媒に転換することを現実的に考えなければならない.しかしこれらの次世代冷媒の多くは 強燃性を示すので、実用化のためにはプロパン等の漏洩に起因する火災・爆発シナリオを想定し、これに伴う 物理的リスク(フィジカルリスク)を社会的に受容できるレベルまで低減させる必要がある.本学ではこの観 点から、「実使用環境における着火源を考慮した次世代冷媒の燃焼に係るフィジカルリスク評価手法の確立」 と題して、次世代冷媒を搭載した家庭用空調機器及び内蔵ショーケースの業務用冷凍冷蔵機器の使用時に、着 火源となりうる機器及び現象の評価手法の開発を目的とした研究開発を開始した.これにより、次世代冷媒適 用を見据えたリスクアセスメントにおいて重要となる着火確率を、従来よりも精密に評価可能になると期待 される.2018-2020年度は次世代冷媒の中でも特に炭化水素系自然冷媒に注目しており、これまでに、空調 機器から漏洩・滞留したプロパン/空気混合気への一般家電等の電気機器の通常使用や喫煙等による着火性 を、文献・Web及び実験により評価した.本報ではそれらの概要を述べる.

なお着火源の選定にあたっては、一般社団法人日本冷凍空調工業会(以下、日冷工)が実施する、家庭用空 調機器及び業務用冷凍冷蔵機器のリスクアセスメント結果と密接に連携している.本研究は NEDO 事業「省 エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発」の一環として実施されるも のであり、共同提案機関である国立大学法人東京大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所(以下,産総研) 安全科学研究部門と密接に連携して、実験データおよび構築するフィジカルリスク評価手法の精度及び信頼 性向上を図る.

3.2 本研究の構成

本研究は大きく分けて以下の2本の柱からなる.

(1) 機器使用時に問題となる着火源のスクリーニングと着火源モデルの構築 家庭用空調機器及び業務用冷凍冷蔵機器の冷媒を、次世代冷媒として期待されている強燃性の炭化水 素系自然冷媒に転換した場合を想定し、実際の環境で着火源となりうる機器や現象を抽出する.抽出さ れた着火源を着火機構ごとにカテゴリー分けし、カテゴリーごとに着火機構のモデル(以下,着火源モデ ル)を構築する.

これまでの進捗内容は次のとおりである.主に家庭用空調機器の使用時を想定して,着火源候補となる機器や現象を日冷工によるリスクアセスメント結果をもとに抽出し分類した.まず電気スパークによるプロパン/空気混合気への着火能力について,文献およびWebサイトの調査結果をもとに着火機構を示したモデルを立て,プロパンの最小着火エネルギーと比較して評価した.この結果と,先に抽出された家電製品を分解調査した結果から,各電気機器の着火能力を評価した.さらに,静電気及び高温面による着火についても,学術的基礎理論をもとに着火機構のモデルを構築した.

(2) 各種着火源による次世代冷媒のフィジカルリスク評価

上記(1)で構築された着火源モデルに基づき,主として実験により着火可能性に関するデータを取得・ 蓄積する.共同提案先である東京大学及び産総研安全科学研究部門と密接に連携して知見を共有する.得 られたデータをもとに,炭化水素系自然冷媒やHFC系・HFO系微燃性冷媒等の次世代冷媒の着火特性に ついて,学術的に一般性のある評価手法を確立する.

これまでの進捗内容は次のとおりである.(1)での分類結果において,電気スパーク及び高温面に分類 される各種着火源候補のうち,①有接点リレー開閉時の電気スパーク,②照明の壁面スイッチ,③プラグ の抜き差し,④高温面について,実験によりプロパン/空気混合気への着火性を調べた.

3.3 着火源の抽出と着火能力の評価手法

日冷工にて実施されている,家庭用空調機器及び業務用冷凍冷蔵機器へのプロパン導入に係るリスクアセス メントにおいて,着火リスクをさらに詳細に検討する必要があるとして挙げられた機器を,まず大項目として

その本質的な着火機構から「電気スパーク」「高温面」「裸火」などの大分類に区分し、それぞれ着火機構を検 討した.これを受けて、着火源候補となる電気機器や現象等を各大分類の下に紐づけ、大分類の着火機構モデ ルに基づいて着火性を評価することとした. Table 3-1 に評価対象とした着火源の一覧を示す.

Table 3-1	List of candidates of ignition source for	propane/air mixture which are g	generally used in life cycle.
-----------	---	---------------------------------	-------------------------------

Major Category	Middle Category	End Category
Electric spark	Electric relay	Refrigerator, Washing machine, Hair dryer, Rice cooker, Microwave oven,
		Dehumidifier, Vacuum cleaner, Electric carpet, Oven, Fan, Television,
		Printer, Air cleaner, Audio&Video, Telephone, Facsimile
	Thermostat	Refrigerator, Electric stove, Oven toaster, Electric kettle, Electric Kotatsu,
		Iron, Hair dryer
	Human operation	Plugging and unplugging, Wall-mounted lighting switch
	Brush motor	Vacuum cleaner, Hair dryer, Electric razor
	Charge	Printer, Electrostatic spark discharge
Hot Surface		Electric heater, Hot plate for cooking, Burnt cigarette
Open flame		Burnt cigarette and lighter, Candles

可燃性ガスの着火性を議論するには、一般的にはエネルギー供給源周囲に可燃性混合気が形成されるかどう かと、そのエネルギー供給源が可燃性混合気を着火させるだけのエネルギーを有しているかどうかで評価でき る。前者は燃焼範囲、後者は(最小)着火エネルギーという物理量を用いて評価される。ここで、(最小)と したのは、着火エネルギーは可燃性混合気の濃度に依存するので、最小着火エネルギーのみで評価すると、過 大に着火しやすいと評価してしまう可能性があるためである.一般に最小着火エネルギーは,静穏な可燃性ガ ス中で容量性火花放電を用いて測定されることが多い.例えば Lewis and Elbe^{3-3)は},火花放電の継続時間を 10-⁸~10⁻⁷ s と見積もっている. Strehlow³⁻⁴は、最小着火エネルギーの実験的な決定に際して、空気コンデンサを用 いた自発放電では、貯蔵エネルギーの最高90%程度が10⁻⁵ s以内に火花として放出されるとしている。

例えば,可燃性ガス/空気混合気では,静電気のような数 mJ のエネルギーで着火するが,これと同じ熱量 をニクロム線のジュール熱として与えても、着火は見られない、また、容器内の灯油や木片などには電気スパ ークでは一般に着火できない.これらは見かけの着火過程が異なるからであるが、本質的な着火過程 3-5).3-6)は 概ね以下の通りで共通である.

着火は持続的な燃焼反応の開始であり、燃焼反応は連鎖反応によって構成されるので、燃焼場には連鎖担体 である OH や H などの活性化学種が多数存在する必要がある. 可燃性混合気にエネルギー(熱) が与えられ て温度上昇するとこの活性化学種の数が増加する. それと同時に, 可燃性混合気から周囲へ熱や活性化学種が 失われる.つまり発熱の速度と熱損失の速度のつりあいによって活性化学種の数が決まることになる.発熱速 度は一般にアレニウス式

$$\dot{q}_1 = QVC^n B \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$
(3-1)

で与えられる. ここで, V は反応系の体積(m³), O は反応体積の物質の発熱量(kJ/m³), Cⁿ は反応速度の濃度項, C は単位体積中のモル数(mol/m³), n は反応次数, B 以下は速度定数であり E は活性化エネルギー(kJ/mol), Rはガス定数(kJ/molK), Tは温度(K)である.

一方、熱損失速度はニュートンの冷却則より

$$\dot{q}_2 = hS\left(T - T_0\right)$$

(3-2)

で与えられる. ここで, h は熱伝達率(kW/m²K), S は系の境界 の面積(m²), T は系内部の温度(K), T₀ は系の境界の温度(K) である. この両式を温度に対してプロットすると Fig.3-1 のよ うになる. つまり $q_1 > q_2$ であれば系の温度は際限なく上昇す るので必ず着火し, $q_1 < q_2$ であれば放熱のほうが大きいので 温度が上昇せず着火しない. したがって, 電気スパークのよ うに瞬間的に局所的な高温が形成される場合(放熱作用が無 視できる場合)は,火炎核と生じる高温ガス塊が電極間に形 成され,この火炎核が定常的な火炎伝播に十分なエネルギー を持っている場合に着火に至ると考えられる.

ー方ホットプレートなどのように、混合気が徐々に加熱される場合は、放熱の影響を無視できないし、初期の低温の段階では反応による発熱はほとんどない.したがって、着火には外部から供給される加熱エネルギー(またはパワー)が支配的となり、要するエネルギーは電気スパークによる最小着火エネルギーよりもけた違いに大きくなる.すなわち、熱面着火においては、上述の定義の最小着火エネルギーとの比較で着火性を論じるのは適当ではない.



Fig.3-1 Schematic diagram of the relationship between the balance of heat release and heat loss and ignition³⁻⁵⁾.

3.4 電気スパークによるプロパンの着火性評価

3.4.1 有接点リレーで生じる電気スパークによる着火性の評価

(1) 着火モデル

有接点リレーで生じる電気スパークの場合においても、本質的には先に述べた通り着火は発熱速度 と放熱速度のつりあいで決まるので、放電時間の大小が着火エネルギーを大きく左右することになる. すなわち、エネルギー供給開始からある時間までは熱損失の影響を無視できる特性時間が存在し、そ の時間内で生じたエネルギーが燃焼反応継続に十分なエネルギー(最小着火エネルギー)であれば着 火できる、と考えることができる.木下³⁻⁷⁾はこの時間を"臨界着火時間"とよび、およそ 100 µs (10⁴ s)としている.その根拠として Strehlow³⁻⁸⁾が示しているプロパンー空気混合気の火炎のシュリーレン 撮影結果から、火花放電が生じてから相当時間(約 10⁴ s)経過してなお、エネルギーがある臨界値以 上であれば、火花放電で生じた初期火炎は真の火炎に発達し、それ以下であれば初期火炎からの熱は 電極へ損失して、火炎伝播が中断され消滅したという結果を挙げている.これ以外にも、燃焼を支配 する連鎖担体である OH ラジカルの時定数が 100 µs 程度という報告が、燃焼とは独立に放電のメカニ ズムを調べた研究も含めて多数報告されている³⁻⁹⁾⁻³⁻¹³.

しかし家電製品に使用されている有接点リレーでは、放電エネルギーの放出に 10⁻³~10⁻² s 程度かか るとされている ³⁻⁷ことに対して、最小着火エネルギーは 10⁻⁸~10⁻⁷ s の放電時間 ³⁻³である容量性放電 を用いて測定されていることが多い. 放電時間が長ければそれだけ放熱量も大きくなるから、有接点 リレーでの放電における着火は、最小着火エネルギーよりもかなり大きなエネルギーが必要になると 推測されるが、ここではまず最悪状況を想定した簡易評価のために、有接点リレーの接点間で生じた 放電エネルギーのうち 100 µs 以内に放出されるエネルギーが最小着火エネルギーより大きい場合に着 火の可能性が高いとして、評価を進めることとした.

(2) 既往文献による着火性の評価

風ら³⁻¹⁴は、電話用リレー、カーボンランプ(抵抗性負荷)、DC 48 V 電源からなる回路を用いた実験により、アークエネルギーを計測している.これによると、接点電流が1.4A 未満の場合、アーク継続時間は概ね 100 μs 以下となるので、放電エネルギーはほぼすべて着火に寄与すると考えられる.このとき、接点材質にも依存するが概ね 0.6A 以上の接点電流であれば、プロパン/空気混合気の最小着火エネルギーを超えるエネルギー(~0.5 mJ)が生じる.ただし電気スパークによる着火エネルギーは燃料濃度に対して下に凸の曲線を描くので、この値であれば、燃焼範囲のすべての濃度にわたって着火できるわけではなく、着火可能なプロパン/空気混合気の燃料濃度範囲はせいぜい 3.0-6.9 vol%の範囲に限られる.

制御電流が2A超となるパワーリレーや電磁コンタクタについても、文献³⁻¹⁵⁾⁻³⁻¹⁷⁾の電圧電流測定結 果をもとに、放電開始後100µs以内に生じるエネルギーを求めたところ、約6-7mJとなる場合がみら れた. 燃焼下限及び上限での着火エネルギーは約4mJであるから、この場合はプロパン/空気混合気 の燃焼範囲すべてにわたって着火可能となる.

以上のことから,電気部品の接点部でアーク放電が生じた場合,放電エネルギーだけでみれば着火 の可能性を否定できず,特に制御容量2A以上の場合は燃焼範囲全体にわたって着火可能となる.

有接点リレーの放電エネルギーの実測

前項までの調査結果を立証するため,実験を実施した.

(a)実験概要

(3)

市販の2種類の有接点リレー(OMRON MK2P, G7J)を用いた.負荷を接続し,接点閉成時及び開離時のそれぞれについて接点両端の電圧と回路を流れる電流をそれぞれプローブで計測し,チャートレコーダに記録した.回路図及び装置写真をFig.3-2に示す.使用した負荷はドライヤー2種,電動ドライバー2種,LED電球1種である.実験条件として負荷種類及びリレー種類をTable 3-2に示すように変化させた.実験実施場所の交流電源周波数が60Hzであることから,1つの負荷種類・リレー種類の組み合わせにおいて,60回の計測を実施した.



Fig.3-2 Schematic diagram of experimental electrical circuit.

(b)結果

いずれの負荷を使用した場合も,100 µs 間で放出される放電エネルギーは全て最小 着火エネルギーよりも大きな値を示した. 特にリレー閉成時に開離時よりも大きなエ ネルギーを示す傾向があった.放電エネル ギーは消費電力の増加に伴って増加する傾 向が認められた(Fig.3-3).負荷のインダク タンス・キャパシタンス・抵抗が及ぼす影 響については,完全ではないものの,放電 エネルギーは抵抗にはあまり依存せず,イ ンダクタンスが小さくキャパシタンスが大 きいほど大きくなる傾向がみられた.

Table 3-2 List of specification of test devices.

Type of relay	Туре о	Type of Electrical Load			
				HIGH	840
		ductive & Hair dryer esistance Type B apacitive & Control Type	Type A	MIDDLE	440
	Inductive &			LOW	40
	Resistance		Туре В	HIGH	1050
Type 1				MIDDLE	1000
				LOW	700
	Capacitive &		e A	130	
	Resistance	Screwariver	Type B		210
	Resistance	Electric bulb		50	
Type 2	Inductive & Resistance	Hair dryer	Туре А	HIGH	840



Fig.3-3 Averaged discharging energy within 100 µs since the commencement of the discharge in each conditions of electrical relays and electrical loads.

3.4.2 ブラシモータで生じる電気スパークによる着火性の評価

ブラシモータで生じる電気スパークの場合においても、有接点リレーと同様の考え方で着火が支配されると 考えることができる.ブラシモータの放電波形を測定した一例として、伊里³⁻¹⁸⁾が実施した直流モータの高速 回転時の整流現象とブラシ摩耗に関する研究がある.本研究では電流電圧波形を観測し、その結果をもとにア ーク継続時間、アーク電圧、残留電流と回転速度の関係がまとめられている.アーク継続時間及び残留電流は、 回転速度 3000 rpm 付近で最小値をとったのち増加に転じ、アーク電圧は回転速度に対してほぼ一定である結 果が報告されている.そこで、最もエネルギーが小さいと思われる、回転速度 3000 rpm での電流・電圧・ア ーク継続時間を読み取ると、それぞれ 17 V, 0.55 A, 37 µs であったので、これよりエネルギーは 0.35 mJ とな る. アーク継続時間が 100 μs であることから,このエネルギーはすべて着火に寄与すると考えられるので, 先述のパワーリレーや電磁コンタクタほどではないが,濃度によってはプロパンを着火させる可能性がある と考えられる.

3.4.3 照明スイッチの操作で生じる電気スパークによる着火性の評価

研究の概要

ここでは、電気スパークによる着火の可能性のある想 定事故シナリオの1つとして、家庭用空調機器からプロ パン冷媒が漏洩し、室内で可燃性混合気が形成された環 境下で、壁面スイッチにより照明を点灯あるいは消灯さ せた場合を考える.壁面スイッチは Fig.3-4 に示すように 接点を有するので、その周囲においてアーク放電を生 じ、これにより着火する恐れがある.そこで実験により、 この動作による着火性を定性的・定量的に評価すること とした.また、日本やアメリカでは100~110Vの電圧が 使用されているが、主要20か国において、200~230Vを 使用している国は16か国ある³⁻¹⁹ことから、供給電圧を AC 100 V 及び AC 230 V に設定して実験を実施した.

(2) 研究の流れ

まず,着火源と想定されるスイッチ接点付近で可燃範 囲のプロパン/空気混合気が形成されるか否かを確認 するために,試験空間内及び接点が格納されたケーシン グ(以下,"接点ケーシング")内のプロパン濃度を測定 した(実験 A). 次いで,空気雰囲気下でスイッチを動作 させ,接点間両端の電圧及び回路電流を計測して放電エ



Fig.3-4 Photos of test switches for lighting. Upper: Body Middle: Button Low: Electrical contacts Left: Type A, Right: Type B

ネルギーを求め、着火能力の評価を行った(実験 B). これらの結果を踏まえて、試験空間内にプロパン/空気の可燃性混合気を形成させてスイッチを動作させる着火実験を実施し、接点周囲の放電及び 着火挙動を視覚的に観測するとともに、放電エネルギー及び発光部の距離を計測することにより、着 火の有無との関係を定量的に検討した(実験 C).

- (3) 実験の概要
 - (a) 実験 A (濃度計測実験)

一辺1mの立方体形状のアクリル製プールを製作し、その壁面に穴をあけて、接点ケーシングを含むスイッチ本体とこれを支持するスイッチボックスを取り付けた.使用したスイッチはFig.3-4に示す2種類(Type A: Panasonic, WNP5101MW, Type B: Panasonic, WTP50011WP)で、両者を合わせた国内シェアは90%以上と推定される.スイッチの取り付け位置はプール底面から787.75,505,222.25 mmの高さとした.これらの位置はそれぞれおよそ3/4H,1/2H,1/4H(Hはプール高さ:1000 mm)の高さに相当するので、本報告書では以後この表記でスイッチの位置を表すものとする.このプール内に、鉛直下向きにプロパンを漏洩させて、プール内のプロパン濃度を高さ方向に異なる5地点で、超音波式ガス濃度計(第一熱研製 US-II-T-S)を用いて計測した.漏洩地点の床面からの高さは0,100,300,500,1000 mmの5地点としてそれぞれ濃度計測を行った.漏洩速度は10g/minとし、漏洩量は41g及び87gとした.これは全量がプール内に漏洩して均一拡散した場合に、プール内のプロパン濃度がそれぞれ燃焼下限界(LFL,2.1 vol%)及び燃焼上限界(9.5 vol%)になる量である.ただし、安全性の観点から、プロパンと分子量がほぼ同じであることから漏洩挙動がよく似ていると推測される二酸化炭素を、プロパンの代わりに漏洩させた.プロパン濃度は、超音波式ガス濃度計によってあらかじめ測定した二酸化炭素濃度とプロパン濃度の校正曲線に基づき求めた.

(b-1) 実験 B-1(放電エネルギー計測実験:100V)

Fig.3-5 に示す装置を用いて,照明スイッチ接点における放電エネルギーを測定した.負荷には抵抗 性負荷の白熱電球(40,60,100W)及びLED電球(60W)を使用した.照明スイッチと負荷との間に カレントモニターを設置して通電時の電流波形を観測するとともに,オシロスコープにてスイッチ両 端の電圧を計測した.スイッチ動作は冶具を電動スライダーに取り付けて遠隔操作で実施した.接点 ケーシング内の接点の様子を観察するために ケーシングに穴をあけ、鉛直下方から高速度 カメラにて放電の様子を撮影した.なお、接点 周囲は空気雰囲気とし、スイッチ押下動作は1 つの負荷について10回実施した.得られた電 流及び電圧波形の積を時間積分して放電エネ ルギーを求めた.

(b-2) 実験 B-2(放電エネルギー計測実験:100, 230 V)

(b-1)と同様の回路を用いて,照明スイッチ接 点における放電エネルギーを測定した.負荷 には抵抗性負荷の白熱電球 6 種類(40,60,95 W 各 1 種類及び 100 W 3 種類)及び Hf 蛍光



Fig.3-5 Photo of setup for the measurement the discharging energy of wall-mounted switch for lighting.

灯(32W)を使用した.印加電圧は100V及び230Vとし,使用するスイッチは, Fig.3-4のTypeAとした.スイッチの接点雰囲気は空気とし、スイッチ押下動作は1つの負荷について60回実施した.放電エネルギーは(b-1)と同様にして求めた.

(c-1) 実験 C-1(着火実験:100V)

着火実験装置はFig.3-5と同じである.安全のため,プロパンはスイッチボックス内にのみ導入した. 先の濃度計測結果から,スイッチボックス内と接点ケーシング内はほぼ同等の濃度を示したので,ス イッチボックス内に可燃濃度範囲のプロパン/空気混合気が存在すれば,接点ケーシングの穴を通し てケーシング内へプロパンが流入すると考えた.あらかじめ所定量のプロパンをシリンジに測りとり, これをスイッチボックスに取り付けた導入ポートから導入した.導入量は全量がスイッチボックス内 に拡散した場合にボックス内濃度が LFL 及び化学量論濃度となる量として,それぞれ 12 mL,21 mL と した.本実験では回路負荷は白熱電球(60 W)のみとし,スイッチタイプは Type B のみとした.着火 の有無はビデオカメラ及び目視観察によった.照明スイッチの閉成及び開離に伴う放電エネルギーは 上述(b)と同様にして求めた.

(c-2) 実験 C-2(着火実験:230V)

着火実験に使用した燃焼容器は、厚さ10mmのアクリル板で製作した、内容積150×150×150mmの プールである.容器上面はアルミホイルで封じており、燃焼時にはこれが破れて圧力を放散するよう になっている.プール内には小型のファンを設置した.スイッチのコンセント部は容器外壁に沿って 鉛直に取り付けられており、スイッチ接点のケーシングがプール内側に位置している.回路構成は実 験 B と同じである.スイッチの電極間にプロパンガスが流入するよう、接点ケーシング部に開口部を 設けた.アクリルプール内にプロパンガスを導入し、濃度を均一にするため小型ファンにより1分間 撹拌した.プール内のプロパンガス濃度は化学量論濃度となる約4%に設定した.高速度カメラを用 いて、接点ケーシング下部にあけた穴より放電の様子を撮影した.負荷は、実験 B で放電エネルギー が大きかった100W 白熱電球及び Hf 蛍光灯(32W)とし、印加電圧は230V とした.スイッチ押下動 作は1つの負荷について50回実施した.放電エネルギーは、実験 B と同様に求めた.

- (4) 結果及び考察
 - (a) 接点ケーシング内への可燃性混合気の流入

Type A, Type B ともに、いずれの漏洩高さの場合も、1/2H 及び 1/4H の高さに設置されたスイッチの 接点ケーシング内への、可燃範囲内の組成をもつプロパン/空気混合気の流入が認められた. プロパ ンはスイッチのプレートとスイッチ本体の間の間隙からスイッチボックス内に流入し、接点ケーシン グにある穴を通して内部へ流入したものと推測される.

(b) 接点での放電エネルギー

実験の結果,以下の知見が得られた.

- ① 1回のスイッチ動作で複数回の放電が生じる場合があった
- ② 回路開離時のほうが回路閉成時よりも大きな放電エネルギーを示した.ただし、回路開離時は回路 閉成時よりも放電時間自体が長くなったので、臨界着火時間内の放電エネルギーに限ると回路閉 成時のほうが大きな値を示した.しかしいずれも最小着火エネルギーよりも大きなエネルギーを 示す場合が認められた.

- ③ 電球では印加電圧に関係なく,アーク放電の電圧は 10~20V 付近に分布した.放電時の最大電流 が大きい 100V の場合のほうが,放電エネルギーが大きくなった.
- ④ 交流の場合、一般的に位相が90°付近でアーク放電の電圧は最大値となる。しかし、印加電圧に関係なく、蛍光灯では位相が20~90°の範囲で大きな電圧が得られた.これは、蛍光灯器具内の安定器の影響と考えられる.放電エネルギーは230Vの場合の方が大きくなった。

⑤ 上記の傾向は負荷の種類に依存しなかった.

これらのことから,照明スイッチの接点付近に可燃組成のプロパン/空気混合気が形成される可能 性と,最小着火エネルギーを上回る放電エネルギーが接点において生じる可能性は否定できず,した がって着火の可能性を否定できないことが示された.

(c) 着火実験

以上を踏まえ着火実験を実施したが,各濃度条件において 60 回(100 V)及びプロパンガス濃度約 4%で 200 回(230 V)のスイッチ動作の繰り返しのうち,着火が認められたケースは1度もなかった. 放電時の様子を撮影した高速度カメラ画像から発光部の距離を読み取ると,おおむね 0.1-0.4 mm 程度 であった.これは、プロパンの消炎距離(1.7 mm³⁻²⁰⁾)に比べて 1/10-1/4 程度の値である. 接点の径は 約 2.0 mm 程度で,これも接点間距離に比して 1 桁大きい.したがって,本実験で着火が認められなか ったのは、放電核の大きさが消炎距離未満であったために、接点との接触によって熱損失を受け、持 続可能な火炎に成長できなかったためと考えられる.

しかしながら一般にスイッチ接点の技術基準として, IEC 規格 ³⁻²¹)に 3 mm ギャップと呼ばれる基準 が存在する. したがって接点間には最低でも 3 mm の間隔が存在することになるので, このギャップ 長全体にわたって放電が生じて火炎核が形成されていれば, 火炎はギャップを通り抜けて全体に伝播 することになる.

そこで、ギャップ長と絶縁破壊電圧の関係について検討した.気体中で絶縁破壊(すなわち放電) が生じる電圧 V_sは、気体の圧力 p と電極間隔 d の積の関数となり、次式で表される(パッシェンの法 則).

$$V_{s} = \frac{Bpd}{K + \ln\left(pd\right)}, \ K = \ln\left\{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right\}$$
(3-3)

ここで *B*,*K* は定数で, *y* は陰極の二次電子放出係数であり,空気の場合は *y*=0.01 とみなせる. 一般に 空気の絶縁破壊電圧は 330 V とされているので,式(3-3)からこれに対応するギャップ長 *d* を大気圧の 下で求めると 0.01 mm となる. ギャップ長 3 mm では 12 kV 超,消炎距離となるギャップ長 1.7 mm で は約 7.8 kV となる. 照明スイッチの動作ではこれだけの電圧は生じないと思われるので,放電時のギ ャップ長は最大でも消炎距離未満になると推測される. よって照明スイッチの接点でのアーク放電に よる着火の可能性は無視できると考えられる.

3.4.4 電源プラグの抜き差しで生じる電気スパークによる着火性の評価

研究の概要

コンセントへの電源プラグの抜き差し(主に引き抜き)時に生じる電気スパークによる着火性については、電気スパークのエネルギー等の基礎的知見のみでは評価困難であり、また、このような研究報告はほとんど見当たらない.そこで、これを再現した実験により、着火性を評価することとした. なお本検討結果の一部は 2019 年度に口頭発表している³⁻²².

(2) 研究の流れ

コンセントを取り付けた燃焼容器内に所定濃度のプロパン/空気混合気を導入し,負荷の電源プラ グを挿入して,着火の有無を高速度撮影により観測した.抜き差し時の電流及びプラグ両端電圧の変 動を計測し,着火挙動の定量的評価を試みた.

(3) 実験の概要

Fig.3-6 に示すように、上面をアルミホイルで封じた一辺 150 mm の容器内に、Fig.3-7 に示す市販の A タイプコンセントを鉛直に取り付けた空間で着火実験を実施した.コンセント筐体内部と挿入口と の間に仕切りはなく、挿入口からガスが進入した場合、

筐体内部全体に拡散・滞留する構造となっている.①
電源プラグの抜き差しを 200 回繰り返した場合(実験
①)と、②コンセントの引き抜き動作のみを 100 回繰り返した場合(実験②)の2パターンの実験を実施した.実験①では、容器内に導入したプロパンは着火が認められるたびに交換するものとし、一方実験②では着火の有無にかかわらず毎回交換した.いずれの実験でも、最も厳しい評価をするために、最小着火エネルギーを示すとされる 5.18 vol%のプロパン濃度を対象とした.電源プラグ両端の電圧と回路電流をそれぞれプローブで計測し、チャートレコーダに記録した.使用したの支援の

Table 3-3 List of specification of test devices.

Туре о	Consumption Power (W)			
	Hair dryer	Туре А	HIGH	810
Inductive &			MIDDLE	420
Resistance		Type B	HIGH	1040
			MIDDLE	700
Capacitive &	Scrowdrivor	Type A		200
Resistance	Sciewulivei	Туре В		80
Inductive &	Vacuum	Туре А		1000
Capacitance	cleaner	Туре В		970

用した負荷は Table 3-3 に示す仕様の市販の家電製品(ドライヤー・電動ドライバー・掃除機)である.



Fig.3-7 Photo of the electrical socket.

10 gnition probability [%] 8 6 4 0 2 0 0 200 400 600 800 1000 1200 1400 Comsumption Power [W] Hair dryer, TypeA, Middle Hair dryer, TypeA, High Hair dryer, TypeB, High O Hair dryer, TypeB, Middle Screwdriver, TypeA Screwdriver, TypeB Vacuum cleaner, TypeA Vacuum cleaner, TypeB



プラグが接続されていた場所とは異なるコンセントロ(上部)から火炎が噴出している. このときの 放電エネルギーは約4.5 mJ であったので,エネルギー的には着火可能である. コンセントのプラグ挿 入口の隙間は約2.4 mm であるのに対してプロパン火炎の消炎距離は1.70 mm であることも併せて考 えると,抜き差し動作の繰り返しによって,コンセント外のプロパン/空気混合気がコンセント筐体 内に侵入し,これにコンセント引き抜き時のスパークで着火して,コンセント上部から噴出したもの と考えられる.

(4) 結果及び考察

general electric appliances.

(a) 着火確率

いずれの負荷を使用した場合も、実験②では着火が1度 も認められなかった.このことから、何度かのプラグの抜 き差しの繰り返しが着火に必要であると考えられる. Fig.3-8に示すように、着火確率は概ね消費電力が大きくな るにしたがって大きくなる傾向がみられた.

Fig.3-6 Photo of setup for the ignition test of propane/air

mixture by plugging or unplugging the power cable of the

(b) 着火及び火炎伝播機構

Fig.3-9 はドライヤーType B を負荷とした場合のコンセント周囲のカラー高速度撮影写真である. 図中のt は放電が開始したと思われる発光がみられてからの経過時間である. Fig.3-9(a)と(b)はよく似た挙動を示している. いずれも,放電時間(この発光の継続時間)は4.3-4.5 ms であり,プラグがコンセントから抜けてから約 100-130 ms 後に,

これに対して, Fig.3-9(c)では若干その様相が異なる. コンセント内での発光の後, Fig.3-9(a), (b)より も有意に早期の段階で, プラグ刃付近に火炎の発生が認められ, これが約 6 ms のうちに同心円状に伝 播している. プラグ刃付近からコンセント方向へ火炎の伝播が認められることから, このケースの着 火機構は Fig.3-9(a), (b)とは異なり, コンセント外で着火してこれが容器内の未燃混合気に伝播したと 考えられる. その着火要因は, 抜き差しの繰り返しにより容器内の塵を巻き上げてプラグ刃との間で 静電気放電が生じたか, あるいは抜き差しによりコンセント内部から連行されてきた金属粉などとプ ラグ刃の間での静電気放電によるものと考えられるが, 今回の実験のみでは確証は得られなかった. また, インダクタンス, キャパシタンス, 抵抗といった負荷条件が着火に及ぼす明確な影響は認めら れず, 上述のように主として消費電力のみに依存した.



Fig.3-9 High-speed images of test space around an electrical socket. Electrical load: hair dryer (type B)

3.4.5 静電気スパークによる着火性の評価

(1) 研究の概要及び流れ

静電気スパークによる着火性を評価するため、日常生活における帯電シナリオ及び人体からの放電 シナリオを、日冷工で実施されているリスクアセスメントと共同して検討し、これに基づいて帯電電 位、エネルギー及びこれらに及ぼす湿度の影響を文献等により推測した.シナリオ構築にあたっては 放電場所と可燃性混合気濃度の位置関係や放電の生じる確率などを総合的に勘案する必要があるが、 ここではこれらについては触れない.

(2) 評価の概要と結果
(a) 帯電シナリオ

日常生活における人体への帯電事例としては、歩 行・摺り足歩行、ソファー・イスからの起立、衣服 の脱衣、毛布の折り畳み、整髪、などが考えられる. これらにより帯電した人体からの放電シナリオとし て、①ドアノブを触って放電する場合と、②衣服を 脱ぐ際に放電する場合を取り上げる.

(b) 放電種類と着火能力の学術的分類

静電気放電の形態には、主として火花放電、コロ ナ放電、ブラシ放電、沿面放電、コーン放電、雷状 放電などがある.それぞれの特性は以下のとおりで ある³⁻²³⁾.

- 火花放電:導体間で起きる放電であり,放電エネ ルギーはE = (1/2)CV² (C:静電容量(F),V:電圧 (V))で与えられ,比較的高い.最小着火エネルギ ーが 100 mJ 以下の可燃性ガスを着火させうると いうガイドラインもあり,着火源となりうる.帯 電電位と静電容量の関係はFig.3-10に示されると おりである.導体の最大帯電電位が 330 V よりも 大きいときに火花放電の発生の可能性があると されている.
- ② コロナ放電

先のとがった針電極,細線電極や曲率半径の極 めて小さい電極の近傍に不平等電界場が形成さ れ,この局所的に高くなった電界により生じる放 電である.一般に曲率半径が5mm以下で起こる. ただし,放電エネルギーが比較的小さいので,水 素のように極めて小さい着火エネルギーを持つ 可燃性ガス以外には,一般に着火性はない.

ブラシ放電

主に絶縁物が帯電し、曲率のある接地金属、指 先などが近づくときに起きる.正極性の放電のほ うが着火性が高いことが知られている.ブラシ放 電のエネルギーは 1~3 mJ までで、4 mJ を超え ることはないが、可燃性ガスの着火源となりう る.絶縁体表面の平均電位とブラシ放電の放電エ



Canacitance (nF)

Fig.3-10 Relationship between the charge potential and capacitance in each energy by spark discharge³⁻²²⁾.



Discharging energy (J)

Fig.3-11 Relationship between the charge potential and discharging energy by brush discharge³⁻²²⁾.



Thickness of isolation laver (um)

Fig.3-12 Criteria of the generation of propagation brush discharge³⁻²²⁾.

ネルギーとの関係は Fig.3-11 に示されるとおりである(接地導体球の半径を 20 mm とする場合).

④ 沿面放電

絶縁物体の厚さが薄くなると絶縁物の表裏に電気二重層が形成されるので、さらに大きな表面電荷を保持できるようになる.このような絶縁物の表面に沿って起きる放電が沿面放電である.放電エネルギーは10J程度になることもあり可燃性ガスの着火源となりうるが、Fig.3-12に示すように絶縁物体の厚さが8mm以下でかつ絶縁層の電位が4kV以上ないと生じない.

⑤ コーン放電

絶縁性の粉体を空気輸送する際に、帯電粉体が堆積するコーン状のフィード表面で生じる放 電のことである.

⑥ 雷状放電

サイロなどへの粉体の投入や搬入,タンク内でのジェット洗浄などにおいて,帯電粉体ある いはミストが気相空間中を浮遊し空間電荷雲を形成し,これから設置されたサイロやタンク壁 に向かって生じる雷のような放電.しかし 500 kV/m もの高電界を要するため通常は生じない. (c) ドアノブ接触時の放電による着火性

この場合の放電は上記(b)の火花放電に該当する.放電の発光が確認できるのは人体帯電電位が 4 kV 以上であるとされ、この電位では"針で深く刺された感じを受け、指がかすかに痛む"電撃 の強さに相当するとされている ³⁻²⁴. これは一般的な生活環境での静電気の感覚に合致すると思 われるので、ここでは帯電電位を 4 kV と見積もることとする.人体の静電容量は一般に 100 pF と されていることが多い ³⁻²⁴. これらをもとに火花放電のエネルギーを見積もると E = 0.80 mJ とな り、単純にエネルギーだけで見れば着火の可能性は否定できない.

(d) 衣服脱衣時の放電による着火性

この場合の放電は上記(b)のブラシ放電に相当する.衣服脱衣時の帯電電位は文献によるとおよそ4.0-5.0 kV とされている.この場合 Fig.3-11 から、放電エネルギーは 10⁻⁵ J 未満のオーダーとなるから、プロパン/空気混合気を着火させるには至らない.よって、衣服脱衣時の静電気放電による着火性は無視できると考えられる.

3.5 各種電気機器によるプロパンの着火性

3.4 節で、電気部品として有接点リレーが使用されている場合、これらの放電発生個所がプロパン/空気混 合気に暴露されていれば、濃度によっては着火の可能性があり、特に2V超の制御容量のリレーの接点付近で はいかなる濃度でも着火できるほどの大きなエネルギーが生じると推測された.これをもとに、日常生活に使 用される一般家電製品のいくつかを実際に分解調査するとともに、いくつかについては Web 上に掲載されて いる分解写真を参考に着火性を評価した.

① インクジェットプリンター

市販のインクジェットプリンター(EPSON, EP-806AR)を分解し, 3.4 節で述べた着火源となりうる電気部品の調査を行った. プリンター内には紙送りのブラシモータが2個, インクカートリッジを動かすためのブラシモータが1個見つかった. インク吐出制御と紙送り制御のために2個の電子基板があったが,いずれにも接点リレーは使用されていなかった. 以上のことから, インクジェットプリンターの場合, ブラシモータが存在することによる着火の可能性があると考えられる.

② 扇風機

市販の扇風機(三菱電機製, Summer life R30C-W)を分解し、着火源となりうる電気部品の調査を行った.機器内部にはブラシレスモータが用いられており、ブラシレスであることからこれによる着火の可能性は小さい.操作スイッチ部には接点があり、ここでは電磁コンタクタあるいは接点リレーと同様の放電が生じると考えられるので、これによる着火の可能性は否定できないとみられる.なお、今回分解調査したものは古い年式のものであるが、これと異なり扇風機の動作を電子制御するものが現在では広く流通している.この場合、電子基板を内蔵しているものと思われ、ここで接点リレーが使用されていれば、これを放電源として着火が生じる可能性は否定できないと考えられる.

3) 電子レンジ

市販の電子レンジ (SANYO, EM-LP1) を分解し、着火源となりうる部品の調査を行った.まずターンテ ーブル駆動用のモータを発見したが、このモータは 6 rpm 定格であり、この回転数ではアーク放電は発生 しないと考えられる.また、モータはプラスチック製の歯車に直結されているため、この点から見ても着 火性の放電が生じるとは考えにくい.これとは別に、庫内にはサーモスタットが使用されていた.サーモ スタットはバイメタルを使用した接点スイッチであり、過去にエチルエーテルがサーモスタットからの火 花によって引火した事例が報告されている.また、そのほかにも庫内からは接点部品が見つかっている. これらのことから、電子レンジについては、サーモスタットの存在によりプロパンの着火源となる可能性 は否定できないと考えられる.

④ 掃除機

市販の掃除機(TWINBIRD, FW3K167)を分解し、着火源となりうる部品の調査を行った.供試掃除機 にはユニバーサルモータが使用されていた.これは整流子とブラシを持つため、アーク放電や機械火花を 生じる.実際にこのユニバーサルモータを動作させたところ、空気中における放電の発生が確認できた. また、インターネット上に掲載されていた別の掃除機の分解写真³⁻²⁵⁾を調べたところ、基板上にリレーが 使用されていた.この基盤はモータ付近に設置されており、密閉性は低い.以上のことから、ブラシモー タで生じるアーク放電や、基板上のリレーで生じる放電等により、プロパンを着火させる可能性は否定で きないと考えられる.

⑤ 洗濯機

インターネット上に掲載されていた洗濯機の分解写真 ³⁻²⁰ (TOSHIBA AW70DG, National NA-F50Z8) か ら,使用されていた電気電子部品を推定した.いずれも電子基板が操作パネルの下にあり,そこに接点リ レーが用いられていたが,洗濯機は漏電防止のために基板上に樹脂を充てんして防水加工が施されている. インターネット上の写真からは,電気部品が樹脂によって完全に覆われているわけではないものの,密閉 性は高いものと推測される.したがって洗濯機に使用されている接点リレーは着火源にはなりにくいもの と推測される.

⑥ 除湿機·空気清浄機

インターネット上に掲載されていた除湿機(CORONA, CD-J107X)の分解写真 ³⁻²⁷⁾及び空気清浄機 (SHARP KC-Y65, KC-B50, Panasonic f-vxe60)を実際に分解した結果から、使用されていた電気電子部品 を推定した.洗濯機と同様,操作パネルの下に電子基板があり、有接点・無接点リレーともに使用されて いるようである.洗濯機とは異なり防水加工があまり施されていない.したがって基板部分の有接点リレ ーによる着火の可能性は否定できないと考えられる.

⑦ ドライヤー

インターネット上に掲載されていたドライヤーの分解写真 ^{3-28), 3-29)}(National EH534, Nobby NB1902)から,使用されていた電気電子部品を推定した. 基板は持ち手の内部に存在し,接点リレーの存在も確認された. ブラシモータも確認された. 以上により,ドライヤーによる着火の可能性は否定できないと考えられる.

⑧ 電気ポット

インターネット上に掲載されていた電気ポットの分解写真 ³⁻³⁰⁾ (タイガー PDK-G) から,使用されて いた電気電子部品を推定した. 基板は製品の底部に存在し,接点リレーの存在も確認された. 電気ポット やケトルの底面は密閉性が低いものが多く,また,サーモスタットやサーミスタ等も使用されている可能 性がある.以上により,電気ポットによる着火の可能性は否定できないと考えられる.

⑨ 電気炊飯器

インターネット上に掲載されていた電気炊飯器の分解写真 ³⁻³¹⁾(National SR-SS18A, タイガー JAQ-A550) から,使用されていた電気電子部品を推定した. 基板は製品の側面下部に存在し,接点リレーの存在も確 認された.以上により,電気ポットによる着火の可能性は否定できないと考えられる.

⑩ 電気カーペット

ー般に電気カーペットは操作部が床に設置されることが多く、インターネットに掲載されていた写真³⁻³²⁾では、操作部にリレーが組み込まれていたものも存在した.熱線によってカーペット全体を暖めているため、回路全体の抵抗が大きく、接点部での放電が起こりやすいと考えられる.また、サーモスタットによって温度を管理しているものが多く、サーモスタットによる可燃性気体の火災事例も存在するため、電気カーペットによる着火の可能性は否定できないと考えられる.

① レーザープリンター

プリンターや CD・DVD 再生機器等に用いられているレーザーも、着火源として懸念されている. レー ザーは可視光線であり、その波長は DVD プレーヤーで 650 nm、ブルーレイプレーヤーで 405 nm とされ ている³⁻³³⁾. これに対しプロパンの吸収帯 ³⁻³⁴は 3370 nm (吸収率 90.6%), 6800 nm (吸収率 19.7%) であ るから、レーザー照射部に可燃範囲のプロパン/空気混合気が存在していたとしても、そのエネルギーを 吸収することはない. よって、レーザーは着火源にはならないと考えられる. 印刷部以外はインクジェッ トプリンターと同じ機構であるので、ブラシモータが使用されていると考えられる. したがって、ブラシ モータから生じるアーク放電によっては、着火源となる可能性は否定できないと考えられる. これ以外に、 感光ドラムを帯電させるためのコロナワイヤー及びレーザーが着火源になる可能性が考えられるが、コロ ナワイヤーで生じるコロナ放電のエネルギーは 0.1 mJ 未満 ³⁻³⁵⁾と考えられるので、プロパンの最小着火エ ネルギーに満たず、着火の可能性は小さいと考えられる. また先述の通りプロパンはレーザーの波長帯に 吸収帯を持たないので、基本的にレーザーでの着火の可能性はない. プリンター内のレーザーはレンズで 集光されるので、通常のレーザーよりもエネルギーが大きくなるが、それでも約 0.1 MW/cm²程度 ³⁻³⁰なの で、レーザーブレイクダウン閾値 (100 GW/cm²⁻³⁻³⁷⁾) よりも小さい. このため、レーザーでの着火の可能 性は極めて小さいが、ブラシモータのアーク放電により着火する可能性がある.

3.6 高温熱面によるプロパンの着火性

3.6.1 研究の概要及び流れ

前節までは主に電気スパークによる着火性について述べたが、ここではたばこの火や電気ヒーター(電気ストーブ)、ホットプレートなどのような高温熱面による着火性について実験的に検討した結果を述べる.まず、加熱壁面に対してある流速を有した可燃性ガスが接触する状況を再現できる装置を製作し、濃度、加熱壁面への印加電圧、流速を変化させて着火の有無、着火時の温度、加熱開始から着火までに要する時間を計測した. 3.3節で示した着火のメカニズムをもとに供給電圧と着火エネルギーの間に成り立つ関係を導き実験結果を説明するとともに、最小着火エネルギーの存在及びこれを与える供給電力の流速・濃度依存性を明らかにした.なお本節の内容については文献 ^{3.38)-3.40}に詳細な記載があるので参考にされたい.

3.6.2 実験の概要

本実験では、Fig.3-13(a)に示すアクリル製および Fig.3-13(b)に示すステンレス製のループ型燃焼容器(管路 断面 40 mm 角,管路長 340 mm 角)を用いた.2 つの容器を用いた理由は、はじめ内部視認の容易さからアク リル製容器を使用していたが、加熱に伴い容器が容易に劣化するので、ステンレス製容器を用いることとした ものである.いずれの容器を用いた場合も、その他の装置仕様および寸法は同じであり、実験条件が異なる. 可燃性混合気の流れは容器内に設置したブラシレスファンによって生じさせた.容器内には一辺 25 mm 角の 正方形セラミックヒーターが流れに対向するように設置されており、スライダックにより所定の電圧を印加し て加熱面とした.加熱面の温度はヒーター内蔵の R 型熱電対にて計測した.加熱面周囲の着火挙動は、ステン レス容器を用いた実験においては容器に取り付けた直径 20 mm の観測窓からシュリーレン法により高速度撮 影した.アクリル容器の実験では常速度デジタルビデオカメラにて撮影した.

実験条件として流速を 0.0-4.0 m/s (アクリル容器) 及び 0.0-2.0 m/s (ステンレス容器), プロパン濃度を 2.1vol% (アクリル容器) および 2.1-9.5 vol% (ステンレス容器), 電圧を 50-90 V の範囲で変化させた.着火は,加熱 面周囲の視覚的変化,容器の圧力上昇,イオンプローブの応答,温度上昇等から総合的に判断した.加熱時間 を最大 10 分間,実験回数は 1 つの流速・電圧・濃度の組み合わせについて最大 10 回とし,この間に 1 度でも 着火した場合はその条件は着火と判定した.また,着火が認められた最小の電圧を最小着火電圧と定義した.



(a) Schematic diagram of acrylic chamber



(b) Photo of SUS chamber

Fig.3-13 Schematic diagram and photo of closed-loop combustion chamber.

3.6.3 実験結果及び考察

(1) 供給電力と着火電圧の関係

本実験の系においては、可燃性混合気の正味の発熱速度 q_{net} (加熱壁面から未燃混合気に熱伝導で与 えられる熱流束 q_w と化学反応による内部発熱による熱流束 q_r の和と熱損失 q_l との差、いずれも単位 は W/m^2) に反比例して着火時間 t_{ig} (s)が決まる.供給電力を P (W)、加熱面面積を $A(m^2)$ としたとき、 t_{ig} は以下の式で書ける.

$$t_{ig} \propto \frac{1}{q_{net}} = \frac{1}{q_w + q_r - q_l}$$
(3-4)

ここで、化学反応による熱流束 q_r は反応直前の微小時間内にしか発生しないので無視できるものとし、温度が加熱時間に対して単調に上昇する時間帯では $q_w \propto P/A$ で近似できるとすると、式(3-4)から、 tig は P/A が大きくなるほど短縮し、逆に q_l が大きくなれば延長されることがわかる. q_l が無視できる ほど P/A の値が大きくなると、tig は P/A のみに反比例する. q_l は流速に比例するから、P/A が q_l に比べ て十分大きい場合、流速の大小によらず P/A の値に応じて tig が決まることを表す. このことは実験か らも認められた.

(2) 着火エネルギー

着火までに要したエネルギー E_{ig} (J)は,着火時間 t_{ig} と供給電力 P の積で与えられるとすると,式(3-4)を考慮して以下の式で与えられる.

$$\frac{E_{ig}}{A} = t_{ig} \cdot \frac{P}{A} \propto \frac{(P/A)}{(P/A) + q_r - q_l}$$
(3-5)

いま q_rは無視できるので, P/A が q_lに比較して十分大きい場合, E_{ig}/A は式(3-5)から一定値をとることになる.このとき,供給された電力は見かけ上損失なく着火に寄与することになるから,一定値となる E_{ig}/A は最小着火エネルギーに相当する.実験結果から,P/A の値が大きくなるほど E_{ig}/A が小さくなって流速の影響がなくなり,最終的に E_{ig}/A=1.6 MJ/m²付近に近づいた.すなわち,P/A がある値以上の範囲においては,上述の最小着火エネルギーで着火するので,加熱面の面積と供給電力の値から着火時間を予測可能であること,P/A の値によって着火するか否かを評価可能であること,が示された.今後,たばこ等の日常的着火源について上記の整理結果が適用可能か,実験等により検証する予定である.

3.7 まとめと今後の課題

3.7.1 電気スパークによる着火性の評価

これまでのところ,以下の知見が明らかとなった.

- (1) 着火が発熱速度と放熱速度のつりあいで決まるとの考え方に基づいて、特定の時間内に生じた放電エネルギーと最小着火エネルギーの比較から簡易的に着火性をスクリーニングする手法を考案し、これをもとに日常家電製品の着火性をスクリーニングした.
- (2) 有接点リレーのアーク放電による着火性について実験を行い,消費電力に依存して放電エネルギーが 大きくなること,スイッチ閉成時のほうが開離時よりも大きな放電エネルギーを示すこと,プロパン /空気混合気の最小着火エネルギーを超える放電エネルギーが生じることを明らかにした.
- (3) 照明用壁面スイッチの動作によるプロパン/空気混合気への着火実験を実施した.スイッチの接点ケーシング内への可燃性混合気の流入可能性が認められ、かつ、接点での放電エネルギーは最小着火エネルギー以上となりうることから、着火性は否定できないとされたが、実験では1度の着火も認められなかった.その原因は、接点間距離が小さいために火炎が定常伝播できるまでに成長しなかったためと考えられた.
- (4) 静電気放電による着火危険性について、シナリオを検討し、既知の放電特性と比較検討した.その結果、帯電人体のドアノブ接触時の放電による着火の可能性は否定できないが、衣服脱衣に伴う静電気での着火性は無視できることが分かった.
- これらを踏まえ、今後の課題として以下の事項があげられる.
- (1) 有接点リレーのアーク放電による着火性については、キャパシタンス、インダクタンス、抵抗などの 負荷特性が放電エネルギーに及ぼす影響がまだ明確には認められていないが、これらの負荷が全く影響しないとは考えにくい、そこで可変キャパシタ・可変インダクタ・可変抵抗を用いてこれらを組み 合わせた回路を用いて放電エネルギーを計測し、定量的知見を得る.これに加え、可燃性混合気中で リレーを動作させる着火実験を実施する.
- (2) ブラシモータでのアーク放電あるいは火花放電による着火性について検討する.まず、可燃性混合気中で実機を用いた着火実験を実施し、着火能力の有無を評価する.着火能力があると評価されれば、放電エネルギーの支配要因を突き止めるために、(1)と同様にキャパシタンス・インダクタンス・抵抗値を変化させた回路を構成し、放電エネルギーデータを蓄積して定量評価を行う.

3.7.2 高温面による着火性の評価

これまでのところ、以下の知見が明らかとなった.

- (1) 着火が発熱速度と放熱速度のつりあいで決まるとの考え方に基づいて、着火時間と供給電力の間に成り立つ関係を説明した.さらに、最小着火エネルギーの存在を突き止め、*E_{ig}/A*=1.6 MJ/m²を得た.
- (2) 最小着火エネルギーを与える P/A の最小値(P/A)cm を求め、これが流速の関数となることを明らかにした.

これらをふまえ、今後の課題として以下の事項があげられる.

(1) 実際に問題となるのは、着火されたたばこでプロパン/空気混合気が着火するのか、といった、想定 する着火シナリオに応じた着火性評価である.そこで、たばこを用いた着火実験を実施し、本研究で 得た Eig/A と P/A の関係で着火挙動を予測できるか検証する.

参考文献

- 3-1) 経済産業省製造産業局オゾン層保護等推進室: 「モントリオール議定書及びキガリ改正の概要について」, <u>https://www.env.go.jp/press/v067-07/ref01_5.pdf</u>, (2017).
- 3-2) 経済産業省製造産業局オゾン層保護等推進室:「モントリオール議定書及びキガリ改正への対応と最近の動向について」, http://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/kagaku_busshitsu/pdf/005_07_00.pdf (2018).
- 3-3) Lewis, B., and von Elbe, G. "Combustion, Flame and Explosions of Gases", p.346, Academic Press, New York and London, (1961).
- 3-4) Strehlow, R.A., 水谷幸夫訳: 「基礎燃焼学」, p.211, 森北出版, 東京(1972).
- 3-5) 平野敏右: 「燃焼学-燃焼現象とその制御-」, 海文堂, pp.93-140 (1986).
- 3-6) 新岡嵩,河野通方,佐藤順一編:「燃焼現象の基礎」,オーム社, pp.121-149 (2001).
- 3-7) 木下勝博: 「電気による火花や加熱に起因する火災に関する研究」, 工学院大学学位論文, p.58 (1997).
- 3-8) Strehlow, R.A., 水谷幸夫訳: 「基礎燃焼学」, p.215, 森北出版, 東京(1972).
- 3-9) チャング ジェン シー: 「大気圧プラズマの物理と化学」, プラズマ・核融合学会誌, 82(10), pp.682-692 (2006).
- 3-10) 渡邊正人, 堀田栄喜, 田上公俊, 牛丸浩二, 窪山達也, 森吉泰生: 「繰り返しナノパルス放電プラズマ中のラジカル計測と 点火特性」, プラズマ・核融合学会誌, 89(4), pp.229-233 (2013).
- 3-11) Lou, G., Bao, A., Nishihara, M., Keshav, S., Utkin, Y.G., Rich, J.W., Lempert, W.R., Adamovich, I.V.: "Ignition of Premixed Hydrocarbon-Air Flows by Repetitively Pulsed, Nanosecond Pulse Duration Plasma", Proc. Combust. Inst., 31(2), pp.3327-3334 (2007).
- 3-12) 田上公俊,牛丸浩二, 菅雅裕, 窪山達也, 森吉泰生, 渡邊正人, 堀田栄喜:「繰り返しナノパルス放電プラズマの点火特性 に関する研究-非平衡プラズマの点火特性-」,日本燃焼学会誌,56(175), pp.59-66 (2014).
- 3-13) Cathey, Cain, J., Wang, H., Gunderson, M.A., Carter, C., Ryan, M.: "OH Production by Transient Plasma and Mechanism of Flame Ignition and Propagation in Quiescent Methane-Air Mixtures", Combustion and Flame, 154(4) pp.7150727 (2008).
- 3-14) 鳳誠三郎, 渡部泰昭: 「接点開離時のアーク放電について」, 電気学会雑誌, 81(875), pp.1331-1337 (1961).
- 3-15) 早田和也,池上知顯:「リレーの接点間アークの計測」,平成 17 年度電気関係学会九州支部連合大会予稿集, p.138, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jceeek/2005/0/2005 0 138/ pdf/-char/ja (2005).
- 3-16) 菫学博: 「電気接点の諸特性に与える周囲気体と圧力の影響」,日本工業大学研究報告,46(1), pp.105-108 (2016).
- 3-17) 富士通株式会社ウェブサイト: 「リレー技術解説」, <u>http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fcl/relays/relay-technology.pdf</u> (2019).
- 3-18) 伊里賢行:「DC モータの高速回転時の整流現象とブラシ摩耗に関する研究」,日本工業大学研究報告,47(1),pp.154-157 (2017).
- 3-19) 世界の電圧一覧表: <u>https://henatuki.aimary.com/</u> (2020年3月18日閲覧).
- 3-20) JSRAE: Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants Final Report 2016, Table 2-9, p.41, (2017).
- 3-21) IEC60947-1: Low-voltage switchgear and controlgear Part 1: General rules, (2007).
- 3-22) 今村友彦, 青木幹尚, 春山智成:「コンセントプラグの抜き差しによる滞留プロパンの着火性状」, 第 52 回安全工学研究発 表会講演予稿集, pp.173-176, (2019).
- 3-23) 独立行政法人労働安全衛生総合研究所:労働安全衛生総合研究所技術指針 静電気安全指針 2007, JNIOSH-TR-No.42, pp.18-27, (2007).
- 3-24) 独立行政法人労働安全衛生総合研究所:労働安全衛生総合研究所技術指針 静電気安全指針 2007, JNIOSH-TR-No.42, p.39, (2007).
- 3-25) K's Memo-Random:"朝っぱらから掃除機を修理しました": <u>http://kenshi.air-nifty.com/ks_memorandom/2009/04/post-9deb.html</u> (2019).
- 3-26) Engineers Blog:洗濯機が壊れた話:アルファ・ウェーブ:<u>https://blog.alphawave.co.jp/eng/index.php?itemid=1744</u> (2019).

- 3-27) Tom のブログ:6年ぶりの除湿機メンテナンス-その1-: <u>http://d.hatena.ne.jp/tomtom1ono/20130128/1359321525</u> (2019).
- 3-28) ナンチャッテ技術者の凸凹日記:ちょいと分解:ヘア・ドライヤー [電子回路]:<u>https://rifle.blog.so-net.ne.jp/2014-02-18</u>(2019).
- 3-29) KEISUKE TABOGAMI KICHIJOJI, TOKYO:美容師必見】ドライヤー(Nobby)の分解後, うまく戻せなくなった時の対 処法: <u>http://www.tabogami.tokyo/archives/1284</u> (2019).
- 3-30) JapaneseClass: 電気分解: https://japaneseclass.jp/dictionary/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%88%86%E8%A7%A3 (2019).
- 3-31) 中年男の目記帳: SR-SS18A (National/Panasonic IH 炊飯ジャー) 分解フォトレポート:
- https://incomprehensiveness.blogspot.com/2014/09/sr-ss18a-nationalpanasonic-ih.html (2019).
- 3-32) ホットカーペットを解体 [道具類]: <u>https://insertyourname.blog.so-net.ne.jp/2015-04-09</u> (2019).
- 3-33) SONY ウェブサイト: <u>https://www.sony.jp/bd/about/technology/index.html</u> (2019).
- 3-34) 児玉勉: 「静電気による爆発とその防止対策」, 電気設備学会誌, 29(8), pp.624-627 (2009).
- 3-35) 佐野尊,竹花立美,関根和喜:「レーザーと赤外線カメラを用いた LP ガス漏洩検知システムの研究」,圧力技術,42(1), pp.36-47 (2004).
- 3-36) レーザーの仕組みを教えてください コピーの不思議 Q&A | Ricoh Japan,

https://jp.ricoh.com/kouken/science_caravan/QandA/science/qanda6_5.html (2019).

- 3-37) 高橋栄一, 古谷博秀: 「レーザー着火研究の基礎と最新動向」, 日本燃焼学会誌, 57(180), pp.112-119 (2015).
- 3-38) 中澤誠人, 苅谷優行, 下村蓮, 桑名一徳, 今村友彦:「循環するプロパン/空気混合気の加熱壁面による着火のエネルギー と燃料濃度の影響」, 2020 年度日本火災学会研究発表会概要集(2020 年 5 月発表予定)
- 3-39) 飯塚洋行,桑名一徳,今村友彦:「加熱壁面に衝突する予混合淀み流の着火条件」,日本火災学会論文集,70(1),1-8,(2020).
- 3-40) Imamura, T., Uehara, K., Nakata, K., Maruyama, S., Kuwana, K.: Quasi-steady Characteristics of Flowing Propane/Air Mixture Ignited by a Heated Surface, Proceedings of 13th International Symposium on Fire and Safety Science, Waterloo, Canada, (2020, accepted).

第4章 産業技術総合研究所安全科学研究部門の進捗

4.1 はじめに

産総研安全科学研究部門では,実使用条件を考慮した自然冷媒使用冷凍空調機器の燃焼に係る実規模フィジ カルハザード評価を担当している.今年度は,ルームエアコン室内機内での可燃性冷媒の急速漏洩時の拡散挙 動計測と,実在の機器類が漏洩した可燃性冷媒に着火を起こすか否かの評価実験を行った.

室内機内での急速漏洩時の拡散挙動計測では、可燃性自然冷媒であるプロパンがルームエアコン室内機から 室内に漏洩して着火した場合の実規模影響評価を行うため、4 畳半と9 畳の実規模模擬室に実在のルームエア コン室内機を設置し、実際の漏洩事故例を検討しモデル化した漏洩条件で室内機内に放出した.充填量(放出 量)や送風の有無等の条件を変えながら模擬室内のプロパン濃度分布時間履歴を計測し、可燃領域の形成され るおおよその位置、高さ、時間を観察した.

また,可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価では,静電気による最小着火エネルギーが最も低い 濃度のプロパン-空気予混合気を調合したアクリル製容器内で,機器類を遠隔操作し,着火の有無を観測した.

4.2 室内機内での急速漏洩時の拡散挙動計測

4.2.1 冷凍空調機器からの冷媒漏洩事故事例の検討と漏えい条件のモデル化

現在日本国内では可燃性の自然冷媒を用いたルームエアコンは販売されておらず,漏洩事故事例もほとんど 報告されていないため,漏洩条件を決定するために微燃性冷媒を使用した室内機での漏洩条件を参考とした. 微燃性冷媒を使用したビル用マルチエアコンのリスク評価報告書²⁻¹⁾には,R32を用いたビル用マルチエアコ ンの漏洩箇所,漏洩箇所形態,相当径が記載されている.報告されているうち最も相当径が大きい,家庭用室 内機熱交換器伝熱管での全面腐食での相当径は0.174 mm であり,63 ℃の液漏洩での漏洩速度は67 g min⁻¹ と 急速漏洩のリスク評価に用いられている 4 分全量放出の放出速度と同程度である.また報告されている漏洩 箇所は熱交換器伝熱管と電子膨張弁がほとんどである.そこで本研究では家庭用ルームエアコンの室内機に おける急速漏洩の漏洩条件として,充填量の全量を4分間で放出する条件と,配管の破断に相当する口径から 30 ℃での自圧で放出する2 通りの放出速度を採用した.また漏洩箇所として,熱交換器の中央部分,熱交換 器と接続配管の継ぎ目付近,室内機内で冷媒配管を取りまわす際の配管継ぎ手部分の3 か所を採用した.

4.2.2 濃度分布計測の実験手法

労働安全衛生総合研究所配管等爆発実験施設の屋内大空間に、2.7 m × 5.4 m × 高さ2.4 m の木製模擬室 を設置し、内壁を設置することで2.7 m × 2.7 m × 高さ2.4 m との2通りの広さで計測を行った.2.7 m × 5.4 m 空間の短辺側中央に下面が床面から2.00 m となる位置にルームエアコン室内機を設置した.室内機は 部屋の広さに対し一般的なサイズであり、送風機構も日本国内で一般的に採用されているものとした.2.7 m × 2.7 m の空間にそれぞれ1つずつ計2つの扉下隙間800mm×4mmを設置し、使用しない場合はアルミテー プで塞ぐことによって濃度分布時間履歴に与える影響を調べた.Fig.4-1 に模擬室と濃度センサーの配置を示 す.センサー位置に示した色は濃度変化時間履歴グラフに対応している.プロパン濃度センサーは接触燃焼式 センサーを用い、エアコン室内機直下と床面、床上25cmまでには計測範囲0-6.6 vol%のセンサーを14点、そ れ以外には計測範囲0-2.2 vol%のセンサーを14点の計28点を設置した.

プロパンの放出量は、IEC60335-2-40:2018⁴⁻²にで採用されている片岡の式(4-1)を用いて求めた送風などの安全対策のない場合の最大許容充填量と、今後採用が検討されている十分な風量での送風を前提とした許容充填量(4-2)を用いた. 2.7 m × 2.7 m × 高さ 2.4 m の模擬室では、およそ 230g と 340g、2.7 m × 5.4 m × 高さ 2.4 m の模擬室では、およそ 330g と 680g になる.

$$m_{\max} = 2.5 \times LFL^{5/4} \times A^{1/2} \times h_0 \tag{4-1}$$

$$m_{max} = 0.5 \times LFL \times V \tag{4-2}$$

mmax:最大許容充填量,LFL:燃焼下限界,A:床面積,h:機器下面高さ,V:室内容積 これらの充填量を4分で全量放出する場合には、プロパンを封入した20kg ボンベを30 ℃に湯浴し、ガス 取りしたプロパンガスをニードルバルブで流量調整し、マススローメーターで流量を確認しながら室内機の 放出配管から放出した.また圧縮され液化した状態で漏洩する場合を模擬するためには、30 ℃に調整した恒 温槽内に 5kg ボンベに封入された最大許容充填量のプロパンを設置して液取りし全量を放出した.

実験における放出動作等はすべて大空間外の計測室から,安全監視用ビデオカメラや濃度センサー指示値で 安全を確認しながら遠隔操作して行った.



Fig. 4-1 Experimental settings a) vertical cross-section plan. b) floor plan. L- : 0-2.2 vol% sensor, M- : 0-6.6 vol% sensor

4.2.3 濃度分布計測の結果

室内空間の広さ,放出量(想定充填量),放出位置,放出速度,エアコン送風の条件,扉下隙間の有無の条件を変えながら実験を行い,条件が濃度分布時間履歴に与える影響を観察し,点火実験による燃焼爆発影響評価を行う条件を検討した.

Fig. 4-2 から Fig. 4-10 に計測されたプロパン濃度の時間履歴を示す.

(1) 2.7 m×2.7 m×h2.4 m 空間における放出量の影響

この空間広さでは、式(4-1)と式(4-2)から計算される充填量は、230gと340gであり差が小さいため濃度分布にも大きな違いは見られなかった.放出量230gの場合と、放出量340gで送風を行った場合には、計測した位置で2.2 vol%の下限界を超える可燃濃度域は形成されなかった.

(2) 2.7 m×2.7 m×h2.4 m 空間における放出位置,放出形態の影響

放出量 340g で送風を行わなかった場合でも放出位置によっては,可燃濃度域がほとんど形成されなかった. 熱交換器中央でガス状態4分全量放出の場合,(Fig.4-2a)床面付近に10分程度可燃濃度域が形成された.熱 交換器と配管接続部分に設置した1.5mm径ピンホールから液状で30℃の自圧で放出させた場合,(Fig.4-2c) 放出中のエアコン直下と放出開始後5分間程度の間の床面に可燃濃度域が形成された.



Fig. 4-2 Time profile of propane concentrations

 $2.7 \text{ m} \times 2.7 \text{ m} \times h2.4 \text{ m}$, 340g propane, no airflow, no under door slit.

a) Center of heat exchanger discharge, gas phase 4 minutes. b) inside tube joint discharge, gas phase 4 minutes.

c) 1.5mm pin hole at heat exchanger – tube joint discharge, liquid phase.

(3) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出量の影響1

この空間広さでは、式(4-1)と式(4-2)から計算される充填量は、330gと 680g で差が倍以上であるため 濃度分布も大きな違いが見られた.放出量 330g の場合は、放出終了後には室内に可燃領域は見られなかった.



Fig. 4-3 Time profile of propane concentrations

2.7 m \times 5.4 m \times h2.4 m, no airflow, no under door slit, center of heat exchanger discharge, gas phase 4 minutes. a) 680g. b) 330g propane.

(4) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出位置の影響

式(4-2)から計算される充填量 680g を放出し送風を行わなかった場合には,熱交換器中央,熱交換器-配管 接続部,室内機内配管接続部のいずれの放出位置で放出した場合も,漏洩中のエアコン直下には高濃度の可燃 領域が形成された.また熱交換器中央から放出された場合は,床面付近に1時間以上可燃領域が形成され続け た.これは,熱交換器中央付近は室内機の吸気口と排気口が大きく開いており,室内機内のプロパンが低線流 速で室内機外に放出され室内の攪拌が起こりにくかったためだと考えられる.



Fig. 4-4 Time profile of propane concentrations

 $2.7 \text{ m} \times 5.4 \text{ m} \times h2.4 \text{ m}$, 680g propane, no airflow, no under door slit, gas phase 4 minutes.

a) Center of heat exchanger discharge, b) heat exchanger – tube joint discharge. c) inside tube joint discharge.

(5) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における扉下隙間の影響

式(4-2)から計算される充填量 680g を放出し送風を行わなかった場合,扉下隙間の有無,個数は放出中や 放出直後の濃度にほとんど影響を与えない.これは床面高さに設置された扉下隙間から室外に押し出される プロパン-空気混合気の体積は,室内に放出された濃度 100 %のプロパンと同体積であり,濃度は計測されて いる 2-3 vol %程度だからである.しかし,床面に可燃濃度域が存在する時間は,扉下隙間が増えると短くな る.



Fig. 4-5 Time profile of propane concentrations

 $2.7 \text{ m} \times 5.4 \text{ m} \times h2.4 \text{ m}$, no airflow, center of heat exchanger discharge, 680g propane gas phase 4 minutes. a) no under door slit. b) one under door slit. c) two under door slits.

(6) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間におけるエアコン送風の影響1

Fig. 4-6 b)の計測では、プロパン放出開始前から最も弱い風速で水平向きにエアコン送風を連続運転した. 送風により4分間の放出中にも放出終了後も室内に可燃領域は観測されなかった.



Fig. 4-6 Time profile of propane concentrations

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, no under door slit, center of heat exchanger discharge, 680g propane gas phase 4 minutes.a) no airflow. b) minimum horizontal airflow continuously.

(7) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間におけるエアコン送風の影響 2

いずれの計測でも、下向きに最も強い送風をプロパン放出開始から a)では 30 秒後, b)では 1 分後, c)では 2 分後に開始した.(送風なしの条件は Fig. 4-6 a))送風開始直後からエアコン直下・床面とも濃度が低下し、可燃領域が消滅していく様子が観測された.





2.7 m \times 5.4 m \times h2.4 m, no under door slit, center of heat exchanger discharge, 680g propane gas phase 4 minutes. a) maximum airflow started 30 seconds after discharge. b) 1 minute after discharge. c) 2 minutes after discharge.

(8) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出形態の影響

Fig. 4-8 b)の計測では、1/4 インチのL字型継ぎ手から、プロパン 30 ℃の蒸気圧である 0.95 MPa (ゲージ 圧)で液取りのプロパンを放出した.これは、室外機で圧縮された液化プロパンが室内機までほとんど気化せ ずに到達し完全に破断した配管から漏洩するシナリオを模擬した、単位時間あたりの漏洩量として想定され る最悪の条件だと考えられる.放出直後はエアコン直下と床面に比較的に高濃度の可燃領域が観測されるが、 放出 4 分後はガス状態 4 分全量放出での濃度とほぼ同様である.また 10 分後以降は可燃領域が消滅し可燃領 域の存在時間は 4 分全量放出より短い.



Fig. 4-8 Time profile of propane concentrations

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, no airflow, no under door slit, center of heat exchanger discharge, 680g propane. a) gas phase 4 minutes. b) liquid phase ϕ 4 mm, 0.95 MPa(G). (9) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出量の影響 2

0.95 MPa(ゲージ圧)で液取りのプロパンを放出した場合でも、片岡の式から計算した放出量 330g では、 放出終了数十秒後には室内に可燃領域は見られなかった.



Fig. 4-9 Time profile of propane concentrations
2.7 m×5.4 m×h2.4 m, no airflow, no under door slit, center of heat exchanger discharge, liquid phase \u03c6 4 mm, 0.95 MPa(G). a) 680g. b) 330g propane.

(10) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間におけるエアコン送風の影響 3

0.95 MPa(ゲージ圧)で液取りのプロパンを 680g 放出した場合でも,放出開始前から最も弱い風速で水平 向きに連続運転するか,下向きに最も強い送風をプロパン放出開始から 30 秒後に開始すると,放出開始 2 分後には可燃領域が消滅する様子が観測された.



Fig. 4-10 Time profile of propane concentrations $2.7 \text{ m} \times 5.4 \text{ m} \times h2.4 \text{ m}$, no under door slit, center of heat exchanger discharge,

680g propane liquid phase ϕ 4 mm, 0.95 MPa(G).

a) no airflow. b) minimum horizontal airflow continuously. c) maximum airflow started 30 seconds after discharge.

4.2.4 濃度分布計測のまとめ

微燃性冷媒を用いた室内空調機での漏洩事故事例を参考に,可燃性自然冷媒であるプロパンを用いた家庭用 ルームエアコン室内機での実規模燃焼爆発影響評価のための漏洩拡散濃度計測実験の漏洩条件を決定した.

2通りの空間広さ、2通りの許容充填量を想定した実室内機内でのプロパン放出による実規模漏洩拡散濃度 計測実験を行い、放出位置、放出速度、エアコン送風の有無、扉下隙間の有無、の影響を調査した.充填量を 4分間で均等に全量放出した場合も液状で短時間に放出した場合も、最大許容充填量ごとの前提を守れば放出 中の室内機直下以外に可燃域は形成されず、放出終了後速やかに可燃領域は消滅した.送風による攪拌を前提 とした充填量を放出し送風を行わなかった場合は、放出位置・放出速度によっては床面に1時間以上可燃領域 が形成され続けた.扉下隙間は長時間の可燃域形成を短くする効果はあるが、放出中や放出直後の濃度を顕著 に低下させる効果は見られなかった.

2020年度以降、この実験結果から影響評価すべき条件を選別し、実規模燃焼爆発影響評価を行う.

4.3 可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価

4.3.1 評価対象機器の選別

評価対象機種は、諏訪東京理科大学が担当している機器使用時に問題となる着火源のスクリーニングによる 部品検討の結果や日本冷凍空調工業会による A3 冷媒のリスク評価から決定した.今年度は、レーザープリン ター、ヘアードライヤー、電気掃除機の評価を行った.

4.3.2 点火能評価の実験手法

実際の機器類の動作によって、周囲に充満したプロパン-空気予混合が着火を起こした場合、機器類の一部 が爆発により飛散する可能性があるため、実験は産総研爆発ピット内にアクリル容器を設置して行った. 1.00 m×1.00m×1.00mのアクリル製容器に、プロパンガス、プロパン-空気混合気を濃度、流量を調整しながら導 入し、プロパン濃度を 5.2 vol%に保った.機器類はアクリル容器内に固定し、エアアクチュエーターによりス イッチ類を爆発ピット外から遠隔操作した.

レーザープリンター, ヘアードライヤー, 電気掃除機は, 構造が一般的と考えられる機種の中から使用電力 の大きい機種を選定し, 各2台の新品個体を使用した. ヘアードライヤーはブラシモーターを用いた機種を選 定した. 電気掃除機は紙製のごみ袋を内蔵するタイプを選定した.

4.3.3 点火能評価の実験結果

レーザープリンターの実験では、2 台の個体についてカラー両面印刷を 250 枚ずつ行ったが、いずれでも異常は見られなかった.

ヘアードライヤーの実験では、2台の個体とも、温風送風開始数秒後にプロパン-空気混合気に着火し爆発が 起きた. (Fig. 4-11)

電気掃除機の実験の1個体では、7秒間「強」運転、5秒間停止を5、6回繰り返した後、発煙した.実験の都合上、窒素によるプロパン-空気混合気の希釈作業を発煙10秒程度後から開始したが、それまでにプロパン-空気混合気の爆発は起こらなかった.電気掃除機の実験のもう1個体では、7秒間「強」運転、5秒間停止を500回繰り返しても、5分間の連続「強」運転を行っても異常は見られなかった.発煙した個体の内部はモーター部から排気口にかけてプラスチック部品の焦げや溶解が見られた.(Fig. 4-12)



Fig. 4-11 Images taken by near infrared high-speed video camera



Fig. 4-12 Vacuum cleaner emitted smoke

4.3.4 点火能評価の予定

2020 年度以降, ヘアードライヤーについて, 着火がブラシモーターによるものかスイッチ操作によるものか調査する追加実験を行う.また, 電動ドライバーやホットプレート等の評価実験を行う.

参考文献

4-1) 微燃性冷媒を使用したビル用マルチエアコンの リスク評価報告書,日本冷凍空調工業会(2017)

4-2) IEC 60335-2-40: 2018. Household and similar electrical appliance - Safety - Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers. I.E.C.

第5章 産業技術総合研究所機能化学研究部門の進捗

5.1 はじめに

本研究開発の目的は、低 GWP かつ安全性に優れた冷媒の開発を支援するため、特にフッ素系冷媒の混合が 燃焼特性等の安全性に与える影響を明らかにすることである.具体的には、評価対象として燃焼性の高い低 GWP 冷媒と、燃焼性の低い冷媒の組合せを中心に検討し、国内外で検討されている冷媒の安全性基準を満た す混合組成範囲、例えば、国際標準 ISO817 における「微燃性等級(Class 2L)」に分類され我が国の高圧ガス 保安法における「特定不活性ガス」に位置づけられるガスと同等以上の高安全性となる混合組成範囲を明らか にする.また、低 GWP 冷媒の実用化を見据え、温度、湿度、冷媒の濃度分布等が燃焼性に与える影響を評価 し、実用上の燃焼安全性を明らかにする.

2019 年度は、昨年度に引き続き、混合冷媒の各混合組成の燃焼限界、燃焼速度、及び消炎距離の評価を行い、データを蓄積した.特に、燃焼速度が既存の特定不活性ガスと同等以下のごく微燃性となる混合組成について燃焼特性評価を実施し、不活性化条件の明確化に取り組んだ.ごく微燃性の混合冷媒は10 mm を超えるような大きな消炎距離を有しているため、大きな放電電極間距離を安定的に絶縁破壊させることが可能な着火装置を導入し、燃焼特性データを取得した.

5.2 低 GWP 混合冷媒の燃焼限界の評価

燃焼限界の評価は、昨年度種々の冷媒について実規模の燃焼限界に最も近い結果が得られることを示した、 EN1839B 法 ⁵⁻¹⁾ を用いて測定し判定基準として圧力上昇 \geq 30%で判定する方法によって実施した. 多くの混 合冷媒の構成成分である R32 及び R1234yf 各々単独ガスについて燃焼限界の温度湿度影響を明らかにするた め、まず、温度影響の測定を実施した. その結果、通常実用上の温度範囲 15~35°C において、燃焼限界値は ほとんど変化しないことが分かった. 高温度域での燃焼限界の変化は低温度域よりも顕著になる傾向が現れ た. R1234yf の下限界 (LFL) は、White 則に基づく予測の温度依存性と異なる結果が得られた. 次に、R32 及 び R1234yf 単体の燃焼限界の湿度影響について測定を実施した. 燃焼限界を相対湿度に対して関数化するほ かに、H₂O/sample モル比の関数として表現することができた.

次に、R32/1234yf 混合系について、モル混合比に対する燃焼限界の温度依存性を測定した(温度 15℃ 及び 25℃,湿度 0%RH).単体の場合と同様、この程度の温度範囲では、燃焼限界に殆ど変化が見られないことが 確認できた.混合比に対する常温乾燥空気中での燃焼限界の変化は、上限界(UFL)、LFL とも概ねル・シャトリエ式に従い、また簡単な 2 次式によって近似できることが分かった.次に、R32/1234yf 混合系について、燃焼限界に対する湿度の影響を調べた.測定温度は全て 35℃,また、LFL、UFL 共に最高の相対湿度は 35℃ 換算で 63%RH である.結果を Fig. 5-1 に示す. Calc1 は通常のル・シャトリエ予測, Calc2 は測定値ごとに H2O/Sample のモル比が同じ値になるよう調整してル・シャトリエ予測した値であるが、この系では Calc1 と 2 の間にそれほど大きな相違は見られなかった.これらについては次年度も引き続き検討する.



Fig. 5-1 Effect of moisture on flammability limits of R32/1234yf blends measured at (a) 35°C and 10%RH and (b) 35°C and 63%RH.

前述のように、温度 35°C で湿度条件各一定(35°C 換算で 0%,10%, 35%, 及び 63%RH)で燃焼限界を測定 してきた.いずれの場合も、燃焼限界測定値(y)は R32 モル混合比(x)に対して $y = ax^2 + bx + c$ の形の 2 次式 で良好な近似が可能であることが判明した.LFL、UFLのそれぞれについて得られた混合比依存の係数 a、係 数 b、係数 c の値をそれぞれ最小二乗法により相対湿度(r = %RH/100)に対する 2 次式として得た.こうして 得られた式に、例えば r = 0.50を代入すれば、相対湿度 50%RHにおける任意の組成に対応する LFL 及び UFL の予測値が得られると期待できる.このことを検証するために、得られた係数 a、b、c の値を用いて各組成の LFL 及び UFL の値を予測し、実測値と比較してみた.Fig.5-2に示すように、予測値は基本的に誤差範囲内で 測定値と一致し、R32/1234yf 混合系については、任意の混合比及び湿度、及び実用の温度範囲において、燃焼 限界を予測できる可能性が示された.



Fig. 5-2 Comparison between prediction and experiment for flammability limits of R32/1234yf blends at 35°C 50%RH.

5.3 低 GWP 混合冷媒の燃焼速度の評価

R32/1234yf 混合系(湿度 0%RH)の混合比全域について燃焼速度(Su)をシュリーレン法によって得た.温

度 25℃ 及び 35℃ の測定を行った結果, 燃焼限界の場合と同様, この程度の温度範囲においては両者の最大 燃焼速度の差がほとんど無いことを確認した. Fig. 5-3 に示したとおり,本混合系の最大燃焼速度(S_{u,max})は, モル分率のル・シャトリエ式ではうまく表現できず, 重量分率又はエネルギー分率のル・シャトリエ式で良好 に表現できた.

また、燃焼限界と同様、R32/1234yf 混合系について、35℃における燃焼速度の湿度影響評価を開始した.



Fig. 5-3 Maximum burning velocity as a function of mixing rate for R32/1234yf blends at 35°C, 1 atm, and 0%RH.

5.4 低 GWP 混合冷媒の消炎距離の評価

本研究で扱うごく微燃性の冷媒の消炎距離(*d*_q)を測定する場合,火炎伝播に及ぼす浮力の影響が大きく,加えて平板間距離が大きいため,直接的に測定するためには浮力を取り除く微小重力実験装置など特殊な装置が必要となる.これまで得た知見として,消炎距離は温度・圧力を上昇させることにより小さくなることが分かった.そこで,消炎距離の温度・圧力依存性を利用して,消炎距離を小さくし体積力である浮力の影響を小さくすることにより,間接的に通常の装置でも定量化しやすくなる可能性がある.一方,火花放電による絶縁破壊に必要な電圧はPaschen則に従いガス圧力と電極間距離に正相関するため,ガス圧力を上昇させると必要な放電電圧が高くなることに注意する必要がある.消炎距離自体の重要性,消炎直径の推算目的に加え,ごく微燃性の消炎距離の推算の観点から,消炎距離の温度・圧力依存性の測定・解析を行った.まず,消炎距離の初期圧力依存性の測定を行った(測定温度 25℃,湿度 0%RH).

微燃性の R32 においては、初期圧力 P_0 の増加に対して概ね P_0^β の形で減少し、5atm の消炎距離は 1atm の約 1/4 に減少した. ごく微燃性の R1234yf においては、圧力の増加に対して消炎距離は激減し、通常重力下でも 測定可能となった.初期圧力依存性は、R32 の傾向に比べて低圧域で大きくずれているが、2atm 以上ではほぼ 一致することが認められた.測定した種々の圧力における消炎距離 ($d_{q(T,P)}$)と、微燃性冷媒の消炎距離と燃焼 速度 $S_{u,max(T,P)}$ の相関式 ⁵⁻²⁾を使って、標準条件の燃焼速度 $S_{u0,max}$ を推算した. この方法によって、R32 につい て $S_{u0,max} = 6.7$ cm s⁻¹、R1234yf について $S_{u0,max} = 1.5$ cm s⁻¹が得られた. この推算値はこれまで報告された燃焼 速度の測定値とほぼ一致しており、高圧条件の消炎距離の値も消炎距離と燃焼速度の相関式を良く満足して いることが確認できた.

そこで,R32/1234yf 混合系の測定を行い,前述の各単体の結果から混合系についても消炎距離の推算が可能 か検証を行った.R32/1234yf 混合系の初期圧力 2atm 及び 3atm における消炎距離の混合比の影響について評 価した(測定温度は 25℃,湿度は 0%RH).Fig.5-4 に,実験結果と種々のル・シャトリエ式による推算結果を 示す. 混合系の消炎距離は,各単体の結果を用いた重量分率又はエネルギー分率のル・シャトリエ式で良好に 表現できた. このように,高圧条件を利用することでごく微燃性の冷媒の消炎距離についても精度良く測定で き,混合比依存性の傾向も燃焼速度と同様に推算可能であることが分かった. 今後,この混合系の湿度条件下 での評価や HFO-1123 混合系等,他の混合系についても一般化・数式化を進める予定である.



Fig. 5-4 Quenching distances of R32/1234yf blends measured at 3 atm, 25°C, and 0%RH.

参考文献

5-1) EN 1839:2012, "Determination of explosion limits of gases and vapours" (2012).

5-2) K. Takizawa, N. Igarashi, K. Tokuhashi, and S. Kondo: Sci. Tech. Built Environ., 24(1), 97(2018).

第6章 日本冷凍空調工業会による A3 冷媒の

ルームエアコンのリスク評価の進捗

6.1 はじめに

日本冷凍空調工業会(JRAIA)では地球温暖化対応として低 GWP 冷媒への段階的な転換を目指し,2011 年から A2L 冷媒に関する検討を行い,R32 冷媒への代替化技術を確立した.

しかし温暖化への影響は依然として残り, さらなる低 GWP 冷媒への転換が望まれ, A3 冷媒が候補の一つ であるが,強い燃焼性がある.そこで JRAIA では家庭用エアコンに関して,2016年7月から新たにワーキン ググループを発足させ,A3 冷媒のリスクアセスメントを開始した.A3 冷媒はA2L 冷媒より着火しやすい特 性があるため着火源の検討が重要である.特に室内では,ロウソク等の裸火,リレー接点での火花,人体によ る静電気等,着火源とみなされるものが様々存在する.

エアコンでの A3 冷媒転換に関して JRAIA は、日本冷凍空調学会、NEDO のプロジェクト、経済産業省と協力 して A3 冷媒のリスクアセスメントを進めている.特に今回のプログレスレポートに記した着火源に関して は、課題解決に向けて諏訪東京理科大と密接に打合せを行なってきた.なおレポートの記述に関しては、JRAIA で独自に進めてきたリスクアセスメントの報告をベースに行っているため、諏訪東京理科大とは少し異なる 記述もあるが、今後さらに打合せや議論を通じ、整合性を図りリスクアセスメントに反映し、その内容の精査 を行っていく.

本報告では、室内で想定される様々な着火源を抽出した結果について報告し、検討中の室内機からの冷媒漏えい時の可燃空間の存在高さについて概括する.

6.2 室内における想定される着火源

A3 冷媒の着火源については Table 6-1 に示したように、裸火 と高温表面とスパークに分けられる.裸火はライター、ロウソ ク、ガスコンロなどであり、A2L 冷媒、A3 冷媒共に、接触する と確実に着火する.高温表面は電気ヒータやホットプレート類 であり、空気滞留などの影響はあるが、A3 冷媒は自己着火温度 が低いため、着火する可能性が高い機器類である.スパークは静 電気によるスパークと電気機器類によるスパークに分けられ る.さらに電気スパークは掃除機などのブラシモータやアイロ ンなどのサーモスタット、電気機器のリレー接点などから発生

Table 6-1 着火源の比較

Ignition source	R410A;A1	R32;A2L	R290;A3
			(Propane)
 Open flame (Blazing tourch, Oil lighter,Candle) 	No ignition	Ignition	Ignition
Electric spark	No ignition	Rare igintion	Occasional ignition
• Static electricity (By human body)	No ignition	No ignition	Occasional ignition

するスパークと、コンセントの抜き差しや照明用スイッチの ON-OFF によるスパークに分けられる.

室内ではこれら着火の可能性があるものが多数存在する.裸火,高温表面,スパークについて,ひとつひとつ A3 冷媒の着火源になるかどうかの検討を行った.なお着火源に関しては既に D. Colbourne らの報告があるが,本報告では日本での床に座って生活する習慣があることから,検討はそれらの生活習慣や着火源の位置関係も考慮して行った⁶⁻¹.

着火源になり得る条件として、高温表面についてはプロパンの自己着火温度 470℃以上であること、スパークについてはプロパンの最小着火エネルギー0.25mJ 以上であることを基準に検討を進めた.

6.2.1 喫煙時

喫煙時にはライターは明らかに着火源となるが、タバコの赤火も着火源となる可能性がある(A2Lでは石油 ライターのみが着火源).Liらや樫村らの研究によれば、タバコは置きタバコの状態では周辺部の温度が 300℃ 程度であることから、吸引していないときは着火源にならないと考えられ、一方、吸引時の温度は 650~800℃ となり、プロパンの自己着火温度以上となる ^{62),63)}.このことから喫煙においてはライターの点火時とタバコ の吸引時が着火源になると考えられる.なお、日冷工で実際の喫煙者の喫煙挙動の実態調査を行った結果、1 回の喫煙は5分で、そのうちライターの着火は5秒、煙草を吸引するのは 40秒(2秒×20回)となり、リス クアセスメントにはこの値を使用する.しかし最近の中山らの研究結果からは、プロパンの中でタバコを吸引 しても着火しなかったという例も示されており、表面形状や灰の影響等、今後更なる検討が必要である ⁶⁴⁾.

6.2.2 ロウソク

日本では先祖供養に仏壇が一般家庭で多く使われている. 仏壇には Figure 6.1 に示すように 2本のロウソク に火を灯すのが一般的であることから,着火源として考える必要がある. 仏壇の保有率は近年減少傾向にある が 46.9%の世帯で保有しており,実際参拝するのはその中の約半数(51.5%)である. 参拝はお盆とお彼岸の 時期の 2回/年, ロウソクの点火時間は 5分として, この値をリスクアセスメントに使用する.

ロウソクには上述の仏壇の他にも、近年増加傾向にあるアロマテラピーで使用するアロマキャンドルも考慮する必要がある.アロマキャンドルは一度点火すると1時間程度使用し続けることが想定されるため、注意すべき着火源の一つである.日本では年間1000万個のキャンドルが使用されていることから、一人当たりの年間使用本数としては約0.02本程度であり、普及率としてはまだ低いと言える.

6.2.3 その他の裸火

燃焼暖房機器には石油ストーブ,石油ファンヒータ,FF 式暖房機があるが,石油ファンヒータやFF 式暖房 機は,Figure 6-2 に示すように燃焼用と対流用のファンが備わっており,点火にあたっては電源投入後,まず 燃焼用のファンが作動し,その後センサー類のチェックを経て点火に至るシーケンスとなるため,点火時は燃 焼用ファン,使用時は対流用ファンにより冷媒が撹拌されるため着火する可能性はないと考える.よって,燃 焼暖房機で着火源として考慮するのはファンが備わっていない石油ストーブのみとする.暖房機の使用は日 本の JIS 規格 (JIS S 2073) より 181 日/年,500 時間/年と定められているので,1日に2回使用することを 想定すると1回の使用は1.38 時間となり,リスクアセスメントにはこの値を使用する.



Figure 6-1 仏壇の飾り方



Figure 6-2 石油ファンヒータの構造図

その他の裸火として、ガスコンロやカセットコンロがある. コンロの使用にあたっては換気扇の併用を推奨し ているので、換気扇の撹拌効果により着火する可能性はないが、実態として換気扇を併用しているのは9割程 度であることから、1割程度は着火源になるものとする. 室らの文献によれば、ガスコンロの使用時間は1日 平均40分で、朝昼夜の1日3回使用するとして、1回あたりの使用時間は約13分である⁶⁵⁾. カセットコン ロを自宅で使用するケースは、東京都生活文化局の調査によると3.1%程度である. 使用にあたっては自宅で の鍋料理を想定し、年間使用日数を20日とし、1回の使用時間は30分間として、リスクアセスメントを行っ た.

6.3 高温表面について

一般家庭で使用される調理用のホットプレートの使用温度は約 80℃(保温)~250℃であり、プロパンの自己 着火温度より低いことから着火する可能性はないとする.

よって,高温表面の着火源としては電気ストーブなどの電気ヒータのみを考えることとする.電気ストーブの使用時間についても,6.2.3 に記載の石油ストーブと同様の使用日数及び使用時間を用いることとした.

6.4 スパークについて

以下に着火源と想定される静電気,電気機器類によるスパークについての検討結果を列記する.

6.4.1 静電気による人体への帯電

日常生活において人体への帯電は様々な状況で起こるが、日常的に放電を経験するのは、ドアノブに触った

時と脱衣時が多いことから、これら代表的な2ケースについて検討を進めることとした.

まず、人体帯電と電撃の強さの関係として Table 6-2 の関係が示されている(静電気安全指針、労働省産業 安全研究所). 人体帯電圧 V が 4.0kV で放電の発光が確認できることから、この場合の静電エネルギーE を 人体の静電容量 C を約 100pF とし、式(6-1)より算出すると 0.8mJ となる. これはプロパンの最小着火エネル ギー0.25mJ より大きな数値である.

 $E=(1/2)CV^2$ (6-1)

奥窪らの研究によれば、日常生活における人体の帯電はソファーなどの椅子からの立ち上がりや脱衣などの ケースで 4.0kV 以上になることがわかっている ⁶⁰.よって、日常のドアノブへの接触や脱衣時に発生してい る静電気は着火するのに十分なエネルギーを有していると言える.

ここで,放電の形態について考えてみると,放電には火花放電とブラシ放電があり,着火に至るのは人体に 対して相手側が導体(金属)の場合に発生する火花放電である.一方,労働省産業安全研究所の「静電気安全 指針」によればブラシ放電は相手側が衣服やプラスチックなどの不導体の場合に発生し,放電エネルギーが小 さいため,着火には至ることはない.

以上より、ドアノブの接触による放電に関しては着火源となる可能性があるが、衣服を脱ぐ時の放電は着火し ないものとする.

人体の帯電	電撃の強さ	備考
电应应到	A /_#	
1.0	全く感じない	
2.0	指の外側に感じるが痛まない	かすかな放電音発生
2.5	針に触れた感じを受け、 ピクリと感じるが痛まない	
3.0	針で刺された感じを受け. チクリと痛む	
4.0	針で深く刺された感じを受け、指がかすかに痛む	放電の発光を見る
5.0	手のひらから前腕まで痛む	指先から放電発光が延びる
6.0	指が強く痛み,後腕が重く感じる	
7.0	指,手のひらに強い痛みと,しびれた感じを受ける	
8.0	手のひらから前腕までしびれた感じを受ける	
9.0	手首が強く痛み、手がしびれた重みを受ける	
10.0	手全体に痛みと電気が流れた感じを受ける	
11.0	指が強くしびれ、手全体に強い電撃を感じる	
12.0	手全体を強打された感じを受ける	
(注)人体の静	電容量:約100pF	

Table 6-2 人体帯電と電撃の強さの関係



Figure 6-3 レーザープリンターの原理図

6.4.2 その他の帯電

静電気以外に帯電を考慮すべき電気機器としてプリンターがある.家庭用のプリンターには主にインクジェット式とレーザー式の2つの方式がある.インクジェット式はさらにピエゾ式とサーマル式に分かれるが,このうちピエゾ式はピエゾ素子に電圧を印加することから帯電による着火が懸念されるが,印加する電圧はピークで数+V程度であることから着火の可能性はないと考えられる.一方,レーザー式はFigure 6-3 に示すように帯電の工程がある.まず初めに細いワイヤーに電圧をかけてコロナ放電を起こすが,ワイヤーからのコロナ放電エネルギーは0.1mJ未満であり,プロパンの最小着火エネルギー0.25mJより小さいため着火には至らない.しかし,コロナ放電により発生したマイナス電荷は感光ドラムの表面に溜まり,感光ドラム全面が静電気を帯びた状態になるため着火の可能性は十分にあると考える.

6.4.3 ブラシモータ

ブラシモータのブラシは機械接点となるため回転によりスパークが発生する.室内で使用されるブラシモ ータを搭載した電気機器として,掃除機,ドライヤー,電気シェーバー,家庭用のプリンターなどがある.こ のうち掃除機とドライヤーについては使用時,ブラシモータの周囲にはファンによりプロパンの燃焼速度よ り十分に速い風が流れているため着火には至らないと考える.一方,電気シェーバーはファンを持たないため 着火源となる可能性がある.ただし,電気シェーバーに関しては防水タイプのものも多く,これらは密閉構造 になっており着火しない可能性もあるため,今後も引き続き検討をしていく.

6.4.4 サーモスタット

サーモスタットは温度変化によるバイメタルの反りで接点を開閉する仕組みであり、接点においてスパー クが発生する可能性があるため着火源として考える必要がある.サーモスタットを使用した電気機器として は、電気こたつ、電気ストーブ、アイロン、トースター、ドライヤーなどがあり、これらの製品からの着火は 十分に考えられる.

6.4.5 リレー

リレーは、有接点リレーと無接点リレーに分類される.有接点リレーは接点を有しており、電磁作用により 機械的に接点を開閉させて信号や電流・電圧を入/切するため、接点でスパークが発生する可能性があり着火 源として考える必要がある.一方、無接点リレーは機械的な可動部を持たず、半導体や電子部品で構成されて おり信号や電流・電圧の入/切はこれらの電子回路により電子的に行われるため、スパークが発生することは ない.近年では無接点リレーも普及してきたが、いまだ有接点リレーが使用され続けているケースも多いこと から、安全のためここでは全ての電気機器で有接点リレーを使用している前提で検討を行った.

リレーは、モータ制御、ヒータ制御、マグネトロン制御、信号ライン制御など様々な用途で使用されている が、AV機器やネットワーク機器に使用される信号ライン制御においてはエネルギーが非常に小さいため着火 源とは考えにくい.よって、モータ制御やヒータ制御などの用途で使用されている機器は着火の可能性があり、 これらを内蔵した電気機器(空気清浄機,除湿器,掃除機,洗濯機,換気扇,ドライヤー、電子カーペット、 炊飯器)は着火源になり得るとした.

6.4.6 コンセントの抜き差し

電気機器には一度コンセントを差したら基本的にコンセントを抜かない機器もあれば、使用するたびにコ ンセントを抜く機器もある.コンセントの抜き差しが発生する機器については、抜き差しの際、スパークが起 こり着火する可能性がある.特に電源が ON の状態で抜き差しするもの、また電源が OFF の状態でも電流が 流れるようなものがあり、ひとつひとつ丁寧に調べる必要がある.また、電気機器の負荷によって突入電流や 逆起電力の大きさが異なることも着火に大きく影響すると言える.しかし本リスクアセスメントの推進にあ たり、情報を共有させていただいている諏訪東京理科大の今村先生の最近の検討結果からは、負荷には主に抵 抗性負荷、誘導性負荷、容量性負荷があり、抵抗性負荷に関しては接点開閉時の突入電流や逆起電力などの過 渡現象の発生が小さくアーク放電は起こらないため着火しないと考えられる.一方、大きな突入電流や逆起電 力が発生する誘導性負荷や容量性負荷はアーク放電が発生するため着火の可能性がある.よって、各電気機器 を負荷別に分類し、着火の可能性がある機器を絞っていくことが重要である.今後、引き続き検討していく.

6.4.7 照明用の壁スイッチ

照明用の壁スイッチの構造を Figure 6-4 に示す.壁スイッチはハ ンドル操作により、中央にあるU字状の可動接点が左右に動くこと で ON/OFF が切り替わる仕組みとなっている.接点が OFF の位置 にあるときは接点間に少なくとも 3mm のギャップが必要であるこ とが国際規格である IEC 60950 により定められている.スイッチを OFF から ON に切り替えたときは放電が始まる距離まで接点間距離 が近づかないと放電しないが、ON から OFF に切り替えたときは接 点が離れる時点で放電が始まっており、一度始まると持続する性質 があるため、OFF から ON に切り替えるときには発生しないような 接点間距離まで離れても放電が続くことが想定される.接点間距離



Figure 6-4 照明用壁スイッチの構造

と放電電圧(火花電圧)との関係はパッシェンの法則があり、式(6-2)よりパッシェン曲線を描くと Figure 6.5 となり、火花電圧 Vs は最低でも 312.5V になると考えられる.

$$V_{s} = \frac{Bpd}{\ln Apd + C} \cdot \cdot \cdot \cdot (6-2)$$
$$C = -\ln\ln\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

空気の場合

A=11 [Pa-1·m-1], B=274 [V·Pa-1·m-1]

 $\gamma = 0.01$



Figure 6-5 パッシェン曲線

一般家庭で使用されている照明には蛍光灯,インバータ照明,LED 照明などがあるが,このうち最も消費電力が大きい一般の蛍光灯について検討した.一例として 6 畳(約 7mm²)の部屋に設置する Figure 6-6 のような

丸形蛍光灯の場合,入力電流は内側と外側の蛍光灯を合わせて 1.025A である.火花放電時に流れる電流は最大で Figure 6-7 より 1.45A となる.



Figure 6-6 一般の蛍光灯(丸形)



Figure 6-7 交流電流波形 (50Hz 時)

また,放電時間は交流の場合,正弦波形であり半周期でゼロとなり,このタイミングで放電も止まると考えられる.よって,電流ピーク時にスイッチ OFF したと仮定すると,放電時間は最大でも 1/4 周期分の 5msec (50Hz 時)である.火花エネルギーE は式(6-3)より算出して以下の結果を得た.

 $E=\int Vs(t)\cdot Is(t)dt \cdots (6-3)$ =(1/2)×Vs×I₀×t =1.13 [J]

以上より,照明スイッチの ON/OFF による火花エネルギーはプロパンの最小着火エネルギーよりもかなり大きなエネルギーであることがわかり,着火源になり得ると考えられる.

6.5 想定される着火源の整理

裸火,高温表面,スパークについて検討した結果,室内で想定される着火源は Table 6-3 となった. これらは着火源となる可能性のあるものであり,最終的に着火源として特定するには可燃空間と遭遇するか 否かを明確にする必要がある.

着火	く源の種類	想定される着火源	
埋山		喫煙時のタバコ(ライター含む), ロウソク(仏壇用, アロマテラピー用)	
株次		石油ストーブ、ガスコンロ、カセットコンロ	
高温表面		電気ストーブ	
	帯電	静電気、レーザーブリンター	
	ブラシモータ	電気シェーバー	
スパーク	サーモスタット	電気こたつ, 電気ストーブ, アイロン, トースター, ドライヤー	
	リレー	空気清浄機,除湿機,掃除機,ドライヤー,電子カーペット,炊飯器,電子レンジ	
	その他	コンセントの抜き差し,照明用スイッチ	

Table 6-3 室内で想定される着火源

6.6 着火源存在高さ

着火源には、タバコやドライヤーなど人が手に取って使用するものと、燃焼暖房機や調理家電など床や台の上 に置いて使用するものがある.前者については日本人の身体のサイズから推定し、後者については台の高さな どから推定することにより、着火源の存在高さを求めることとした.

6.6.1 手に取って使用する着火源の存在高さ

人が手に取って使用する着火源としては、タバコ、電気シェーバー、ドライヤーなどが挙げられる.これらの着火源は立って使用する場合と座って使用する場合があり、それぞれで着火源の存在高さが異なってくるため、両方の状態について求めた.

タバコや電気シェーバーの使用位置は口元や顎付近であり、ドライヤーの使用位置は肩から頭上 10cm 程度と 仮定した.日本人の平均身長,座高,肩の高さなどの各寸法は厚生統計要覧や Figure 6-8 に示すような産業技 術総合研究所の人間生活工学研究センターが示している人体寸法データベースの数値(を用い着火源の存在 高さを求めた ^{67),68)}.これより着火源存在高さは Table 6-4 に示す結果となった.



着火源	使用位置	立った状態	座った状態		
タバコ 電気シェーバー	口元 <mark>付</mark> 近	155cm程度	65cm程度		
ドライヤー	肩~ 頭上10cm	180cm程度	55cm程度		

Table 6-4 差水源左在高さ

Figure 6-8 人体寸法

6.7 その他着火源の存在高さ

ここでは床や台の上などに置いて使用する着火源や壁スイッチやドアノブなど位置がある程度固定されて いる着火源の存在高さについて調査した.

6.7.1 ガスコンロ, カセットコンロ

キッチンの高さは一般的に身長に合わせて決めるが,標準的には 80~90cm である.ガスコンロの火の高さ もキッチンの高さと同様と考えられる.カセットコンロはキッチンで使用される場合だけではなく,リビング のこたつの上で使用される場合もある.キッチンで使用される場合はガスコンロと同様,着火源の存在高さは 80~90cm であるが,リビングでは一般的なこたつの高さは 37~60cm 程度であるので,低めにみて 35cm とす る.また,カセットコンロの火の高さは,コンロ自体の高さを 5cm 程度と仮定し,床から 40cm の高さとする.

6.7.2 石油ストーブ

石油ストーブは一般的に Figure 6-9 に示すような構造であり、裸火に相当する燃焼筒とスパークが発生する 点火装置はともに高さ 20~35cm 程度の位置にあると言える.



Figure 6-9 石油ストーブの構造

6.7.3 ロウソク(仏壇用,アロマテラピー用)

仏壇のロウソクを置く燭台は Figure 6-10 のように仏壇の上台の下方に置かれており,床から 50~100cm の 範囲に配置されると考えられる.また,上置きタイプのものもあるが,これらは高さ 44~100cm 程度の仏壇 箪笥や仏壇キャビネットの上に置くのが一般的であるので,ロウソクの位置は仏壇の下から 30cm 程度とする と 74~130cm と考えられる.アロマテラピー用のアロマキャンドルは,就寝時にベッド脇の台や出窓などに 置いたりするケースが多いようである.ベッド脇であれば床から 40~50cm,出窓の場合は 70cm 程度である と考えられる.



Figure 6-10 仏壇の構成と種類

Figure 6-11 キッチンカウンターと専用ラック

6.7.4 調理家電

電子レンジ,炊飯器,トースターなどの調理家電はキッチンカウンターや専用ラックに置かれることが多い. Figure 6-11 に代表的なキッチンカウンターと専用ラックを示す.一般的に電子レンジやトースターはカウンタ ーやラックの上部の棚,炊飯器は下部に設けられているスライド式の棚に収納されることが多い.市販されて いるカウンターやラックは上部の棚が 80~104cm,下部のスライド式の棚が 50~55cm であった.また,一人 暮らしの場合,トースターや炊飯器は小型の冷蔵庫の上に置くケースも考えられる.小型の冷蔵庫の高さは 100~130cm であるが,配膳することを考慮すると 130cm では高すぎると思われるため小型の冷蔵庫の上に置 く場合は 100cm 程度とした.以上より,調理家電の設置高さは電子レンジとトースターが 80~104cm,炊飯 器が 50~100cm であると考えられる.

6.7.5 ドアノブ(静電気)

ドアノブの高さは日本人男性の平均身長である 170cm を基準とし、立っている場合に最も作業しやすい位置である 90~100cm に設定されることが多い.ただし、実際の製品としてはこれらより高い 130cm 程度のものもあることから、ドアノブの高さは 90~130cm とする.

6.7.6 照明用の壁スイッチ

壁スイッチの高さは床上 110~120cm の高さが人間工学上,最も操作しやすい高さとして推奨されている. よって,壁スイッチの設置高さは110~120cmとする.

6.8 冷媒漏えい時の室内可燃空間

着火源の特定するにあたり冷媒漏えいによって形成される可燃空 間を把握する必要があるため,CFD 解析を用い冷媒漏えい時の可燃 空間の存在高さを求めた.漏えいシミュレーションを実施するにあ たり,まずは床面積および冷媒充填量を決定することとした.

日本の家屋では4.5 畳程度の狭い部屋が多く存在する. Figure 6-12 は日本の住宅供給公社が 1960 年代に大量に建設した住宅のダイ ニングキッチンであり広さは4.5 畳程度です.まだ,この形式の住 宅は公団住宅の約半数の 35 万戸近くが残っており,今も居住空間 として使用されている.漏えいシミュレーションにおいても,この



Figure 6-12 公団住宅のダイニングキ ッチン (1960 年代)

ような狭い床面積(7.0m²)の部屋を対象にすることとした.漏えいシミュレーションにおける R290 の冷媒量 は、式(6-4)より床面積 7.0m²の IEC 規格(IEC 60335-2-40)で安全対策が費用な最大冷媒量に相当する 0.2kg とした.また、現行の家庭用エアコンの HFC 冷媒の冷媒量を 1kg とし、それと同等性能が得られると想定され る R290 の冷媒量を 0.5kg とし、これについても漏えいシミュレーションを実施し、そのときの床面積は安全 対策が必須とし、撹拌を前提とした式(6-5)により、11.88m²と決定した. m_{max}≦2.5×LFL^{5/4}×h₀×A^{1/2} ····· (6-4)
m_{max}≦0.5×H×A×LFL ····· (6-5)
ここで、m_{max}:許容冷媒量(kg)、LFL:燃焼下限界(kg/m³)、h₀:冷媒漏えい高さ(m)
H:部屋高さ (m)、A:床面積(m²)

解析モデルは Figure 6-13 に示す空間とし,壁掛け室内機設置面の対面の下部中央部にドア下を想定した幅 800mm×高さ 4mm の隙間を設け,天井面には大気圧境界として換気口(200mm×200mm)を 2 か所配置した. 計算はエアコン停止中(撹拌なし)と運転中(撹拌あり)の条件で行い,各冷媒量における冷媒漏えい速度は 4 分 で全量漏れると仮定した.なお,運転中の撹拌風量は式(6-6) (Colbourne et al.(2018))に従い算出した.式(6-5) 及び式(6-6)は IEC 60335-2-40 の次の版に採用される予定の内容を考慮した.



モデル寸法					
		冷媒量 200g	冷媒量 500g		
W	m	2.5	3.3		
D	m	2.8	3.6		
Н	m	2.2	2.2		
設置高さ	m	1.8	1.8		
床面積	m ²	7.00	11.88		

Figure 6-13 解析空間モデル

 $\mathbf{Q} = \frac{\mathbf{8}\mathbf{Y}\sqrt{\mathbf{A}_0}}{\mathbf{240}} \left(\frac{m_c}{LFL}\right)^{3/4} \left(\frac{F^{1/4}}{1-F}\right) \quad \cdots \quad (6-6)$

ここで,Q:必要撹拌風量 (m³/s),A0:気流の吐出面積 (m²),mc:冷媒充填量 (kg) LFL:燃焼下限界 (kg/m³),Y:定数=1.0,F:安全率=0.5

現在、計算により,可燃空間の存在高さを求めている。実際には着火源が可燃空間と接触して初めて着火に至ることから,CFD 解析で得られた可燃空間と検討した着火源存在高さとの位置関係を確認して,着火源の特定の作業を行っていく予定である.

6.9 まとめ

現在 JRAIA で実施している A3 冷媒のリスクアセスメントについて,室内での各種の着火源が A3 冷媒に燃 え移る可能性を評価した.特にこれら着火源の高さ方向の考察を行い,着火依存性について現時点での検討内 容をまとめた.

今後これら記述から考察される内容について、日本冷凍空調学会や大学、研究機関と連携を密にし、特に本 レポートに記された内容をもとに諏訪東京理科大と打合せを密にして A3 冷媒のリスクアセスメントに、これ ら検討結果の反映を行っていく、それらに基づき有効な対策を盛り込んだ日本向けの A3 冷媒のマニュアルや JRAIAの規格、ガイドラインを整備していく、

NOMENCLATURE

(kg/m^3)
n)
亂量(m ³ /s)
t(kg)

参考文献

6-1) Colbourne, D., Suen, K. O., 2018. "Minimum Airflow Rates to Dilute R290 Concentrations Arising from Leaks in Room Air Conditioners". Proc. 13th IIR Gustav Lorentzen Conference. Valencia, Spain, paper 1104.

- 6-2) B. Li, H.R. Panga, J. Xinga, B. Wanga, C. Liub, K.G. McAdamb, J.P. Xie, Thermochimica Acta , 579, 93-99 (2014)
- 6-3) 樫村利明ら: 消防科学研究所報, 7, 34p (1970)
- 6-4) 中山隆裕ら: 消防科学研究所報, 53, 86p (2018)
- 6-5) 室恵子ら:日本建築学会技術報告集, 19(43), 1031p (2013).
- 6-6) 奥窪朝子ら: 繊維製品消費科学, 15(10), 438 (1974).
- 6-7) 厚生労働省「厚生統計要覧(平成 30 年度) 第 2-6 表」
- 6-8) 産業技術総合研究所「日本人頭寸法データベース 2001」,人間生活工学研究センター「HQL データベースサイト (2001 年)」

第7章 日本冷凍空調工業会によるA3冷媒の

内蔵ショーケースのリスク評価の進捗

7.1 はじめに

日本冷凍空調工業会(日冷工)では、2016年7月から、R290等のA3冷媒を使用した内蔵ショーケースについて、ショーケースの庫内及び庫外からの漏えいを想定した CFD 漏えい解析やリスクアセスメントを行い、ショーケースを安全に使用するための検討を行っている.

前報では、内蔵ショーケースに R290 を使用した際の着火源や可燃空間の関する検討内容として、主にリー チインショーケースの庫内漏えいの CFD 解析結果を中心に説明した.本報では、内蔵ショーケースのリスク アセスメントと、その結果から導いた対応策について報告する.

7.2 安全規格の見直し

内蔵ショーケースの安全面に関する国際規格である, IEC60335-2-89 "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"が, 2019年6月に改定された. 今回の IEC60335-2-89 の主な改定内容を示す.

7.2.1 最大冷媒充填量

従来の規格では、可燃性冷媒を使用する冷凍サイクルへの冷媒充填量は、1 つの冷凍サイクル当たり 150g が 上限であった.今回の改定では、可燃性冷媒の最大冷媒充填量を燃焼下限界(Lower Flammability Limit: LFL)の 13 倍又は 1.2kg の少ない方としている. R290 の場合、LFL が 0.038 kg/m³なので、最大冷媒充填量は 494g と なる.また R1234yf の場合、LFL が 0.289 kg/m³なので計算上は 3.757 kgとなるが、上限値に規制があるために 最大冷媒充填量は 1.2kg になる.

7.2.2 最小設置床面積

最大冷媒充填量の緩和に伴い,製品から冷媒が漏えいした時の冷媒への着火リスクを回避する必要がある. そのため,可燃性冷媒を使用した製品を設置する部屋の床面積 Amin(m²)を式(7-1)で規格化し,製品にもその 数値を表示することになる. H は天上高さ 2.2 m(固定値)であり,0.25 は安全係数, M は冷媒充填量(kg)であ る.例えば,R290を494g使用した製品の場合は,23.7m²以上の床面積の場所に置かなくてはならない.

$$Amin = M/(H \times 0.25 \times LFL)$$

(7-1)



Fig.7-1 Symbol of minimum room floor area IEC 60417-6415(2019-03)

7.2.3 冷媒漏えい試験

冷媒を150g以上充填した冷凍サイクルは、冷媒漏えい試験が必要である.

冷媒は、最も不利な結果になる箇所からの漏えいを想定する. 試験中の冷媒放出量は、冷凍サイクルの冷媒 充塡量と同じでなくてはならない. そのときの冷媒放出速度は、式(7-2)で求めた質量流量とする. R290 を 494g 使用した製品の場合、q が 281g/min/mm²(高圧側、低圧側は 134 g/min/mm²)、ρr が 476kg/m³ なので、冷媒放出 速度は 44.4g/min(2.66kg/h)となる.

$$m = 152 \times q \times M/\rho_r \tag{7-2}$$

(7-3)



concentration sampling points

7.2.4 IEC60335-2-89 に対する日冷工の考え方

はLFLの50%の濃度を超えてはならない.

IEC60335-2-89 では、冷媒充填量 150g 未満のショーケースについて、「7.2.3 冷媒漏えい試験」が不要となっている.しかし、日冷工で行った冷媒漏えい解析において、冷媒漏えい量 150g 未満でも可燃域が形成されることを把握した.そこで日冷工としては、冷媒充填量 150g 未満の機器も冷媒漏えい試験を行うことにした.また冷媒漏えい試験において、冷媒漏えい開始から 5 分間の冷媒濃度は評価対象外となっている.しかし、

この間に可燃域が形成されれば引火の可能性もあり、評価しない理由が不明である.したがって日冷工では、 漏えい開始直後から評価を開始することにした.この漏えい開始直後からの評価に関しては、IECの検討WG へ試験方法や評価方法の見直しを提案する予定である.

7.3 リスクアセスメント

可燃性冷媒をより使い易くするために,IEC60335-2-89 が改定された.しかし,この規格はリスクアセスメントに基づいて作成されてはいないため,安全面よりも使い勝手を重視する傾向があり,使用方法や使用環境などの実使用時の安全面の評価は十分に検討されていない.そこで日冷工ではリスクアセスメントを行い,リスクの明確化とリスクを排除するための安全対策を検討した.またこの結果を基に,日冷工の規格及びガイドラインの原案を作成した.この検討で抽出された内容については,今後,IECの規格にも反映すべく提案する予定である.

7.3.1 リスクアセスメントのプロセス

リスクアセスメントにおける冷媒への着火確率は、冷媒漏えい発生確率と、着火源が可燃域と接触する時間 率である時間的遭遇確率及び可燃域の空間分布を表す空間的遭遇確率を乗じて算出する.冷媒濃度が LFL と 燃焼上限界(Upper Flammability Limit: UFL)の間にある領域が可燃域となる. この体積が可燃空間体積であり、 可燃域が持続する時間が可燃域継続時間である.可燃域継続時間,着火源存在時間及び着火源作動回数を用い て時間的遭遇確率を算出し、平均可燃空間体積を対象空間の体積で除して空間的遭遇確率を算出する. これら の可燃域継続時間及び平均可燃空間体積は、CFD 解析によって算出する. 着火確率は、ファン運転時及びファ ン停止時(故障時等)の双方の着火確率を運転率で加重平均を取って求める.

7.3.2 内蔵ショーケースのリスクモデルの設定

リスクアセスメントを行うモデル店舗として,揚げ物などの簡単な調理が可能なコンビニエンスストアとし,店内には Fig.7-3 に示すショーケースが設置されている.

一般に内蔵ショーケースは工場で生産された後, 倉庫で一時保管されてから使用される店舗などに輸送さ れ, 店内の適切な場所に設置してから使用される. 使用時に不具合が生じたとき, 設置場所で修理するか, そ の場では十分な作業が出来ないと判断されたときにはショーケースをメーカーのサービス拠点等に持ち帰り, 不具合部分を修理した後に再設置される. ショーケースが不要になった場合は設置先から回収し, 一時的に倉 庫に保管してから廃棄処理されるか, 一部のショーケースは再生又は整備後に中古品として再設置されるこ ともある.



Fig.7-3 Refrigerated display cabinet installation example in CVS



7.3.3 着火確率の算出式

着火源と可燃域が接触する時間率である時間的遭遇確率は,幾何学的確率の考え方を用い,対象とするステ ージの総時間,可燃域継続時間,着火源存在時間及び着火源作動回数を用いて,式(7-4)で計算する.係数kは, 着火源となるものの存在率(電気機器の普及率等)や着火源がある時間帯に集中して作動する場合の集中度合 を考慮した係数である.空間的遭遇確率は平均可燃空間体積と対象空間体積を用いて式(7-5)で計算し,着火確 率は,時間的遭遇確率,空間的遭遇確率及び漏えい発生確率を用いて式(7-6)で計算する.

$$P_{t} = k \times [1 - \{1 - (T_{i} + T_{v})/T_{a}\}^{n}]$$

$$P_{t} = V_{tr}/V_{tr}$$
(7-4)
(7-5)

$$P = P_t \times P_s \times P_r$$
(7-5)
(7-6)

7.3.4 許容レベルの設定

内蔵ショーケースの国内普及台数は,2014 年度時点で190万台⁷⁻¹⁾であった.日冷工の年度別内蔵ショーケース国内出荷台数推移より,2014 年以降の出荷台数の増減幅が非常に小さいため,2018 年における国内普及 台数も2014 年度と同等と考えて190万台とした.

許容できる事故の発生確率は、100年に1回以下の重大事故が発生するレベルと考え、市場に普及している 台数 190万台から 5.26×10⁹(=1/(1.9×10⁶)/100)を許容レベルとした.また使用時以外は常にショーケースを取り 扱う専門の作業者が携わっているため、許容レベルを使用時よりも1桁上げて 5.26×10⁸とした.

	Table 7-1 Acceptable Level
Stage	The allowable of ignition probability
Stage of usage	5.26×10^{-9}
Another Stage	5.26×10^{-8}

7.3.5 冷媒漏えい発生確率について

内蔵ショーケースの冷媒漏えい発生確率は、日冷工会員会社の市場での冷媒漏えい事故件数を調査して算出した.配管の破損状況から冷媒漏えい速度を推測し、冷媒漏えい速度毎に噴出漏れの確率 5.26×10⁻⁷、急速漏れの確率 1.89×10⁻⁵、微小漏れの確率 9.82×10⁻⁴、これらを合計した冷媒漏れの確率 1.00×10⁻³ とした.

Table 7-2 Leakage Probability			
Refrigerant leak	Leak probability		
Burst leak	5.26×10^{-7}		
Rapid leak	1.89×10^{-5}		
Slow leak	9.82×10^{-4}		
The total refrigerant leak	1.00×10^{-3}		

7.3.6 CFD 解析

解析は、コンビニエンスストア(床面積 84.7m²)に、リーチインショーケースと平形ショーケースを設置した 場合を想定して実施した.解析には SRAR-CCM+を用い、冷媒は R290 として、REFPROP Ver.8.0 で計算した 大気圧・常温の物性値を与え、分子拡散係数の式から算出した値を拡散係数として使用した.

(1) リーチインショーケースの解析

リーチインショーケースは、高さ 2.0m、幅 1.542m、奥行き 0.7m で、庫内体積は 1.08m³ である.ショーケ ースの下部には圧縮機、凝縮器及び送風機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空気 を吸って背面を通ってショーケースの上部に吹き出す風路構造となっている.凝縮器ユニットは、開口部の面 積を 8.3×10⁻²m²とし、解析では開口部の風量を 0~14.94m³/min(風速 0~3m/s)の間で変化させた.ショーケース は、正方形の店内の壁際中央に設置した.解析では、庫内に冷媒が漏えいした後にドアを一気に開けることを 想定して、庫内が均一冷媒濃度になっている状態から解析を開始し、扉はないものとして、ショーケース前面 から外部へ冷媒が重力及び分子拡散により自然に漏えいする解析を行った.

庫内に気流が無い最悪条件で解析した結果,冷媒量(M)を店内床面積(A)で除した値(M/A)で整理して近似式 を作成した.また凝縮器風量 0.208 m³/s(2.5 m/s)でも可燃域が生成したため,(M/A)の近似式を作成した.さら に,リーチインショーケースの庫内漏えいでは,庫内の気流に関係なく,凝縮器ユニットの風量を大きくして も庫外の可燃域が無くならないことが分かった⁷⁻²⁾.

$T_v = 4.61 \times 10^5 \times (M/A)^2 - 4.76 \times 10^3 \times (M/A) + 1.38 \times 10^1$	(air flow rate;0m ³ /s)	(7-7)
$V_v = 1.36 \times 10^2 \times (M/A) + 1.34$	(air flow rate;0m ³ /s)	(7-8)
$T_v = 1.04 \times 10^1 \times (M/A) + 8.22 \times 10^{-1}$	(air flow rate;0.208m ³ /s)	(7-9)
$V_v = 4.48 \times 10^1 \times (M/A) + 9.40 \times 10^{-1}$	(air flow rate; $0.208 \text{m}^3/\text{s}$)	(7-10)

(2) 平形ショーケースの解析

平形ショーケースは、高さ 0.81m、幅 1.8m、奥行き 1.09m である.ショーケースの下部には圧縮機、凝縮器 及び送風機が内蔵された凝縮器ユニットがあり、一方の開口部から空気を吸って、他方の開口部から吹き出す 風路構造となっている.凝縮器ユニットは、開口部の面積を 6.89×10⁻²m² とし、解析では開口部の風量を 0~14.94m³/min(風速 0~3m/s)の間で変化させた.ショーケースは、正方形の店内の中央に設置して解析を行っ た.

凝縮器風量 0m³/s 時で解析した結果,冷媒量(M)を店内床面積(A)で除した値(M/A)で整理して近似式を作成 した.また凝縮器ユニットからの冷媒漏えいでは,凝縮器ユニットの風量を大きくすると庫外に可燃域が形成 されないことが分かった⁷⁻²⁾.
$$\begin{split} T_v &= 4.41 \times 10^5 \times (M/A)^2 - 1.42 \times 10^3 \times (M/A) + 3.94 \\ V_v &= 8.90 \times 10^1 \times (M/A) + 2.58 \end{split}$$

(air flow rate;0m ³ /s)	(7-11)
(air flow rate;0m ³ /s)	(7-12)

7.4 各ステージの検討

7.4.1 輸送ステージ

(1) 輸送時の条件

コンビニエンスストアに設置する内蔵ショーケースは、一般的にトラックを使用して輸送される.このトラ ック輸送の場合、荷室には着火源が存在しない.もし荷室に可燃域が生じても、荷室には着火源が存在しない (荷室が運転室と分離)ので、着火するリスクは非常に低い.また荷降ろしの際は、扉を開けた瞬間から内部の 空気が循環するため、この場合も着火するリスクは非常に低い.これらの理由から、トラック輸送に関しては リスクが非常に低いと考えた.そこで輸送時のリスクとしては、荷室と運転室が同じ空間にあるワゴン車によ る場合を想定した.

ワゴン車による輸送は、現地修理でユニット交換を行う場合とする. 往路は全て新品(木枠梱包等),復路は 全て旧品である. 主なリスクとして、ユニット単体を冷媒が入った状態で、木枠等の梱包無しで輸送する状況 とした.

ワゴン車の輸送頻度は、ショーケースの普及台数 190 万台のうち、ろう付け作業を伴う故障発生時にユニット交換作業を行う場合で、2011 年から 2015 年の年間平均で 1595 台であった.また年間の出荷台数に対して、 ユニット交換するショーケース中に冷媒が入っている割合は 0.5%であった.

ワゴン車の車内容積は 2.9m³,乗車人員は積み下ろし作業に必要な人数として 2 名,ユニット単体の積載台数は 2 台とし,最大輸送時間は 12 時間,平均輸送時間は 2 時間とした.

(2) 輸送時の着火確率と安全対策

着火源は,輸送者による喫煙,静電気(鍵の接触)を想定した.

輸送者による喫煙は、喫煙本数を1時間当たり1人1本で、ライター着火時間が5秒、煙草の赤火時間が40秒、男性の作業者を想定して喫煙率を男性の喫煙率28.2%として計算した.

鍵の接触による静電気は、乗車下車時及び休憩時の施錠を想定し、2時間の輸送中に休憩する確率を10%として2.2回(=2+0.1×2)とし、放電割合は鍵が金属製である確率を50%、金属製の場合に50%は放電するとして放電率を25%とした.さらに、静電気は湿度30%以下で発生するものとし、東京都の気象データから室温での発生率18.7%とし、放電時間は1µsとした.

Table 7-3	Potential ignition sources assumed at transportation stage			
Name	Туре	T _i (s)	n	k
Smoking by workers	Open flame	4.5×10 ¹	1/hour	0.282
Static electricity when the key contacts	Electrostatic spark	1.0×10 ⁻⁶	2.2	0.04675

着火確率を計算した結果,ワゴン車での輸送時の着火確率が許容値を超えたために対策を検討した.安全対 策としては、ショーケースに火気厳禁の注意喚起表示を行う.さらに、携帯形漏えい検知器を携行し、もし漏 えいを検知した場合は、換気することを作業員に徹底することにした.

7.4.2 保管ステージ

(1) 保管時の条件

ショーケースの保管は、工場生産後や海外生産拠点から持ち込まれたショーケースを一時的に保管する中型 倉庫と、各販売拠点などで保有する狭小倉庫に分類され、中型倉庫の大きさは 1000m²、狭小倉庫の大きさは 15m²とした.ショーケースの運搬は、フォークリフトや作業員が直接操作する台車等の輸送機器で行う.シ ョーケースは段積み保管は行わず、作業員は休憩時に喫煙することを想定した.作業は、中型倉庫では5名が 1日8時間で月20日、狭小倉庫では2名が1日2時間で月20日の勤務とした.

倉庫に保管するショーケースは新品と中古品があり、新品はビニール梱包,ビニール梱包+段ボール梱包, もしくはビニール梱包+木枠梱包等でショーケースが保護されている.中古品は梱包無し、若しくはビニール |梱包とした.さらに新品と中古品ともに、扉や蓋が付いているクローズドタイプショーケースの場合、輸送や 保管時にそれらが開かないように固定されているとした.

(2) 保管時の着火確率と安全対策

着火源は、倉庫内での作業者の喫煙、静電気、ストーブを想定した.

倉庫内での作業者の喫煙は、「6.4.1 (2) 輸送時の着火確率と安全対策」の輸送者と同じ条件で算出した. 静電気については、新品はビニール梱包されているので静電気は発生せず、中古品はビニール梱包されずに 製品がそのままの状態で保管され,製品外装の金属面に接した時に静電気が発生するものとした.静電気が発

生する確率は、空調がない外気と同じ状態と考えて、東京都の気象データから3.2%とした.

石油ストーブは、中型倉庫では事務所内のみ、狭小倉庫は事務所以外でも使用するとした. 暖房機器の使用 期間を年間120日とし、暖房器具の使用率を50%、そのうち石油ストーブの使用割合を50%とした.

Table 7-4 Potential ignition sources assumed at storage stage (small-sized warehouse)

Name	Туре	T _i (s)	n	k
Smoking by workers	Open flame	4.5×10^{1}	1/hour	0.282
Static electricity	Electrostatic spark	1.0×10 ⁻⁶	2	0.032
stove	Open flame	7.2×10^{2}	1	0.082

着火確率を計算した結果, 狭小倉庫保管時の着火確率が許容値を超えたために対策を検討した. 安全対策と しては、梱包材やショーケースに火気厳禁の注意喚起表示を行う. さらに、軍手などの静電気を防止する効果 のある手袋などを着用してショーケースを取り扱うことにした.

7.4.3 設置ステージ

(1) 設置時の条件

設置時のショーケースの状態として,新品と中古品を想定した.新品は工場出荷時の状態であり,木枠や段 ボール等で梱包され、中古品はビニールのみの梱包状態とした.

設置作業は,屋外でトラックの荷台にあるショーケースを地面に降ろすまでの荷下ろし作業,荷下ろしされ たショーケースを店舗内の設置場所まで運搬する運搬作業,設置場所で開梱,付属品の取付けなど行う据え付 け作業がある.これらの作業で、ショーケース1台当たり、作業者2名で約1時間を要する.また既存店への ショーケース設置の場合、店舗内に運転中の電気機器等があるため、使用ステージの着火源も考慮することに した.

(2) 設置時の着火確率と安全対策

着火源は、使用ステージの着火源の他に、作業者の喫煙、電源プラグの抜き差し、電動ドライバー、静電気 を想定した.

作業者の喫煙は、「6.4.1.2 輸送時の着火確率と安全対策」の輸送者と同じ条件で算出した.

電源プラグの抜き差しは、機器使用時に電源プラグを差す動作と、使用後に抜く動作があるので合わせて2 回とした.また機器本体のスイッチ操作をせず、運転状態で電源プラグを抜き差しする率を 25%とした.ま た、電気スパークの放電時間は5msとした.

電動ドライバーはネジの付け外しに使用するので,1回当たり使用時間を3秒,1台当たり10回使用すると 想定し、電気スパークが発生するブラシモータの電動ドライバー普及率を5%とした.

静電気は湿度 30%以下で発生するものとし、東京都の気象データから室温での発生率18.7%、放電時間1µs とした.

Table /-5	Potential ignition sources assumed at installation stage			
Name	Туре	$T_{i}(s)$	n	k
Smoking by workers	Open flame	4.5×10^{1}	1/hour	0.282
Power outlet	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	2	0.25
Electric screwdriver	Electrics spark	3.0	10	0.05
Static electricity	Electrostatic spark	1.0×10 ⁻⁶	2	0.187

着火確率を計算した結果,着火確率が許容値を超えたために対策を検討した.安全対策としては,ショーケースに火気厳禁の注意喚起表示を行う.また軍手などの静電気を防止する効果のある手袋などを着用してショーケースを取り扱う.さらに,携帯型漏えい検知器を携行して冷媒の漏えいを検知した際に,速やかに作業を中断し,冷媒濃度が十分に低くなるまで作業を再開してはならないとした.

7.4.4 使用ステージ

(1) 使用時の条件

コンビニエンスストア内に設置されている機器として、可燃性冷媒を使用しているショーケースは、安全面 を考慮して設計されているため着火源にはならない.その他の機器に関しては、全て着火源になる可能性があ り、機器の構造面まで詳細に検討する必要がある.さらに買い物客がケースと接触した際に発生する静電気、 店内で販売している電子ライターの試し点火、一部の店舗で燃焼式暖房機を使用されることも考慮した.



Fig.7-5 Other appliance of CVS

(2) 使用時の着火確率と安全対策

コンビニエンスストア内の着火源は, Table 7-6 に示すものを想定した.

電源プラグは、店舗内の清掃のため、機器の電源プラグを1日2回計4回の抜き差しを行い、50%の確率で 機器本体のスイッチ操作をせず、運転状態で電源プラグを抜き差しするとした.また、電気スパークの放電時 間は 5ms とした.

照明スイッチは、1日2回計4回のON/OFFを行うとし、着火源の存在係数は1とし、電気スパークの放電時間を5msとした.

フライヤースイッチは、コンビニエンスストアで調理して販売する唐揚げの賞味期限が4時間なので、4時~24時の20時間で4時間ごとに調理することを想定し、フライヤースイッチのON/OFF回数を10回とし、電気スパークの放電時間を5msとした.

中華まん加湿装置やおでん加熱装置は,製品評価技術基盤機構(NITE)の調査データから発火事故件数を調査 したが,事故事例は無かった.そこで,これらの機器の着火確率を,フライヤースイッチと同等と想定した. コピー機は,使用中に着火源になると仮定し,1日50回,1回当たり3分間使用するとした.

コーヒーディスペンサーは,特定のコンビニエンスストアでの年間コーヒー販売数が9億杯,店舗数約2万 店より1店舗当たり年間45000杯,1日当たり124杯となる.内部リレー1回動作時のアーク放電時間を各5ms とし,コーヒー1杯当りのリレー動作回数が1.5回で,1日の販売が124杯のため,着火源使用回数は186回 となる.着火源の存在係数は1とし,電気スパークの放電時間を5msとした.

可燃性冷媒を使用していに他のショーケースに内蔵された,主に送風用に使用されているブラシモータは, 圧縮機の ON/OFF に合わせて運転している.送風機運転中のブラシモータの周囲には,十分に速い気流が流れ ているため着火源にはならず,ON/OFF 時のリレーのみが着火源になるとした.一般的な圧縮機は運転5分以 上・停止5分以上が規定されているので,圧縮機の発停頻度は1時間当たり最大で6回となる.また,ショー ケースに内蔵したブラシモータの発停頻度も同じく1時間に6回として,1日に換算して144回とした.ま た,ブラシモータを内蔵したショーケースの普及率を1%とし,電気スパークの放電時間を5msとした.

リーチインショーケースの静電気は、ショーケースの扉開閉のために扉の取っ手を持つ時に発生する静電気を想定した.アイスコーヒーの氷入りカップを冷凍リーチインショーケースで保冷することを想定すると、特定のコンビニエンスストアでの年間コーヒー販売数が9億杯で、その半数がアイスコーヒーとすると、1店舗
当たり1日に62杯を販売することになる.したがって、1枚扉の冷凍リーチインショーケースの1日当たり の開閉回数は 62回となる.他の6枚扉の冷蔵リーチインショーケースについても、扉1枚当たり同じ回数開 閉すると想定し、1店舗当たりの開閉回数は434回とした.また、静電気は湿度30%以下で発生するものとし、 東京都の気象データから室温での発生率18.7%,放電時間1µsとした.

オープンショーケースの静電気は、買い物客がケースの外枠であるハンドレールや棚などの金属部分に触れ る確率で、リーチインショーケースの静電気発生回数の 5%と想定して 22 回とした. 静電気発生率と放電時 間はリーチインケースと同じとした.

店舗内のその他の扉の静電気は、オープンショーケースの静電気と同等とした. 販売している電子ライターの試し点火は、1日当たり5人が5s点火するとした. 燃焼式暖房機は、1日10時間の使用で、普及率は0.01%とした

Name	Туре	$T_{i}(s)$	n	k
Power outlet	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	4	0.5
Light switch	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	4	1
Switch of flied food machine	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	10	1
Chinese-style buns steamer	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	10	1
Heating appliance for "Oden"	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	10	1
Copier	Electrics spark	180.0	50	1
Coffee machine	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	186	1
Brush motors of other equipment	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	144	0.01
Static electricity (door of reach-in refrigerated display cabinet)	Electrostatic spark	1.0×10 ⁻⁶	434	0.187
Static electricity (exterior of open refrigerated display cabinet)	Electrostatic spark	1.0×10 ⁻⁶	22	0.187
Static electricity (other doors)	Electrostatic spark	1.0×10 ⁻⁶	22	0.187
Electronic lighter	Open flame	5.0	5	1
Combustion type boiler	Open flame	3.6×10 ⁴	1	0.0001

Table 7-6 Potential ignition sources assumed at use

安全対策としては、ショーケース以外の機器に対策を施すことは困難なので、ショーケースから漏えいした 冷媒が可燃濃度にならないような対応を行う.

ショーケースは圧縮機の ON/OFF に合わせて凝縮器用送風機を発停させるものが多い. この凝縮器用送風 機が停止している時に冷媒漏えいが発生すると、漏えいした冷媒の拡散が不十分になり、可燃域が生成してし まうことになる、そこで、圧縮機の ON/OFF にかかわらず、除霜時も含めて凝縮器用送風機を常に運転させる ことにした. さらに, 可燃域を存在させないための凝縮器用送風機の送風量の規定値を定め, その値以上で常 に使用することにした.またリーチインショーケースの場合,庫内漏えい時に扉を開けると、ショーケースの 前面に可燃域が発生することがあるため、庫内の冷媒漏えいを検知して、その漏えいを遮断するような機能を 製品に備えることにした.

7.4.5 修理ステージ

(1) 修理時の条件

修理は、設置場所からの移動が可能なショーケースの場合、代替機と置き換えてメーカーやメンテナンス業 者のサービス拠点等で修理を行う持ち帰り修理,一時的に店外に移動して修理を行う店外修理,及び大型など で移動が困難なショーケースは店内に設置したまま修理を行う店内修理がある。高圧ガス保安法では、可燃性 冷媒の現地での充填には20日前までの届け出が必要であり、実質現地での冷凍サイクルの修理は行えない. そのため、可燃性冷媒を使用した内蔵ショーケースの冷凍サイクルの修理は、持ち帰り修理に限定される、現 在,現地での可燃性冷媒の充塡が届け出なしでも行えるようにするため,高圧ガス保安法の緩和を経済産業省 へ依頼中である.そこで,その改正が認められた場合を想定し,製品を屋外に移動して修理を行う店外修理の リスクアセスメントを行った.

- (2) 修理時の着火確率と安全対策 修理時の着火源は、ショーケースに冷媒が充填されている状態での移動や設置の着火源に、ろう付けバーナ ーを加えたものを想定した.
 - ろう付けバーナーの使用回数は、1台当たり4回で、1回当たりの点火時間は2分とした.

Table 7-7 Potential ignition sources assumed at recovery stage						
Name	Туре	$T_{i}(s)$	n	k		
Smoking by workers	Open flame	4.5×10^{1}	1/hour	0.282		
Power outlet	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	2	0.25		
Electric screwdriver	Electrics spark	3.0	10	0.05		
Static electricity	Electrostatic spark	1.0×10 ⁻⁶	2	0.187		
Burner for brazing	Open flame	1.2×10^{2}	4	1		

着火確率を計算した結果,着火確率が許容値を超えたため対策を検討した.安全対策としては,軍手などの 静電気を防止する効果のある手袋などを着用してショーケースを取り扱う.さらに,携帯型漏えい検知器を携 行して冷媒の漏えいを検知した際に,速やかに作業を中断し,冷媒濃度が十分に低くなるまで作業を再開して はならないとした.

7.4.6 廃棄ステージ

(1) 廃棄時の条件

廃棄時は、店舗内に設置してあるショーケースを廃棄するために、店内から撤去する場合を想定した.この時、内蔵ショーケースは、冷凍サイクル内に冷媒が充塡されているまま移動する.

(2) 廃棄時の着火確率と安全対策

廃棄時の着火源は、ショーケースに冷媒が充填されている状態での移動や設置と同じになると想定した.

Tuble / 6 Totential Emilion sources assumed at disposal stage					
Name	Туре	T _i (s)	n	k	
Smoking by workers	Open flame	4.5×10^{1}	1/hour	0.282	
Power outlet	Electrics spark	5.0×10 ⁻³	2	0.25	
Electric screwdriver	Electrics spark	3.0	10	0.05	
Static electricity	Electrostatic spark	1.0×10 ⁻⁶	2	0.187	

 Table 7-8
 Potential ignition sources assumed at disposal stage

着火確率を計算した結果,着火確率が許容値を超えたため対策を検討した.安全対策としては,軍手などの 静電気を防止する効果のある手袋などを着用してショーケースを取り扱う.さらに,携帯型漏えい検知器を携 行して冷媒の漏えいを検知した際に,速やかに作業を中断し,冷媒濃度が十分に低くなるまで作業を再開して はならないとした.

7.5 可燃性冷媒を使用した内蔵ショーケースの普及に向けた活動

7.5.1 廃棄マニュアルの作成

可燃性冷媒を充填した内蔵ショーケースの廃棄処理施設での廃棄に関して,現在は安全に処理する仕組みが 整っていない.この状態のまま可燃性冷媒を充填した内蔵ショーケースが廃棄されると危険なため,安全に廃 棄を行うための手順を記載した廃棄マニュアルの原案を作成した.今後,廃棄処理施設の意見も取り入れて内 容の見直しも行い,廃棄処理施設への配布・教育に役立てたい.

7.5.2 高圧ガス保安法の改正検討

高圧ガス保安法では、可燃性冷媒の現地での充填には 20 日前までの届け出が必要であり、実質現地での冷

媒充塡は行えない. そこで、この現地での冷媒充填を可能にするため、高圧ガス保安法の緩和を経済産業省に 依頼している. 依頼している内容は、高圧ガス保安法施行令関係告示(平成九年通商産業省告示第百三十九号) 第四条の二 第七号を次のように改正することである. (下線部が改正点)

第四条の二 令第二条第三項第九号の経済産業大臣が定めるものは、次の各号に掲げるものとする.

七 冷凍設備へ高圧ガスを充塡するための設備内における高圧ガスであって,充塡するガスが二酸化炭素又 はフルオロカーボン(不活性のものに限る.)であること.又は冷凍能力が三トン未満の冷凍設備へ高圧 ガスを充塡するための設備内における高圧ガスであって、充塡するガスが可燃性ガスである場合は、充塡 は、火気を取り扱う場所又は引火性若しくは発火性の物をたい積した場所及びその付近を避け、通風の良 い場所で行うこと.

7.6 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った結果、機器を安全に取り扱うために、 ステージごとに着火源の抽出と安全対策を検討した. このリスクアセスメントにはCFD解析結果を用いてい るが、前報でも報告したように、実機を使用した確認試験がまだ行えておらず、ショーケースやその周囲に 存在する着火源の検討もまだ十分に検討したとは言えない.

そこで、現在計画中または検討途中である、東京大学における実機レベルでの漏えいに関する研究、及び 諏方東京理科大学における着火源に関する研究などの成果を適宜このリスクアセスメントに反映して行きた い. さらに、リスクアセスメントの検討結果から導いた、安全対策を施したショーケースにおける着火に関 する研究を,産業技術総合研究所にて実施して頂く予定である.

NOMENCLATURE

- А room floor area (m²) Η ceiling height of the shop (m) М refrigerant charge (kg)
 - m mass flow rate of the release (g/min)
 - mass flux ((g/min)/mm²) q
 - \mathbf{P}_{t} temporal encounter probability
 - Pr refrigerant leak probability
 - T_i duration of ignition source (s)
 - k coefficient
 - Va volume of target space (m³)
 - density at the dew point of 35°C (kg/m³) ρ_r

参考文献

t_c

Ρ

P.

 T_a

 T_v

V_v

n

7-1) Mitsubishi Research Institute

time required to be released (s)

spatial encounter probability

total time of target stage (s)

duration of flammable region (s)

mean flammable volume (m³)

frequency of ignition source

ignition probability

Heisei 20 FY2007 energy use streamlining promotion infrastructure development project (survey on energy conservation measures of machinery and equipment etc.) report, PP. 224-227 (in Japanese)

7-2) K. Yamashita, Y. Sakamoto, T. Kato, S. Ishihara, A. Kobayashi, H. Kainuma, M. Sato, K. Osawa, H. Nagai and M. Nakagawa: "Study on method ensuring safety of built-in refrigerated display cabinet using R290", ICR 2019, 25th IIR International Congress of Refrigeration