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

2020 年度プログレスレポート

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

2021年6月1日

# 免責事項

本報告書に記載している内容については,最新の技術情報に基づき万全を期して作成しておりますが, 掲載された情報の正確性を保証するものではありません.また,本報告書に掲載された情報・資料を利 用,使用する等の行為に関連して生じたいかなる損害についても,本学会並びに著者は何ら責任を負いま せん.

著作権

本報告書の著作権は執筆者が有しています.許可なく全体あるいは一部の転載,複製はお断りします.

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 2020年度プログレスレポート

> 2021年6月1日 2021年9月16日改訂

編集 日本冷凍空調学会 次世代冷媒に関する調査委員会
 発行所 公益社団法人 日本冷凍空調学会
 〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町 13-7
 日本橋大富ビル 5 階
 TEL 03-5652-3223 FAX 03-5623-3229

目 次	
-----	--

目 次	2
第1章 はじめに	5
1.1 NEDO プロジェクトの概要	5
1.2 次世代冷媒に関する調査委員会 WGIIの活動	7
1.3 本報告書について	8
参考文献	9
第2章 東京大学の進捗	10
2.1 はじめに	10
2.2 家庭用ルームエアコンからの冷媒漏洩	10
2.2.1 数値流体解析の方法	10
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	12
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	15
2.2.4 まとめ	16
2.3 業務用ショーケースからの冷媒漏洩	17
2.3.1 数値流体解析の方法	17
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	17
2.3.3 ファンの稼働が可燃領域の規模に及ぼす影響	20
2.3.4 まとめ	22
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	22
2.4.1 実験装置と実験条件	22
2.4.2 実験結果	24
2.4.3 まとめ	27
参考文献	
第3章 公立諏訪東京理科大学の進捗	29
3.1 はじめに	
3.2 本研究の構成	
3.3 着火源の抽出と着火能力の評価手法	
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	
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	
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	
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	
3.4.5 静電気スパークによる着火性の評価	
<ol> <li>3.5 各種電気機器によるプロパンの着火性</li> </ol>	41
3.6 高温熱面によるプロパンの着火性	42
3.6.1 研究の概要及び流れ	42
3.6.2 実験の概要	43
3.6.3 実験結果及び考察	43
3.7 まとめと今後の課題	44
3.7.1 電気スパークによる着火性の評価	44
3.7.2 高温面による着火性の評価	45
参考文献	45
第4章 産業技術総合研究所安全科学研究部門の進捗	47
4.1 はじめに	47

4.2 可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価	47
4.2.1 評価対象機器の選別と実験手法	47
4.2.2 点火能評価の実験結果	47
4.2.3 点火能評価のまとめと計画	49
4.3 ルームエアコン室内機の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価	49
4.3.1 冷媒漏洩事故事例の検討と漏洩条件の決定	49
4.3.2 ルームエアコン室内機における漏洩拡散挙動計測の実験手法	49
4.3.3 ルームエアコン室内機における漏洩拡散挙動計測の実験結果	50
4.3.4 ルームエアコン室内機における実規模フィジカルハザード評価の実験手法	52
4.3.5 ルームエアコン室内機における実規模フィジカルハザード評価の実験結果	52
4.3.6 ルームエアコン室内機における実規模フィジカルハザード評価のまとめ	53
4.4 リーチインショーケースの拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価	53
4.4.1 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける漏洩拡散挙動計測の実験手法	53
4.4.2 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける漏洩拡散挙動計測の実験結果	54
4.4.3 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける実規模フィジカルハザード評価の実	験手法54
4.4.4 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける実規模フィジカルハザード評価の実	験結果55
4.4.5 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける実規模フィジカルハザード評価のま	とめ56
参考文献	57
第5章 産業技術総合研究所機能化学研究部門の進捗	58
5.1 はじめに	58
5.2 低 GWP 混合冷媒の燃焼限界の評価	58
5.3 低 GWP 混合冷媒の燃焼速度の評価	60
5.4 低 GWP 混合冷媒の消炎距離の評価	62
5.5 従来型混合冷媒の基礎燃焼特性の評価	64
参考文献	66
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	67
6.1 はじめに	67
6.2 リスクアセスメントについて	67
6.2.1 リスクアセスメントの範囲	67
6.2.2 レポートの構成について	68
6.2.3 リスクアセスメントの手法	68
6.2.4 リスクアセスメントの対象エアコン	69
6.2.5 リスクアセスメントの許容値について	69
6.3 事故の発生確率について	69
6.3.1 時間的遭遇確率	69
6.3.2 事故の発生確率についてのまとめ	72
6.4 室内の着火源について	72
6.4.1 室内の想定される着火源	72
6.4.2 裸火について	72
6.4.3 高温表面について	73
6.4.4 スパークについて	73
6.4.5 想定される着火源の整理	75
6.4.6 看火源の尚さ	75
<b>6.4.</b> 7	77
<b>6.4.8</b> 看火源の特正	
6.4.9 至内の看火源のまとめ	
<b>0.3</b> 至外の府保リークンミュレーションについて	
<b>6.5.1</b> 至外機の設直状況について	
<b>6.5.2</b> 至外の伶磲漏えいンミュレーション	80

0.5.5 至外の有人你について	82
6.5.4 冷媒漏えいシミュレーションからの室外機リスク検討結果	83
6.5.5 室外機の安全対策の方向性	83
6.6 リスクアセスメントの想定外の考え方と提言	83
6.6.1 リスクアセスメントでの想定と想定外について	84
6.6.2 リスクアセスメントでの想定外に対する提言	85
6.7 まとめ	85
参考文献	86
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	87
7.1 はじめに	87
7.2 国際規格 IEC60335-2-89 の主な改正点	87
7.2.1 最大冷媒充填量	
7.2.2 最小設置床面積	87
7.2.3 冷媒漏えい試験	87
7.3 冷媒漏えい解析	
7.3.1 リーチインショーケースの庫内漏えい	
7.3.2 平形ショーケースの庫外漏えい	91
7.3.3 多段形オープンショーケースの庫内漏えい	93
7.4 リスクアセスメントの条件及び方法	95
7.4.1 リスクアセスメントのプロセス及び着火確率の算出	95
7.4.2 内蔵ショーケースのリスクモデルの設定	95
7.4.3 内蔵ショーケースのライフステージ及び各ステージのシナリオ	96
7.4.4 許容レベルの設定	98
7.4.5 冷媒漏えい速度	99
7.4.6 冷媒漏えい発生確率	99
7.5 日本の法律(高圧ガス保安法)	100
7.5.1 冷媒の廃棄	100
7.5.2 冷媒の回収	101
7.5.3 冷凍装置への冷媒充填	101
7.6 日本の規格	101
7.6.1 最大冷媒充填量	101
7.6.2 表面温度	101
7.6.3 測定免除時間及び漏えい試験免除	
7.6.4 冷媒漏えい速度	
7.6.5 作業時の安全担保	
7.7 リスクアセスメントに対する課題	
7.8 まとめ	
参考文献	

# 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

【産業技術総合研究所(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. 【産業技術総合研究所(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<sup>1-1)</sup>を示す. A 領域(ピンク色の領域)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(黄色の領域)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(青色の領域)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<sup>-10</sup>(件/台/年)となる. Fig. 1-1の発生頻度は1億 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.

						-	Risk
	Frequently	10-4				Nota	×
<u>↑</u>	Some time	10 <sup>-5</sup>		Accen			eptable
8	Rare	10 <sup>-6</sup>			able with		
р Ч	Usually not	<b>10</b> -7				Ondition	
eli	Very difficult	10 <sup>-8</sup>					
Ľ	Extremely difficult	10 <sup>-9</sup>		acceptable	3		
	Near zero	<b>10</b> <sup>-10</sup>	_				
Allowa	able frequency of fire		0	I	Π	Ш	IV
event	S:		No	Minor	Light	Maior	l ethal
10-2	<sup>2</sup> case/vear						
	ouoo/you		damade	damage	damage	damage	damage
Room	air conditioner in Jap	an:	damage	damage (smoke	damage (fire from	damage (fire,	damage (permanent
Room	air conditioner in Jap	oan:	damage	damage (smoke from	damage (fire from product,	damage (fire, human	damage (permanent injury,
Room 10 <sup>8</sup>	air conditioner in Jap units	oan:	damage	damage (smoke from product)	damage (fire from product, light injury)	damage (fire, human injury)	damage (permanent injury, death, burn down
Room 10 <sup>8</sup> Allowa	air conditioner in Jap units able frequency of fire	oan:	damage	damage (smoke from product)	damage (fire from product, light injury)	damage (fire, human injury)	damage (permanent injury, death, burn down house)
Room 10 <sup>8</sup> Allowa events	air conditioner in Jap units able frequency of fire s per unit:	oan:	damage	damage (smoke from product)	damage (fire from product, light injury)	damage (fire, human injury)	damage (permanent injury, death, burn down house)
Room 10 <sup>8</sup> Allowa events 10 <sup>-2</sup>	air conditioner in Jap units able frequency of fire s per unit: $^{2}/10^{8} = 10^{-10}$ case/unit	oan: /year	damage	damage (smoke from product)	damage (fire from product, light injury)	damage (fire, human injury)	damage (permanent injury, death, burn down house)

Fig. 1-1 R-Map for Consumer Products when one hundred million units are distributed.<sup>1-1)</sup>



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 WG I 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	音以	署	役 職	氏 名
主査	大学改革支援• 与機構	学位授	研究開発部		特任教授	飛原 英治
委員	公立諏訪東京理	<b> 【科大学</b>	工学部機械電気	工学科	准教授	今村 友彦
	産業技術総合研	F究所	機能化学研究部	明	主任研究員	滝澤 賢二
	産業技術総合研	F究所	安全科学研究部	明	主任研究員	椎名 拡海
オブザーバ	日本冷凍空調コ	業会	パナソニック㈱			室園 宏治
			パナソニック㈱			高市 健二
			㈱オカムラ			加藤 俊匡
			三菱電機㈱			山下 浩司
			東芝キヤリア㈱			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	コントロールフ	ズ空調(株)	佐々木 俊治
			三菱重エサーマ	ルシステムズ㈱	Þ	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	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	11科大学	工学部機械電気	工学科	講師	上矢 恭子
	東京海洋大学		海洋電子機械工業	学部門	教授	井上 順広
	產業技術総合研	F究所	安全科学研究部	明	研究グループ長	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
					専門調査員	高橋 辰彦
					主査	牛腸 誠
					主任	二関 洋子
事務局	日本冷凍空調学	会			事務局長	松田 謙治
						上村 茂弘
						西口章

Table 1-1 Investigation Committee on Next-Generation Refrigerants, WGII Committee List as of March 1, 2021

# 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 2020 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	·
第1章 はじめに	飛原英治(大学改革支援・学位授与機構)
第2章 東京大学の進捗	党超鋲(東京大学),齋藤静雄,伊藤誠
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	山下浩司(三菱電機㈱)

# 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.

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

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

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

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

ただし、 $\tau_{ij}$ :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)<sup>[2-1]</sup>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 cm<sup>3</sup>/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.

	Room	Showcase		
Software	ANSYS Fluent 18.1	ANSYS Fluent 2019 R1		
Simulation	Unsteady and compressible flow	Unsteady and incompressible flow		
Species transport	2 components (Air - Refrigerant)	2 components (Air - Refrigerant)		
Turbulence model	Realizable k-ε	(Ditto)		
Solver	SIMPLE	Coupled		
Scheme	2nd order upwind	(Ditto)		

Table 2-1 Simulation outline

	Table 2-2 Diffusion	n coefficient	
	R290-Air	R32-Air	R744-Air
Diffusion coefficient [m <sup>2</sup> /s]	1.11×10 <sup>-5</sup>	$1.35 \times 10^{-5}$	1.59×10 <sup>-5</sup>

実験室モデルについての概要を Fig. 2-1 及び Table 2-3 にまとめた.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 3800 mm×2400 mm×2550 mm で,エアコ ンの対面に、 $\phi$ 100 mm の排気口とドア下隙間 900 mm×7 mm を設けた.メッシュは境界近傍が細かく なるようにした.漏洩速度は、IEC 60335-2-40:2018<sup>[2-2]</sup>に基づき 4 min で全量室内に放出するようにし ている.冷媒に関しては、通常の計算では R290 と R32 を対象とした.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.これは、R290 の試験は着火の危険があるため、物性値の近い R744 で代替したからである.

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)<sup>[2-3]</sup>から算出した. R290 の場合のファン風量は 185m<sup>3</sup>/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 30 s 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 m<sup>3</sup>/h, Y: 定数=1,  $A_o$ : 空気流の開口面積 m<sup>2</sup>,  $\dot{m}_{leak}$ : 冷媒流量 kg/s, LFL: 燃焼下限界 kg/m<sup>3</sup>, 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	n
-------------------------	---

Flow rate	Equation (2-6)
Direction	Vertical direction for wall-mounted unit, horizontal direction for floor-mounted unit
Process	Process 1: 0~30 s: Refrigerant leak
	Process 2: 30 - 240 s: Refrigerant leak with fan operation
	Process 3: 240 s - : Fan operation

#### 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.冷媒濃度の測定については, 複数種類の冷媒を扱うことと,吸気による気流を発生させないことを目的として,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<sub>ref</sub>*は酸素濃度*X<sub>02</sub>と初期酸素濃度 X<sub>02.atm</sub>* から式(2-7)を用いて算出した.

$$X_{ref} = \frac{X_{O2,atm} - X_{O2}}{X_{O2,atm}}$$
(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

Name	Туре	Specifications
Mass flow controller	Fujikin	Gas: CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>
	(FCST1500)	Range: 0~250 L/min
		Accuracy: $\pm 2\%$ F.S.
Oximeters	ICHINEN JIKO	Gas: Oxygen
	$(JKO-O_2 Ver.3)$	Principle: Galvanic battery type
		Resolution: 0.01%
		Accuracy: $\pm 0.5\%$ ( $\geq 10$ vol%),
		$\pm 0.01\%$ (<10 vol%)

Table 2-6 Experimental conditions for validation of CFD model				
No	Refrigerant	Air vent	Refrigerant	
110.	Kenngerant	All Vent	amount (g)	
1-1			200	
1-2	D744	exist	300	
1-3	K/44		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<sup>[2-2]</sup>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することを前提とした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<sub>FL</sub>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 m<sup>2</sup>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 m<sup>2</sup>及び 9.12 m<sup>2</sup>のとき, R32 に関しては 12 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>以上のとき, R32 が 21.28 m<sup>2</sup>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 排気口を設けた.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 0 Pa, 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.換気口には圧力境界を設定した.冷媒種類は R290 とし、実験との比較の目的で不燃の R744 による計算も別途行った.また、計算時間やメモリ使用量などの都合で、部屋中央を対称面としている.

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 枚両方を同時に開く.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,凝縮器ファンが動作する条件においては、ファンの領域に均一な速度を設定し、定常状態から 開始する. Fig. 2-11 は冷凍機が下部に設置されている場合である.ショーケースの筐体は、中心線が実 験室モデルと一致するように設置し、壁面からは 100 mm 離している。複数並んだ状態を想定し、壁面 との隙間の両端に塞ぎ板を設けた。そのため、前面から下部ファンをに吸い込まれたガスは、後方の隙 間を通過して筐体天面の高さから室内空間に戻る。ファンの吹き出し方向が前面に向いている場合も同 様に下部から吸い込む構造としている。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、IEC 規格に基づき 3 秒で 60°回転するようにしている.凝縮器ファンの位置、吹 き出し方向、および風速をパラメータとした.



Fig. 2-10 Modeled room

Fig. 2-11 Details of display cabinet

#### 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.試験室の壁 のうち、外壁に接している側には断熱材を追設し、外部温度の影響を抑制している.また、試験室外に 設置されている照明を天窓から取り込むことで、室内の熱源を抑制している。冷媒供給装置の全体図は Fig. 2-4 と同じである.実験用のガスとしては R744 を用いた.

酸素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う ちの 6 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 12 箇所とした.後者の 6 個のセンサ に関しては,筐体の反対側の壁から 500mm の地点 A、および部屋の中央の地点 Bの2ヶ所に、100mm, 400mm, 1000mm の 3 つの高さで設置した。モデルの妥当性検討では,この 12 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、PWM 制御により 3 秒で 60 度の開扉となるよう調整した.本体の開口部の外周にクッションを貼り付け、閉扉時にアクチュエーターで圧縮されるようにすることで、開扉前のガス封入中に生じる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,実験室内に流出しないよう、ホースで試験 室外に導き放出する.庫内には,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 じたうえで庫内を攪拌し,ガス組成ができるだけ均一になるようにしている.



Fig. 2-12 Concentration measurement points



Fig. 2-13 Internal structure of showcase model

IEC60335-2-89: 2019 において、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/m<sup>3</sup>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 494g とした.冷媒は実験中の安全のため、密度が近くかつ不燃の R744 で代替した.

結果の例として、凝縮器ファンが動作していない条件を Fig.2-14, 下部から前方に 1.3m/s で吹き出し た条件を Fig.2-15 に示す. 双方の左側のグラフが IEC60335-2-89: 2019 に規定されている測定箇所の結果 で、右側が室内の各点での値である。ファンが動作しない条件については、開扉開始直後の 10 秒程度の 間に前面付近の P1, L2, R2 が最大値をとり、120~180 秒程度まで波打ちながら少しずつ減少する挙動が 実験、計算双方でみられる。ファンを動作させた条件においては、攪拌により濃度差の縮小が速く進む ことから、増減の波は 60 秒過ぎにはみられなくなり均一な濃度に近づいていく。この条件における P1,B1 に大きな差異があるのは、実験は実機を想定して Fig.2-11 の通りファンを左側に寄せている一方、計算 においては対称条件とするため中央に配置しているために、ファンの風が直接当たっていることによる。 また、開扉直後に濃度が急上昇する部分の時間幅が実験の方が長いのは、センサの応答時間が主な理由 であると推測される。

以上のことから、計算結果が挙動、値ともに実験値に概ね合致していると判断し、このモデルの妥当 性が証明された.したがって, R290 についての計算を進めた。



Fig. 2-14 Comparison of simulation and experiment without fan when 494 g of R744 is released.



Fig. 2-15 Comparison of simulation and experiment with a fan with a wind speed of 1.3 m/s at the bottom when 494 g of R744 is released.

#### 2.3.3 ファンの稼働が可燃領域の規模に及ぼす影響

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*<sub>max</sub>=150g とされていたが、2019 年に改訂された IEC 60335-2-89:2019<sup>[2-4]</sup>においては、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した可燃性冷媒の最大許容充填量に関する式が追加された.

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

R290のLFLは0.038 kg/m<sup>3</sup>なので,最大冷媒充填量は494gとなる.また、同規格内のAnnex CCにおいて、筐体周囲の8測定点すべてで実測を行い、5分以内に濃度がLFLの50%を下回ることも要件とされている。そこで、ファンによる攪拌の効果について検討した.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、測定点以外も含めた 室内の全域について、可燃ガス領域の大きさや存在時間について評価した。

Fig. 2-16 に R290 を 494g 放出する条件で下置きファンの風速を変化させた際の可燃領域の時間推移 について示す。Fig.2-16 の左側が可燃濃度(LFL-UFL)の体積を可燃ガス体積として計算した場合、右が 0.5LFL 以上の濃度の体積を可燃ガス体積として評価した体積である。後方に排気する条件では、1m/s で は可燃領域が 180s で、0.5LFL 以上の領域も約 405s で消滅し、2m/s では 40s で可燃領域が消滅した。前 方に排気する条件では、1m/s での 0.5LFL 領域の消滅まで 140s であった。一方、上部のファンで後方に 1m/s の風速を与える条件では、ファンが無い条件と比較しても可燃体積はあまり減らず、可燃体積の消 滅は 1620s 経過後であった。



(a) A gas in a concentration range of LFL to UFL is defined as flammable gas.

(b) A gas with a concentration of 0.5 LFL or higher is defined as flammable gas.

Fig.2-16 Effect of condenser fan on flammable gas volume when 494 g of R290 is released.

Fig.2-17 に、ファンが無い条件で冷媒充填量を変更した場合の可燃ガス体積の変化を示す。充填量 494g は先述の通りファンの稼働を前提とした充填量基準を引用しているため過大であり、670s 頃に 2.91m<sup>3</sup>で 減少に転じるまで緩やかに増加し、1800s まで可燃領域が残った。Fig.2-16 と比較すると下部ファンの効 果により可燃領域の存在時間が 90%以上減少したことになる。冷媒充填量を 700g まで増加させると、 可燃ガスの消滅には 50 分以上要する。冷媒充填量を 300g に減少させると 6 分程度で可燃ガス体積は消 滅するので、ファンが稼働していない場合の安全性の確保には、冷媒充填量が大きな影響を及ぼすこと が分かる。冷媒放出量が 300、494、700g の時のファンが存在しない条件での可燃ガス体積の時間積分値 は、可燃ガスの濃度範囲を LFL-UFL と定義する場合は、それぞれ 24.4、4345、1.21×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>s であった。 冷媒放出量が 494g のとき,濃度が 1/2LFL 以上の場合を可燃ガスと定義する場合は、1920 秒までで計算 を打ち切った値で 10150 m<sup>3</sup>s となり、極めて大きくなる。

Fig. 2-18 に、下部にファンを配置した条件における可燃体積の時間積分値を示す。風速値は正が後方 吹き出し、負が前方吹き出しを示す。風速 1m/s の前方吹き出しと後方吹き出しを比較すると、Fig.2-16 における推移は異なるが、可燃体積の時間積分値の大きさは同程度であった。



(a) A gas in a concentration range of LFL to UFL is defined as flammable gas.

(b) A gas with a concentration of 0.5 LFL or higher is defined as flammable gas.

Fig.2-17 Effect of refrigerant charge on flammable gas volume without fan.



Fig.2-18 Difference in time integration of flammable gas volume due to fan wind direction.

以上の結果から,凝縮器ファンが下部で稼働していることによる撹拌効果が、漏洩時のリスクを低減す る効果が大きく、また前後どちらの向きに吹き出しても一定以上の効果が見込めることが予想される. 安全のためには,凝縮器ユニットは下部設置に限定すべきだと考えられる.

#### 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の目的で,数値流体解析により冷媒充填量およびファンの稼働による、可燃領域の生成規模への効果の評価をおこなった.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 21m<sup>2</sup>の 部屋に設置し、R744 を用いて冷媒漏洩実験を行った.ショーケース内への漏洩を想定して冷媒を 導入・攪拌後、扉を開放した際の室内の濃度分布の推移を計測した。リスク評価上重要と予想さ れる漏洩後 5 分程度についての精度、およびそれ以降についての妥当性を検証した。
- 2) 凝縮器ファンが動作していない条件で冷媒充填量を増加させた場合の可燃領域の規模について評価した。R290を494g放出する場合は可燃ガスが30分以上残ることが分かった。
- 3) 凝縮器ファンの設置位置・風速・吹出方向ごとに、可燃領域の容積の推移および時間積分値を評価し、ファンの攪拌により可燃領域が減少する効果を検討した.ショーケースの下部に凝縮器ファンを設置する場合は、風向を前方としても後方としても可燃ガスを消滅させる効果はほとんど同じであることが分かった。
- 凝縮ファンをショーケースの上部に設置する場合は、冷媒ガスの撹拌効果はほとんど期待できないことが分かった。

# 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

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.Higashi ら<sup>[2-5]</sup>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、潤滑油の混合物ガスを圧縮し、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圧力上昇を伴った燃焼が発 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、Higashi ら<sup>[2-6][2-7]</sup>は、ディーゼル爆発 実験において、潤滑油の種類を変えた実験や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、潤滑油の混合ガスの圧縮燃焼実験を行い、燃焼抑制 剤の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. 潤滑油の燃焼を抑制できれば,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),エポキシ系安定化剤(A2),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.

#### 2.4.1 実験装置と実験条件

Fig. 2-19 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状況を模擬した実験 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: 4 サイクル改造エンジン)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 は除湿機を介して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, 配管よ り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 デザイン製, 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(
φ)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.理論空燃比はオイルの炭素/水素/酸素 の質量分率(CHO比)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(キスラー製 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)で測定した. 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.潤滑油 は粘度グレード 68 の POE である。本研究では添加剤として A1、A2、リン耐摩耗剤 P1 を用いた。冷媒 は R290、R1234yf、R32、R22 を用いた。Table 2-7, 2-8 に実験条件,潤滑油と添加剤の物性値をそれぞれ 示す.



Fig.2-19 Experimental apparatus

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 <sup>-1</sup> ]	18.8
Oil injection timing [°]	90 (at crank angle)
Inlet gas temperature [°C]	260±5
Oil equivalent ratio [-]	1
Refrigerat concentration [vol%]	0-64.9

Table 2-7 Experimental conditions

1	
Lubricating oil	Polyolester (POE)
Viscosity grade	68
Ignition point [°C]	408
CHO ratio [mass%]	70.1:10.8:19.1
Theoretical air-fuel ratio [kg kg <sup>-1</sup> ]	10.91
	A1: Penolic antioxidant
Additive	A2: Epoxy stabilizer
	P1: Phosphorus antiwear agent
Concentration of additive [wt%]	0, 1, 5

Table 2-8 Properties of lubricant and additives

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.オイルが噴射した直後から数秒後の間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.

#### 2.4.2 実験結果

# (1) 潤滑油の燃焼時の圧力上昇

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(φ=1)の混合ガスの圧縮着 火実験を行った.添加剤濃度は0,1,5wt%である.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. Fig. 2-20 は各添加剤濃度について 8~16 回の実験を行 いその平均圧力上昇値を示した.図の縦軸は添加物が ない場合の最高圧力で除した混合ガスの最高圧力で 横軸は添加剤濃度である.P<sub>max.baseoil</sub>=6.76MPaである。 添加剤 A1 と P1 の最高圧力は添加剤濃度の増加と共 に圧力が減少するのに対して、添加剤 A2 では 1%の濃 度で 5%と同様の最高圧力が低下することが分かる.





Fig. 2-20 Relationship between maximum pressure of mixed gas and additive concentration.

Fig. 2-21 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. 圧力の無次元化に使った P₀は、入口ガス温度を 260℃に設定し、空気のみ の圧縮による圧力上昇の最高値の測定結果である。エンジンのシリンダー内壁の摩耗等によるクリアラ ンスが増減し、上昇圧力が変化するので、各実験の始めに測定し、無次元圧力上昇の基準としている. P₀は実験ごとに異なるが、おおむね 2~2.3MPa である。Fig. 2-21 (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のが分かる. 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.



Fig. 2-21 Relationship between the maximum pressure of mixed gas and the refrigerant concentration for additive A1.

#### (3) エポキシ系安定化剤(A2)を添加する場合

Fig. 2-22 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. Fig. 2-22(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 A2 の 1wt%と 5wt%はそれぞれ 22vol%と 18vol%であり, 添加剤濃度の増加と共に上限値は低下する. R32 の燃焼範囲の上限の冷媒濃度を比較すると, 添加剤無 しは 20vol%、そして添加剤 A2 の 1wt%では 10vol%であり, 5wt%になると高圧力上昇を伴う燃焼範囲は 消えている。R1234yf の燃焼範囲の上限の冷媒濃度はあまり系統的な傾向が見られない. R290 において は, 添加剤濃度 1%でも燃焼範囲は消滅している。



Fig. 2-22 Relationship between the maximum pressure of mixed gas and the refrigerant concentration for additive A2.

#### (4) リン系摩耗抑制剤(P1)を添加する場合

Fig. 2-23 に添加剤 P1 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. 2-23 Relationship between the maximum pressure of mixed gas and the refrigerant concentration for additive P1.

#### 2.4.3 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、エポキシ系安定化剤 A2、リン系摩耗防止剤 P1 で、それ らの濃度は 0,1,5wt%である.実験結果より次のような知見を得ることができた。

- 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、圧縮機の破裂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 A2 は 1%の添加でも多くの冷媒に 対して抑制効果を示した。特に、R290 や R1234yf についてはディーゼル爆発の発生濃度範囲を著し く縮小させることができた。
- 3) R22 については、少量の添加剤では爆発の抑制をすることは困難であった。不燃性の R22 のディー ゼル爆発を起こす濃度範囲が広い原因の探求は今後の課題である。

# 参考文献

- 2-1) Kirk, R.E. and Othmer, D.F., 1999. Concise Encyclopedia of Chemical Technology, Wiley.
- 2-2) 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.
- 2-3) 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.
- 2-4) 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 motercompressor", International Electrotechnical Commission, (2019).
- 2-5) Higashi, T., Saitoh, S., Dang, C., Hihara, E., 2017. Diesel combustion of oil and refrigerant mixture during pumpdown of air conditioners. Int. J. Refrigeration 75, 300-310.
- 2-6) 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>.
- 2-7) Higashi, T., Tamai, Dang, C., Hihara, E., Shitara, Y., 2018. Effect of additives to suppress the combustion of oil on pump-down 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<sup>3-1)</sup>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<sup>3-2)</sup>、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たばこに代表される高温熱面について,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」「高温熱面」「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.

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, Elect		
		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		

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

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<sup>3-3)</sup>は、火花放電の継続時間を 10<sup>-8</sup>~10<sup>-7</sup> s と見積もっている。Strehlow<sup>3-4)</sup>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<sup>-5</sup> 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<sup>3-5,3-0</sup>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(m<sup>3</sup>)、Qは反応体積の物質の発熱量(kJ/m<sup>3</sup>)、C<sup>n</sup>は反応速度の濃度 項、Cは単位体積中のモル数(mol/m<sup>3</sup>)、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

$$\dot{q}_2 = hS\left(T - T_0\right) \tag{3-2}$$

で与えられる.ここで、hは熱伝達率(kW/m<sup>2</sup>K)、Sは系の境 界の面積(m<sup>2</sup>)、Tは系内部の温度(K)、 $T_0$ 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 ignition<sup>3-5)</sup>.

# 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<sup>3-7)</sup>はこの時間を"臨界着火時間"とよび、およそ 100 μs (10<sup>-4</sup> s) としている.その根拠として Strehlow<sup>3-8)</sup>が示しているプロパン-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 10<sup>-4</sup> 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 <sup>3-9-3-13</sup>.

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<sup>-3</sup>~10<sup>-2</sup> s 程度か かるとされている <sup>3-7</sup>ことに対して、最小着火エネルギーは 10<sup>-8</sup>~10<sup>-7</sup> s の放電時間 <sup>3-3</sup>)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. さらに 2020 年度は、回路の負荷 特性が放電エネルギー及び着火に及ぼす影響を調べるために、抵抗、インダクタンス、キャパシタ ンスを可変とした回路を構成して実験的評価を実施するとともに、プロパン/空気混合気中に、接 点を露出させたリレーを設置して開閉動作を行い、着火の有無を調べた.

(2) 既往文献による着火性の評価

属ら<sup>3-14)</sup>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 0.6 A 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<sup>3-15-3-17)</sup>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,実機としてドライヤー2種,電動ドライバー2種,LED電球1種,及びモデル回路として可変抵抗のみ(R回路),可 変抵抗とコイルの組み合わせ回路(RL回路),可変抵抗・コイル・コンデンサ組み合わせ回路(RLC回路)の3パターンとした(Table 3-2).実験実施場所の交流電源周波数が 60 Hz 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

(i)実機使用の場合

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). (ii)モデル回路使用の場合

Fig.3-4 は、放電開始から 100 µs 以内に 生じたエネルギーと各要素値の関係を回 路要素ごとにまとめたものである.まず R 回路では、回路抵抗が大きくなるほど放電

Table 3-2 List of specification of test

Type of relay	es. Type of Electrical Load			Consumption Power (W)	
Type 1	Inductive & Resistance	Hair dryer	Туре А	HIGH	840
				MIDDLE	440
				LOW	40
			Туре В	HIGH	1050
				MIDDLE	1000
				LOW	700
	Capacitive &	Constructurity on a	Type A		130
-	Resistance	Screwuriver	Type B		210
	Resistance	Electric bulb		50	
Type 2	Inductive & Resistance	Hair dryer	Туре А	HIGH	840



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

エネルギーが小さくなる結果が得られた. RL 回路, RLC 回路においては, コイルのインダクタンス 及びコンデンサの容量が大きくなるほど放電エネルギーが小さくなる傾向がみられた. これらのこ とから, 放電エネルギーの大小は回路を流れる電流値に関係づけられ, 電流値が大きいほどエネル ギーも大きくなる傾向が認められた.

(4) 着火実験



Fig.3-4 Averaged energy of spark discharge at the gap of electrical contact with various characteristic values of electrical circuit.

(a) only R-circuit (b) RL circuit (c) RLC circuit

(a)実験概要

Fig.3-5 に示すように、接点保護カバーを取り外して接点を露出させたリレー(OMRON MK2P)を 燃焼容器(プラスチックケース)内に設置した.このケース内にプロパンを導入してプロパン/空 気予混合気を形成し、接点を動作させて着火の有無を調べた.容器上面はアルミホイルで封じ、着 火時には破裂口として圧力を放散できる構造である.燃焼容器内のプロパン濃度は5.2 vol%とした. 前節での検討より、電流の大小が放電エネルギーを大きく支配することが分かったが、回路要素の 定格容量が小さいために AC100V をそのまま抵抗に印加すると破損してしまう.そこで10Ωの抵抗

を使用し、スライダックで供給電圧を調整して、回路要素の定格容量内でアンペアオーダーの電流を流すことのできる回路を構成した.設定電圧は55,60,70 ACV とした.接点の開閉回数は最大60回とし、着火までに要した開閉回数の逆数を着火頻度と定義した.

#### (b)結果

本実験では着火が認められ,接点での放電によって火炎 が容器全体に伝播し,アルミホイルを突き破って外気へ伝 播した.Fig.3-6に公称電流(供給電圧を抵抗値で除した値) と着火頻度の関係を示す.電流値が大きくなるにしたがっ て着火頻度が指数関数的に増加する傾向がみられた.すな わち,着火頻度は回路電流を1つの指標として整理できる 可能性が示唆された.なおここで回路電流で着火頻度を整 理したのは,交流放電の場合は通電時の初期位相によって 電流電圧波形が大きく異なるために放電エネルギーを定義 しにくいためである.ただし現象論としては,着火は未燃 気に供給されるエネルギー(または時間当たりエネルギー) により支配されると考えられるので,より学術的知見に沿 った整理方法の確立を次年度の課題としている.

# 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<sup>3-18)</sup>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



Fig.3-5 Photo of experimental setup on ignition test by open/close of the mechanical relay with electrical



Fig.3-6 Relationship between the ignition frequency and nominal value of current.

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.3-7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<sup>3-19</sup>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

(3)

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ネ ルギーを求め,着火能力の評価を行った(実験 B).これ



Fig.3-7 Photos of test switches for lighting. Upper: Body Middle: Button Low: Electrical contacts Left: Type A, Right: Type B

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). 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.3-7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10 g/minとし、漏洩量は 41 g 及び 87 g 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.3-8 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(40,60,100 W) 及び LED 電球(60 W)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



Fig.3-8 Photo of setup for the measurement the discharging energy of wall-mounted switch for lighting.

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(40,60,95W各1種類及び100W3種類)及びHf蛍光灯(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.3-7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.3-8 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150×150×150 mm 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 mm<sup>3-20)</sup>)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 <sup>3-21</sup>)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<sub>s</sub>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).

 $V_{s} = \frac{Bpd}{K + \ln(pd)}, K = \ln\left\{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right\}$ (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<sup>3-22)</sup>.2020年度は、海外製品への適用 を念頭にAC230V対応で世界の半数以上の国使用されている、SEタイプ(Cタイプ)のコンセント プラグを用いて着火性を評価した.

(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

#### (a)AC100 V 製品(A タイプ)対応実験

Fig.3-9 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.3-10 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.

Table 3-3 List of specification of test devices.

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

Fig.3-10 Photo of the electrical socket.



Fig.3-9 Photo of setup for the ignition test of propane/air mixture by plugging or unplugging the power cable of the general electric appliances.

# (b) AC230 V 製品 (SE タイプ) 対応実験

Fig.3-11 に通常の状態(左)と、実験で使用したカバー部分を最大限カットした状態(右)のコンセント を示す. Fig.3-12 に示すように、一辺 200 mm のポリカーボネートプールの上部をアルミホイルで封じた空 間内にコンセントを取り付け、実験を行った.コンセントのカバー部分をカットすることにより、コンセン ト内部もプロパンガス雰囲気内に暴露される状況とした.容器内のプロパンガス濃度は、約4%となるよう に調整した.印加電圧は 230V とし、負荷は可変抵抗器を用いて 2 種類(50 Ω, 300 Ω)とした.プラグの抜 き差し速度は 2 種類(quick, slow)とし、その際の荷重をフォースゲージで計測し、荷重が一定となるよう 調整した.1 ケースにつき 50 回測定を行い、コンセントとプラグ間の電圧と電流をそれぞれオシロスコー プで記録し、放電エネルギーを算出した.



Fig. 3-11 Photo of electrical plug socket (SE type)



Fig. 3-12 Photo of setup for the ignition test of propane/air mixture by plugging or unplugging the power cable.

- (4) 結果及び考察
- (a) AC100 V 製品対応実験
  - (a-1) 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.3-13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.

(a-2) 着火及び火炎伝播機構

Fig.3-14 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.3-14(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,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)



Fig.3-13 Dependence of the ignition probability by plugging/unplugging on the consumption power.

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.

これに対して, Fig.3-14(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.3-14(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6ms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.3-14(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.3-14 High-speed images of test space around an electrical socket. Electrical load: hair dryer (type B)

(b) AC230 V 製品対応実験

Fig. 3-15 にコンセント付近でのプラグの様子を示す. 300 Ω OFF 時の quick (Fig.3-15(a)), 50 Ω OFF 時の quick 及び slow (Fig.3-15(b), (c))の写真では、コンセント内部が発光している様子が観察できた. 300 Ω OFF 時の quick では、発光の範囲は微小であり、写真に示した1回のみが観察できたケースである. 50 Ω OFF 時 の quick 及び slow では,青白い光が見られ,(a)に比べ発光範囲も広い. このことから, 300 Ω OFF 時の quick でみられた発光は放電によるものと推測されるのに対し, 50 Ω OFF 時ではハウジングとスイッチボ ックスの隙間から黄色及び青白色の発光が一瞬認められた (Fig.3-15(b), (c)). この現象は 50 Ω OFF 時の quick では 20/50 回, 50 Ω OFF 時の slow では 8/50 回見られた. これはプラグとコンセントの電気的接触部

に存在したわずかなプロパン /空気混合気への着火である 可能性がある.しかし,アクリ ルプール上部に設置したアル ミホイルが吹き飛ぶ等の変化 も見られず、ビデオ画像から も火炎がアクリルプール内の プロパンガスに広がることは なかった.着火時の放電エネ ルギーは、63~328 mJ となり、 プロパンガスの最小着火エネ ルギー0.7 mJ を大きく超える







Fig.3-15 Photo of test space around an electrical socket and plug. (a) 300  $\Omega$ - OFF-quick, (b) 50  $\Omega$ - OFF-quick, (c) 50  $\Omega$ - OFF-slow

50 mJ 以下ではこの発光は認められなかった.

#### 静電気スパークによる着火性の評価 3.4.5

(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<sup>3-23)</sup>.

- 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)CV<sup>2</sup> (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100mJ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.3-16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



Fig.3-16 Relationship between the charge potential and capacitance in each energy by spark discharge<sup>3-22)</sup>.



Fig.3-17 Relationship between the charge potential and discharging energy by brush discharge<sup>3-22</sup>).



5



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ネルギーとの関係は Fig.3-17 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.3-18 に示すように絶縁物体の厚さが 8 mm 以下でかつ絶縁層の電位が 4 kV 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4kV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<sup>3-24)</sup>. 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4kV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<sup>3-24)</sup>. 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.3-17 から,放電エネルギーは 10<sup>-5</sup> 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<sup>3-25)</sup>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 <sup>3-26</sup> (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<sup>3-27)</sup>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<sup>3-28), 3-29)</sup>(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 <sup>3-30</sup>(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 <sup>3-31)</sup> (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,電気炊飯器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

一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 <sup>3-32)</sup>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.

# 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 3-33-36)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.3-19(a)に示すアクリル製および Fig.3-19(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 角および 10 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, プロパン濃度を 2.1-9.5 vol%, 電圧を 50-90 V (25 mm 角ヒーター)及び 21-25 V (10 mm 角ヒーター)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.3-19 Schematic diagram and photo of closed-loop combustion chamber.

# 3.6.3 実験結果及び考察

(1) 着火時間と供給パワーの関係

加熱開始から着火までの所要時間 ( $t_{ig}$ ) とヒー ター単位面積 (A) 当たり供給パワー (P/A) の関 係は、いずれのヒーター寸法の場合も、P/Aを増 加させると  $t_{ig}$ が短縮され、かつ、流速の大小に よる差は小さくなった. 一方 P/A を低下させる と  $t_{ig}$ が指数関数的に増加し、最終的には無限大 (すなわち不着火) となる傾向がみられた. この 「着火時間が無限大」となる P/A 値よりわずか に大きな熱流束が壁面から未燃気へ供給される と着火することから、ここではこの値を "臨界着 火熱流束  $q_{w_c}$ " と呼ぶことにする.  $q_{w_c}$ は流速に 依存して増加した. Fig.3-20 では、いずれのヒー ター寸法の場合も流速ごとにおおむね 1 つの曲



Fig.3-20 Dependence of  $q_{w_c}^*$  on the flow velocity.

線を描いており,濃度の影響は小さいようである.ただし,単位面積当たりの供給パワーで着火時 間を整理したにもかかわらず, qwcは10mmヒーターの場合のほうが有意に大きな値をとった. 臨界着火熱流束のふるまい

(2)

いま、ヒーターから未燃気へ流れる熱流束を $q_w$ 、Cをヒーターの熱容量、 $T_w$ をヒーター温度、tを 時間にとると、以下の式が成り立つ.

$$q_w = \frac{P}{A} - \frac{C}{A} \cdot \frac{dT_w}{dt}$$
(3.4)

着火は  $q_w > q_w c$ の条件で成り立ち,(1)に述べた結果から  $q_w c$ は流速ごとに一定で濃度によらな いとすると, P/A が qw cよりも比較的大きな場合は,右辺第2項が(すなわち dTw/dt が)少々大きく ても容易に qw cを上回るので早期に着火する.これに対して P/A が qw cをわずかに上回る場合は, 右辺第2項が十分小さくならないと着火しないので tig が長くなり,着火温度もその分上昇する.し たがって、着火時の P/A と  $dT_w/dt$  の関係をプロットし、 $dT_w/dt = 0$  となる切片の値を  $q_w c$  と定義し た. Fig.3-20 は qwc と流速の関係を示したものである. いずれのヒーター寸法の場合も流速増加に伴 って qwc が単調増加している. すなわち, いずれのヒーター寸法でも流速が大きくなると着火しに くくなることを示す.これは経験的にも妥当であるし、本実験の系を1次元ポテンシャル流れと仮 定してエネルギー及び物質保存の基礎式を数値的に解いた結果 3-34)とも符合する.

本実験の系を1次元ポテンシャル流れを仮定してモデル化した次元解析 3-36)によると, 無次元臨界 着火熱流束  $q_w c^*$ は以下の式で書ける.

$$q_{w_{-c}}^{*} = \frac{q_{w_{-c}}}{\rho c s \Delta T} = f\left(\frac{\lambda}{\rho c D}, \frac{\rho c s^{2}}{a \lambda}\right)$$
(3.5)

ここで $\rho$ は密度, cは比熱, sは層流燃焼速度,  $\Delta T$ は温度差, Dは拡散係数, aは伸縮ひずみ速度, λは熱伝導率である.右辺第1項はルイス数(物質拡散速度と温度拡散速度の比),第2項はダムケ ラー数(化学反応の特性時間と滞留時間との比)を表す.予混合気燃焼ではルイス数は1とみてよ い場合が多いのでここでもそのようにみなすと, qw c\*はダムケラー数のみに依存することになる. こ こで、伸縮ひずみ速度 a は流れがヒーターに及ぼす垂直応力に関係づけられるはずであるから、a∝ u/L(uは流速,Lはヒーターの一辺の長さ)で書けるとすれば,式(3.5)は以下のように書き直せ る.

$$q_{w_c}^* = f\left\{\frac{\lambda}{\rho cD}, \frac{\rho cs^2}{(u/L)\lambda}\right\}$$
(3.6)

実験結果に式(3.5)を適用して求めた qw c\*とダムケラー数の関係をみると, qw c\*はダムケラー数 のほぼ平方根に反比例し、理論解析の結果ともおおむねよく一致した. このことから、壁面サイズが 小さくなると伸縮ひずみ速度が小さくなるために、臨界着火熱流束が増加すること、その増加度合 いはダムケラー数によって見積もられること、燃焼速度の影響は両辺から相殺されて発現しなくな ることが示唆された.

(3) たばこによる着火性の評価

> 着火されたたばこの熱面によって,プロパン/空気予混合気への着火が生じるか否かを調べるため に、たばこ熱面から未燃混合気への熱流束をフーリエの法則によって見積もった. 伝熱厚さを1mm とすると、熱流束は約17kW/m<sup>2</sup>となる.これをFig.3-20の関係にプロットすると、25mm角の臨界 着火熱流束よりもさらに小さい値となる. たばこの直径は約7mm であるから, この寸法に対応する 臨界着火熱流束は 25 mm 角の結果よりもさらに大きいと考えてよい.よってたばこの熱面による着 火が生じる可能性は極めて小さいと考えられた.

# 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.

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 (1)

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.また,モデル回路を用いた実験から,回路の電流の大小が放電エネルギーの大小に関係することを明らかにし,回路電流の値を指標として着火頻度を予測できる見通しを得た.
- (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) プロパン/空気予混合気中で電源プラグを抜き差しした実験により,一般家電製品(ドライヤー)を 接続した場合に着火する場合がみられた.また,海外規格(AC230V)においても同様に,着火する 場合が認められた.いずれの場合も最小着火エネルギーよりは 2~3 桁程度大きな放電エネルギーが 計測された.
- (5) 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) 可燃性混合気中で使用電流値の異なる様々な負荷実機を使用してリレーを動作させる着火実験を実施し、着火の有無及び着火頻度のデータを蓄積して、電流値及び消費電力と着火頻度の関係を明らかにすることにより、着火性評価の高度化を達成する.さらに、最小着火エネルギーとの比較では十分に大きな放電エネルギーを生じているにもかかわらず着火しない場合がある原因の1つとして、放電時間が大幅に(10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup> s 程度)異なることによる、単位時間当たりの供給エネルギーの相違が考えられるので、放電エネルギーを一定として放電時間のみを変化させることのできる測定回路を構成し、有接点リレーの放電による着火性評価に対応可能な着火性評価指標の確立を目指す.
- (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) 供給パワーと着火時間の間には明確な相関があり、これに対して濃度が寄与する影響は小さいこと が分かった.また、ある供給パワーで着火時間が無限大(すなわち不着火)になることから、着火の 成否を支配する臨界着火熱流束が存在し、その値は流速が大きくなるにしたがって大きくなった(す なわち着火しにくくなった).この傾向はヒーター寸法の大小によらないが、臨界着火熱流束の値に 対しては、ヒーター寸法が小さいほうが有意に大きくなった.
- (2) 無次元臨界熱流束 q<sub>w\_c</sub>\*をダムケラー数の関数として表現することにより,異なるヒーター寸法における臨界着火熱流束を予測可能であることを見出した.
- (3) モデル実験及び理論解析で得た臨界着火熱流束の値及びヒーターサイズへの依存性を勘案すると, たばこの熱面による着火性は極めて小さいと考えられた.

### 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」, https://www.env.go.jp/press/y067-07/ref01\_5.pdf, (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

τ], <u>http://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo\_sangyo/kagaku\_busshitsu/pdf/005\_07\_00.pdf</u> (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: <u>https://japaneseclass.jp/dictionary/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%88%86%E8%A7%A3</u> (2019).
- 3-31) 中年男の日記帳: 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]: https://insertyourname.blog.so-net.ne.jp/2015-04-09 (2019).
- 3-33) 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)
- 3-34) 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).
- 3-35) 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 13<sup>th</sup> International Symposium on Fire and Safety Science, Waterloo, Canada, (2020, accepted).
- 3-36) 桑名一徳, 今村友彦: 可燃性予混合気の熱面着火の相似則-加熱壁面に衝突する淀み流の場合-, 実験力学, 20(4), 254-257 (2020).

# 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の担当研究項目は、可燃性冷媒が室内で漏洩し可燃濃度域が形成された場合に、 室内に存在する家電等の機器類が着火源となり得るか否かを調査する点火能評価と、ルームエアコン室内機 と冷蔵機内蔵リーチインショーケースで想定される漏洩着火事故の実規模フィジカルハザード評価に分類 できる.以下の項では実規模実験の条件設定に合わせ、可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価、 ルームエアコン室内機の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価、リーチインショーケースの拡散挙 動計測と実規模フィジカルハザード評価にまとめて報告する.

# 4.2 可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価

地球温暖化効果の小さい次世代冷媒として期待されている可燃性ガスのプロパン(R290)を,冷媒として 使用した機器類から漏洩事故が起こった場合のリスク評価上の着火確率を決定するための基礎データとし て,静電気着火が最も起こりやすいとされている 5.2%程度のプロパン-空気予混合気を満たした容器内で, 電気機器類を繰り返し遠隔操作し,着火の有無を観測した.

#### 4.2.1 評価対象機器の選別と実験手法

評価対象機種は、着火源となり得る電気部品のスクリーニングを担当している諏訪東京理科大学や、A3 冷媒のリスク評価を行っている日本冷凍空調工業会と検討して決定した.これまで、レーザープリンター、 ヘアードライヤー、電気掃除機、電動ドライバー、ホットプレート、石油ファンヒーターの評価実験を行った.

実験は石油ファンヒーターの評価実験を除き,1.00 m×1.00 m×1.00 mの4 面のアクリル壁と鋼製床面を 持ち,天井面にビニルシートを張ったアクリル製容器を用いて行った.着火が起こった場合に機器類の一部 が爆発により飛散する可能性があるため,アクリル製容器は産総研爆発ピット内に設置して行った.アクリ ル製容器を用いた実験では,機器類に遠隔操作用のエアアクチュエーターを取り付けて容器内に設置した 後,プロパンと空気を流量調整して容器内に導入した.濃度センサーによりおよそ 5.2%のプロパン濃度に 調整して維持し,爆発ピット外から機器類を遠隔操作した.着火は赤外高速度カメラにより観測した.

#### 4.2.2 点火能評価の実験結果

#### レーザープリンター

レーザープリンターの評価では、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た. 同機種の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、いずれの個体でも異常は見られなかった.

#### ヘアードライヤー

ヘアードライヤーの評価では、構造が一般的と考えられる機種の中から使用電力が大きくブラシモーター を持つ機種を選定し、同機種の4台の個体で実験を行った.うち2台について、本体スイッチを温風にセッ トしたまま容器外部から電源のオンオフを操作したところ、10秒間オンと5秒間オフを100回繰り返して も2台とも着火は観測されなかった.また3台の個体について、容器内でエアアクチュエーターにより本体 スイッチを温風のオンオフで操作したところ、いずれも1~2回程度の繰返しで着火が確認された.うち1 台の個体では、オンオフの繰返し時間を長く設定することで、1回目のオフ動作時に着火していることが確 認された.(Fig.4-1)これらの結果から、ヘアードライヤーでは本体スイッチのオフ動作が着火源となると 考えられる.

#### 電気掃除機

電気掃除機の評価では、紙製のごみ袋を内蔵するタイプの中から使用電力が大きい機種を選定し、同機種

の2台の個体で実験を行った.うち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-空気混合気への火炎伝播や爆発は起こらなかった.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 た方の個体では実験後,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.4-2)

b)

a)



c)



Fig. 4-1 Images taken by near infrared high-speed video camera



Fig. 4-2 Vacuum cleaner emitted smoke

#### 電動ドリル

電動ドリルの評価では、構造が一般的と考えられる機種の中から使用電力が大きくブラシモーターを持つ 機種を選定し、1台の個体で実験を行った. 高速回転・負荷あり、高速回転・負荷なし、低速回転・負荷な しの3条件で、容器外からエアアクチュエーターを用いて回転オン6秒間オフ4秒間を100回繰り返した が、いずれの条件でも着火は確認されなかった.

#### ホットプレート

ホットプレートの評価では、電源スイッチと一体化した温調用バイメタルを本体内部に持つ機種を選定し、 1 台の個体で実験を行った.エアアクチュエーターでスライドスイッチを遠隔操作したところ、電源オン5 秒間オフ5秒間を20数回繰り返した時点で着火が確認された.

#### 石油ファンヒーター

石油ファンヒーターの評価では、ヒータの点火時ではなく運転時の点火能を評価するために容器内に石油 燃焼用の空気を送り続ける必要があり、1.00 m×1.00 m×1.00 mの立方体ステンレス骨格と鋼製床面を持つ 構造物の4壁面と天井にビニルシートを張ったビニルハウス状の実験容器を、鉱山堆積場跡地の野外実験場 に設置して実験を行った.ビニルハウス状の実験容器内の温度上昇を抑えるため小型の機種を選定し、同機 種の2個体で実験を行った.石油燃焼用の空気を送り続けている容器内に設置した石油ファンヒーターが、 点火タイマーにより点火し容器内の温度が上昇し始めたことを確認した後、空気圧作動弁を遠隔操作してプ ロパンを容器内に導入した.300gのプロパンを急速に供給した場合、150gのプロパンをより低流量で供給 した場合のいずれでも、着火とビニルの破膜が観測された.

Fig. 4-3 に 300g のプロパンを急速に供給した場合の高速度カメラ画像から切り出した 100m 秒ごとの静止 画を示す. 放出中に着火・破膜が起こった際(Fig. 4-3 b)の火炎は視認しにくく,プロパン濃度が低い状態 で着火していると考えられる.着火・破膜後にプロパン放出口で放出拡散火炎に移行していることが確認で きる.(Fig. 4-3c)



Fig. 4-3 Kerosene fan heater ignites propane

### 4.2.3 点火能評価のまとめと計画

ヘアードライヤー,電気掃除機,ホットプレート,石油ファンヒーターでは着火が確認された.単一の機 種を用いた実験結果ではあるが,可燃濃度域内で作動した場合のリスク評価上の着火確率は1とするべきだ と考えられる.使用電力や構造の違い等によって着火が起こらない可能性がある機種が判明した場合は,追 加試験を検討する.

レーザープリンター,電動ドリルでは着火が確認されなかった.有限の機種数・繰り返し実験回数での評価で,防爆構造を持たない機器のリスク評価上の着火確率をゼロとすることはできないが,ある程度の機種数・繰り返し実験回数で着火が起こらないことが確認できれば,その繰り返し回数に応じてリスク評価上の着火確率を下げることができると考えられる.リスク評価上の着火確率が下がると期待される機器については,複数機種での繰り返し実験を検討する.

# 4.3 ルームエアコン室内機の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価

プロパン(R290)を、冷媒として使用したルームエアコン室内機から漏洩事故が起こった場合のリスク評価上の危害度を決定するための、漏洩着火事故の燃焼影響を評価した.実使用条件を想定して実物大の模擬室内にルームエアコン室内機を設置し、想定される複数の漏洩条件での漏洩拡散挙動を計測して、着火時に危害度が大きいと予測される条件について、点火実験を行って燃焼影響を評価した.

### 4.3.1 冷媒漏洩事故事例の検討と漏洩条件の決定

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. そこで微燃性冷媒を使用した室内機での漏洩条件を参考として漏洩条件を決定した. 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<sup>4-1)</sup>には,R32を用いたビル用マルチエア コンで報告された漏洩事故の漏洩箇所,漏洩箇所形態,相当径等が記載されている.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<sup>-1</sup>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漏洩条件として,充填量の全量を4分間で放出する条件を主に採用 し,その他の時間で放出する場合,配管の破断に相当する口径から30 ℃での自圧で放出する場合を加えて 実験を行った.また漏洩箇所としては,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.2016 年度に行った前事業での計測実験 により,ピンホール等から室内空間に直接放出が起こる場合は,噴流により室内気の撹拌が促進され,可燃 濃度域が形成されないことが分かっている.

#### 4.3.2 ルームエアコン室内機における漏洩拡散挙動計測の実験手法

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 となる位置にスプリット型ルームエアコンの室内機を設置した. ルームエアコン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 機構を持つものとした. 2.7 m×2.7 m の空間にそれぞれ 1 つずつ計 2 つの模擬扉下隙間 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.

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, IEC60335-2-40:2018<sup>4-2)</sup>で採用されている片岡の式(4-1)を用いて求めた送風等の 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)を用いたが, 今回の実験では部屋の高さとして 2.4mを使って計算している. 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.

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

$$m_{\rm max} = 0.5 \times LFL \times A \times h \tag{4-2}$$

*m<sub>max</sub>*:最大許容充填量,*LFL*:燃焼下限界,*A*:床面積,*h*:機器下面高さ,*h*:部屋の高さ(2.2mが上限)

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、マスフ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で行った.

#### 4.3.3 ルームエアコン室内機における漏洩拡散挙動計測の実験結果

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 条件を変えながら濃度分布時間履歴を計測し,点火実験による燃焼影響評価を行う条件を検討した.

式 4-1 を用いて計算した最大許容充填量を放出したすべての実験で,放出終了後にプロパンの可燃濃度域 は観測されなかった.またエアコンの送風機能を用いて室内気を撹拌したすべての実験で送風運転中に可燃 濃度域は観測されなかった.つまり,放出終了後に可燃濃度域が観測されるのは,送風を前提に緩和された 許容量を送風なしで放出した場合のみであった.

#### 2.7 m×2.7 m 模擬室実験

2.7 m×2.7 mの模擬室を用いた実験では、放出量(想定充填量)、放出位置、放出方法、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濃度分布時間履歴を計測した.

2.7 m×2.7 mの模擬室を用いた実験では,式4-1と4-2を用いて計算した放出量の比が1.5 程度と小さいため,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,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 30 ℃の自圧で放出させた場合,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.

#### 2.7 m×5.4 m 模擬室実験

2.7 m×5.4 m の模擬室を用いた実験では、放出量(想定充填量)、放出方法、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濃度分布時間履歴を計測した.

式 4-1 を用いて計算した最大許容充填量を放出した実験では,放出中の室内機下方でのみ可燃濃度域が観測され,放出終了後にプロパンの可燃濃度域は観測されなかった.(Fig. 4-4b)



Fig. 4-4 Time profile of propane concentrations

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

#### 2.7 m×5.4 m 模擬室・式 4-2 充填量実験(放出位置・扉下隙間の影響)

4分全量放出の放出条件で,放出位置を熱交換器中央,熱交換器-配管接続部,室内機内配管接続部として 計測を行ったところ,熱交換器中央の場合のみ放出終了後も可燃濃度域が観測された.扉下隙間がない状態 で可燃濃度域が観測された時間は80分程度であった.800 mm×4 mm の扉下隙間を1つ設けた場合は55分 程度,2つ設けた場合は40分程度に短縮されたが,放出中や放出終了直後の拡散挙動に大きな変化は見ら れなかった.これは,扉下隙間から排出されるプロパン-空気混合気の濃度は計測から2~3%程度であり, その体積は室内機付近から放出される100%のプロパンとほぼ同体積だからである.

#### 2.7 m×5.4 m 模擬室・式 4-2 充填量実験(放出方法・放出時間の影響)

放出位置を熱交換器中央として、均等全量放出の放出時間を3,4,5,6,8,12,16分に変化させて行った.4分,5分で全量放出した場合の室内へのプロパン拡散挙動に大きな違いは見られなかった.それ以外の時間で放出した場合は、放出中・放出終了後のプロパン濃度はより低く、可燃濃度域が消失するまでの時間も短かった.12分で放出した場合、放出終了後に可燃濃度域は見られなかった.同様の放出位置で放出方法を30℃の自圧での急速放出とした場合、放出中のプロパン濃度は高かったが、放出終了後には可燃濃度域は見られなかった.プロパンガスの噴出により室内気の撹拌が促進されたためと考えられる.この結果から、広く冷媒の漏洩リスク評価で用いられている4分全量放出の条件は、形成される可燃濃度域の時空積の大きさを最大とする最悪条件となっていることが確認された.

#### 2.7 m×5.4 m 模擬室・式 4-2 充填量実験(送風の影響)

放出位置を熱交換器中央として式 4-2 の充填量を 4 分全量放出した際に, エアコン送風機能を「弱・水平」 に連続運転していた場合には、プロパンは室内に拡散され、放出中からどの計測点でも可燃濃度のプロパン は計測されなかった. Fig. 4-5 に 680g のプロパンを 4 分で全量放出した場合の送風の有無によるプロパン拡 散挙動の違いを示す.

また,4分間全量放出中の放出開始から30秒後,1分後,2分後に,エアコン送風機能を「最強・下向」 に開始した場合のプロパン濃度拡散挙動を Fig. 4-6 に示す.送風開始後10~20秒程度で室内機下方の可燃 濃度域が消滅した.



Fig. 4-5 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 gas phase 4 minutes. a) no airflow. b) minimum horizontal airflow continuously.



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) maximum airflow started 30 seconds after discharge. b) 1 minute after discharge. c) 2 minutes after discharge.

# 4.3.4 ルームエアコン室内機における実規模フィジカルハザード評価の実験手法

日立セメント太平田鉱山堆積場跡地の野外実験場に、2.7 m×5.4 m×高さ2.4 mの鋼製模擬室を設置し, 拡散挙動計測と同様の方法でプロパンを放出して点火し,燃焼影響評価実験を行った.現実の部屋に近い条 件で燃焼影響を観測するため、2.7 m×5.4 m 空間のルームエアコン室内機を設置した短辺の反対側壁中央 に幅 180cmの引き違いの掃き出しガラス窓を設置した.点火には,発電機からの交流 100V をネオントラン スで 15kV に昇圧して放電させた電気スパークを用いた.

燃焼影響を評価するため,放射熱センサーを室内と室外に2つずつ計4台設置した.またひずみ式圧力センサーを室内に1台,爆風計測用マイクロフォンをガラス窓側室外に3台,裏側に2台設置した.熱電対を 室内機上方,側壁上方,側壁下方に1点ずつ計3点設置した.

室内の火炎伝播を観測するため、5.4mの側壁中央に厚さ 50mm のアクリル窓を設置し、外側直近に可視 域モノクロ高速度カメラを設置した.また着火の有無を確認するため、ガラス掃き出し窓外 40m に赤外高 速度カメラを設置した.

ガラス窓の破損挙動を観測するため、ガラス窓設置壁の延長線上 40m と 45° 向き 40m に可視域カラー高 速度カメラを設置した.

#### 4.3.5 ルームエアコン室内機における実規模フィジカルハザード評価の実験結果

室内機送風ファンを運転せず式 4-1 で計算された充填量 330g を 4 分全量放出した直後に、模擬室中央床

上 2cm で点火しても着火は起こらなかった.また室内機送風ファンを水平に弱運転し続けた状態で,式4-2 で計算された充填量 625g を4分全量放出した直後に,模擬室中央床上 2cm で点火しても着火は起こらなかった.

室内機送風ファンを運転せず式 4-1 で計算された充填量 330g を 4 分全量放出する放出速度で,放出中で ある放出開始後 3 分 30 秒に室内機下の床上 150cm で点火したところ着火が確認された.室内機正面のガラ ス掃き出し窓と側壁に設置したカーテンには異常はなかったが,エアコン室内機は全焼した.計測された室 内圧の最大値は 2.3 kPa,放射熱の最大値は 7.5 kW m<sup>-2</sup>であった. Fig. 4-4 に着火直後から 200 ms ごとの静止 画像を示す.



Fig. 4-7 Fire observed after ignition at 30 seconds before finishing blowout. (200 ms each)

室内機送風ファンを運転せず式 4-2 で計算された充填量 625g を 4 分全量放出した直後に、模擬室中央床上 2cm で点火したところ着火が確認された. 室内機正面のガラス掃き出し窓は窓枠・ガラスとも破損し飛散した. 計測された室内圧の最大値は 5.6 kPa,放射熱の最大値は 6.1 kW m<sup>-2</sup>であった. 掃き出し窓外 10m で計測された爆風圧の最大値は 36 Pa であった. Fig. 4-5 に着火直後から 200 ms ごとの静止画像を示す.



Fig. 4-8 Fire observed after ignition at 30 seconds before finishing blowout. (200 ms each)

### 4.3.6 ルームエアコン室内機における実規模フィジカルハザード評価のまとめ

片岡の式(4-1)を用いて計算される許容充填量が放出された場合は放出流量後に着火は起こらなかった. また室内気の撹拌を前提に緩和が検討されている充填量(式 4-2)が漏洩する場合でも,エアコン送風ファンが運転されている場合,障害物の少ない室内では着火は起こらなかった.

片岡の式(4-1)を用いて計算される許容充填量が放出された場合でも,漏洩中に着火が起こった場合は, 樹脂で製作された室内機本体が燃焼して延焼する可能性があることが明らかになった.

室内気の撹拌を前提に緩和が検討されている充填量(式 4-2)が漏洩する際に送風が行われていない場合, 放出終了後に着火が起こると,ガラス窓が破損するほどの危害が生じる.ガラス窓等が破損し室内圧の上昇 が限定的である場合は,燃焼による人体影響は小さいと考えられる.

# 4.4 リーチインショーケースの拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価

プロパン(R290)を冷媒として使用した冷蔵機内蔵リーチインショーケースから,漏洩事故が起こった場合のリスク評価上の危害度を決定するため,漏洩着火事故の燃焼影響を評価した.実使用条件を想定して実物大の模擬室内にリーチインショーケースを設置し,想定される複数の漏洩条件での漏洩拡散挙動を計測して,着火時に危害度が大きいと予測される条件について,点火実験を行って燃焼影響を評価した.

#### 4.4.1 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける漏洩拡散挙動計測の実験手法

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, 4.9 m×4.9 m×高さ 2.8 m の木製模擬室を 設置し計測を行った. 模擬室の一壁面中央に幅 120cm, 奥行き 85cm, 高さおよそ 200cm の冷蔵機内蔵リー チインショーケースを設置した. リーチインショーケースの扉は観音開きで, 圧縮機等の機械部分はショー ケース部分の下部に設置されている.

プロパンの漏洩は、冷媒として充填されたプロパンの全量がまずショーケース庫内に漏洩拡散し、すべて のプロパンが庫内に保たれ均一濃度になった状態で扉が開かれる想定で行った.この漏洩方法は、同じ漏洩 量の場合に室内のプロパン濃度が最も高くなる最悪条件だと考えられる.プロパンの充填量は 100g, 500g, 1000gの3通りとした.ショーケースの扉は、扉に設置したエアアクチュエーターを大空間外の計測室から 遠隔操作し、観音開きの両扉を同時に3秒間でそれぞれ 60°の角度まで開いた.

プロパン濃度センサーは,計測範囲 0-100 vol%の気体熱伝導式と,計測範囲 0-2.2 vol%及び 0-6.6 vol%の 接触燃焼式のセンサーを用いた.気体熱伝導式センサーは,高濃度が予想されるショーケース内に 2 点,シ ョーケース付近の床上 5cm に 5 点,ショーケース扉前方向の床上 5cm, 25cm, 50cm に計 7 点,合計 14 点 設置した.接触燃焼式センサーは,両側側面壁の床上 5cm と 25cm に 6 点ずつ計 12 点,模擬室中央断面上 の床上 50cm, 100cm, 200cm, 280cm に 16 点の計 28 点設置した.

#### 4.4.2 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける漏洩拡散挙動計測の実験結果

送風等の室内気の撹拌を前提として緩和を検討されている 500g の充填量で、ショーケース下部の凝縮器 冷却ファンを運転した場合を中心に、充填量、ファン運転の有無、庫内商品の有無等の条件を変えながら拡 散挙動を計測した. 冷却ファンを運転して 500g の充填量を庫内に漏洩させ開扉した場合、開扉後 5 分程度 で模擬室内の可燃濃度域が消滅した. (Fig. 4-9a) 冷却ファンを運転せずに 500g の充填量を庫内に漏洩させ 開扉した場合、模擬室内に 90 分程度の間、可燃濃度域が形成され続けた. 冷却ファンを運転しない場合で も充填量を 100g とした場合は、可燃濃度域は 1 分程度で消滅した. (Fig. 4-9b) 庫内に設置した模擬ボトル の影響は大きくなかった.



Fig. 4-9 Time profile of propane concentrations. 4.9 m $\times$ 4.9 m $\times$ h2.8 m, a) 500g propane with cooling fan driven. b) 100g propane without cooling fan.

#### 4.4.3 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける実規模フィジカルハザード評価の実験手法

日立セメント太平田鉱山堆積場跡地の野外実験場に, 4.9 m×4.9 m×高さ2.8 mの鋼製模擬室を設置し, 拡散挙動計測と同様の方法でプロパンを放出して点火し,燃焼影響評価実験を行った.現実の部屋に近い条 件で燃焼影響を観測するため,ショーケースを設置した壁の反対側の壁に,自動ドアを模擬した幅240cmの 両開きスライドガラス扉を設置した.点火には,発電機からの交流100Vをネオントランスで15kVに昇圧 して放電させた電気スパークを用いた.

燃焼影響を評価するため,放射熱センサーを室内と室外に2つずつ計4台設置した.またひずみ式圧力センサーを室内に1台,爆風計測用マイクロフォンをガラス扉側室外に3台,裏側に2台設置した.熱電対をショーケース内部,ショーケース上方,側壁上方,側壁下方に1点ずつ計4点設置した.

室内の火炎伝播を観測するため、側壁中央に厚さ 50mm のアクリル窓を設置し、外側直近に可視域モノク

ロ高速度カメラを設置した.また着火の有無を確認するため,ガラス扉外 40m に赤外高速度カメラを設置した.

ガラス窓の破損挙動を観測するため、ガラス扉設置壁の延長線上 40m と 45° 向き 40m に可視域カラー高 速度カメラを設置した.

# 4.4.4 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける実規模フィジカルハザード評価の実験結果

漏洩拡散挙動計測に用いたものと同型のリーチインショーケースの冷蔵室下部にある凝縮器冷却用ファンを運転した状態で、500gのプロパン全量がショーケース庫内に漏洩したと想定した26%に庫内プロパン 濃度を調整して遠隔操作により開扉し放電スパークにより点火した.ショーケース扉の開扉5分後に部屋中 央床上2 cm で点火した場合には着火は起こらなかった.ショーケース開扉40秒後にショーケース扉前50 cm 床上2 cm で点火した場合,着火が確認されたが、模擬室ガラス扉の破損は起こらなかった.ショーケー ス開扉後0秒後にショーケース扉前50 cm 床上2 cm 点火した場合,着火が確認され、模擬室ガラス窓の窓 枠・ガラス共に破損し飛散した.

Fig. 4-9 に着火直後から 100 ms ごとの室内火炎伝播の様子を静止画像で示す.開扉後に庫内から比重の重 いプロパン-空気混合気が下方に流出して点火装置に到達して着火が起こっていると考えられる.また, Fig. 4-10 に着火直後から 200 ms ごとの模擬室ガラス扉破損の様子を静止画像で示す.ガラス扉は模擬室内圧の 上昇により外向きに飛散した後,ガラスが破損している様子が確認できる.

計測された室内圧の最大値は 5.0 kPa, 掃き出し窓外 10m で爆風圧の最大値は 29 Pa であった. ガラス窓 が破損することで,室内圧の上昇が 5 kPa 程度に抑えられたと考えられる. プロパンの燃焼速度は大きくな いため,室外に伝達する爆風圧の影響は小さかった.

計測された放射熱の最大値は、室内外で 160 kW m<sup>-2</sup> 程度であり、持続時間が短いもののやけどを負うほどの危害度となった.



Fig. 4-10 Fire observed after opening door with continuous ignitions. (100 ms each)





Fig. 4-11 Glass door behavior observed after propane gas ignitions. (200 ms each)

また、冷蔵室下部にある凝縮器冷却用ファンを停止した状態で、100gのプロパン全量がショーケース庫 内に漏洩したと想定した 5.2%に庫内プロパン濃度を調整して遠隔操作により開扉し、ショーケース扉前 50 cm 床上 2 cm で放電スパークにより点火した.着火と模擬室ガラス扉枠の破損が確認されたが、ガラスは飛 散しなかった.計測された室内圧の最大値は 4.4 kPa、放射熱の最大値は 8.7 kW m<sup>-2</sup> であった.掃き出し窓外 10m で計測された爆風圧の最大値は 26 Pa であった. Fig. 4-12 に着火直後からの室内火炎伝播の様子を 100 ms ごとの静止画像で示す.プロパンの濃度が低いために発光が小さいと考えられる. Fig. 4-13 に着火直後 からの模擬室ガラス扉破損の様子を 400 ms ごとの静止画像で示す.ガラス扉は飛散したが、ガラスは破損 しなかった.



Fig. 4-12 Fire observed after opening door with continuous ignitions. (100 ms each)



Fig. 4-13 Glass door behavior observed after propane gas ignitions. (400 ms each)

#### 4.4.5 冷蔵機内蔵リーチインショーケースにおける実規模フィジカルハザード評価のまとめ

室内気の撹拌を前提に緩和が検討されている 500g の充填量では漏洩開始後 5 分以降に可燃濃度域がない ことを要求されている.採用したリーチインショーケースでは、凝縮器冷却ファンを運転している場合、庫 内漏洩した後の開扉後 5 分で、着火は起こらなかった.しかし開扉直後や開扉 40 秒後には着火が起こり、 特に開扉直後に着火した場合のガラス扉の破損と放射熱危害が大きい結果になった.室内気の撹拌を前提に 緩和が検討されている充填量で撹拌が行われない場合の危害はより大きくなると予想される.

現時点で対策が不必要とされている 100g の充填量でも、庫内漏洩した後の開扉直後に着火が起こる場合は、燃焼の危害度は比較的小さいがガラス扉等の破損が想定される.

# 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・普及を支援するため、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.評価の対象として、燃焼性を有する低 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 ガス保安法が定める「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 冷媒の将来的な実用化を見据え、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.

2020年度は、新規低 GWP 混合冷媒として R32/1234yf 混合系を、従来型の混合冷媒として R32/152a 混合系を対象とし、混合冷媒の各混合組成について、標準条件及び種々の温度湿度条件における燃焼 限界、燃焼速度、及び消炎距離等の燃焼特性評価を行い、データを蓄積した.その結果、新規低 GWP 混合冷媒については、実用上の温度、湿度条件下で、任意の混合組成において、既存の「特定不活性 ガス」(R1234yf 及び R32)よりも低い燃焼特性を示すことを明らかにした.従来型の混合冷媒につい ては、標準条件における最大燃焼速度が特定不活性ガスと同等以下の微燃性となる混合組成を明らか にした.

# 5.2 低 GWP 混合冷媒の燃焼限界の評価

燃焼限界の評価は、2019 年度まで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 <sup>5-1)</sup> を用いて測定を行い判定基準として圧力上昇率  $100 \times (P_{max} - P_0)/P_0 \ge 30$  (%) を 用いる方法によって実施した. Fig. 5-1 に、R32 及び R1234yf について、燃焼限界(下限界、LFL)近傍の濃 度における燃焼時の圧力上昇率及び温度上昇を測定した結果を示す. 連続する 3 濃度 B<sub>3</sub>,B<sub>2</sub>,B<sub>1</sub> で圧力上昇率 30%を常に下回った場合の最高濃度 B<sub>1</sub> と、連続する 3 濃度 A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub>,A<sub>3</sub> で圧力上昇率 30%を常に上回った場合 の最低濃度 A<sub>1</sub> の平均値(B<sub>1</sub> + A<sub>1</sub>)/2 を燃焼限界値とした. Fig. 5-1(a)に示したように、R32 については圧力上 昇率から、LFL=(13.75+13.65)/2=13.7 vol%と求められた. Fig. 5-1(b)に示したように、R1234yf については 圧力上昇率データのばらつきが大きいが、LFL は(7.15 + 6.50)/2 = 6.8 vol%と求められた.





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 15~60°C において、燃焼限界は大きく変化しないこと 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 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、H<sub>2</sub>O/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(温度範囲 15~60°C,湿度 0%RH).結果を Fig. 5-2 に示す.グラフの縦軸切片は R32 及び R1234yf 単独ガスの燃焼限界 を表す.混合系は単独ガスと同様,この程度の温度範囲では,燃焼限界に大きな変化が見られないことが確認できた.乾燥空気中での燃焼限界の変化は,上限界(UFL),LFL とも R32 のモル混合比増加に伴い単調 に増大し,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.



Fig. 5-2 Effect of temperature on flammability limits of R32/1234yf blends at 0 % RH.

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 10, 35, 63%RH である. 結果を Fig. 5-3 に示す. Calc1 は通常 のル・シャトリエ予測, Calc2 は測定値ごとに H<sub>2</sub>O/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.



Fig. 5-3 Effect of humidity 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. これらの係数を Table 5-1 にまとめて示す. 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 における任意の混合組成に対応する 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. 5-4 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.

					2	3		3
LFL	0%RH	10%RH	35%RH	63%RH		r dependency of each coefficient		<i>r</i> =0.5 (50%RH)
a	6.85	7.47	7.15	7.24	$\rightarrow$	$ya = -1.95r^2 + 1.49r + 7.03$	$\rightarrow$	7.29
b	-0.074	-0.072	0.965	0.961	$\rightarrow$	$yb = -3.85r^2 + 4.36r - 0.22$	$\rightarrow$	0.995
с	6.72	6.07	5.31	5.27	$\rightarrow$	$yc = 6.37r^2 - 6.25r + 6.69$	$\rightarrow$	5.155
UFL	0%RH	10%RH	35%RH	63%RH		r dependency of each coefficient		<i>r</i> =0.5 (50%RH)
a	12.68	10.85	9.26	7.83	$\rightarrow$	$za = 8.84r^2 - 12.80r + 12.44$	$\rightarrow$	8.25
b	2.76	3.61	4.4	5.44	$\rightarrow$	$zb = -2.28r^2 + 5.45r + 2.88$	$\rightarrow$	5.04
с	11.59	11.94	12.55	12.74	$\rightarrow$	$zc = -3.26r^2 + 3.89r + 11.59$	$\rightarrow$	12.715

Table 5-1 Coefficients for flammability limits of R32/1234yf blends at relative humidity r



Fig. 5-4 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

総括燃焼反応速度は、アレニウス型の式で表現することができるため、重量燃焼速度(ρ<sub>u</sub> S<sub>u</sub>)は、(5-1)式のように記述される.

$$(\rho_u S_u)^2 \propto exp(-E_a/RT_b) \tag{5-1}$$

ここで、 puは未燃ガス密度、Suは燃焼速度、Eaは総括活性化エネルギー、R は気体定数、Tb は火炎温度であり断熱火炎温度で代表させている.反応系の化学反応が大きく変化しない条件において、燃焼速度は火炎 温度に指数関数的に依存する.従ってまず、混合系の火炎温度の計算を行った.Fig.5-5 に、その一例と して R32/1234yf=50/50 v/v 混合系の火炎温度の濃度依存性(初期温度 298 K, 圧力 1 atm),及び Fig. 5-6 に R32/1234yf 混合系の火炎温度の混合比依存性(当量比 φ=1.0)を示す.併せて,成分単体の火炎 温度から種々のル・シャトリエ則で算出した値を示す.これらの比較の結果,全ての濃度範囲及び混 合組成について,いずれのル・シャトリエ則によってもこの混合系の顕著な火炎温度の低さを表現し ないことが分かり,各成分の相互作用の寄与の可能性が示唆された.



Fig. 5-5 Flame temperature for R32/1234yf (50/50 v/v) blend at  $T_0 = 298$ K and  $P_0 = 1$  atm.



Fig. 5-6 Flame temperatures of R32/1234yf blends as a function of mixing rate at  $\varphi = 1.0$ ,  $T_0 = 298$ K, and  $P_0 = 1$  atm.

上記の知見をふまえ,R32/1234yf 混合系について,種々の温度湿度条件における燃焼速度の混合比 依存性を,シュリーレン可視化法を用いて評価した.まず,湿度0%RHの混合比全域について,広範な 温度での測定を行った.Fig.5-7 に結果の一例を示す.燃焼限界の場合と同様,実用上の温度範囲において は最大燃焼速度(S<sub>u,max</sub>)の差がほとんど無いことを確認した.また乾燥空気条件では,R32 モル混合比の 増加につれて燃焼速度は単調増加するが,火炎温度の傾向と同様,R32 モル混合比が 0.5 を超える程 度まで燃焼速度の顕著な増加は確認されなかった.Fig.5-7 に曲線で示したとおり,本混合系の最大燃焼 速度は,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.



Fig. 5-7 Maximum burning velocities as a function of mixing rate for R32/1234yf blends at 35°C, 1 atm, and 0%RH.

また,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行った.Fig.5-8に結果をま とめて示す.湿度が増加するにつれて,R1234yf 単体の燃焼速度が増加するため,混合系の燃焼速度の 混合比依存性は緩やかになった.また,結論として,この混合系は任意の混合組成において,今回評 価した35℃63%RH 以下の実用上の温度・湿度条件下で,同一条件下でのR1234yf 単体及びR32 単体 よりも低い燃焼速度を示すことが分かった.





# 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*<sub>q</sub>)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°C,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  $P_0$ の形で減少し、5 atm の消炎距離は 1 atm

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, 2 atm 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 <sup>5-2)</sup>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<sup>-1</sup>, R1234yf について  $S_{u0,max} = 1.5$  cm s<sup>-1</sup>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 2 atm 及び 3 atm 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°C,湿度は 0%RH).Fig.5-9 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るようになり,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.



Fig. 5-9 Quenching distances of R32/1234yf blends measured at 3 atm, 25°C, and 0%RH.

次に、R32/1234yf 混合系について、消炎距離の温度、湿度、及び混合比依存性を評価した.Fig.5-10, Fig.5-11に結果を示す.燃焼速度の結論と同様、評価した混合組成で、実用条件において、同一条件下 でのR32又はR1234yf単体の消炎距離よりも大きく、着火性が低いことが分かった.また、高湿度条 件において、本混合系の消炎距離は種々のル・シャトリエ則によって概ね表現できることが分かった.



Fig. 5-10 Effect of humidity on  $d_q$  of R32, R1234yf, and R32/1234yf (70/30 v/v) blends at  $T_0 = 333$ K and  $P_0 = 1$  atm.



Fig. 5-11  $d_q$  of R32/1234yf blends under high humidity ( $T_0 = 333$ K and 50%RH).

#### 5.5 従来型混合冷媒の基礎燃焼特性の評価

新冷媒との比較となる従来型の混合冷媒として,汎用的で燃焼性を幅広く変化させることができる R32/152a 混合系を選定し,複数の混合組成について標準条件(温度 25℃,圧力 101.3kPa,湿度ゼロ) における火炎温度,燃焼速度,及び消炎距離を評価した <sup>5-3)</sup>.まず,混合系の火炎温度の計算を行い, 単体の火炎温度から種々のル・シャトリエ則で算出した値と比較した.Fig. 5-12 に,その一例として R32/152a=50/50 v/v 混合系の火炎温度の濃度依存性及び Fig. 5-13 に R32/152a 火炎温度の混合比依存性 (当量比 φ = 1.0)を示す.これらから,この混合による火炎温度の変化は小さいと考えられる.また 全ての濃度範囲及び混合組成について,エネルギー分率のル・シャトリエ則が混合系の火炎温度を最 も良く再現し,それ以外のル・シャトリエ則においても概ね混合系の火炎温度を再現することが分か った.



Fig. 5-12 Flame temperatures of R32/152a (50/50 v/v) blend at  $T_0 = 298$ K and  $P_0 = 1$  atm.



Fig. 5-13 Flame temperatures of R32/152a blends as a function of mixing rate at  $\varphi = 1.0$ ,  $T_0 = 298$ K, and  $P_0 = 1$  atm.

上記の知見をふまえ,R32/152a 混合系について,標準条件の燃焼速度(Suo)の混合比依存性を,球形容器中心点火法を用いて評価した.Fig.5-14,Fig.5-15 にその結果を示す.最大燃焼速度が 10 cm s<sup>-1</sup> 以下(保安法上「特定不活性」)になるのは,R32 のモル混合比が 0.86 を超える場合であることが分かった.最大燃焼速度の混合比依存性は,種々のル・シャトリエ式で表すことはできず,実験値を過小評価することが分かった.



Fig. 5-14 Burning velocities of R32/152a blends at  $T_0 = 298$ K and  $P_0 = 1$  atm.



Fig. 5-15 Maximum burning velocities of R32/152a blends at  $T_0 = 298$ K and  $P_0 = 1$  atm.

次に、R32/152a 混合系について、標準条件の消炎距離( $d_{q0}$ )を評価した.結果を Fig.5-16, Fig.5-17 に示す.燃焼速度の結果と併せた場合、本混合系が「特定不活性ガス」になるのは、消炎距離が 5mm を超えるときであり、従来の単体冷媒と同じ境界値となることが分かった.また、本混合系の消炎距 離はエネルギー分率のル・シャトリエ則で概ね表現でき、燃焼速度との相関も従来冷媒から求めた相 関式が成立つことが確認できた.これにより、単体の消炎距離値(既知)から、任意の混合組成の消 炎距離及び燃焼速度が推算可能なことが分かった.



Fig. 5-16  $d_{q0}$  of R32/152a blends at  $T_0 = 298$ K and  $P_0 = 1$  atm.



Fig. 5-17 Relationship between maximum burning velocity and  $d_{q0}$  for R32/152a blends.

# 参考文献

- 5-1) EN 1839:2017, "Determination of the explosion limits and the limiting oxygen concentration (LOC) for flammable gases and vapours (2017).
- 5-2) K. Takizawa, N. Igarashi, K. Tokuhashi, and S. Kondo: Sci. Tech. Built Environ., 24(1), 97(2018).
- 5-3) K. Takizawa, N. Igarashi, K. Tokuhashi, and S. Kondo: Int. J. Refrig., 120, 370(2020).

# 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(日冷工)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,2016年 9月から新たにワーキンググループを発足させ,低 GWP のA3 冷媒のリスクアセスメントを開始した. A3 冷 媒のリスクアセスメントに関しても,A2L 冷媒を検討した時と同様な官学産の連携が図れる体制の構築が望ま れ,2018 年後半より NEDO プロジェクトとして同様の体制で検討がスタートした.

このレポートは、このような体制の中で日冷工のミニスプリットリスクアセスメント WG3 が実施している リスクアセスメントの検討結果の中から、過去3年間で対外報告を行った内容を中心に記載した.そのためリ スクアセスメントについて体系的に記述されている訳ではないし、また対外報告時期のずれから数値の細かい 差や、語句の使用に関する不一致も見受けられるが、あえて訂正は行っていない.それぞれ対外報告を行った 時期での最新結果として、このレポートを読まれる技術者が自ら内容を理解したうえで、各自が適切に判断し て参考としていただきたい.

なお 2021 年 10 月に開催される日冷工の国際シンポジウムでは,前述の数字や語句を訂正,適正化した形で 報告する予定である.

# 6.2 リスクアセスメントについて

#### 6.2.1 リスクアセスメントの範囲

製品リスクアセスメントの範囲としては、通常は製造から廃棄までが対象となる。今回の日冷工で検討して いるミニスプリットエアコンのリスクアセスメントで対象としたライフステージについて、図1に示す。図よ り範囲は、"輸送・保管"、"据付"、"使用時の室内と室外"、"修理"、"廃棄"の6つのステージが対象となる。 なお製品製造は各社のノウハウがあるため対象外とした。また "廃棄"のステージは、エアコンの撤去、リサ イクル工場までの運搬、リサイクル工場での解体のサブステージに分けられるが、このリスクアセスメントで 検討を行ったのは、撤去のみである。エアコンの移設に関しても厳密には差があるが、基本的に"運搬"と"据 付"のステージを合せたものと考え、今回のリスクアセスメントの対象とはしていない。

各ステージでのリスクアセスメントの検討は、エアコン製造業者である日冷工のメンバーが想定できる範囲 で行っており、使用時以外の各ステージの作業者は、基本的に訓練や講習を受け、エアコンの運搬や据付、修 理、撤去に関して一定の知識を有していることを前提とし、犯罪及び故意に行う事象やシビアなシナリオは除 いて、平均的な統計によるリスクを見積もって行っており、"通常考えられる作業や工程"をベースに、各ステ ージの着火確率の算出を行っている.よって"通常考えられない作業や工程"は想定外としている.なお、冷媒 ボンベの取り扱いに関しては、全ステージに関するが、詳しい検討は行っていない.







67

#### 6.2.2 レポートの構成について

先程記述したリスクアセスメントの範囲からは、"輸送・保管"、"据付"、"使用時の室内と室外"、"修理"、 "廃棄"の6つのステージについて簡単に記したのち、現時点での到達点を明示すべきであるが、各ステージ でのFTAの差異や根拠についての議論がまだ進行中である。そのためこのレポートでは、以下のトピックス を羅列した形の構成となっている。すなわち、"事故の発生確率"についてまず述べ、特に課題となった時間 的遭遇確率について再考察した結果を記述した。また、この3年間でワーキンググループとして"室内の着火 源"についてと"室外の冷媒リークシミュレーション"について対外発表した内容を記載した。"室内の着火 源"の記載は、室内に数多く存在する着火源を特定し、シミュレーションで算出した可燃空間との遭遇の考察 を行っている。一方、室外の冷媒リークシミュレーションの記述では、室外は着火源の数が多くないので、シ ミュレーションによる冷媒拡散挙動を設置状況やエアコン室外送風機の運転状態、ベランダの隙間の影響、自 然風の影響など可燃空間の変動を生じる要因から考察を行っている。アプローチはかなり異なるように見える が、リスクアセスメントとしては事故の発生確率を求める場合に、発生確率に影響の大きな因子から解析して いくプロセスに則った。すなわち室内では着火源が大きな因子であり、室外では可燃空間の形成が大きな因子 である。最後に、このリスクアセスメントの終了後に課題となる"リスクアセスメントの想定外への提言"の 節を新たに設けた。また日本人に特徴的な"安心と安全"に関して、R290の冷媒を使用して行く場合には、厳 密なリスクコミュニケーションが必須であることも、新たな節を設けて記載した。

### 6.2.3 リスクアセスメントの手法

R290のリスクアセスメントの手法は、従来から日冷工が A2L 冷媒で検討に使用していた手法と同じ FTA を 用いた. 具体的には、ISO/IEC の Guide 51 の反復改善プロセスに基づく Fig. 6-2 のリスクアセスメントフロー に従う <sup>6-1</sup>. リスクアセスメントの詳細に関しては、日本冷凍空調学会のホームページや日冷工のホームペー ジに公開されている R32 に関するリスクアセスメント結果の報告を参照いただきたい.



Fig. 6-2 Iterative process of risk assessment and risk reduction

このリスクアセスメントは、強燃性の冷媒を使用することに関するリスク評価であるため、着目すべきは着 火源の存在確率と可燃域形成の要因となる冷媒漏えい事象の存在確率である.ここでは着火源の存在,冷媒漏 えい事象とそれらの関係性について FTA 手法を用いて示し、着火源の存在確率、漏えい確率そして漏えい時 に生じる可燃空間の発生度合い、それらの遭遇率から火傷や火災事故となる確率を導出することとした.また それらの事故事象はそれぞれ独立していると考え、確率を合算して1 台あたりの年間事故発生頻度として示 す.

いずれにせよリスクアセスメントは、算出された事故発生確率について、リスクの低減を行うための「リスクの頻度、程度を軽減する安全対策を立案する」、そして安全策の決定として「リスクアセスメント終了に至る要件を確認し、これを安全策として決定する」ことが求められる. ただし安全策は完ぺきではないため、 Guide51 準拠すれば、残差リスクをユーザーへ知らせる旨の文書を記載する必要がある.

#### 6.2.4 リスクアセスメントの対象エアコン

このリスクアセスメントの対象のエアコンは、ミニスプリットエアコンと称される主に家庭で使われる壁掛け式のスプリットタイプのエアコンであり、冷房の定格能力で 2.2 kW から 5.0 kW クラスを対象とする.

また漏えい着火のリスクアセスメントの検討に最も密接に関係するエアコンの冷媒充填量に関しては, IEC 60335-2-40 で規定された 7m<sup>2</sup> (4.5 畳相当)の部屋に充填できる冷媒量を下回り,安全が確保できるであろうと 予想した 200gを第一の検討充填量とした.第二の検討充填量としては,現行 R32 エアコンで省エネ機種と言 われるクラスのエアコンの冷媒充填量 1000 g に対し, R290 では冷媒密度が約 1/2 となることから,必要充填 量も 1/2 の 500 g になると考え, 500 g を選定した.

#### 6.2.5 リスクアセスメントの許容値について

日冷工で 2015 年頃に実施した家庭用エアコンの A2L 冷媒に対するリスク評価では、リスクアセスメントで 判定基準となる事故発生率の許容値について、NITE(製品評価技術基盤機構)の資料を根拠としている.具体 的には、100万台市場に存在する製品に関しては、使用時(室内,室外)の目標を100年に1回以下の事故発 生となる 10<sup>-8</sup>台/年以下としている.日本市場で使用されている家庭用エアコンの総台数は1億台であり、使 用時の目標は 10<sup>-10</sup>台/年となる.なお使用時以外の輸送保管,据付,修理,撤去の各ステージでは職業人とし ての義務感などで許容度は大きくなると仮定し、許容値は使用時の値の10倍程度大きい、つまり 10<sup>-9</sup>台/年以 下で受容できると判断した.

今回の A3 冷媒(R290)のリスクアセスメントでも、この考え方を踏襲し使用時の許容値は 10<sup>-10</sup> 台/年、その他のステージでは 10<sup>-9</sup> 台/年以下で受容できると判断した.

# 6.3 事故の発生確率について

#### 6.3.1 時間的遭遇確率

漏えいした冷媒が着火するには,着火源 と可燃域が存在しなければならない.これ らが時間的に同時に発生する確率を時間的 遭遇率として,岡部の著書や高倉が公開し ている専門的なホームページを参照しなが ら,着火源存在時間や可燃域継続時間等か ら幾何学的確率を用いて算出式を導出しリ スク評価に用いた<sup>62),63)</sup>.なお,使用ステ ージと作業(輸送保管,据付,修理,撤去) ステージでは基準となる時間等が異なるた め,算出式もステージごとに検討した.

# (1) 使用ステージにおける時間的遭遇率

まず、使用ステージにおいて着火源作動





回数を1回/日とした場合の時間的遭遇率P1

を検討する <sup>6-2), 6-2)</sup>. 着火源の発生時刻を x, 可燃域の発生時刻を y とすると, 着火源と可燃域が遭遇しない条件は,式(6-1)と式(6-2)に示す範囲となる. これらの関係を前ページの Fig. 6-3 に示す.

$$\Delta T_{V} \langle \mathbf{x} - \mathbf{y} \langle 24 - \Delta T_{I} \qquad (\mathbf{x} \geq \mathbf{y})$$

$$\Delta T_{I} \langle \mathbf{y} - \mathbf{x} \langle 24 - \Delta T_{V} \qquad (\mathbf{x} < \mathbf{y})$$
(6-1)
(6-2)

ここで、ΔTv:可燃域継続時間(h)

#### $\Delta T_{I}$ : 着火源存在時間(h)

Fig. 6-3 における遭遇する領域と遭遇しない領域の面積比から導出した P<sub>1</sub>を式(6-3)に示す.この式より,時間的遭遇率は着火源存在時間と可燃域継続時間の和を基準となる時間(使用ステージでは 24 h)で除することで算出できることがわかる.

$$P_{1} = \frac{\Delta T_{1}^{2} + \Delta T_{V}^{2}}{2} + 24^{2} - \frac{(24 - \Delta T_{1})^{2} + (24 - \Delta T_{V})^{2}}{24^{2}} = \frac{\Delta T_{1} + \Delta T_{V}}{24}$$
(6-3)

次に、1日に複数回発生する着火源との時間的遭遇率  $P_n$ を検討する.着火源作動回数を n 回/日とすると、 少なくとも1回も遭遇しない確率は $(1-P_1)^n$ となる.このため、 $P_n$ は式(6-4)で表すことができる.なお、時間的 遭遇確率は1年あたりの値として求める必要があるが、着火源は毎日(365日)同様に発生することを前提と しているため、分母は1日の時間である 24 時間となる.

$$P_{n}=1-(1-P_{1})^{n}=1-(1-\frac{\Delta T_{1}+\Delta T_{V}}{24})^{n}$$
(6-4)

ここで, n: 着火源作動回数 (回/日)

さらに、1 日に複数回発生する着火源が特定の時間帯に集中する場合の時間的遭遇率  $P_m$  を検討する. これ は、着火源が存在し得る時間帯が複数回あり、その存在時間内で着火源が複数回作動する場合を想定している. 例えば、喫煙具のように存在する時間が喫煙時間に集中し、さらにその喫煙時間内に複数回作動するものであ る.  $P_m$ は、"着火源が存在し得る時間と可燃域が遭遇する前提で着火源と可燃域の遭遇率"と"着火源が存在し 得る時間と可燃域の遭遇率"の積で求めることができる. なお、 $\Delta T_I$ 内に集中して存在する着火源の1動作当た りの時間  $\Delta T_{IC}$ 、 $\Delta T_I$ 内で着火源が作動する回数 n、着火源が存在し得る時間帯の回数 nc、となる. 各遭遇率を 前述までと同様の手法を用いることで式(6-5)が得られる.

使用ステージにおいては、式(6-5)を用いて時間的遭遇率を算出する.ストーブ等のように着火源が特定の時間帯に集中しない場合は、 $\Delta T_{IC}=\Delta T_{I}$ 、 $n_{C}=1$ となり、式(6-5)は式(6-4)と等しくなる.

$$P_{tn} = \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta T_{IC} + \Delta T_V}{\Delta T_I + \Delta T_V} \right)^{nc} \right\} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta T_I + \Delta T_V}{24} \right)^{n} \right\}$$
(6-5)

ここで, ΔT<sub>IC</sub>: 着火源作動時間 (h)

nc:着火源が存在し得る時間帯の回数(回/日)

### (2) 作業となる輸送保管, 据付, 修理, 撤去のステージにおける時間的遭遇率

作業(輸送保管,据付,修理,撤去)ステージでの時間的遭遇率 Ps は,

- (i) 作業と漏えい冷媒の遭遇率
- (ii) 作業と着火源の遭遇率

(iii) 作業中に着火源と漏えいが発生すること前提での着火源と漏えい冷媒の遭遇率

の3つの積により求める.作業ステージにおける着火源と漏えいの発生には、それぞれ作業起因する場合と起因しない場合が考えられるため、次の考え方に基づき、Psは(I)~(IV)の4つに場合分けした.

- (a) 漏えいが作業に起因しない場合(使用時漏えい等),漏えい発生確率は市場の機器での1年間の漏えい 発生頻度として求めた値であるため、作業時間内での漏えい発生頻度に換算する必要があり、(i)とし て ΔTs/(24×365)を乗じる.
- (b) 着火源の発生が作業に起因しない場合(室内の電気機器等),着火源存在時間を算出する基準時間は 24(h)であるため,作業時間内での着火源存在時間に換算する必要があり,(ii)として[1-{1-(ΔT<sub>I</sub>+ΔT<sub>S</sub>)/ 24}<sup>n</sup>]を乗じる.

作業に起因しない漏えいと作業に起因する着火源の場合,着火源は必ず作業中に発生するため(ii)=1 となり, 使用時の式(6-5)における 24(h)を作業時間  $\Delta T_s(h)$ に置き換えた式(6-6)となる. 各遭遇率については使用ステー ジと同様に算出した. なお,作業に起因しない着火源が1日に複数回発生する場合,作業時間中に全数が発生 するわけでは無いため,回数nに作業時間  $\Delta T_s(h)$ と1日 24(h)の比を乗じ,n× $\Delta T_s/24$ 回が遭遇するものと仮定 した. 回数nが多く着火源存在時間  $\Delta T_1$ が小さい場合は,この計算方法が現実に近いと思われる. 回数nが少 なく着火源存在時間  $\Delta T_1$ が長い場合は,回数ではなく着火源存在時間  $\Delta T_1$ に  $\Delta T_s/24$ を乗じた方が現実に近い 値になると思われるが,場合分けをするのは困難であるため,すべての場合において,回数nに  $\Delta T_s/24$ を乗 じることとした. 導出した Psを式(6-6)から(6-9)に示す.

(I)作業に起因する漏えいと作業に起因する着火源(=(iii))

$$P_{\rm S} = \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta T_{\rm IC} + \Delta T_{\rm V}}{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm V}} \right)^{\rm nc} \right\} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm V}}{\Delta T_{\rm S}} \right)^{\rm n} \right\}$$
(6-6)

(Ⅱ) 作業に起因しない漏えいと作業に起因する着火源(=(i)×(iii))

$$P_{\rm S} = \left(\frac{\Delta T_{\rm S}}{24 \times 365}\right) \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta T_{\rm IC} + \Delta T_{\rm V}}{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm V}}\right)^{\rm nc} \right\} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm V}}{\Delta T_{\rm S}}\right)^{\rm nc} \right\}$$
(6-7)

(Ⅲ)作業に起因しない漏えいと作業に起因しない着火源(=(i)×(ii)×(iii))

$$P_{\rm S} = \left(\frac{\Delta T_{\rm S}}{24 \times 365}\right) \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm S}}{24}\right)^{\rm n} \right\} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta T_{\rm IC} + \Delta T_{\rm V}}{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm V}}\right)^{\rm nc} \right\} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm V}}{\Delta T_{\rm S}}\right)^{\rm n \times \frac{\Delta T_{\rm S}}{24}} \right\}$$
(6-8)

(IV)作業に起因する漏えいと作業に起因しない着火源(=(ii)×(iii))

$$P_{\rm S} = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm S}}{24}\right)^{\rm n} \right\} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta T_{\rm IC} + \Delta T_{\rm V}}{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm V}}\right)^{\rm nc} \right\} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta T_{\rm I} + \Delta T_{\rm V}}{\Delta T_{\rm S}}\right)^{\rm n} \right\}$$
(6-9)

ここで、ΔT<sub>s</sub>:作動時間 (h)

またここまで使用した記号を以下に再整理する.

P1 : 着火源作動回数を1回/日とした場合の時間的遭遇率,-

Pn : 1日に複数回発生する着火源との時間的遭遇率,-

Ptn : 1日に複数回発生する着火源が特定の時間帯に集中する場合の時間的遭遇率,-

 $\Delta T_v$ : 可燃域継続時間, h

 $\Delta T_{I}$ : 着火源存在時間, h
$\Delta T_{IC}$ :  $\Delta T_I$ 内に集中して存在する着火源の1動作当たりの時間,h

- ΔT<sub>s</sub>: 作業時間, h
- N : 着火源作動回数, 回/日
- nc : 着火源が存在し得る時間帯の回数, 回/日

#### 6.3.2 事故の発生確率についてのまとめ

現在,日冷工で実施している A3 冷媒のリスクアセスメントでは漏えいした冷媒が着火する事故の発生確率 に関して検討を進めているが,着火源と可燃域が同時に存在し,かつこれらが時間的に同時に発生する確率と なる時間的遭遇率については,前項までのように幾何学的確率を用いて算出式を導出した.

なお,使用ステージと作業(輸送保管,据付,修理,撤去)ステージでは基準となる時間等が異なるが,共 通する考え方で共通する式を導出した.

#### 6.4 室内の着火源について

#### 6.4.1 室内の想定される着火源

A3 冷媒の着火源については裸火と高温表面とスパークに分けられる.裸火は Table 6-1 に示したように,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 冷媒は発火温度が低いため,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電気スパークに分け 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 ー接点から発生するスパークと,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.なおこれら着火源は,検討対象の候補であり必ずしもA3 冷媒を着火させると確定したものではない.

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.特に日本では床に座って生活する習慣もあり,検討は, 生活習慣や着火源の位置関係も考慮して行った.

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発火温度 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0.25 mJ 以上であることを基準に検討を進めた.

なお各ステージでの着火源については、この章と共通なものはこの章の内容を展開し、異なる着火源が存在 する場合には、各ステージで各々検討を行った.

## 6.4.2 裸火について

以下に着火源と想定される喫煙時,ロウソ ク,その他の裸火についての検討結果を列記 する.

#### (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、LiやKashimuraらによるとタバコの 赤火も吸引時に 650~800 ℃となり、プロパ ンの発火温度以上となるため着火源となる 可能性がある  $^{64)}$ .6-5).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)

Ignition source	R410A; A1	R32; A2L	R290;A3 (Propane)
Open flame (smoking, candle)	No ignition	Ignition	Ignition
High-temperature surfaces	No ignition	Rare ignition	Occasional ignition
Electric spark	No ignition	No ignition under 15kVA	Occasional ignition

Table 6-1 Comparison of ignition sources

×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、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 Nakayama らの文献もあり、表面形状や灰の影響等、今後更なる検討が必要である<sup>6-6)</sup>.

## (2) ロウソク

日本では、ロウソクは主に仏壇とアロマ テラピーで使用されている. 仏壇には数本 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. 小谷の報告によれば近年、仏壇の保有 率は減少傾向にあるが 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<sup>6-7)</sup>. 参拝は1年に 数回、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.



Fig. 6-4 Structural diagram of kerosene fan heater

#### (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,Fig. 6-4 に示すように燃焼用と対流用のファンが備わっており,点火時は着火装置による着火よりも前 に燃焼用ファンによる空気の流れが発生し,使用時は対流用ファンにより 2 m<sup>3</sup>/min 程度の風量が維持される ため着火する可能性はないと考える(今後検証が必要).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した.暖房機の使用は日本の JIS 規格(JIS S 2073)の試験条件より 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<sup>6-8)</sup>.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.これらについても,使用場所,年間使用日数,1回の使用時間を考慮してリスクアセスメントを行 った.

#### 6.4.3 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時の温度は約80℃(保温)~250℃であり、プロパンの 発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、6.4.2の(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.

#### 6.4.4 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.

#### (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つのケースについて検討を進めることとした.

日本で定期的に発行されている"静電気安全指針"を参照すると、人体への帯電圧 V は、4.0 kV で放電の発 光が確認できるため、この場合の静電エネルギーE を人体の静電容量 C を 100~300 pF とし、式(6-10)より算 出すると 0.8~2.4 mJ となる <sup>6-9</sup>. これはプロパンの最小着火エネルギー0.25 mJ より大きな数値である.

#### $E = (1/2)CV^2$

(6-10)

ここで E:静電エネルギー(J), C:静電容量(pF), Vs: 人体帯電圧(V)

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4.0 kV 以上になることが Okukubo らの研究で判っている<sup>6-10</sup>.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プロパンに着火するのに十分なエネルギーを有していると言える.ただし前出の"静電気安全指針"によれば、脱衣時はブラシ放電となるため、人体帯電位が4.0~5.0 kV 程度では放電エネルギーが10<sup>-5</sup>J 未満と小さい.そのため、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.ドアノブに接触するのは部屋から出るときであり、 かつ人体の帯電電位が 4.0 kV を超えるのはソファーから立ち上がるケースが考えられる.1日の行動パターン を考えると家族 4 人の場合、平均 3 回程度とし、専業主婦は 5 回と仮定すると 14 回/日となる.放電時間は yoshida らの文献から 1 µs としてリスクアセスメントを行った<sup>6-11)</sup>.

#### (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.家庭用で使用されているレーザープリン ターには、感光ドラムへの帯電の工程がある.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、 そのエネルギーは 0.1 mJ 未満であるため、着火には至らない.しかし、帯電された感光ドラムは、全面が静電 気を帯びた状態になるため着火の可能性はあると考える.プリンターの使用にあたっては、1回に印刷する枚 数を 10 枚と仮定し、印刷工程において放電が懸念される工程として、帯電工程と転写工程があるので1枚の 印刷で 2 回放電するとし、放電時間は明確ではないが人体の静電気と同様 1 μs と仮定してリスクアセスメン トを行った.

#### (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,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,電気シェーバーとプリンターはファンを持たないため 着火源となる可能性がある. 電気シェーバーに関しては,日本の主要メーカ4社の構成比率から70%とし, 使用時間は約3分間とした. プリンターに関しては,放電回数,放電時間を調査した結果を用いてリスクアセ スメントを行った.

#### (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.電気こたつ及び電気ストーブの使用時間は,前述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.1日の使用回数はいずれもリビングで使用する場合は2回とした.ただし,電気スト ーブはキッチンで使用されるケースもあるため,その場合は朝昼晩の調理回数3回とした.また,アイロン, トースター,ドライヤーについても,家族構成,1日の使用回数,使用時間を考慮してリスクアセスメントを 行った.

#### (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.有接点リレーは機械式接点を有しているため、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いるため、スパークが発生することはない.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.

モータ制御やヒータ制御に使用しているリレーは、流れる電気エネルギーが大きいため、これらの制御を内 蔵した電気機器(空気清浄機,除湿器,掃除機,洗濯機,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.使用回数について、空気清浄機は1年のうちの6ヶ月間使用し、一度電源を入れると1日中 使用すると仮定するとリレーの作動は ON と OFF 時の2回となる.除湿機の使用は1年のうち4月~7月の4 ヶ月間とし、1日のリレー作動回数は空気清浄機と同様2回とした.掃除機も電源を入れると一部屋を掃除す るまで電源を切らないとして1回の掃除でリレーの作動は2回とした.洗濯機はモータと給水弁の作動の回数 を考慮した.ドライヤー、電子カーペット、炊飯器も同様に使用頻度を考慮した.

#### (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.これらについては調査中であり、今後も引き 続き検討していく.

## (7) 照明用の壁スイッチ

照明用の壁スイッチは, ON から OFF に切り替える時に発生する火花エネルギーが最小着火エネルギーより 大きいと推定しており,そのため,着火源になり得ると考えられる.日常でのスイッチ操作は1日2回,放電 時間は 5 msec とした. なお, 壁スイッチではなく紐で操作する照明も少数ながら残っており, その構成比を 20 %と仮定してリスクアセスメントを行った.

Ignition source types Potential ignition sources					
Open flar	mes	Gigarettes during smoking (including lighters), candles (for religious events and romatherapy)			
		Kerosene space heaters, gas cooktops, portable butane stoves			
High-tem	perature surfaces	Electric radiant heaters			
	Charges	Static electricity, laser printers			
	Brush motors	Electric shavers, printers			
G 1	Thermostats	Kotatsu(table with electric feet warmers), electric stoves, irons, toasters, hairdryers			
Sparks	Relays	Air purifiers, dehumidifiers, vacuum cleaners, dryers, electric carpets, rice cookers, microwave ovens			
	Others	Plugging/unplugging of power plugs, ON/OFF of lighting switches			

Table 6-2Potential indoor ignition sources

#### 6.4.5 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 6-2 となった.これらは R290 冷媒に対して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.以下,着火源の存在高さに関する考察について述べる.

#### 6.4.6 着火源の高さ

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.

## (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、それぞれ着火源の存在高さが異なるため、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(厚生労働省(2019)),座高(文部科学省(2016)),肩の高さなどの各寸法は人体 寸法データベースの数値(産業技術総合研究所(2001),人間生活工学研究センター(2001))を用い着火源の存在 高さを求めた.これより,着火源存在高さは Table 6-3 に示す結果となった.

## (2) その他着火源の存在高さ

#### (2.1) ガスコンロ, カセットコンロ

Table 6-3 Height of potential indoor ignition sources

といエンの古とは、奶的に 00-00-00				
イツブンの高さは一板的に 80~90 cm			Standing	Sitting-up
である. ガスコンロの火の高さもキッチ	Ignition source	Position of use		
ンの喜さと同様というろ カヤットマン	-		position	position
この間でと同様でいたる.メビットユン	Cigarettes			
ロはキッチンで使用される場合だけで		Around the mouth	About 155 cm	About 65 cm
けわく リビンガのこたのの上では田さ	Electric shavers			
はなく、サビングのこたうの上で使用さ		Patwaan shouldars		
れる場合もある. キッチンで使用される		Between shoulders		
相人はポコーンロト日接 差し返の左右	Hairdryers	and 10 cm above the	About 180 cm	About 55 cm
場合はルスコンロと回球, 有火原の仔住	-	top of bood		
高さは 80~90 cm であるが. リビングで		top of head		

は一般的なこたつの高さは 37~60 cm 程度であるので、低めにみて 35 cm 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 5 cm 程度と仮定し、床から 40 cm の高さとする.



Fig. 6-5 Configuration of floor-standing and shelf-top type household Buddhist altars



## (2.2) 石油ストーブ

石油ストーブは一般的に、裸火に相当する燃焼筒とスパークが発生する点火装置があり、ともに高さ 20~35 cm 程度の位置にあると言える.

## (2.3) 仏壇用とアロマテラピー用のロウソク

仏壇のロウソクを置く燭台は Fig. 6-5 のように仏壇の上台の下方に置かれており,床から 50~100 cm 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 44~100 cm 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 30 cm 程度とすると 74~130 cm と考えられる.アロマキャンドルは、ベッド脇の台や出窓などに置くケースが多く、それぞれ 40 ~50 cm、70 cm 程度であると考えられる.

Igniti	on source types	Potential ignition sources	Heights of ignition sources	Remarks
		Cigarettes	155 cm/65 cm	In the state of standing/ being seated
		Candles for religious events	74-130 cm	
0		Aroma candles	40-50 cm/70 cm	Bedside/bay window
Open II	ames	Kerosene space heaters	20-35 cm	
		Gas cooktops	80-90 cm	
		Portable butane stoves	80-90 cm/40 cm	Upon using the kitchen/ living room
High-temperature surfaces		Electric radiant heaters	30 cm or less	
C	Charges	Doorknobs (Static electricity)	90-130 cm	
		Laser printers	74-150 cm	
	Brush motors	Electric shavers	155 cm/65 cm	
	Thermostats	Kotatsu(tables with electric feet warmers), electric stoves, irons	30 cm or less	
		Toasters	80-104 cm	
Sparks		Hairdryers	180 cm/55 cm	In the state of standing/ being seated
	D 1	Air purifiers, dehumidifiers, vacuum cleaners, electric carpets	30 cm or less	
	Relays	Microwave ovens	80-104 cm	
		Rice cookers	50-100 cm	
	Others	Plugging/unplugging of power plugs	25 cm or less	
	Oulers	ON/OFF of lighting switches	110-120 cm	

Table 6-4Heights of ignition sources

## (2.4) スパーク

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収納棚や専用ラックに置かれることが多い. Fig. 6-6 に代表的なキッチン収納棚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収納棚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. また, 一人暮らしの場合, トースターや炊飯器は, 高さ 100 cm 程度の小型の冷蔵庫の上に置くケースも考えられる. 以上より, 市販品を調査した結果, 調理家電の設置高さは電子レンジとトースターが 80~104 cm, 炊飯器が 50~100 cm である

と考えられる.ドアノブの高さは、日本人男性の平均身長(170 cm)や作業性を考慮し、90~130 cm としている. プリンターを家庭で使用する場合、一般的に机の上(80~85 cm)、パソコンラック上段の棚(140~150 cm)やプリンター専用のラック(74~95 cm)に置かれる.よって、プリンターの設置高さとしては74~150 cmとする.コンセントの高さは25 cm 程度であり、延長コードを利用する場合などは床面付近になることもある. 壁スイッチの高さは床上110~120 cm 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110~120 cm とする.

#### (3) 着火源存在高さのまとめ

着火源別に検討した存在高さの結果を前ページの Table 6-4 に示す. なお, 6.4.6 項では取り上げていないが, 電気ストーブ,電気こたつ,アイロン,空気清浄機,除湿機,掃除機,電気カーペットといった機器に関して は,床に近い位置で使用されるため 6.4.6 の(2.1)で紹介したカセットコンロが使用される一般的なこたつの上 の高さと同等とした.

#### 6.4.7 冷媒漏えい時の室内の可燃空間

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.

床面積は、現在でも公団住宅の約半数が採用している 4.5 畳 (7.0 m<sup>2</sup>)の部屋を対象にすることにした. R290 の冷媒量は、式(6-11)より床面積 7.0 m<sup>2</sup>の IEC 規格(IEC 60335-2-40:2018)で安全対策が不要な最大冷媒量に 相当する 200 g とした. また、現行の家庭用エアコンの HFC 冷媒の冷媒量を 1000 g 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 500 g 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(6-12)により、11.88 m<sup>2</sup>と決定した.

$m_{max} \leq 2.5 \times LFL^{5/4} \times h_0 \times A^{1/2}$	(6-11)
$m_{max} \leq 0.5 \times H \times A \times LFL$	(6-12)

解析モデルは Fig. 6-7 に示す空間とし、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 Colbourne らの 式(6-13)に従い算出した<sup>6-12)</sup>.式(6-11)及び式(6-12)は IEC 60335-2-40の次期改訂版に採用される予定の内容を 考慮した.室内機からは水平に約1m/s(冷媒量200g時)、約2m/s(冷媒量500g時)の流速で一様に冷媒が 漏えいするものとする.

(6 - 13)

$$\mathbf{Q} = \frac{8Y\sqrt{A_0}}{240} \left(\frac{m_c}{LFL}\right)^{3/4} \left(\frac{F^{1/4}}{1-F}\right)$$

<u>Ventilator (200 × 200)</u> Atmospheric Pressure Boundary 大気圧境界 のののので Gap (800 × 4mm) Atmospheric Pressure Boundary

Fig. 6-7 Analyzed spatial mour

		Refrigerant Amount		
		200g	500g	
W	m	2.5	3.3	
D	m	2.8	3.6	
Н	m	2.2	2.2	
Installation Height	m	1.8	1.8	
Floor Area	m <sup>2</sup>	7.00	11.88	

Table 6-5 Flammable gas height

	Heights of flammable gas					
	Refrigerant 200 g Refrigerant 500					
Operating	1.705 m	1.510 m				
Stopped	0.008 m	0.326 m				



Fig. 6-8 Height of presence of the flammable space during the air conditioning operation

計算結果より,可燃空間の存在高さは Table 6-5 の結果 となった.ここで運転中の数値は,壁掛け室内機の設置 位置(1.8 m)から表中の数値の間に可燃空間が存在してい ることを示しており,停止中の数値は,床面からの可燃 空間が存在している高さを示している.運転中は室内機 から漏えいした冷媒が吹出し空気の風に乗って移動す るため,Fig. 6-8 に示すように可燃空間体積を室内機の吹 出し口面積で除した値が,可燃空間が存在する長さに相 当する.ここで,暖房運転など吹き出し方向が下方にな ることも考慮する必要がある.着火源に対する遭遇のし 易さは吹き出し方向が下方のときが厳しくなる.よっ て,前述長さの方向を下方向に変更し,壁掛け室内機の 設置位置(1.8m)からこの長さを減じた数値を Table 6-5 の 数値とした.Fig. 6-9 に漏えい終了(4 分経過)時点の冷媒



濃度分布を示す.濃度分布からもわかるようにエアコン運転中は冷媒量 200g, 500g とも室内機の吹出し口近 傍にのみ可燃空間が存在する.なお,この結果では冷房運転であるために可燃空間は室内機の吹き出し口から 前方に存在している.一方,停止中は,Fig. 6-9 に示すように冷媒が室内機の真下に漏えいし,床面から可燃 域が積層していくため,可燃空間体積を床面積で除した値が床面からの可燃空間存在高さとなる.なお,500 gの冷媒量は 200g に比べ充填量が 2.5 倍となり,燃焼空間の広がり易さは累乗に,また着火爆発した場合の 危険度は充填量増加比率に対し指数的に増加していくことに留意しなければならない 6-13).

#### 6.4.8 着火源の特定

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 Table 6-6 に示した可燃空間と, 検討した結果である Table 6-5 の着火源存在高さとの位置関係を一つ一つ確認して,着火源の特定を行った. ここで停止中に関しては, Fig. 6-7 からも分かるようにエアコン真下は可燃空間が形成されているため,考慮 する必要がある.そこで,着火源が室内機の真下で使用される確率を 10%とした.以上の結果,最終的に特定 した着火源を Table 6-6 に示す.

#### 6.4.9 室内の着火源のまとめ

現在日冷工で実施している A3 冷媒のリスクアセスメントのなかで検討している着火源について,着火源と して特定するための経緯と検討内容をまとめた.各々の着火源が日常使用される状況を加味し,着火源の高さ を求め,冷媒漏えいについては4分で全量漏れる条件下で可燃空間の存在高さを算出した結果,着火源存在高 さを考慮した場合に着火源になるものとして次に述べる結果を得た.裸火ではタバコ,石油ストーブ,高温表 面では電気ストーブ,スパークではレーザープリンター,電気シェーバー,電気こたつ,電気ストーブ,アイ ロン,ドライヤー,空気清浄機,除湿機,掃除機,電子カーペット,コンセントの抜き差しであった.一方, 着火源存在高さを考慮することで着火源にならないと判断したものにロウソク,コンロ,調理器具,ドアノブ に接触したときに発生する静電気,照明用スイッチの ON/OFF などがあるが,ロウソク,調理器具,照明用ス イッチに関しては、室内機真下に存在する可能性があるため、着火源なるものとした. 今後、NEDO 研究の結果も踏まえ、リスクのある着火源に関しては対策を考えていく.

					Height of flammable gas		Ignition or no ignition	
Ignition	Source types	Potential ignition sources	Heights of ignition		(during operation/stop)		(during operation/stop)	
ignition source types		T otential ignition sources	sourc	es	Refrigerant	Refrigerant	Refrigerant	Refrigerant
				1	200 g	500 g	200 g	500 g
		Cigarettes	155 cm	Standing			No/Yes*	Yes/Yes*
		Cigarettes	65 cm	Seated		-	No/Yes*	No/Yes*
		Candles for religious events	74-130 cm				No/Yes*	No/Yes*
			40-50 cm	Bedside			No/Yes*	No/Yes*
Op	en flames	Aroma candles	70 cm	Bay window			No/Yes*	No/Yes*
		Kerosene space heaters	20-35 cm				No/No	No/Yes
		Gas cooktops	80-90 cm				No/No	No/No
			80-90 cm	Kitchen			No/No	No/No
		Portable butane stovesCassette cooktops	40 cm	Living room			No/No	No/No
High-temperature surfaces		Electric radiant heaters	30 cm or less				No/No	No/Yes
	CI	Doorknobs (Static electricity)	90-130 cm			No/No	No/No	
	Charges	Laser printers	74-150 cm		1.705 m	1.510 m	No/No	No/Yes
	D 1 /		155 cm	Standing	/0.008 m /0.320 m	/0.326 m	No/Yes*	Yes/Yes*
	Brush motors	Electric shavers	65 cm	Seated			No/Yes*	No/Yes*
		Kotatsu(tables with electric feet	30 cm or				NL- /NL-	N. /V.
		warmers), electric stoves, irons	less				INO/INO	No/Yes
	Thermostats	Toasters	80-104 cm				No/Yes*	No/Yes*
Smonlea		II.:	180 cm	Standing		No/Yes*	Yes/Yes*	
Sparks		Hairdryers	55 cm	Seated			No/Yes*	No/Yes*
		Air purifiers, dehumidifiers, vacuum	30 cm or				No/No	No/Vos
	Polova	cleaners, electric carpets	less				100/100	100/ 1 05
	Relays	Microwave ovens	80-104 cm				No/Yes*	No/Yes*
		Rice cookers	50-100 cm				No/Yes*	No/Yes*
	Others	Plugging/unplugging of power plugs	25 cm or less				No/No	No/Yes
		ON/OFF of lighting switches	110-120 cm				No/Yes*	No/Yes*

Table 6-6 Identification of ignition sources

Yes\*: If the ignition source is directly under the air conditioner, it is considered to be ignited.

## 6.5 室外の冷媒リークシミュレーションについて

## 6.5.1 室外機の設置状況について

日本の住宅の種類には戸建住宅と共同住宅がある.戸建住宅における室外機の設置方法は主にベランダ設置, 地面直置き設置,壁面設置,屋根置き設置,軒下天吊り設置があり,また共同住宅における室外機の設置方法 は、ベランダ設置,共用廊下設置,専用ミニベランダ設置がある.この中で,漏えい冷媒が最も溜まりやすい 環境は壁で覆われた換気の悪いベランダである.それらは,高層の共同住宅の場合においても,まれにしか見 られないが,最悪のケースとしては考えられ,そのような室外機の設置環境を想定することとした.



Fig.6-10 Three installation conditions of outdoor unit in a balcony

Fig. 6-10 にベランダにおけるエアコン室外機の設置例を示す. シミュレーションでは、最悪のケースを考え、 床面に排水穴は設けていない. 室外機は能力 4.0kW の家庭用エアコンの室外機である. 設置方法は、床面設置 と二段積み設置、天吊り設置を想定した.

## 6.5.2 室外の冷媒漏えいシミュレーション

## (1) 解析モデル・漏えい条件

Table 6-7 に R290 の漏えい条件を示す. 漏えい量 200 g は室内床面積 7 m<sup>2</sup> に対する IEC 規格の最大許容量, また冷媒量 500 g は現行の R410A 家庭用エアコンと同等性能が得られると推定冷媒量, 1000 g は IEC 規格に おける R290 の m<sub>2</sub> 相当として決定した. 冷媒漏えい速度は, IEC 規格で採用されている 4 分全量漏れとした. シミュレーションでは, 停止中に漏えいした冷媒が, 熱交換器の外側にある空気吸い込み面より均一にバルコ ニーへと流入するとし, 漏えい濃度は R290 が 100 vol%とした.

Table 6-7 R290 leakage conditions					
Leakage amount	g	200 500 100			
Leak rate	kg/s	8.3×10 <sup>-4</sup> 2.1×10 <sup>-3</sup> 4.2×			
R290 density (25°C)	kg/m <sup>3</sup>	1.832			
Leakage area	m <sup>2</sup>		0.834		
Leakage concentration	vol%		100		





Fig. 6-11 に解析モデルを示す. 冷媒拡散現象の CFD 解析は, 空気と R290 の 3 次元混合流体解析を質量保存 式,運動量保存式および化学種の保存式を用いて行った. 温度場は解析場全体で, 25 ℃一定としているため, エネルギー保存式は用いていない. また空気と R290 の混合による密度変化を考慮し, 圧縮性流体解析を行っ た. また, R290 の漏えい速度や自由落下速度, R290 の動粘性係数, 代表長さから計算したレイノルズ数を考 慮して, 乱流モデル(標準k-εモデル)を用いた. なお, 代表長さは熱交換器と壁の隙間長さとした.

#### (2) 設置状況別の可燃空間

Fig. 6-12 に CFD の結果を示す. 床に 1000g の室外機を設置した場合,可燃領域の持続時間は 3546 秒に達した. 各漏えい量について,設置高さが高くなると,可燃空間継続時間が短くなった. 一方,床面設置の場合,漏えい量 1000g の時間平均可燃体積は,漏えい量 500g の場合とあまり違いはなかった.これは,漏えい量 1000g の場合,床面近傍に UFL 以上の濃度空間が生成されたことに関係していると考えられる. なお,最小ファン風量で室外機ファンが稼働している場合,漏えい量 1000g の場合に対してのみ,極めて小さな可燃空間が生成された.

R290 [vol%]

Installation	Leakage Amount	200	g	500	) g	100	)0 g
Condition	Time	240 s	600 s	240 s	600 s	240 s	600 s
Floor mounted	Concentration distribution						
	Duration	776	S	190	0 s	354	46 s
	Averaged volume	1.22 m <sup>3</sup>		2.96 m <sup>3</sup>		2.73 m <sup>3</sup>	
Steel stand mounted	Concentration distribution						-
	Duration	292 s		1206 s		212	26 s
	Averaged volume	0.20 m <sup>3</sup>		2.83 m <sup>3</sup>		3.87 m <sup>3</sup>	
Eaves mounted	Concentration distribution						
	Duration	260	S	939	) s	1711 s	
	Averaged volume	0.05	m <sup>3</sup>	2.47	m <sup>3</sup>	3.73 m <sup>3</sup>	

Fig. 6-12 Concentration distribution, the duration and time averaged volume of flammable region within the balcony for different installation conditions

## (3) 隙間の影響

Fig. 6-13 に共同住宅の連続したベランダを示す. 共同住宅のベランダでは避難経路確保の観点で,蹴破り可能な仕切り板が設けられていることがある. このような板には床面との間に隙間があり,その隙間の代表的な高さは,調査したところ,約0.1 mであった.

Fig. 6-14 にこの様な連続ベランダにおける, R290 の漏えい濃度分布と可燃空間の継続時間および時間 平均体積の解析結果を示す.各漏えい量条件で,室 外機が設置されているベランダにおける可燃空間の 継続時間及び時間平均体積は減少した.これは漏え いした冷媒が仕切り板下部の隙間からベランダへ流 出したことによる.この結果,漏えい量 1000 g の継 続時間は 1211 sec となり,隙間がない場合の 3546 sec



Fig. 6-13 The CFD model of a balcony with side wind

と比較しておおよそ3分の1に減少した.次に,隣接ベランダにおける可燃空間の形成について,漏えい量200gでは隣のベランダでは,わずかに可燃空間の生成がみられるが,その継続時間,平均体積は小さい.一方,漏えい量500gと1000gでは,隣のベランダと更に隣のベランダまで可燃空間が生成された.

R290 [vol%]

					0.0 2.5 5.0 7.5 10.0
Leakage	Leakage amount		Balcony 1	Balcony 2	Balcony 3
200 g	Concen- tration distribution	240 s			
	Duration		418 s	175 s	0 s
	Averaged volu	ime	0.51 m <sup>3</sup>	0.01 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup>
500 g	Concen- tration distribution	240 s			
	Duration		701 s	582 s	269 s
	Averaged volu	ime	1.32 m <sup>3</sup>	0.71 m <sup>3</sup>	0.07 m <sup>3</sup>
1000 g	Concen- tration distribution	240 s			
	Duration	•	1211 s	1132 s	1059 s
	Averaged volu	ime	2.16 m <sup>3</sup>	2.32 m <sup>3</sup>	2.20 m <sup>3</sup>

Fig. 6-14 Concentration distribution, the duration and time averaged volume of flammable regions within each balcony with partition plates

## (4) 自然風の影響

室外機の周囲では,通常,自然の風が吹く.Fig.6-15 に日本 の代表都市における各風速の年間累積発生時間を示す.各地域 によってばらつきはあるものの,おおよそ 1.0 m/sec から 2.0 m/sec の間の発生頻度が高い.これらのデータから,自然風が 吹かない確率は0.5%となり,結果,99.5%は風が吹いているこ ととなる.そこで,漏えいシミュレーションは,自然風がある 条件で,行うことが重要となる.更に,これらのシミュレーシ ョン結果を,各風速の頻度確率で加重平均することにより,着 火確率を算出したところ,自然風を考慮しない場合に比べて, 漏えい量 500 g と 1000 g では着火確率が約 1/100 に低下するこ とを確認した.

#### (5) 解析モデルの影響

この解析では、漏えい中の R290 の漏えい速度、その自由落 下速度などの影響を考慮して、乱流モデルを選択した.しか



Fig. 6-15 The appearance time length of each wind velocity in 16 cities in Japan

し、漏えい終了後、無風条件であれば、乱れがなくなり、流れは層流に戻ると考えられる.そこで、隙間がないベランダ床面設置の500g漏えい条件で層流モデルによる解析を行った.結果、可燃空間の継続時間は 乱流モデルの1900 sec に対し、層流モデルでは、60740 sec(16 時間 52 分 20 秒)と、可燃空間が非常に長い時 間生成され続ける結果となった.これは拡散係数の差によるものである.つまり、層流モデルの分子拡散係 数に比べて、乱流モデルの乱流拡散係数の値が少なくとも一桁ないし二桁大きいためである.バルコニー内 の流れが、長い間層流であり続けることはほぼ不可能であるが、この大きな差異は、慎重に考えなければな らない.

#### 6.5.3 室外の着火源について

Table 6-8 に室外で想定される着火源の継続時間と高さを示す.室外における着火源として使用者の喫煙やガ

ス石油温水機器の裸火, それと他のエアコン室外機のスイッチ ON/OFF によって発生する電気スパークが想定 される.静電気については,衣服の脱衣や金属製ドアノブとの接触により発生することが多いため,室外では ほとんど発生しないと考えられ,着火源とはしなかった.これら着火源について,使用実態や動作原理を考慮 して継続時間を決定した.一方,喫煙やエアコン室外機のスイッチ ON/OFF については,日本では R290 に 対して着火源にならないとの報告もある.またガス石油機器については,点火前の燃焼ファンの動作により攪 拌されるため,着火源にならないと推定される.着火源に関する理解の進展を考慮して,FTA を構成し着火確 率を求める必要がある.

Nome	Innition courses	Duration	Height
Iname	Ignition sources	T <sub>s</sub> (sec/frequency)	$h_{S}(m)$
Smoking by users	Open flame	$4.5 \times 10^{1}$	≤ 1.72
Gas/oil water heater	On an flama	$2.0\times10^{2}$	
(stationary type)	Open name	3.0×10-	$\leq 0.6$
Outdoor unit of AC	Electric spark	5.0×10 <sup>-3</sup>	$\leq 0.714$
Static electricity	Electrostatic spark	1.0×10 <sup>-6</sup>	-

 Table 6-8
 The typical duration and the typical location height of each ignition source

#### 6.5.4 冷媒漏えいシミュレーションからの室外機リスク検討結果

冷媒漏えいシミュレーションとそれに基づくリスクアセスメントにより,以下の結論を得た.

- i. 漏えいした冷媒が最も蓄積されやすいのは,壁に囲まれた換気の悪いバルコニーの床への設置であり, これは高層マンションにおける最悪のシナリオと考えられる.
- ii. 可燃空間の継続時間は、床面設置に対して、二段積み設置や天吊り設置など、設置高さを高くするほど 短くなるが、可燃空間の時間平均体積は、必ずしも減少するわけではない.可燃空間の時間平均体積が 減少しないのは、床面近傍でのUFL以上の濃度領域の生成に関係していると考えられる.一方、隣接す るベランダの間に隙間のあるパーティションがある場合、室外機が設置されているベランダでの可燃空 間の継続時間やその時間平均体積は減少するが、隣のベランダに可燃空間が形成される恐れがある.
- iii. 日本の代表都市における風速分布の調査の結果,バルコニーには 99.5%は自然風が吹いていると考えられる.また自然風の存在により、着火確率は自然風が無い場合に比べて、1/100になる.
- iv. 床より高い場所への設置や,壁と床の間に適切な隙間がある場所への設置,自然風が着火リスクを減ら すための重要因子である.
- v. 日本の屋外での着火源の候補としては、喫煙、ガス石油機器、別のエアコンの室外機がある.これらの 着火源による着火リスクはほぼ許容値を満たすことから、使用者を対象とした室外機への注意喚起ラベ ルの貼り付けが実用的な安全対策と考えられる.しかし、これは日本市場にのみ適用可能なリスクアセ スメントに基づく対策であるため、各国の設置環境で特に着火源が多い場合などは、別の安全対策を考 案する必要がある.

#### 6.5.5 室外機の安全対策の方向性

設置環境による安全対策として、室外機の設置高さ制限を設ける事や、隙間がある場所への設置、風通しの良い場所への設置が、可燃空間生成の抑制に有効であることが確認された.しかし、大半の設置状況は、 これらの制約を満たすけれども、全ての設置状況がこれらを満足すると期待するのは現実的ではない.

IEC 60335-2-40 では可燃性冷媒を使用した家庭用エアコンに関し, 室外機への作業者を対象とした炎マークの注意喚起ラベルの貼り付けが規定されている.また,取扱説明書には可燃性冷媒に関する注意事項の記載もあるが,一般使用者は,エアコンを運転させるために取扱説明書の注意事項を必ずしも読むとは限らない.そこで,使用時室外に対する安全対策としては,一般使用者が直ぐに認識できる注意喚起ラベルの室外機への貼り付けが実用的な安全対策である.

## 6.6 リスクアセスメントの想定外の考え方と提言

#### 6.6.1 リスクアセスメントでの想定と想定外について

このリスクアセスメントでは、"通常考えられる作業や工程"をベースに、各ステージの着火確率の算出 を行っている.よって"通常考えられない作業や工程"は想定外としている.

#### i. 廃棄回収

想定外としている代表的な例としては、廃棄時に適法なルート以外で扱われている家庭用エアコン(以下エアコンと略す)の冷媒の回収があげられる.経済省・環境省のプレスリリースをよると家電リサイクル法及び 廃棄物処理法に基づくルートでの回収率は35.4%となり、残りの6割近いエアコンは鉄、銅、アルミの金属有 価物の回収が目的とみられる見えないルートで回収されており適切に冷媒が回収・処理されているかは定かで はない.エアコンの金属を有価物としてスクラップ処理する際に、冷媒の回収は処理費用が負担になるため、 冷媒を回収しないで大気中に放出したならば、可燃性のA3冷媒の場合には着火事故が増加する可能性は否定 できない.また、市中でエアコン等を回収する不用品回収業者が、リユース、スクラップ処理をする場合も同 様なリスクを生じる.不用品回収業者は古物商登録をしていたとしても、スクラップ処理をする場合も同 様なリスクを生じる.不用品回収業者は古物商登録をしていたとしても、スクラップ処理には廃棄物処理法上 の必要な許可を得ていないと違法となる.家電リサイクル法では、廃エアコンの鉄、銅、アルミ、プラスチッ ク等をリサイクルして得る有価物の重量、すなわち再商品化率は80%以上が義務付けられている.また、冷 媒の回収・適正処理についても義務付けがなされている.製造事業者等はDfE(環境配慮設計)やリサイクル プラントとの協業も含め、その義務を確実に果たしている.エアコンに用いられている鉄、銅、アルミの金属 構成比は約7割であり、他の製品(冷蔵庫・テレビ・洗濯機)に比べ高いため、その有価性の高さから、家電 リサイクルのルート以外の見えないルートが注目する大きな要因となっている.

なお、アルミや銅の熱交換器や銅パイプが使用されている冷蔵庫、ヒートポンプ洗濯乾燥機や浴室乾燥機な ど他の家電製品でも、リサイクルを考慮した DfE が行われているものの回収が容易な銅やアルミの重量比率 が小さいので、見えないルートが注目しないと考える.

以上,廃棄・冷媒回収時の実態と課題を述べたが,見るえないルートにおいて冷媒回収が行われず冷媒を大気に放出する行為は着火確率の上昇を招くが,このリスクアセスメントでは考慮していない.すなわち想定外である.

ii. 据付, 修理

このリスクアセスメントでは、エアコンの据付時や修理時は、エアコンの知識、技術等の訓練を受けた作業 者が行うことを前提としている.しかし、個人が自分で据付や部品交換を行う"DOITYOURSELF"の場合や、 一部の引っ越し業者などがエアコンを移設する場合など、訓練を受けていない作業者が行う実態については、 その総数を把握できないことから、このリスクアセスメントでは考慮していない.すなわち想定外である.

また、現状でも可燃性冷媒に関する確実な安全知識を持ち合わせず、あるいは、エアコン据付に関して知識のない素人に近い作業者が、エアコン製造者責任の範囲外で冷媒種を違えたりして施工している実態もある. さらに、上記の例の中には、据付時や修理時の作業者の行為と使用時の着火事故の因果関係を特定できないことも考えられる.具体的な例としては、ユーザーがeコマース等で購入したエアコンを、据付業者の一括比較見積もりサイトで作業者を選定して工事を行った.その後の使用時に事故が生じても、着火事故と工事の因果関係を証明できず、ユーザーに不利益が発生する可能性も否定できない.

上記以外にこのリスクアセスメントでの据付時や修理時の作業は、橋本らの文献による正常、リラックスした精神状態での作業によると仮定している<sup>6-14)</sup>.しかし夏場など繁忙期に急かされた精神状態での作業や、売り上げを伸ばすためにノルマを懸けられた精神状態での作業は、人を介在したミスを誘発し重大事故に繋がると考える.このような状態の割合は把握できないため、想定外としている.

iii. 使用時の室内, 室外

このリスクアセスメントでは家電製品からの着火事故に関しては、NITEのデータに基づいて事故事象を集計し、FTAで計算を行った.しかし、テーブルタップやコンセントで発火要因となるトラッキングによる事故事象や、耐用年数をオーバーした家電製品での部品やコードからの事故事象に関しては、現在も調査中であるため、各ステージのFTAには反映されていない.この点に関しても、今後NITEなどが解析を行うことで、より詳細なデータを考慮することができれば、このリスクアセスメントによって、さらに精度の高い着火確率が求められると考える.

iv. 想定しない事故事象

最後に言うまでもないことであるが、故意に行われるエアコン室外機への放火や、使用中の室外機の持ち去 りなども想定外である.

以上、このリスクアセスメントでの想定外の事項を列挙したが、これらの想定外の事項は実際の着火事故を

増加させることが容易に想像できる.しかも列挙した事項の FTA を作成し,正確な着火確率を算出し,その 危険性を定量化することは非常に困難である.さらに広い意味でリスクアセスメントに含まれる安全性の担保 の課題や,違反事項の課題などもある.

#### 6.6.2 リスクアセスメントでの想定外に対する提言

現在、日本で広く普及している A2L 冷媒の R32 を使用したエアコンも先ほど記述したような想定外を、過 去に実施したリスクアセスメントで考慮していたわけではない. それにもかかわらず実際の着火事故は発生し ていない. その理由として、R32 は先に列挙した想定外があったとしても、A3 冷媒に比して着火源の種類が少 ないこと、最小着火エネルギーが大きいこと、また燃焼下限界の濃度が 13.5%と可燃域の形成が極めて困難な ことが考えられる. これらの因子によって、R32 はリスクアセスメントで想定したよりも、着火事故が極めて 生じにくいと推定される. 一方、A3 冷媒の R290 では、着火源の種類が多いこと、最小着火エネルギーが R32 の約 80 分の 1 と小さいこと、燃焼下限界の濃度が 2.02 %と低く、R32 に比して容易に可燃域が形成されるこ とが考えられる. よって R290 に関しては、このリスクアセスメントの想定外である"通常考えられない作業や 工程"をいかに排除できるかが重要である.

すなわち R290 を冷媒として実用化するために,ワーキンググループとしては以下のような方策を提言する. i. エアコンの冷媒が適正に回収・処理されるための取り組みの強化

エアコンを排出する消費者・事業者に対して、家電リサイクル制度に則った排出を促す啓発活動の更なる 取り組み、また、権限のある者(行政)が見えないルートの調査・解明を行い、もしそこに違法な行為があ った場合には、適切な取り締まりを実施して改善を図ってゆくことを要請して行く、現状の社会制度にお いては、家電リサイクルルートへの排出を促すことが確実な冷媒回収の方策であり、このことの徹底を図 らなくてはならないと考える。先ずは家電リサイクル制度を含めたエアコンの冷媒の回収・処理に関する インフラ整備の検討が必要であり、特に A3 冷媒の場合には人が介在する場合の安全性を担保することが 必須である。万一、このような方策で効果が得られない場合には、"新たな社会システムの検討"をはじめ るべきである。

#### ii. エアコン据付や修理作業者への免許制度

冷凍空調に関連する団体が講習、実地訓練をベースとした可燃性冷媒作業者への資格制度を整備する、 もしくは法的な背景を元にした免許制度を設立するなどの、新たな仕組みを施策として検討することが 必要と考えている. 資格制度や免許制度を整備し、資格や免許なしの作業者が作業した場合の罰則強化 と事故を起こした場合の免責を設けないこと、一方で資格や免許取得者には事故時の消費者への徹底的 な補償義務を法的に裏付けることなど.

しかし以上の対策は、排除すべき不安全な作業及び行為をさせない"人への対策"となり、労働安全や機械 安全のリスクアセスメントの考え方に掲げられる、国際規格 ISO 45001, ISO 12100 及び JIS Z8115 に則った "人は必ずミスをする、機械は必ず故障する"との前提で安全を確保することを求めている. R290 を冷媒と して採用する場合には、この原点に立ち返って、着火事故がおきても人が危害を受けない、あるいは冷媒が漏 れても着火濃度を形成しない対策を考えることも必要なのかも知れない. そしてより安全性を向上させるため に、作業時の保護具の着用、漏えい時の適切な機器の停止手段、撤去時の適切な冷媒放出策などの対応を、今 一度、考慮し今後の検討に反映していきたいと考えている.

地球温暖化に対応したより良い社会を実現するには、上記の方策の実施と、また様々な政策提言と社会システムの変革を中期的な時間と視野から実現すべきであることを認識しなければならない. さらに、安全の原点に立ち返っての検討も必要であろう. このようにリスクアセスメントの想定外を減らす取組みを行うことにより、このワーキンググループで算出した許容できうる値としての 100 年に1回の着火確率の発生に抑えることで、 R290 をエアコンへ安全に使用できるのではないかと考える.

#### 6.7 まとめ

日冷工でのミニスプリットワーキンググループの活動は2016年7月に開始した.本レポートではNEDOプロジェクトと連携したこの3年間でのグループとして検討した以下の項目についてまとめた. "事故の発生確率の計算"に関する学術的な整理を行なった.また対外発表を行った"室内着火源について"と"室外の冷媒リークシミュレーション"について考察を記載した.なお各項で記載した対策に関しては,現在も検討中であ

るが、このレポートでは考えられる範囲での結果であり、FTA による効果の検証も実施している. なお対策に 関しては、今後必要に応じて日冷工の規格に反映する予定である. さらに今回のリスクアセスメント終了後に 重要となる"リスクアセスメントの想定と想定外への提言"の節を新たに設けた. 製品のリスクアセスメント は本来、企業が新しい製品を企画する場合にリスクの大きさを確認する目的と、最終的に製品を発売する段階 に製品リスクを最小限にする目的で行う. しかし、R290 を冷媒とした家庭用エアコンのリスクアセスメント は、具体的な製品がない状況で実施されたものであり、本来企画段階でのリスクアセスメントである. よって 6.6 節に記載した"リスクアセスメントでの想定と想定外"や"提言"が今後は重要な課題となり、これらの ことが実現しないかぎり R290 を使用したエアコンの上市はできない. また日本人に特徴的な"安心と安全" に関して、R290 冷媒を使用して行く場合には、きっちりとしたリスクコミュニケーションが必須であること も記載した. いずれにせよ、地球環境問題は猶予がある状況にないであろう. この問題に冷凍空調技術者は知 識と経験に基づき、最大限の努力を払って課題解決を行わなければならないとともに、官学の連携も加速して いく必要があると考える.

## 参考文献

- 6-1) ISO/IEC Guide 51 (2014).
- 6-2) 岡部靖憲:「確率・統計-文章題のモデル解放」,朝倉書店, pp. 131-133,東京(2010).
- 6-3) 高倉亘:「幾何学的確率に関する教材について」, http://izumi-math.jp/W\_Takakura/k\_kakuritu/k\_kakuritu.pdf.
- 6-4) B. Li, H.R. Pang, J. Xing, B. Wang, C. Liu, K.G. McAdam, J.P. Xie: "Effect of reduced ignition propensity paper bands on cigarette burning temperatures", Thermochimica Acta, 579, pp. 93–99, Amsterdam(2014).
- 6-5) T. Imamura, S. Goto, A. Fushimi: "Ignition mechanism by cigarette", Report of Fire Science Laboratory of Tokyo Fire Department, 7, pp. 34-45, Tokyo (1970). (in Japanese)
- 6-6) T. Nakayama, H. Nakada, M. Mochizuki, S. Toriya: "Study on the Ignition Properties of Various Types of Flammable Gas", Report of Fire Technology and Safety Laboratory of Tokyo Fire Department, 53, pp. 86-94, Tokyo (2016). (in Japanese)
- 6-7) 小谷みどり:「死者祭祀の実態」, Life Design REPORT, 東京(2010).
- 6-8) 日本産業規格 JIS S 2073:「家庭用密閉燃焼石油温風暖房機の標準使用条件,標準加速モード及び試験条件」.
- 6-9) 労働安全衛生総合研究所技術指針:静電気安全指針 2007, 労働安全衛生研究所刊, p. 47, p.20, pp. 23-24, 東京 (2007).
- 6-10) 奥窪朝子, 酒井恒美:「繊維製品消費科学」, 15 巻, 10 号, 東京 (1974).
- 6-11) T. Yoshida, K. Kubota, T. Sawai, N. Matsui: "Time-Frequency Analysis of Discharge Current from Charged Human Body", Journal of the Institute of Electrostatics Japan, Tokyo (2007).
- 6-12) D. Colbourne, K. O. Suen: "ASSESSMENT OF FACTORS AFFECTING R290 CONCENTRATIONS ARISING FROM LEAKS IN ROOM AIR CONDITIONERS", Proc. 13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, 1103, Valencia(2018).
- 6-13) 土橋律:「日本燃焼学会誌」, 56 巻, 177 号, pp. 234-240, 東京 (2014).
- 6-14) 橋本邦衛:「安全人間工学」,中央労働災害防止協会編, 東京(1984)

## 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

冷凍機を内蔵したショーケース(内蔵ショーケース)は、飲食店、食料品販売店、スーパーマーケット等で 使用されている.現在は、GWPが大きいR404A、R134a等のHFCが冷媒として使用されているが、モントリ オール議定書のキガリ改正を受け、温暖化防止のため、GWPの低い冷媒への転換が望まれている.内蔵ショ ーケースの冷媒量は数+gから1kgを超えるものまであるが、一体型でありかつ冷媒量も比較的少ないため、 A3 冷媒(強燃性冷媒)であるプロパン(R290、GWP:3)やイソブタン(R600a、GWP:4)を内蔵ショーケース に使用する検討が欧州を中心に行われている.この状況を受け、2019年6月に国際規格 IEC 60335-2-89<sup>7-1)</sup>が Edition 3.0 に改正され、A3 冷媒の最大冷媒充填量が従来の0.15kgから約 0.5kg(R290の場合)に緩和された. しかし、国際規格は使い勝手を重視する傾向があり、また、今回の改正は各国の冷媒規制の状況から改正時期 を遅らせることができなかったという側面もあるため、十分に安全性を担保できる内容になっているとは限ら ない.

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の 安全性の評価を行っている.ショーケースの庫内及び庫外からの漏えいを想定した冷媒漏えい解析やリスクア セスメントを行い、A3冷媒を使用した内蔵ショーケースを安全に運用する方法を検討している.日冷工では、 検討結果に基づいて、日冷工規格を作成し、IEC 60335-2-89を基にした日本の規格である JIS C 9335-2-89 にも 必要なデビエーション(国際規格との差異)を加える活動を行った.

ここでは, R290 等の A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースに関する国際規格,冷媒漏えい解析,リスクアセスメント,日本の規格及び日本の法律についての今までの検討結果及び現在の状況をまとめる.

## 7.2 国際規格 IEC60335-2-89 の主な改正点

#### 7.2.1 最大冷媒充填量

従来の IEC 規格では、冷媒回路への可燃性冷媒(A3 冷媒, A2 冷媒及び A2L 冷媒)の充填量は、1 つの冷媒 回路あたり 0.15 kg が上限であった.改正後の IEC 規格では、可燃性冷媒を、LFL(Lower Flammability Limit, 燃焼下限界)の 13 倍と 1.2 kg のうち小さい値まで充填してよいことが規定された. R290 の場合、LFL が 0.038 kg/m<sup>3</sup> であるため 0.494 kg まで充填できる.また、A2L 冷媒である R1234yf の場合、LFL が 0.289 kg/m<sup>3</sup> であ るため 13 倍の LFL は 3.757 kg となるが、冷媒量の上限値が制限されているため、最大冷媒充填量は 1.2 kg 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,安全のため,機器から可燃性冷媒が漏えいした時の着火リスクを低減することが重要となる.そのため,可燃性冷媒を使用した機器の設置は,式(7-1)で計算した最小床面積 A<sub>min</sub> m<sup>2</sup>以上の部屋に制限し,製品にもその数値を表示することが規定された.式(7-1)において,Hは天井高さ 2.2 m(固定値),0.25 は安全係数,LFL は使用する冷媒の LFL kg/m<sup>3</sup>, M は冷媒充填量 kg である.例えば,R290 を 0.494 kg 充填した機器の場合は,23.7 m<sup>2</sup>以上の床面積の場所に設置しなければならない.

$$A_{min} = M/(H \times 0.25 \times LFL) \tag{7-1}$$

#### 7.2.3 冷媒漏えい試験

冷媒回路に冷媒を 0.15 kg 以上充填した場合は、冷媒漏えい試験を行い、機器の周囲に可燃域が生成されないことを確認しなければならない.この時、最も不利な結果になる箇所からの漏えいを想定する.試験中に放出する冷媒量は、冷媒回路内の冷媒充填量と同じでなくてはならない.冷媒漏えい速度は、式(7-2)で求めた wg/min に設定する.例えば、冷媒が R290 で冷媒充填量 M が 0.494 kg の場合、質量流束 q は 281 g/min/mm<sup>2</sup> (高



Fig. 7-1 Schematic illustration of the refrigerant concentration sampling points<sup>1)</sup>

圧側の場合.低圧側の場合は 134 g/min/mm<sup>2</sup>) であり,冷媒漏えい速度 w は 44.4 g/min (2.66 kg/h) となる.リ ーチインショーケース等では庫内に全冷媒量を漏えいさせた後に扉や蓋を開けなければならない.冷媒濃度の 測定間隔は 5 秒以下とし,試験時間は全冷媒量が放出されるのに要する時間 (*t*cmin,式(7-3)) の 2 倍以上と する.冷媒濃度は, Fig. 7-1 の黒四角と黒丸で示す箇所で測定し,全ての測定点で,測定開始から 5 分を超え た後は LFL の 1/2 を超えてはならない (すなわち,測定開始から 5 分以内は大きな可燃域が生成されたとし ても可燃域が生成されないとみなされてしまう).

$$w = q \times 0.32 \times M \times (476/\rho)$$
 (7-2)  
 $t_{z} = 10^{3} \times M/w$  (7-3)

# 7.3 冷媒漏えい解析

## 7.3.1 リーチインショーケースの庫内漏えい

#### (1) 解析モデル

リーチインショーケースの庫内に冷媒が漏えいした後に扉を急開放することを想定した解析を行った.解析 モデルを Fig. 7-2 に示す.リーチインショーケースのサイズは、高さ 2.0 m、幅 1.542 m、奥行 0.7 m、庫内体積 は 1.08 m<sup>3</sup> とした.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、 前面から吸気し、背面を通り、ショーケースの上部に吹き出す風路構造となっている.凝縮器ユニットの開口 部の面積は  $8.3 \times 10^2$  m<sup>2</sup> (幅 1.206 m×高さ 0.0689 m)で、風量を 0~0.249 m<sup>3</sup>/s (風速 0~3 m/s)で変化させた. 正方形店舗内の壁際中央にショーケースを設置し、ショーケースの反対側の天井の両隅に 0.4 m×0.4 m の圧力 境界を設置した.庫内が全冷媒量相当の均一の冷媒濃度になっている状態から解析を開始し、扉がないものと して解析を行った.この解析は、スライド扉付きのショーケースでの挙動を模擬したものである.庫内前面の 上部から下部に向かって流れるエアカーテンは、吹出部の開口面積 6.59×10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>、風量 0.137 m<sup>3</sup>/s (風速 2.08 m/s)とし、エアカーテンが有る場合と無い場合の双方の解析を行った.店舗内の床面積を 17.14 m<sup>2</sup> (4.14 m× 4.14 m)、24.01 m<sup>2</sup> (4.9 m×4.9 m)、36.0 m<sup>2</sup> (6.0 m×6.0 m)、64.0 m<sup>2</sup> (8.0 m×8.0 m)及び 100.0 m<sup>2</sup> (10.0 m× 10.0 m)と変化させ、冷媒量は 0.358 kg 又は 0.5 kg とした.店舗内の天井高さは 2.2 m とした.



Fig. 7-2 CFD model of reach-in refrigerated display cabinet

## (2) 解析結果

冷媒量 0.5 kg,床面積 24.01 m<sup>2</sup>の場合の扉開放後 5 秒後及び 10 秒後の店舗内のショーケースの中央での冷 媒濃度分布を Fig. 7-3 及び Fig. 7-4 に示す. Fig. 7-3 は,エアカーテン無で,凝縮器ユニット風量が 0 m<sup>3</sup>/s の場 合,Fig. 7-4 は,エアカーテン有で,凝縮器ユニット風量が 0.166 m<sup>3</sup>/s (風速 2 m/s)の場合の図である.風量 0 m<sup>3</sup>/s の時は,漏えい冷媒がショーケースから直線的に対面壁まで移動し,壁に衝突する形になっている.エア カーテンの有無及び風速(風量)によらず,全ての場合で,床面又は天井面の広い領域に数秒で可燃域が広が っている.リーチインショーケースの庫内に漏えいした全冷媒が扉の開放によって庫外に一気に漏えいするた め,漏えい速度が速く,周囲への冷媒の拡散が間に合わないことが原因と考えられる.

冷媒量 0.5 kg において, エアカーテンの有無, 凝縮器ユニットの風量及び床面積を変化させた場合の可燃空 間体積の経時変化を Fig. 7-5 に示す. Fig. 7-5 の(a)はエアカーテン無かつ床面積 24.01 m<sup>2</sup>の場合, (b)はエアカ ーテン有かつ床面積 24.01 m<sup>2</sup>の場合, (c)はエアカーテン無かつ床面積 100 m<sup>2</sup>の場合, (d)はエアカーテン有か つ床面積 100 m<sup>2</sup>の場合である. エアカーテン有の場合, エアカーテン無の場合よりも可燃域継続時間(可燃域 の発生から消滅までの時間)が短くなり,可燃空間体積が若干小さくなる. しかし, 凝縮器風量が 0 m<sup>3</sup>/s の場 合以外では, エアカーテン有無による値の違いはそれほど大きくない. 凝縮器ユニットの風量を大きくした場 合, エアカーテン有無によらず,可燃域継続時間は小さくなるが,可燃空間体積の最大値は殆ど減らない.



(a) After 5 sec. from opening the door

(b) After 10 sec. from opening the door







000

(a) After 5 sec. from opening the door

(b) After 10 sec. from opening the door

Fig. 7-4 Concentration distribution of air flow rate 0.166 m<sup>3</sup>/s with the air curtain (refrigerant 0.5 kg, floor area 24.01 m<sup>2</sup>)

また、可燃空間体積の経時変化は、風量が0m<sup>3</sup>/sの時には床面積によって大きく異なるが、風量が0.083m<sup>3</sup>/s (風速1m/s)以上の時には床面積の影響はそれほど大きく無い.可燃空間体積の最大値は、エアカーテンの 有無、床面積の大小、凝縮器風量の大小によらず、あまり変わらない.床面積24.01m<sup>2</sup>かつ凝縮器風量0m<sup>3</sup>/s の場合以外では、可燃空間継続時間は5分(300秒)以内であるため、国際規格 IEC 60335-2-89 では可燃域が 生成されないものとみなされてしまう.しかし、Fig. 7-3 及び Fig. 7-4 に示す通り、可燃域は店舗内の床面又は









$$T_{\rm V} = 4.61 \times 10^5 \times \left(\frac{M}{A}\right)^2 - 4.76 \times 10^3 \times \left(\frac{M}{A}\right) + 1.38 \times 10^1 \qquad \text{(air flow rate ; 0 m^3/s)} \tag{7-4}$$

$$V_{\rm V} = 1.36 \times 10^2 \times \left(\frac{M}{A}\right) + 1.34 \qquad \text{(air flow rate ; 0 m^3/s)} \tag{7-5}$$

$$T_{\rm V} = 1.40 \times 10^1 \qquad \text{(air flow rate ; 0.166 m^3/s)} \tag{7-6}$$

$$V_{\rm V} = 2.68 \times 10^1 \times \left(\frac{M}{A}\right) + 1.08 \qquad \text{(air flow rate ; 0.166 m^3/s)} \tag{7-7}$$

天井面の広い領域に広がっている. R290 等の A3 冷媒においては,静電気や店舗内の電気機器のリレー等も着 火源となるため,可燃域の生成が短時間であっても,可燃域内に着火源が存在すれば着火に至る可能性があり, 危険である.

エアカーテン無の場合の可燃域継続時間(*T*<sub>v</sub>)及び平均可燃空間体積(*V*<sub>v</sub>)(可燃域継続時間内での可燃空間体 積の平均値)の解析結果を Fig. 7-6 及び Fig. 7-7 に示す. 図は,それぞれ風量が 0 m<sup>3</sup>/s, 0.166 m<sup>3</sup>/s (風速 2.0 m/s)の場合を示す. 図の横軸は冷媒量(*M*)を床面積(*A*)で除した値である.可燃域継続時間及び平均可燃空間体 積ともに, M/A の関数で表現することができ,求めた最小二乗近似式をそれぞれ式(7-4)~式(7-7)及び Fig.7-6 及び Fig. 7-7 の実線で示す. リーチインショーケースの庫内漏えいでは,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かった. これは,ショーケース庫内前面のエアカーテン有の場合でも同様であ る.

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

#### 7.3.2 平形ショーケースの庫外漏えい

#### (1) 解析モデル

平形ショーケースの下部の凝縮器ユニットから冷媒が漏えいする解析を行った.解析モデルを Fig. 7-8 に示す.平形ショーケースのサイズは、高さ 0.81 m、幅 1.8 m、奥行 1.09 m とした.ショーケースの下部には凝縮器ユニットがあり、一方の開口部から吸気して他方の開口部から吹き出す.凝縮器ユニットの開口部の面積は吸込口及び吹出口とも 6.89×10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>(幅 0.733 m×高さ 0.094 m)で、風量を 0~0.207 m<sup>3</sup>/s(風速 0~3 m/s)で変化させた.正方形店舗内の中央にショーケースを設置し、天井の一端の両隅に 0.4 m×0.4 m の圧力境界を設置した.凝縮器ユニットの開口部では、風量 0 m<sup>3</sup>/s の時の冷媒濃度は 100%に設定し、風量が 0 m<sup>3</sup>/s よりも大きい時の冷媒濃度は計算値を使用した.風量 0 m<sup>3</sup>/s の時は吸込口及び吹出口の双方から均等に冷媒を漏えいさ

せ、風量が0m<sup>3</sup>/sよりも大きい時は吹出口から漏えいさせた.店舗内の天井高さは2.2m,床面積は15.21m<sup>2</sup> (3.9m×3.9m),24.01m<sup>2</sup>(4.9m×4.9m),36.0m<sup>2</sup>(6.0m×6.0m),64.0m<sup>2</sup>(8.0m×8.0m)及び100.0m<sup>2</sup>(10.0 m×10.0m)と変化させ、冷媒量は0.358kgと0.5kgとした.漏えい速度は4分で全冷媒量を漏えいさせる値 (4分全量漏れ速度)とし、0.358kgの時は5.37kg/h,0.5kgの時は7.5kg/hとした.



Fig. 7-8 CFD model of horizontal refrigerated display cabinet

#### (2) 解析結果

Fig.7-9 は、凝縮器ユニット風量 0 m<sup>3</sup>/s の場合の可燃域継続時間(*Tv*)及び平均可燃空間体積(*Vv*)の解析結果であり、図の横軸は冷媒量(*M*)を床面積(*A*)で除した値である.可燃域継続時間及び平均可燃空間体積ともに、M/Aの関数で表現することができ、求めた最小二乗近似式をそれぞれ式(7-8)、式(7-9)及び Fig.7-9 の実線で示す.

$$T_{\rm V} = 4.41 \times 10^5 \times \left(\frac{M}{A}\right)^2 - 1.42 \times 10^3 \times \left(\frac{M}{A}\right) + 3.94 \qquad \text{(air flow rate ; 0 m^3/s)}$$
(7-8)  
$$V_{\rm V} = 8.90 \times 10^1 \times \left(\frac{M}{A}\right) + 2.58 \qquad \text{(air flow rate ; 0 m^3/s)}$$
(7-9)

凝縮器ユニットからの漏えい冷媒の撹拌について、可燃域を生成しない風量として式(7-10)が提案されている  $^{7-2}$ . ここで、 $A_o$ は吹出口面積 m<sup>2</sup>、Fは安全係数で 0.25、Gは LFL kg/m<sup>3</sup>、 $h_o$ は吹出口の中心線の高さ m、Qは吹出風量 m<sup>3</sup>/min、w は漏えい速度 kg/h である.

$$Q = 60 \times \frac{5 \times \sqrt{A_0} \times (w/3600)^{3/4}}{h_0^{1/8} \times [G \times (1-F)]^{5/8}}$$
(7-10)

床面積 24.01 m<sup>2</sup>, R290 0.5 kg, 漏えい速度 7.5 kg/h の時,式(7-10)の計算風量は 0.150 m<sup>3</sup>/s (風速 2.182 m/s) で あり、この条件で冷媒漏えい解析を行ったところ、可燃域は生成されなかった.また、それよりも 8.4 %小さ い風量である 0.1378 m<sup>3</sup>/s (風速 2.0 m/s) でも可燃域が生成されなかった.この他、A3 冷媒である R600a 及び A2 冷媒である R152a でも同様の解析を行った結果、いずれの冷媒においても式(7-10)の計算風量では可燃域が 生成されず、計算値よりも 8~20 %程度小さい風量でも可燃域が生成されなかった.

次に、床面積 24.01 m<sup>2</sup>、冷媒量 0.5 kg、凝縮器ユニット風量 0 m<sup>3</sup>/s の時に、漏えい速度を 0.1~40.71 kg/h と 変化させた解析を行った。可燃域継続時間及び可燃空間時空積の計算結果を Fig.7-10 に示す。可燃空間時空積 は可燃域継続時間と平均可燃空間体積を乗じたものである。漏えい速度が 2 kg/h 以上の場合は、可燃域継続時 間及び可燃空間時空積の計算結果には殆ど違いはない。漏えい速度が 2 kg/h を下回ると、平均可燃空間体積が 徐々に低下し始め、漏えい速度が 2 kg/h の時に対して 0.2 kg/h では約 60%、0.1 kg/h では約 25%になった。し かし、冷媒量が同一のため、漏えい速度が低下すると漏えい終了までの時間が長くなり、可燃域継続時間が増 加する。そのため、結果的に、可燃空間時空積は、漏えい速度 0.54 kg/h 以上では殆ど変わらず、それよりも



(a) Mean flammable volume

(b) Flammable volume-time integration

Fig. 7-10 Calculation results at different leak rate

漏えい速度が遅いと値が小さくなるが、0.1 kg/h でも漏えい速度が大きい時の約 50 %の値がある. すなわち、 R290 の場合、微少漏れは 0.54 kg/h 以下(7.4.5 の Table 7-1 参照)であり、微少漏れでも十分に大きな可燃域が 形成されることになり、A3 冷媒のリスクアセスメントでは、微少漏れを含む全ての漏えいを考慮して着火確 率を計算する必要があることがわかった. なお、リスクアセスメントは、安全のため、4 分全量漏れ速度(R290 の場合は 7.5 kg/h)の時の可燃空間時空積を用いて行う.

#### 7.3.3 多段形オープンショーケースの庫内漏えい

#### (1) 解析モデル

多段形オープンショーケースの庫内から冷媒が漏えいする場合のショーケースの解析モデル及び店舗モデル(ハーフモデル)をFig. 7-11 に示す.ショーケースのサイズは、高さ1.9 m、幅 1.8 m、奥行き0.76 m で、下部に凝縮器ユニットがあり、前面から吸気し、背面を通り、ショーケースの上部に吹き出す風路構造となっている. 凝縮器ユニットの開口部の面積は9.66×10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>、開口部の中心の高さは0.1545 m、風量を0~0.290 m<sup>3</sup>/s(風速0~3 m/s)で変化させた.ショーケース庫内の前面の上部から下部に向かって流れるエアカーテンの吹出部は、一重エアカーテンとし、開口面積を0.1296 m<sup>2</sup>(幅 1.8 m×奥行き0.072 m)、風量を0.114 m<sup>3</sup>/s(風速0.88 m/s)とした.店舗モデルはハーフモデルで高さ2.7 m×幅5.487 m×奥行き3.35 m であり、店舗の壁面中央にショーケースを設置し、ショーケースの中央に対称境界を設置し、対面の壁面を圧力境界に設定した.冷

媒量は 0.5 kg とし,漏えい速度は 4 分全量漏れ速度である 7.5 kg/h とした.





## (2) 解析結果

Fig. 7-12 は漏えい後 240 秒後(4分後)の濃度分布図である.(a)は凝縮器ユニットの風量が0m<sup>3</sup>/sの場合,(b)は凝縮器ユニットの風量が0.0965m<sup>3</sup>/s(風速1m/s)の場合である.凝縮器ユニットの風量が0m<sup>3</sup>/sの場合は床面に可燃域が生成された.風量が0.0965m<sup>3</sup>/s(風速1m/s)以上の場合は庫外には殆ど可燃域は生成されず,庫内のエアカーテンの下部と凝縮器ユニットの空気吸込部との間にのみわずかに可燃域が生成されたが,この領域には着火源がないため問題にはならない.すなわち,多段形オープンショーケースの庫内漏れに対しては,下部に設置した凝縮器ユニットの風量がある程度確保されていれば,着火に至る有意な可燃域が庫外に生成されることはない.また,A3冷媒であるR600aやA2冷媒であるR152aでも同様であることを確認した.





## 7.4 リスクアセスメントの条件及び方法

国際規格 IEC 60335-2-89 において、可燃性冷媒の最大冷媒充填量が緩和(増加)され、最低限の安全性を担保するために、冷媒量に応じた床面積の制限及び冷媒漏えい試験の実施が規定された.しかし、国際規格は、安全性よりも使い勝手を重視する傾向があり、リスクアセスメントも行われていないため、十分に安全性を担保できる内容になっているとは限らない.そこで、日冷工では、A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースの冷媒漏えい時の着火に関する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ている.この検討で抽出された内容については、IECの規格にも反映すべく提案する予定である.

## 7.4.1 リスクアセスメントのプロセス及び着火確率の算出

可燃性冷媒を使用した機器の着火確率は,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,可燃域の空間分布を表す空間的遭遇確率及び冷媒漏えい発生確率を乗じて算出する.

時間的遭遇確率( $P_t$ )は,幾何学的確率<sup>7-3),7-4</sup>の考え方を用いて算出する.詳細は6章に記載しているので,ここでは,簡単なイメージを記載する.対象とするステージの総時間( $T_a$ ),可燃域継続時間( $T_v$ ),着火源存在時間( $T_t$ )及び着火源作動回数(n)を用いて,式(7-11)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)や着火源が特定の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( $P_s$ )は平均可燃空間体積( $V_v$ )と対象空間体積( $V_a$ )を用いて式(7-12)で計算し,着火確率(P)は,時間的遭遇確率( $P_t$ ),空間的遭遇確率( $P_s$ )及び冷媒漏えい発生確率( $P_t$ )を用いて式(7-13)で計算する.このうち,可燃域継続時間( $T_v$ )及び平均可燃空間体積( $V_v$ )は,冷媒漏えい解析(7.3参照)で求めた値(近似式)を用いる.その他の値は,各ライフステージでの設定及び着火源の性質に応じた値に設定する.

$$P_{t} = k \times [1 - \{1 - (T_{t} + T_{v})/T_{a}\}^{n}]$$
(7-11)

$$P_{\rm s} = V_{\rm v} / V_{\rm a} \tag{7-12}$$

$$P = P_t \times P_s \times P_r \tag{7-13}$$

なお、使用時の着火確率は、凝縮器ユニットのファン運転時及びファン停止時(故障時等)の着火確率を運転率で加重平均して求める.リーチインショーケースの庫内漏えいには、停止時は式(7-4)及び式(7-5)、運転時は式(7-6)及び式(7-7)を用いる.凝縮器ユニットからの漏えいには、平形ショーケースの式を適用し、停止時は式(7-8)及び式(7-9)を用い、運転時は式(7-10)を満足する風量になっているものとして可燃域は生成されないものとする.作業時の値は停止時の式を用いて求める.

#### 7.4.2 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は、揚げ物等の簡単な調理が可能なコンビニエンスストアとする. コ ンビニエンスストアは店舗数が多く(約5.5万店舗),さらに、A3冷媒は静電気や電気機器のリレー等でも着 火するため、内蔵ショーケースを設置する場所のうち、コンビニエンスストアが最も着火源が多いと想定され



Fig. 7-13 Refrigerated display cabinets installed at convenience store

る. コンビニエンスストア店舗内には Fig. 7-13 に示すショーケースが設置されている.

リスクアセスメントにおいて、ショーケースの冷媒回路内の冷媒量は 0.5 kg とし、店舗内の床面積は 84.7 m<sup>2</sup> とした. なお、この床面積は、店舗の標準的な寸法を想定し、店舗内の別置形のクローズドショーケース、事 務所、及びトイレを除く床面積として求めたものである.

#### 7.4.3 内蔵ショーケースのライフステージ及び各ステージのシナリオ

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する店舗に輸送され、店舗内の適切な場所に設置して使用される。使用時に不具合が生じた時は、設置場所で修理するか、その場所では 十分な作業が出来ないと判断された時には、ショーケースをメーカーのサービス拠点等に持ち帰り、不具合箇 所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撤去し、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。 このうち、日冷工で行うリスクアセスメントにおいては、輸送、保管、設置、使用、修理、撤去までをライ フステージとして設定する。

#### (1) 輸送ステージ

コンビニエンスストアに設置する内蔵ショーケースの輸送は、一般的にトラックを使用して行われるが、ト ラック輸送の場合、荷室には着火源が存在しない、そこで、輸送時のリスクアセスメントでは、荷室と運転室 が同じ空間にあるワゴン車による輸送を想定する.

ワゴン車による輸送は、現地の修理で凝縮器ユニットを交換する場合に行われる. 往路は全て新品の木枠梱 包有、復路は全て旧品の木枠梱包無しで、凝縮器ユニット単体を冷媒が入った状態で輸送することを想定し、 ろう付けを伴う故障が発生した時に交換作業が発生するものとする. ワゴン車輸送が発生する確率は、ろう付 けを伴う修理件数の調査結果を市場普及台数で除した値 8.39×10<sup>4</sup> とする. これに、交換される凝縮器ユニッ トに冷媒が入っている確率の推定値 5×10<sup>-3</sup>を乗じて、ワゴン車輸送頻度を 4.2×10<sup>-6</sup> とする.

ワゴン車の内容積は2.9 m<sup>3</sup>, 乗車人員は積み下ろし作業に必要な人数として2名, 最大輸送時間は12時間, 平均輸送時間は2時間とする. 輸送時の着火源はシナリオを想定して設定する.

#### (2) 保管ステージ

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 倉庫と各販売拠点等で保有する狭小倉庫に分類され、中型倉庫は1,000 m<sup>2</sup>、狭小倉庫は15 m<sup>2</sup>とする.

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運搬機器で行う.作業時間は、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日とする.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又はビニール梱包+木枠の状態を想定する.ビニール 梱包は底面が解放されており外気との空気流動がある.中古品は梱包無し又はビニール梱包を想定する.さらに新品と中古品ともに、扉が付いているリーチインショーケース等の場合、輸送時や保管時にそれらが開かないように固定されているものとする.保管時の着火源はシナリオを想定して設定する.

#### (3) 設置ステージ

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する.新品は工場出荷時の状態であり,ビニール 梱包やビニール梱包+木枠等で梱包されており,中古品はビニールのみの梱包状態とする.

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、設置場所で開梱及び付属品の取付け等を行う据付作業がある.これらの作業で、ショーケース1台あたり、作業者2名で約1時間を要する.内訳は、荷下ろし作業で0.2時間、運搬作業で0.1時間、据付作業で0.7時間とする.ショーケースの年間の設置率は陳列棚及び陳列ケースの耐用年数から1.67×10<sup>-1</sup>とした.設置時の着火源はシナリオを想定して設定する.設置状態については新店工事と営業中の店舗への設置を想定する.営業中の店舗への設置の場合、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必要がある.

#### (4) 使用ステージ

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. R290 等の A3 冷媒においては,裸火の他,電気スパーク, 静電気,高温表面も着火源となる. このうち,電気スパークには,店舗内の電気機器のリレーやサーモスタッ ト,照明等のスイッチの ON/OFF,電気機器のコンセントの抜き差し等がある. 静電気は,人が店舗内のショ ーケースの金属部に触れて放電することを想定する.

#### i) 電気スパーク

電気スパークの放電時間は5msecとする.電気スパークが発生するシナリオは以下とする.

コーヒーディスペンサー(Fig. 7-14 (a))は、ボイラーやモーターを有している.ボイラーは、空焚き防止を 考慮して過昇防止スイッチやヒューズ等で保護されており、ブラシモーターは使われていないため、ともに着 火源にはならない.コーヒーディスペンサーの内部リレーの動作時に放電が発生するものとする.コンビニエ ンスストアチェーン全体でのコーヒー販売数とコンビニエンスストアの店舗数から1店舗あたりの年間販売 数を求め、内部リレーの動作回数を設定する.

フライヤー(Fig.7-14(b))は、ヒータを有しているが、油の温度やプレート温度を250℃以下に制御しており、着火源にはならない.フライヤーのスイッチのON/OFF時に放電が発生するものとする.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時間であるため、4時~24時の間に4時間ごとに調理するものとし、スイッチのON/OFF回数を設定する.

中華まん加湿装置(Fig. 7-14 (c))及びおでん加熱装置(Fig. 7-14 (d))は、ヒータを有しているが、過昇防止 スイッチや温度ヒューズで保護されているため着火源とはならない. それぞれのスイッチの ON/OFF 時に放電 が発生するものとする.

マルチコピー機(Fig. 7-14 (e))は、レーザー光を使う書き込み部、コロナ放電が発生する帯電ローラー、ヒータを使用してトナーを上に定着させる定着部等から構成されている.家庭用プリンターと業務用コピー機との違いが不明であり、安全のため、使用中はずっと着火源になるものとする.1日あたりのコピー機の使用回数及びコピー時間を想定し、コピーをすると必ず着火するものとする.

自身以外のショーケースは可燃性冷媒の使用を想定していないため、内蔵されたブラシモーターの放電が着 火源になるものとする.ブラシモーターの普及率は1%とする.モーターが動いている時は、周囲に燃焼速度 よりも十分に速い風が流れているため着火源にならず、起動時に放電が発生するものとする.

掃除機のコンセントを抜く時と店舗内の照明スイッチの操作時の放電を想定する.店舗内の清掃のため掃除 機の電源コンセントを1日2回抜き,掃除機本体のスイッチを操作せずにコンセントを抜く確率を想定する. 店舗内の照明スイッチは1日2回 ON から OFF にするものとする.

店舗の換気扇は一般的に常時運転であり、ON/OFF 無しのため、そのスイッチは着火源にならない.

その他,各電気機器の発火事故による着火を想定する.各機器の1店舗あたりの設置台数を想定し,NITE (National Institute of Technology and Evaluation,製品評価技術基盤機構)のデータから1年間の事故件数を調べ、市場普及台数を基に発火事故の発生確率を算出する.











(a) Coffee machine

(b) Deep frying machine

ne (c) Chinese-style buns steamer

(d) Heating appliance for "Oden"

(e) Copier

Fig. 7-14 Typical equipment in the shop

#### ii) 静電気

リーチインケースの扉開閉時の扉の取っ手を持つ時,買い物する客がオープンショーケースのハンドレール や棚等の金属部分に触れる時等に発生する静電気を想定する.コンビニエンスストアでの1日あたりのアイス コーヒーの販売数を調べ,冷凍用及び冷蔵用のリーチインショーケースの扉開閉回数を算出する.なお,リー チインショーケースの庫内漏えい後に扉をあけても、最初の客が扉に触れる時には庫外には漏えいしていない ため着火しない.そこで,1人目の客が扉を開け,直後に2人目の客が扉を開ける確率を想定する.静電気の 放電時間は1 µsec とする.静電気放電の危険性がある湿度を30%以下とし,その発生確率は東京の気象デー タを店内温度に換算し年間平均18.7%とする.

#### iii) 高温表面

蛍光灯・LED・白熱球の点灯時の表面温度,ショーケースのデフロストヒータの表面温度は R290 の自己着 火温度以下であり,着火源とならない.

#### iv) 裸火

店舗に陳列しているライターを客がためし使用する場合を想定する.ためし使用は、1日5人が1回あたり5秒行うものとする.なお、店舗内では喫煙しないものとする.また、燃焼式暖房機の使用も想定し、普及率0.01%、1日10時間使用とする.

#### (5) 修理ステージ

修理は、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、一時的に屋外に移動し て修理を行う店外修理、大型等の移動が困難なショーケースで店舗内に設置したまま修理を行う店内修理を想 定する.

内蔵ショーケースの修理確率は、修理件数の調査結果を市場普及台数で除して求め、1.00×10<sup>-2</sup>とする.また、そのうち、店外修理及び店内修理において、冷媒回路の修理を伴う修理の発生割合を 8.39×10<sup>-2</sup>とする. 修理に要する作業時間は、大気への冷媒放出(冷媒廃棄)の時間が1時間、配管切断及び冷媒回路部品の交換時間が1時間、冷媒充填の時間が1時間、その他の冷媒回路に関わらない作業の時間が1時間とする.

修理時の着火源はシナリオを想定して設定する. なお,店舗内での作業に関しては,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必要がある. なお,現地での冷媒廃棄や冷媒充塡は,高 圧ガス保安法との関連があるが,これについては,7.5 で説明する.

#### (6) 撤去ステージ

撤去ステージは、店舗内に設置してあるショーケースを廃棄するために、店舗内から撤去する場合を想定する.この時、内蔵ショーケースは、冷媒回路内に冷媒が入った状態で移動する.

内蔵ショーケースの撤去率は、ショーケースの寿命(13年)で交換される確率7.69×10<sup>-2</sup>と、店舗が閉店されてショーケースが撤去される確率4.70×10<sup>-2</sup>を合計し1.24×10<sup>-1</sup>とする。撤去に要する作業時間は1時間とする。撤去時の着火源はシナリオを想定して設定する。撤去は、営業廃止店舗から撤去する場合と営業中の店舗から撤去する場合を想定する。営業中の店舗からの撤去の場合、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必要がある。

#### 7.4.4 許容レベルの設定

内蔵ショーケースの日本の普及台数は2014年度時点で190万台<sup>7-5)</sup>であった.日冷工のデータから,2014年 度以降の内蔵ショーケースの出荷台数は殆ど変化していないため,普及台数はその後も変わっていないと考え て190万台とした.

安全のため、着火事故は全て致命的な事故であると考え、使用時の許容値は、市場の普及台数に対して 100 年に1回以下の致命的な事故が発生するレベルであるとして、5.26×10<sup>-9</sup>とした.使用時以外に関しては、職 業として常にショーケースを取り扱っている専門の作業者が携わっており、作業に関する専門的な教育を受け ているため、許容できる事故の発生確率を使用時よりも1桁上げることができると考え、許容値を 5.26×10<sup>-8</sup> とした.

#### 7.4.5 冷媒漏えい速度

Table /-1 Comparison of reingerant leak rates			
Refrigerant	Burst leak (kg/h)	Rapid leak (kg/h)	Slow leak (kg/h)
R32 (63 °C saturated liquid)	75	10	1
R290 (63 °C saturated liquid, higher pressure side)	40.71	5.43	0.54
R290 (35 °C saturated liquid, lower pressure side)	31.2	4.16	0.42

配管の損傷状況により、冷媒漏えい速度を噴出漏れ、急速漏れ、微少漏れの3つに区分する. 噴出漏 れは圧縮機の振動や蒸発器の氷結による配管折損が起きた場合の漏えい速度、微少漏れは俗にいうスロ ーリークで腐食等によって微小な孔が形成された場合や継手の締付不良等が発生した場合の漏えい速度 である.そして急速漏れは、その中間的な漏えい速度であって、圧縮機や蒸発器の凍結がない場合の最 大漏えい速度であり配管亀裂等が発生した場合の漏えい速度である.

日冷工では、市場から回収した冷媒漏れが発生した空調機の部品の調査結果から、R32 において、噴出漏れ を 75 kg/h, 急速漏れを 10 kg/h, 微少漏れを 1 kg/h とした <sup>7-6)</sup>. この漏えい速度を算出した計算式を用い、R32 の物性値を R290 の物性値に置き換えて、R290 の漏えい速度を求めると Table 7-1 のようになる. この時、R290 の漏えい速度は 63 ℃の飽和圧力(飽和液)に対するもの(高圧側)と 35 ℃の飽和圧力(飽和液)に対するもの(低圧側)の双方を算出した.

冷媒が漏えいする孔径は、腐食等の漏えい発生原因によって異なる.冷媒の漏えい初期においては、その孔 径での最大の漏えい速度で漏えいするが、漏えいが進むと冷媒回路内の圧力が低下するため漏えい速度が下が り、最後は漏えいが停止する.内蔵ショーケースでは、冷媒量が少ないため、漏えいによる冷媒回路内の圧力 の低下が早く起こり、漏えい速度も早めに小さくなる.そこで、リスクアセスメントに使用する内蔵ショーケ ースの冷媒漏えい速度を4分全量漏れ速度とした.0.5 kgのR290においては、4分全量漏れ速度である7.5 kg/hは、急速漏れより速く、噴出漏れより遅い漏えい速度となっている.なお、4分全量漏れ速度は、空調機 の国際規格 IEC 60335-2-40における考え方である.IEC 60335-2-89 では、漏えい速度を計算する別の式(式(7-2))が規定されており、この式で計算した漏えい速度は2.66 kg/h となる.この値は急速漏れよりも遅い速度で あり、4分全量漏れ速度に対しては1/2.8 となる.日冷工では、安全性を高めるために、内蔵ショーケースのリ スクアセスメントにおいて、空調機で使用している4分全量漏れ速度を採用した.

#### 7.4.6 冷媒漏えい発生確率

## (1) 使用時冷媒漏えい発生確率

使用時の冷媒漏えい発生件数の調査結果を市場普及台数で除して冷媒漏えい発生確率を算出した.結果を Table 7-2 に示す.

冷媒漏えい速度を 0.1~40.71 kg/h の間で変化させて、平形ショーケースの下部の凝縮器ユニットから R290 が漏えいする冷媒漏えい解析を行った結果、漏えい速度が 0.1 kg/h でも十分大きな可燃域が生成されることが わかった (7.3.2 参照). そこで、A3 冷媒のリスクアセスメントにおいては、微少漏れ、急速漏れ、噴出漏れの 全ての冷媒漏えい発生確率を合計した値である 1.0×10<sup>-3</sup>を使用時の冷媒漏れ発生確率とした.

Table 7-2 に示す通り、微少漏れは全漏えい事故の約 98%を占めており、A3 冷媒では危険な状況になる漏えい事故の割合がかなり多いことがわかる.

	Allinual terrigerant leakage probability		
	Refrigerant leak probability	Percentage	
Burst leak	5.26×10-7	0.05 %	
Rapid leak	1.89×10 <sup>-5</sup>	1.89 %	
Slow leak	9.82×10 <sup>-4</sup>	98.06 %	
Total	1.00×10 <sup>-3</sup>	_	

Table 7-2 Annual refrigerant leakage probability

## (2) 初期設置時冷媒漏えい発生確率

初期不良のうちの冷媒漏えいが発生した機器の件数の調査結果を出荷台数で除して初期設置時冷媒漏えい 発生確率を求め、2.11×10<sup>4</sup>とする.これを工場出荷後から設置までの冷媒漏えい発生確率とし、輸送時と設 置時の冷媒漏えい発生確率は初期設置時冷媒漏えい発生確率を 1/3 にした値とする.保管時の冷媒漏えい発生 確率については、保管の期間が長期間の場合も想定されるので、安全のため、初期設置時冷媒漏えい発生確率 をそのまま使用する.

また,調査結果から,各ショーケースの形態ごとの割合を,リーチインショーケース 29.7%,平形ショーケース 13.3%,多段形ショーケース 57.0%とする.リーチインショーケース庫内漏れ後の扉急開放が最も危険な状態と想定され,これが発生する割合として,リーチインショーケースの割合 29.7%を乗じて取り扱う.

#### (3) 作業時冷媒漏えい発生確率

作業に起因する冷媒漏えいは作業ミスにより発生する.修理時及び撤去時の作業起因の冷媒漏えい発生確率 は、各作業のシナリオからヒューマンエラーを想定しその発生確率から算出する.

#### (4) ヒューマンエラー発生確率

ショーケースの設置,修理,撤去等の作業は,基本的には教育訓練された技術レベルの高い専門業者が行う が,作業環境は一様ではなく,ショーケースが食品保管に使用されている場合は,食品の保管温度の関係から, 修理作業に時間的な制約を設けられることも多い.一般的に,リスクアセスメントは,正常な状態を想定して 行うものであるため,リラックスした精神状態での作業を想定し,ヒューマンエラーを1.0×10<sup>-3</sup>とする<sup>7-7)</sup>. 可燃性冷媒への着火を防ぐために実施する従来とは異なる作業に関しては,注意を要する作業であるとし,ヒ ューマンエラーを1.0×10<sup>-2</sup>~5.0×10<sup>-2</sup>とする<sup>7-7)</sup>.また,教育や表示等のヒューマンエラーを低減させる安全 対策を講じた後でも,ヒューマンエラーは1.0×10<sup>-4</sup>を下回らないものとする.

## 7.5 日本の法律(高圧ガス保安法)

高圧ガス保安法では、冷凍能力が3トン未満の冷凍設備(冷媒回路)内における高圧ガスが適用除外となっ ている.しかし、これは冷媒回路内の高圧ガスに関して規定している冷凍保安規則(冷凍則)に関してのこと である.冷凍則の適用を受けるものを除き、炭素数が3又は4の炭化水素を主成分とする冷媒は液化石油ガス 保安規則(液石則)の適用を受け、それ以外の冷媒は一般高圧ガス保安規則(一般則)の適用を受ける.機器 の冷媒回路から大気への冷媒の放出(冷媒の廃棄)、冷媒の回収、機器への冷媒の充填に関して、一般則又は 液石則が適用されると、20日前までの届け出が必要となり、実質、機器の修理ができなくなってしまう.そこ で、日冷工では、これを緩和すべく、経済産業省高圧ガス保安室との折衝を重ねた.ここでは、その結論とし ての冷媒廃棄、回収、冷媒充填の規定について説明する.

#### 7.5.1 冷媒の廃棄

冷凍則,一般則及び液石則で,可燃性ガス(A3冷媒及びA2冷媒)及び特定不活性ガス(A2L冷媒)の廃棄 は,火気を避け,大気中に放出する時は通風の良い場所で少量ずつ放出することが規定されている.液石則で はこの際の着火源との火気距離を8m以上とすることが規定されている.一般則には火気距離の規定はない が,一般則関係例示基準に同様の規定がなされている.

しかし、冷凍能力が3トン未満の機器からの冷媒の廃棄は、冷凍則が適用されかつその適用除外である領域 から一般則又は液石則が適用される領域に冷媒を移動する行為である.また、現地での冷媒の廃棄は機器から 大気へ差圧を使って行われる.そこで、2020年7月に、次の判断が経済産業省高圧ガス保安室によってなされ た.

「圧力を変更するための処理設備を使用しない差圧による冷凍能力が3トン未満の冷凍装置からの冷媒の 廃棄は高圧ガス保安法の適用除外である.」

従って、現地での冷凍能力が 3 トン未満の機器からの冷媒の廃棄に関しては、高圧ガス保安法の適用除外 であるため、日冷工規格(JRA GL-21)で安全を担保する内容を規定し、それに従って運用することとなる. なお、HFC 冷媒に関しては、フロン排出抑制法(フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律)に よって大気放出が禁止されているため、実際は大気への冷媒の廃棄はできない.

#### 7.5.2 冷媒の回収

経済産業大臣が定める回収装置は高圧ガス保安法の適用除外となっている.適用除外となっているのは、告示及び通達で定められた特定の要件を満たす CO<sub>2</sub> 又は特定不活性ガスを含む不活性ガスのフルオロカーボン に限られている.特定不活性ガスにおける特定の要件とは、風通しのよい所で使用すること、火気の近くで使用しないこと、適切な消火設備を適切な箇所に設けること、ガス漏えい検知警報装置を適切な箇所に設けることである.なお、特定不活性ガスの場合は、特定不活性ガスに対応した回収機を使用しなければならない.しかし、回収機の規定には、可燃性ガスに対する規定がない.そのため、可燃性ガスの回収は高圧ガス保安法の適用除外にならず、20日前までの届け出が必要となる.そのため、実質、可燃性ガスの回収はできない.なお、回収装置の規定を可燃性ガスに拡張するのは課題が大きい.

#### 7.5.3 冷凍装置への冷媒充塡

冷凍設備へ高圧ガスを充填するための設備内における高圧ガスに関して、当該設備内のガスの容積が 0.15 m<sup>3</sup> (150 L) 以下の特定不活性ガスを含む不活性ガスの現地での充填は高圧ガス保安法の適用除外である. そして、「高圧ガスを充填するための設備」は、「冷凍設備に高圧ガスを充填するためのゲージマニホールド、減 圧弁、バルブ、ホース等の設備(圧縮機を除く.)」であることが規定されている. 即ち、現地でのボンベから 機器への冷媒充填は高圧ガス保安法の適用除外となっている. しかし、可燃性ガスに対しては、規定がない.

冷凍能力が3トン未満の機器への冷媒の充填は、一般則又は液石則が適用される領域から冷凍則が適用され かつその適用除外である領域に冷媒を移動する行為である.また、現地での冷媒充填はボンベから機器へ差圧 を使って行われる.そこで、2020年7月に、次の判断が経済産業省高圧ガス保安室によってなされた.

「圧力を変更するための処理設備を使用しない差圧による冷凍能力が3トン未満の冷凍装置への冷媒充填 は高圧ガス保安法の適用除外である.」

従って,現地での冷凍能力が3トン未満の機器への冷媒充填に関しては,高圧ガス保安法の適用除外であるため,日冷工規格(JRAGL-21)で安全を担保する内容を規定し,それに従って運用することとなる.

## 7.6 日本の規格

JIS C 9335-2-89 は、IEC 60335-2-89 を和訳し必要なデビエーション(国際規格との差異)を加えた日本の規格である。日冷工が原案を作成しており、IEC 60335-2-89の Edition 3.0 に対応する改正を行った。JRA 4078及び JRA GL-21 は、A3 冷媒を使用した内蔵ショーケース等のリスクアセスメントに基づく日冷工規格であり、A3 冷媒及び A2 冷媒を使用した内蔵形冷凍冷蔵機器を適用範囲としている。日冷工のリスクアセスメントは、まだ途中段階である。しかし、フロン排出抑制法で、内蔵ショーケースを含む内蔵形冷凍冷蔵機器に対して、GWPの目標値及び目標年度を規定する動きがあるため、現時点の検討結果に基づき、日冷工規格を作成した。

ここでは,JISC 9335-2-89 と日冷工規格(JRA 4078 及び JRA GL-21)を総称して日本の規格と呼称し,IEC 60335-2-89 と日本の規格で異なる主な内容を説明する.

#### 7.6.1 最大冷媒充填量

A2L 冷媒は, A2 冷媒及び A3 冷媒よりも燃焼性が低いが, IEC 60335-2-89 の規定では 1.2 kg までしか充填 できないため,大形機器で A2L 冷媒を使用できない.しかし,空調機の国際規格 IEC60335-2-40 では,燃焼 性の違いから A2 冷媒及び A3 冷媒では LFL の 26 倍, A2L 冷媒では LFL の 52 倍まで充塡できる.そこで, 日本の規格では 1.2 kg の上限を無くし,全ての冷媒で LFL の 13 倍まで充塡できる規定とした. R1234yf の 場合, LFL が 0.289 kg/m<sup>3</sup>であり 3.76 kg まで使用できる.この内容は次の改正に向けて IEC に DC (Document for Comments) として提案した.

#### 7.6.2 表面温度

IEC 60335-2-89 の規定では、漏えいする可燃性冷媒にさらされる表面の温度が冷媒の自己着火温度から 100 K を減じた温度を超えてはならない.しかし、空調機の国際規格 IEC 60335-2-40 では、A2L 冷媒は燃焼性が低いため、表面温度は 700 ℃まで許容している.そこで日本の規格では、A2 冷媒及び A3 冷媒は自己着火温度から 100 K を減じた温度、A2L 冷媒では 700 ℃を超えてはならないと規定した.この内容も次の改正に向けて IEC に DC として提案した.

#### 7.6.3 測定免除時間及び漏えい試験免除

冷媒漏えい解析によって、リーチインショーケースの庫内に全冷媒量が漏えいした後に扉を開けると、庫外 に大きな可燃域ができることがわかっている(7.3.1 参照). IEC の規定では 5 分間の測定免除時間(7.2.3 参 照)があり、この間の可燃域の生成は無視されるが、A3 冷媒では、静電気や店舗内の電気機器のリレー等も 着火源となるため、短時間でも可燃域が生成されれば、着火事故に至る可能性がある.そこで日本の規格では、 5 分間の測定免除時間を削除し、試験開始時から可燃域の生成を許容しない規定とした.そして、庫外の可燃 域の生成防止のために、庫内の漏えいを検知する手段と冷媒回路を遮断する装置を規定し、これらを備えれば 庫内からの冷媒漏えい試験を不要とする規定とした.さらに日冷工規格では、圧縮機や凝縮器を内蔵している 凝縮器ユニットからの漏えいに関して、風量が Colbourne ら<sup>7-2)</sup>の式(式(7-10))を満たせば凝縮器ユニットか らの冷媒漏えい試験を不要とする規定とした.なお、この式の風量で可燃域ができないことは冷媒漏えい解析 で検証済みである(7.3.2 参照).

#### 7.6.4 冷媒漏えい速度

IEC 60335-2-89 では冷媒漏えい速度を独自の式(式(7-2))で規定している.JIS C 9335-2-89 は IEC 60335-2-89 と同じ規定とした.一方,空調機の国際規格 IEC 60335-2-40 では4 分全量漏れ速度が規定されている.漏 えい速度は、腐食や振動等が原因で生成された孔や亀裂の大きさと配管内外の圧力差で決まるもので、機種に よる違いはない.そこで、日冷工規格では安全のために4 分全量漏れ速度を採用し、冷媒漏えい試験(7.2.3) 及び式(7-10)の風量計算に使用することとした.0.5 kg の R290 の場合、4 分全量漏れ速度は 7.5 kg/h となり、 IEC の式の計算値 2.66 kg/h の 2.8 倍になる.

#### 7.6.5 作業時の安全担保

IEC 60335-2-89 には作業時の安全を担保するための規定はない.日冷工規格(JRA GL-21)では,静電気を防止する手袋の着用,携帯形漏えい検知器の携行等の作業時の着火リスク低減のための規定を設けている.また,現地で冷媒回路の修理を行う場合には,冷媒廃棄時及び冷媒充填時に,機器の周囲から着火源となるものを排除し,通風を良くすることを規定した.

## 7.7 リスクアセスメントに対する課題

内蔵ショーケースでは、輸送から撤去まで冷媒回路内に冷媒が入った状態で行われる.日冷工のリスクアセ スメントでは、冷媒漏れの原因として初期不良、使用時の腐食や振動、作業時の配管外からの衝撃等を想定し ており、冷媒漏えい時の可燃空間時空積は最悪状態を想定した値に設定し、不明な着火源は着火するものとし て扱っている。初期不良、使用時の腐食や振動による冷媒漏れ発生確率は調査結果に基づいて設定しており、 配管外からの衝撃が冷媒漏れに直結することは考え難いため、現在のリスクアセスメントでの想定よりも危険 な状態になることは稀であると考えている.

しかし、大型等の移動が困難なショーケースでは店内修理を行う場合があり、この場合は冷媒回路内の冷媒 の廃棄、冷媒の充填を行う必要があるため、作業には注意が必要である.また、リスクアセスメントにおいて は、作業時のヒューマンエラーは、リラックスした精神状態での作業を想定した値に設定している.しかし、 ショーケースが食品保管に使用されている場合は、食品の保管温度の関係から、修理作業に時間的な制約を設 けられることも多く、このような状況での作業では、ミスを誘発し重大事故に繋がることも考えられる.そこ で、店内修理に関しては、リラックスした精神状態の時よりヒューマンエラーが多く発生しても、着火事故に 繋がり難い安全対策を想定することが重要と考える.そこで、日冷工規格(JRA GL-21)では、高圧ガス保安 法の規定も参考に、この視点に基づいた内容(作業手順)を規定した.

安全のためには、日冷工規格を遵守することが重要である.しかし、日冷工規格は法律ではないため、特に、 機器メーカー以外の方に守って頂きたい内容に関しては、その周知活動が重要となる.

また,製品化のためには,撤去後の機器を安全に廃棄することも重要である.内蔵ショーケースは,産業廃 棄物として廃掃法(廃棄物の処理及び清掃に関する法律)に従って廃棄される.日冷工では,可燃性冷媒を使 用した内蔵形冷凍冷蔵機器を処理業者に引き渡す段階での廃棄に関する手順を規定したマニュアルの作成を 進めており、安全な廃棄方法に関して環境省とともに検討を進めている.

## 7.8 まとめ

R290 等の A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースに関して、国際規格、冷媒漏えい解析、輸送から撤去までの リスクアセスメント、機器を安全に運用するための日本の規格及び日本の法律についての今までの検討結果及 び検討状況を説明した.また、リスクアセスメントに関する課題についても記載した.日冷工では、リスクア セスメントに基づき、製品を安全に運用するための方法を日本の規格に規定した.また、法規制に関しても省 庁と協力して検討を進めている.しかし、海外から輸入される機器の安全性を担保するためには、検討内容を 国際規格に提案し、反映することも重要であり、今後検討が必要である.

## 参考文献

- 7-1) IEC 60335-2-89:2019, "Household and similar electrical appliances Safety Part 2-89: Particular requirements for commercial refrigerating appliances and ice-makers with an incorporated or remote refrigerant unit or motorcompressor", (2019.6).
- 7-2) D. Colbourne and K. O. Suen: "Minimum Airflow Rates to Dilute R290 Concentrations Arising from Leaks in Room Air Conditioners", 13th IIR Gustav Lorentzen Conference, 1104, Valencia (2018).
- 7-3) 岡部靖憲:「確率・統計-文章題のモデル解法-」, pp. 131-133, 朝倉書店, 東京(2010).
- 7-4) <u>http://izumi-math.jp/W\_Takakura/k\_kakuritu/k\_kakuritu.pdf</u>: (高倉亘:「幾何学的確率に関する教材について) (2020).
- 7-5) (株)三菱総合研究所 環境・エネルギー研究本部:「平成 27 年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業(機 械器具等の省エネルギー対策の検討に係る調査)報告書」, (2016.2).
- 7-6) "Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants Final Report 2016", JSRAE (2017.3).
- 7-7) David J. Smith: "Reliability, Maintainability and Risk 8th Edition: Practical Methods for Engineers", Eighth Edition, Elsevier, pp. 395-397 (2011).