

# 微燃性冷媒のポンプダウン時のディーゼル爆発に関する研究

2016年3月修了  
人間環境学専攻 47-146714 東 朋寛  
指導教員 飛原 英治 教授

In this study, we aimed to investigate characteristics of accidents during a pump down operation of air conditioners to examine safety issue by reproducing a diesel combustion that may occur during the pump down. As refrigerants, R1234yf, R32, R410A, R134a, R22, and R125 were tested with different combinations of refrigerants and lubricating oil including PAG oil and POE oil. At results except R125, gaseous mixture of the air, the refrigerant and the oil got self-ignited, which represents that the combustion accidents during pump down are caused by the diesel combustion of the air, refrigerant, and oil mixture even though the refrigerant is categorized as non-flammable. On the other hand, the air, R125 and the oil mixture did not combusted intensely at any condition. It was also found that oil has significant effect to the combustion during pump down by changing phenomena such as flammable range and pressure.

Key words: Heat pump, Pump down, Low GWP refrigerant, Mildly flammable refrigerant, Diesel combustion, Safety

## 1 緒言

エアコンや冷蔵庫などのヒートポンプ内部に封入され、熱の移動を担う流体を冷媒といい、環境性や安全性等、さまざまな物性が求められる。近年では地球環境の悪化を受け、より高い環境性が求められるようになってきている。モントリオール議定書により、オゾン破壊係数（ODP）を持つCFC冷媒とHCFCの全廃が定められ、ODPが0であるHFC冷媒への転換が進んでいる。しかしHFCの中には高い地球温暖化能（GWP）を持つものもあり、近年の地球温暖化に関連した環境問題の深刻化を受け、低GWP冷媒への転換が世界的な急務となっている。

新しい低GWP冷媒として、R1234yf ( $\text{CH}_2=\text{CFCF}_3$ ) や、R32 ( $\text{CH}_2\text{F}_2$ ) が注目を集めている。これらの冷媒は従来冷媒と比較して環境性は高いが、従来冷媒と異なり微燃性を持つことが分かっている。Table 1 に主な冷媒のODP, GWP と、ASHRAEの燃焼性区分を示す<sup>1,2)</sup>。従来冷媒はA1（不燃）に分類されているが、新冷媒はA2L（微燃性）に区別されている。

Table 1 Flammability of refrigerants

Refrigerant	Chemical formula	ODP	GWP	ASHRAE flammability
R1234yf	$\text{CH}_2=\text{CFCF}_3$	0	<1	A2L
R32	$\text{CH}_2\text{F}_2$	0	677	A2L
R410A	R32+R125	0	2090	A1
R134a	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$	0	1300	A1
R22	$\text{CHF}_2\text{Cl}$	0.055	1760	A1
R125	$\text{CF}_3\text{CHF}_2$	0	3170	A1

環境性は高いが微燃性を有するR1234yfやR32の普及に向けて、安全性の評価は必要不可欠である。微燃性冷媒の安全性評価のため、燃焼特性<sup>3)</sup>や漏えいシミュレーション<sup>4)</sup>等、幅広い研究が行われている。それら安全性研究の一環として、本研究は家庭用エアコンのポンプダウン時の、圧縮機爆発事故を扱う。

Fig. 1 に家庭用エアコンの冷媒配管模式図を示す。ポン

プダウンとは図で示したバルブを閉じて強制運転することで、冷媒を液化して室外機に回収する操作のことである。これはエアコンの移設・排気時に冷媒を大気解放しないために重要な操作である。このポンプダウン中に操作ミス等で冷媒配管内に空気が混入した結果、圧縮機が爆発する事故が報告されている<sup>5)</sup>。これは冷媒・空気と、元々圧縮機内に存在する潤滑油の混合気が自己着火して発生したと考えられており、従来の不燃性冷媒でも事故が発生する危険性があると言える。微燃性冷媒を導入した場合事故が発生する条件や危害度が変化する可能性がある。ポンプダウン事故時の現象を解明し、不燃性冷媒と微燃性冷媒を系統的に比較し安全性を調べる必要がある。

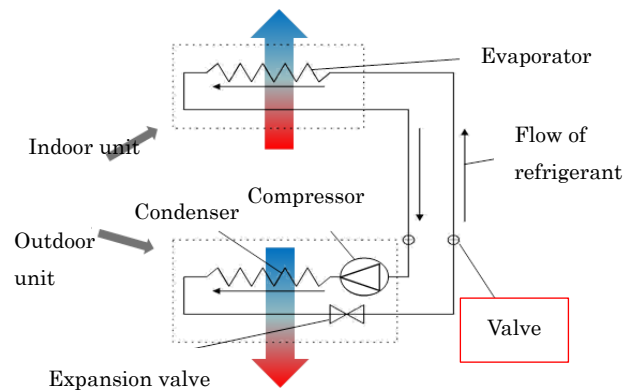


Fig. 1 Schematic diagram of air conditioner

以上から、本研究目的を

- ・冷媒・空気・潤滑油混合気が圧縮機内で自己着火する現象を解明する。
  - ・微燃性冷媒と従来の不燃性冷媒を比較し、新冷媒の安全性を評価する。
- とした。

## 2 実験方法

### 2.1 実験装置

エアコンのポンプダウン運転時における、圧縮機内への空気混入を再現した実験を行った。装置の外観及び概略図

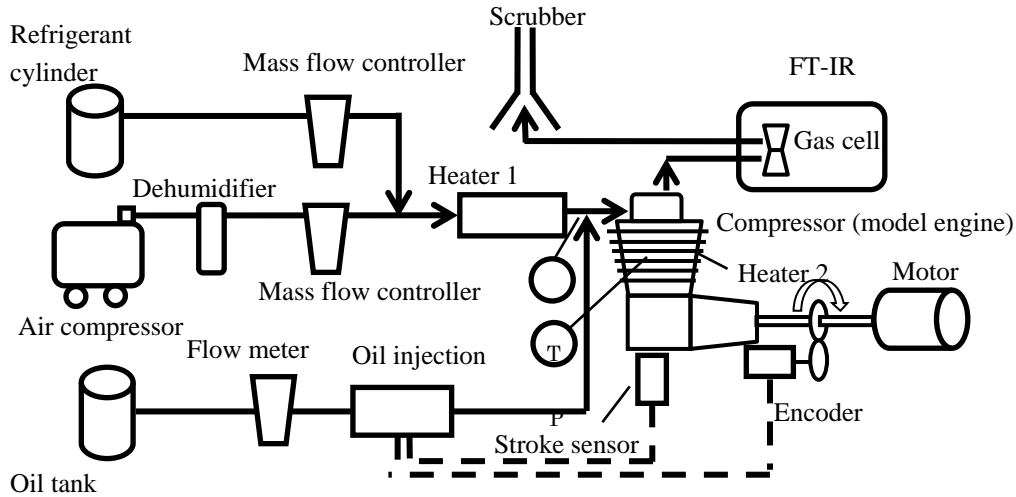


Fig. 2 Experimental apparatus

を Fig. 2 に示す. この実験装置は主に圧縮機, 空気供給系, 冷媒供給系, 温度制御系, 潤滑油供給系から構成される. 実際にエアコンに用いられる圧縮機を用いた場合, 事故と同様に爆発してしまう可能性があるため, 本実験では模型エンジンをモーターで駆動することにより圧縮機として用い, 安全に実験を行った.

#### (a) 圧縮機

模型エンジン (行程容積 25.42cc, 圧縮比 16.0) をモーターで駆動することにより, 圧縮機として用いた. 使用したエンジンのカットモデルを Fig. 3 に示す. エンジンとモーターを繋ぐ軸にはエンコーダーが取り付けられており, エンジンクランク角を測定できる.



Fig. 3 Cut model of engine

#### (b) 空気供給系 (c) 冷媒供給系

空気と冷媒は, それぞれ気体の状態で流量を独立に制御し, その後混合した.

#### (d) 温度制御系

混合された冷媒・空気を, ヒーターで指定温度 (260°C) まで加熱した. エンジンでの断熱圧縮を実現するため, エンジン自体も同程度加熱した.

#### (e) 潤滑油供給系

潤滑油はオイル噴霧システムにより, エンジン吸気弁の直前から霧状に噴霧され混合される. 噴霧するタイミングはエンジンの軸に取り付けられたエンコーダーを読み取ることで制御する.

#### (f) 計測系

エンジン内圧力を圧力計で測定した.

エンジンの排気ガスは, FT-IR を用いて光学的に分析した. 生成物の同定には, Northwest-Infrared<sup>6)</sup> のデータを参考にした.

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 実験条件

Table 2 に, 実験に用いた冷媒及び潤滑油を示す. 低 GWP 冷媒である R1234yf, R32 に加え, 従来冷媒である R410A, R22, R134a, R125 と, 比較のため窒素ガスを用いた. 潤滑油として PAG (ポリアルキレングリコール) オイルと, POE (ポリオールエステル) オイルを用いた. いずれも R1234yf や R32 エアコンに用いられる潤滑油である. Table 3 に実験条件を示す. 入口気体温度は燃焼を発生しやすくするため, 260°C まで加熱した. 潤滑油流量は, 後述する理論空燃比を基に算出した当量比を基準として設定した. 潤滑油噴霧タイミングはエンジンクランク角 90°とし, 吸気行程において噴霧されるようにした.

Table 2 Refrigerants and lubricating oils

Item	Type
Refrigerant	R1234yf, R32, R410A, R134a, R22, R125, N <sub>2</sub>
Lubricating oil	PAG (VG46), POE (VG68)

Table 3 Experimental conditions

Number of revolutions, rpm	1500
Mixture flow rate, l/min	18.75
Inlet gas temperature, °C	260
Oil flow ratio, -	0.0, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6
Injection timing, degree	90 (at crank angle)

潤滑油の特性を Table 4 に示す. CHO 比は潤滑油内に含まれる炭素, 水素, 酸素の質量割合である. 引火点 (Flash point) は, 点火源によって燃焼が開始する最低温度, 自然発火点 (Ignition point) は空気中で加熱した際, 着火限が無くとも燃焼が開始する最低温度である. 本件研究は混合気の自己着火現象を扱うため, 特に自然発火点は重要な値の 1 つである. また, CHO 比を基に理論空燃比を求めた. この理論空燃比の際の潤滑油の流量を基準流量とし, 今後はそれとの比で潤滑油流量を表す.

**Table 4 Characteristics of lubrication oils**

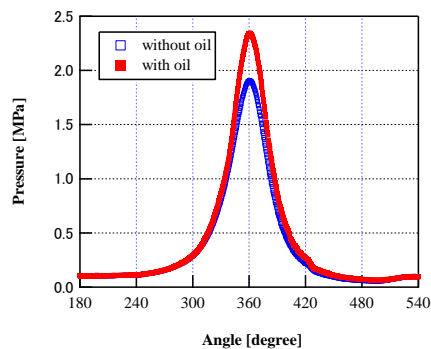
	PAG(VG46)	POE(VG68)
CHO ratio , mass %	61.7 : 10.5 : 26.2	70.1 : 10.8 : 19.1
Flash point	216°C	254°C
Ignition point	350°C	408°C
Theoretical air fuel ratio	9.54kg/kg	10.91kg/kg
Standard flow rate	$2.295 \times 10^{-4}$ l/min	$3.519 \times 10^{-4}$ l/min

### 3 実験結果と考察

#### 3.1 PAG オイルを用いた実験

##### 3.1.1 空気・潤滑油混合気の燃焼

Fig. 4 に空気・潤滑油混合気を圧縮した際の、代表的なエンジン内圧力変化を示す。横軸がエンジクラック角を示し、360°で圧縮上死点となる。縦軸はその際の絶対圧力を示す。青点は潤滑油を噴霧せず、空気のみを圧縮した際の圧力変化である。クラック角 180°~360°にかけての圧縮行程で断熱圧縮により圧力が上昇し、上死点で最大圧力を取り、360°~540°の膨張行程で圧力が低下している様子が分かる。赤点は潤滑油を噴霧し、空気・潤滑油混合気を圧縮した際の圧力グラフである。この時最大圧力は空気のみを圧縮した際と比較して上昇し、さらにエンジン回転時の振動、異音が大きくなった。潤滑油の自己着火が発生したと考えられる。

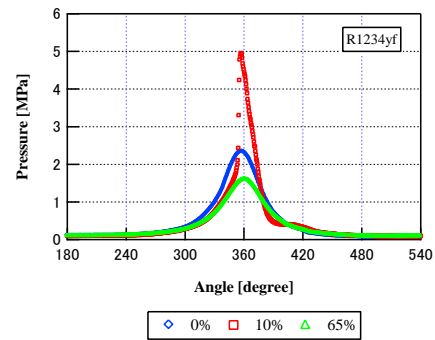


**Fig. 4 Change of pressure inside engine against crank angle with and without oil**

##### 3.1.2 冷媒・空気・潤滑油混合気の燃焼

空気・冷媒混合気の圧縮実験を行った。この時、全ての冷媒、冷媒濃度で燃焼は発生しなかった。

空気・冷媒・潤滑油混合気を圧縮した際のエンジン内圧力変化を Fig. 5 に示す。使用した冷媒は R1234yf である。青点、赤点、緑点が、それぞれ冷媒濃度 0%、10%、65% の際の圧力を表している。冷媒濃度 0% では、Fig. 4 の結果と同様に潤滑油の燃焼が発生した。冷媒濃度 10% では、0% の結果と比較して激しい圧力上昇が見られた。冷媒濃度 65% では燃焼しなかった。

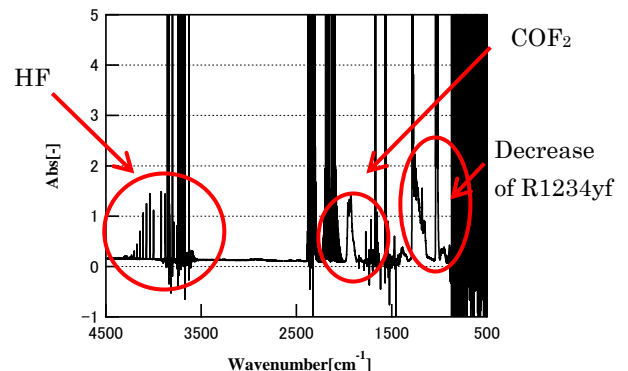


**Fig. 5 Change of pressure inside engine against crank angle with different refrigerant concentration**

異なる冷媒濃度で実験を行った結果、冷媒濃度が高い範囲では燃焼は発生せず、冷媒濃度が低い範囲では冷媒自体の激しい燃焼が発生し、エンジン内の圧力が急上昇した。この燃焼傾向は、R32, R410A, R134a, R22 でも同様であった。R125 では、激しい燃焼は観測されなかった。

##### 3.1.3 排気分析

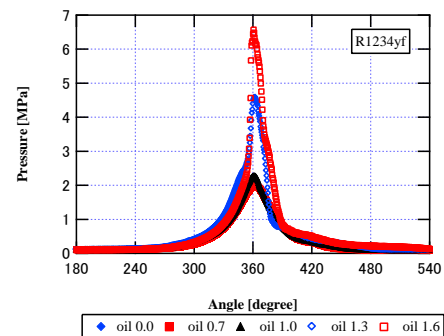
エンジンから排気されたガスを、FT-IR で分析した。代表的な分析結果を Fig. 6 に示す。R1234yf が 10% の際の結果であり、このとき Fig. 5 に示した結果に見られるように激しい燃焼が発生している。横軸が赤外光の波数、縦軸が吸光率となっている。燃焼によって冷媒濃度が減少し、フッ化水素 (HF) やフッ化カルボニル (COF<sub>2</sub>) といった冷媒燃焼生成物が発生していることが分かった。



**Fig. 6 Infrared absorption spectrum of exhaust gas**

##### 3.1.4 潤滑油流量変化実験

潤滑油の燃焼に対する寄与を調べるため、滑油量を変化させて実験を行った。代表的なエンジン内圧力変化を Fig. 7 に示す。潤滑油の量が増える程、最大圧力が上昇する傾向が見られた。



**Fig. 7 Change of pressure inside engine against crank angle with different amount of PAG oil**

以上の実験結果をまとめたのが Fig. 8 である。横軸が冷媒濃度、縦軸がエンジン内の最大圧力を示している。最大圧力は正規化されており、黒線は断熱圧縮を仮定した最大圧力の理論値である。冷媒濃度が高い時は最大圧が低く、燃焼が発生していない。冷媒濃度が低くなると燃焼が発生し、圧力が大きく上昇している。これは実際の事故の現象と同様であり、事故は冷媒配管への空気混入により混合気が自己着火することで引き起こされていると明らかになった。また潤滑油を増やすと、燃焼範囲、圧力共に大きくなる傾向が見られた。

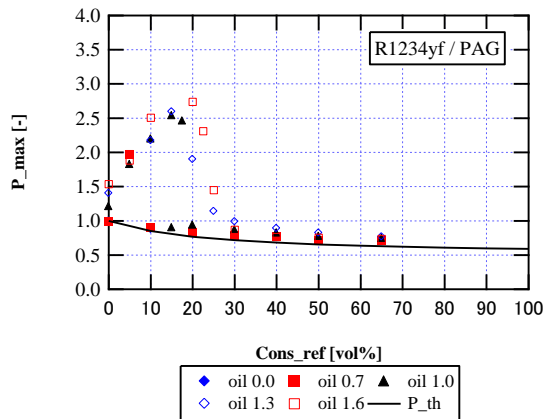


Fig. 8 Maximum pressure against different refrigerant concentration with PAG oil

### 3.2 POE オイルを用いた実験

潤滑油の組成の違いによる燃焼条件の変化を調べるため、POE オイルを用いて実験を行った。PAG オイルと同様に、実験結果をまとめたものを Fig. 9 に示す。PAG オイルの結果と比べて、燃焼範囲は明確に狭くなった。発火点は PAG より POE の方が高く、POE の方が自己着火しにくいと言える可能性もある。しかしながら、エンジンの入口気体温度と最大圧力から、燃焼していない条件でもシリンダ内温度は発火点に到達していることが予想されるため、発火点だけでは判断できない。今後潤滑油に関するより多くの燃焼特性を調べ、潤滑油のどのような要素がポンプダウン時の燃焼に寄与しているのか明らかにしたい。

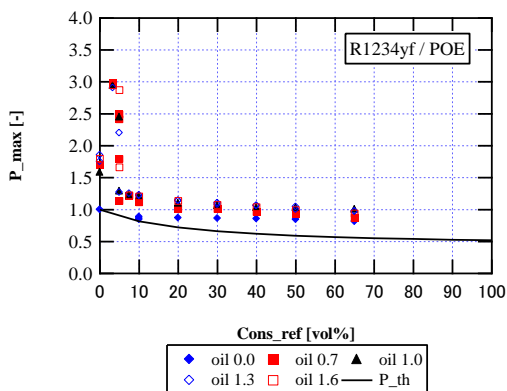


Fig. 9 Maximum pressure against different refrigerant concentration with POE oil

## 4 結言

### 4.1 結言

本実験で、以下のことが明らかになった。

- ・ポンプダウン時の爆発事故は空気、冷媒、潤滑油混合気の自己着火によって引き起こされていることが明らかとなった。
- ・冷媒の燃焼性区分と、本実験における燃焼範囲、燃焼時の圧力には、明確な相関は見られなかった。特に、低GWP・微燃性冷媒である R1234yf や R32 は、従来冷媒・不燃性冷媒である R410A, R22 と比較して、特に燃焼性が高いとは言えなかった。
- ・混合気中の潤滑油量の増加に従い、冷媒の燃焼範囲は拡大し、また燃焼時の最大圧力は増加した。冷媒濃度を变化させた際の最大圧力は、潤滑油量の増加に従い増加し、その時の冷媒濃度も上昇する傾向があった。
- ・異なる潤滑油を用いることにより、燃焼範囲は大きく変化し得ることが明らかになった。

### 4.2 今後の課題

本結果を踏まえ、以下を今後の課題とする。

- ・潤滑油自体の燃焼特性をより幅広く調べ、どのような特性が混合気の燃焼に影響を及ぼしているか調べる。
- ・エンジン内を可視化し、燃焼時の現象を直接観測する。可視化実験装置を Fig.10 に示す。

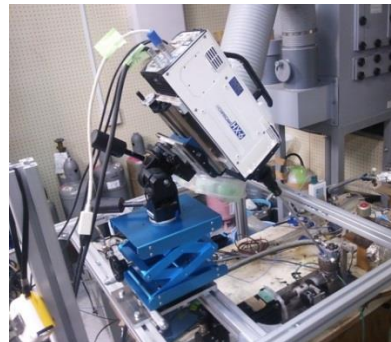


Fig. 10 Visualization apparatus

### 文献

- 1) IPCC, "Climate Change 2013: The Physical Science Basis", 2013, Chapter 8, pp.731 - 732
- 2) American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. "ANSI/ASHRAE Standard 34-2013", 2013
- 3) Kenji, T., Kazuaki, T. and Shigeo K., Flammability assessment of CH<sub>2</sub> CFCF<sub>3</sub>: Comparison with fluoroalkenes and fluoroalkanes, Journal of Hazardous Materials, 2009, 172, pp. 1329-1338
- 4) Lizhi, J., Wufeng, J. and Yan, Z., Analysis of Indoor Environment Safety with R32 Leaking from a Running Air Conditioner, Procedia Engineering, 2015, 121, pp. 1605-1612
- 5) 東京都商品等安全対策協議会, 家庭用エアコンの取外し等に関する安全確保報告書, pp2-3, (2012)
- 6) <https://secure2.pnl.gov/nsd/nsd.nsf/Welcome>, 2013