

平成30年6月26日現在

機関番号：33603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01235

研究課題名(和文)着火エネルギー及び環境湿度が可燃性ガスのフィジカルハザードに及ぼす影響

研究課題名(英文)Influence of ignition energy and initial ambient humidity on physical hazard of flammable gases

研究代表者

今村 友彦 (IMAMURA, TOMOHIKO)

諏訪東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：50450664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、可燃性ガスを利用する際の火災・爆発危険性(フィジカルリスク)評価に資するために、可燃性ガスの着火可能性及び燃焼威力に及ぼす環境因子の影響を実験により解明したものである。特にLPGの燃焼に対して環境湿度が着火可能性及び燃焼威力に及ぼす影響について、(1)水分からのOHラジカル引き抜きに伴う反応促進効果、(2)水分の顕熱および潜熱による反応抑制効果、(3)水分添加に伴う相対的な酸素濃度低下による反応抑制効果、のバランスで決まることを実験により予測し、化学平衡計算によってその妥当性を示した。これらの成果は国際会議論文として2報受理され、うち1報はBest Paper Awardを受賞した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the influence of environment factors on the flammability and combustion strength has been clarified experimentally to contribute to the physical risk management in use of the flammable gases. Especially, the hypothesis for the influence of initial environment humidity on the LPG combustion has been developed by a series of experiment. It is that the flammability and combustion strength are controlled by the balance of the following three factors; (1) reaction promotion effect that the unreacted fuel reacts to the O radical and/or OH radical which are decomposed from the moisture, (2) reaction suppressing effect by cooling due to the latent heat and sensible heat of moisture, and (3) reaction suppressing effect due to the oxygen insufficient which is caused by adding the moisture. The validation of this hypothesis was guaranteed by the chemical equilibrium analysis. These results were reported as two papers, and the one of them was awarded the "Best Paper Award".

研究分野：燃焼工学

キーワード：気相燃焼 可燃性ガス 着火エネルギー 環境湿度 フィジカルハザード

### 1. 研究開始当初の背景

可燃性ガスを利用する際の火災・爆発危険性（フィジカルリスク）評価においては、どのようにして可燃性混合気が形成され、どのような着火源により、どのような燃焼威力を生じるかといった危害度評価（フィジカルハザード評価）が必要不可欠である。そのため、燃焼範囲や最小着火エネルギー、燃焼速度、爆風圧といったデータが必要となる。これらは温度、圧力、湿度、エネルギー等の環境因子に依存するが、その影響度については未解明の点が多かった。

### 2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、燃焼範囲や最小着火エネルギーといった着火可能性につながるデータと、燃焼速度、爆風圧といった危害度評価につながるデータを、様々な環境条件の下で取得し、フィジカルハザードに及ぼす環境因子の影響を明らかにすることを目的とした。特に、投入エネルギーと環境湿度に注目し、①投入エネルギーが着火可能性及び燃焼威力に及ぼす影響、②環境湿度が着火可能性及び燃焼威力に及ぼす影響の2点を明らかにすることをめざした。

### 3. 研究の方法

研究は大きく分けて上述の2点に注目し、主として実験により進めた。

#### 3.1 実験装置

##### ① 燃焼容器及び配管系統

高さ120 mm、直径120 mmの円筒型燃焼容器（容積1.36 L、耐圧2 MPa、SUS304製）を用いた。図1に装置全体の概略図を示す。バルブはすべて空圧動作式とし、遠隔操作を可能とした。容器内のガス温度を極力一定とするため、容器をジャケットヒーターで覆い、温度調整器（太洋システム、UT150）により温度制御した。容器には直径30 mmの円形の観察窓が対向式に取り付けられている。容器上部にはガスの導入ポートと排気ポートがそれぞれ1か所ずつ設置されており、導入ポートを分岐して、可燃性ガスと支燃性ガスをそれぞれ別系統から導入できるようにした。排気ポートは真空ポンプに接続した。

##### ② 水分添加系統

空気（LPG/空気混合気の実験の場合）または窒素（LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>混合気の場合）を、図1中のバブラーを通して容器内に導入することにより水分を添加した。バブラーを通過する空気及び窒素の分圧を任意に設定することにより初期湿度を調整可能とした。容器内の初期湿度は、配管中に取り付けた露点計（MICHELL製 SF72）により測定した露点温度及び初期の容器内温度から求めた。

##### ③ 着火系統

容器内中央に設置した対向針電極（タ

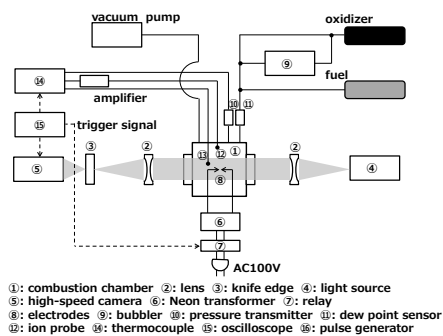


図1 実験装置概略図

ングステン製、直径2.0 mm、先端角30°のギャップ間に交流スパークを生じさせることにより着火性放電を生じさせた。交流スパークは、電極を巻線式ネオントランス（LECIP製 L2204840、定格電圧15 kV、定格電流20 mA）に接続して生じさせた。

##### ④ シュリーレン撮影系統

シュリーレン光学系（カトウ光研製、キセノン光源、75 W）及び高速度カメラ（Photron, SA-X）により、燃焼挙動をシュリーレン撮影した。

##### ⑤ 温度・圧力等計測系統

容器内にK型シース熱電対（シース管径：φ1.6 mm）及びイオンプローブを挿入して、温度及び火炎到達を計測するとともに、容器上面に取り付けた圧力トランスミッター（長野計器製 KH15-L34）により、圧力上昇を計測した。各センサーの出力はチャートレコーダー（日置電機製 8860-50）により記録した。

#### 3.2 実験条件および方法

##### ① 投入エネルギーが着火可能性及び燃焼威力に及ぼす影響

対向針電極のギャップ長を変化させることにより、投入エネルギーを変化させた。供給電圧のパルス幅は100 msに固定し、LPG濃度は2.9~7.0 vol%の範囲で変化させた。着火の有無は、所定濃度のLPG/空気混合気を容器内に導入した後、着火性放電を10回繰り返して生じさせ、1度でも火炎が容器内に部分的にでも伝播した場合を着火とし、これが10回の施行で1度も見られなかった場合のギャップ長を最小針電極間隔と定義した。また、LPG/空気混合気は乾燥（0 %R.H.）及び湿潤状態とした。ここでの湿潤状態とは、容器内に導入した空気がすべてバブラーを通過した場合のことを指し、そのときの正確な初期湿度は測定していない。

##### ② 環境湿度が着火可能性及び燃焼威力に及ぼす影響

LPG/空気混合気の場合は、LPG濃度を一定にして水分を増加させていくと、その分空気濃度が低下するので、水分を除いた混合気としてみると、LPG濃度が一定ではないことになる。そのため水分の

影響のみを切り取って検討することが困難であったので、LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 混合気について、LPG 及び O<sub>2</sub> 濃度を一定にして、バランスガスの N<sub>2</sub> をバブラーに通す分圧を調整することにより、初期湿度を 0~50 %R.H. の間で 10%R.H. ずつ変化させた実験を実施した。

LPG/空気混合気、LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 混合気の場合とも、電極ギャップ長は 2 mm、放電パルス幅は 100 ms に固定した。LPG/空気混合気の実験では、LPG 濃度は 2.5 ~ 8.1 vol% の間で、初期湿度は 0 %R.H. 及び 80 ~ 100 %R.H. の間で変化させた。LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 混合気の実験では、LPG 濃度は 5, 6, 7, 8 vol% を目標値とし、初期湿度は 0 ~ 40 %R.H. の間で変化させた。

#### 4. 研究成果 (結果及び考察)

##### 4.1 投入エネルギーが着火可能性及び燃焼威力に及ぼす影響

###### 4.1.1 最小針電極間隔と LPG 濃度の関係

本実験は LPG/空気混合気のみを対象として行った。図 2 にギャップ長と当量比の関係を、着火の有無も合わせて示す。乾燥状態では、LPG 濃度 3.0 ~ 6.0 vol% の範囲内では、0.05 mm (本実験で設定できる最小のギャップ長) であっても着火し、最小針電極間隔は定義できなかった。7.0 vol% では、最小針電極間隔は 0.2 mm であった。

湿潤状態では、LPG 濃度 4.0, 5.0 vol% においてギャップ長 0.05 mm でも着火し、最小針電極間隔が定義できなかった。

図 2 より本実験で求められた最小針電極間隔は、乾燥状態の LPG 濃度 7.0 vol% の場合で 0.2 mm、湿潤状態の 2.9, 6.0 vol% で 0.05 mm となり、一般に知られているプロパンの消炎距離 (約 2 mm [1]) よりも 1 桁以上小さい値となっている。一般に知られている消炎距離は、フランジ付きの電極を用いて測定されるので、本実験で使用した針電極に比べて熱損

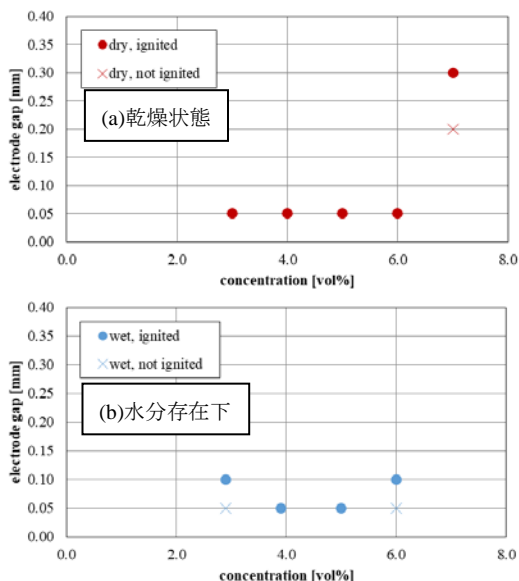


図 2 電極ギャップ長と LPG 濃度の関係

失が大きい。したがって火炎伝播にはフランジへの熱損失に打ち勝つだけのエネルギーが余計に必要なことになる。言い換えればその分だけ針電極を用いた場合のほうが、火炎伝播に必要なエネルギーが小さくて済むといえる。

##### 4.1.2 ギャップ長が燃焼威力に及ぼす影響

LPG 濃度をプロパンの化学量論濃度 (4.03 vol%) 付近に固定し、ギャップ長を 0.05~0.4 mm の間で変化させた場合のピーク過圧・爆発強度指数 ( $K_G$  値)・火炎伝播速度の測定結果を表 1 に示す。ギャップ長が変化しても、ひとたび火炎伝播してしまえば、これが燃焼威力に及ぼす影響はないとみられる。

表 1 各ギャップ長における LPG/空気混合気 (化学量論組成) の燃焼威力

ギャップ長 (mm)	0.05		0.10		0.20		0.30		0.40	
LPG 濃度 (vol%)	4.0	3.9	4.0	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
湿度 (%R.H.)	dry	73.6	dry	78.7	dry	81.8	dry	90.4	dry	84.1
ピーク過圧 (kPa)	643	633	646	633	664	633	656	633	646	639
$K_G$ 値 (bar·m/s)	52.1	54.0	53.4	53.9	53.5	54.9	52.9	50.3	55.8	52.0
火炎伝播速度 (m/s)	2.44	2.37	2.37	2.16	2.42	2.29	2.51	2.22	2.38	2.22

##### 4.2 環境湿度が着火可能性及び燃焼威力に及ぼす影響

###### 4.2.1 水分存在下における LPG/空気混合気の定性的な火炎伝播特性

図 3 は LPG/空気混合気に対向針電極を用いて着火した場合の火炎伝播のシュリーレン高速撮影画像である。電極のギャップ長は 0.05 mm で、消炎距離よりも十分小さい。図 3 より火炎伝播特性に及ぼす水分の影響について、定性的には以下の傾向が読み取れた。

###### (a) 燃料希薄組成 (図 3(a))

乾燥状態では火炎が容器全体に伝播したが、水分存在下では電極周囲で着火が認められるものの、容器全体への火炎伝播は認められなかった。

###### (b) 化学量論組成 (図 3(b))

乾燥状態、水分存在下いずれの場合も、着火及び容器全体への火炎伝播が認められた。

###### (c) 燃料過濃組成 (図 3(c))

乾燥状態では、容器全体への火炎伝播が認められた。水分存在下では、容器全体への火炎伝播途中で消炎する傾向が認められた。

これらのことから、LPG/空気混合気に対しては、水分の存在により火炎伝播のしやすさが抑制される傾向があることが分かった。

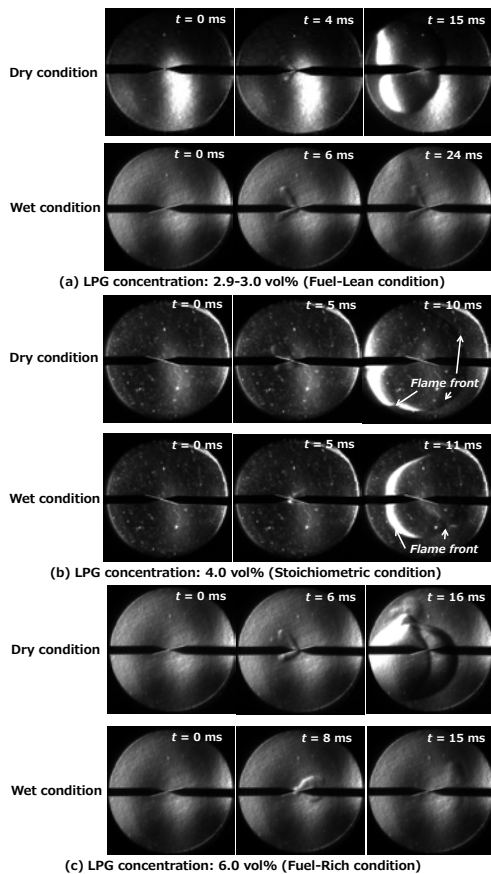


図3 LPG/空気混合気火炎のシュリーレン画像

#### 4.2.2 LPG/空気混合気の火炎伝播速度に及ぼす水分の影響

図4(a)はLPG/空気混合気、図4(b)はLPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>混合気の火炎伝播速度とLPG濃度の関係を示したものである。また図5は、水分存在下と乾燥状態の火炎伝播速度の比  $S_{wet}/S_{dry}$  をLPG濃度に対してプロットしたものである。電極ギャップ長は2.0 mmで固定し、針電極を用いている。これより以下のことが読み取れた。

##### (a) LPG/空気混合気の場合

乾燥状態、水分存在下ともに、燃料希薄組成では化学量論濃度 ( $C_{st}$ ) 程度までは、燃料濃度の増加に伴って火炎伝播速度も増加し、その後燃料過濃領域では、燃料濃度の増加に伴って火炎伝播速度が低下する傾向が認められた。伝播速度の値は、全体的に水分存在下のほうが乾燥状態よりも小さいが、特に燃料過濃領域では両者の差がかなり小さくなり、燃料希薄組成では0.5程度であった  $S_{wet}/S_{dry}$  の値が、燃料過濃組成ではおよそ0.85~0.9程度となった。

##### (b) LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>混合気の場合

LPG/空気混合気の場合と同様に、火炎伝播速度とLPG濃度の関係は上に凸の曲線を描いた。火炎伝播速度が最大値をとるLPG濃度の値はおよそ5 vol%付近であり、LPG/空気混合気と比べて過濃側にシフトした。また、LPG/空気混合気とは対照的に、全体的に水分存在下のほうが乾

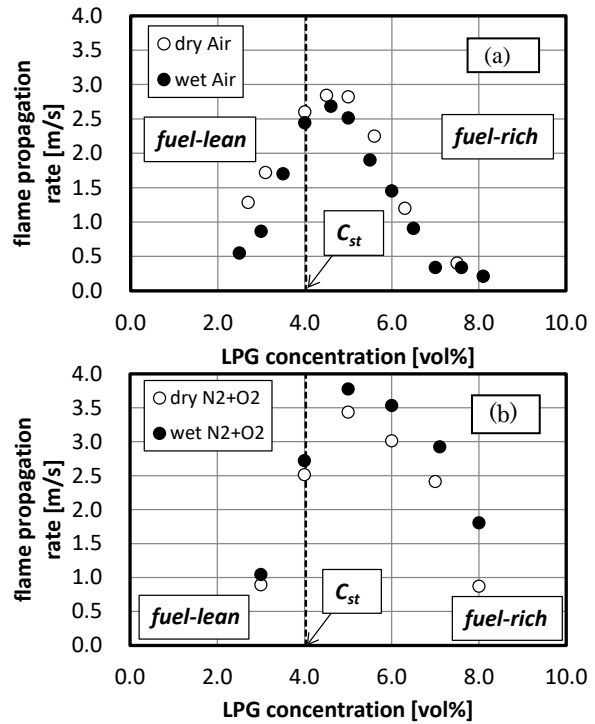


図4 火炎伝播速度とLPG濃度の関係

(a) LPG/空気 (b) LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>

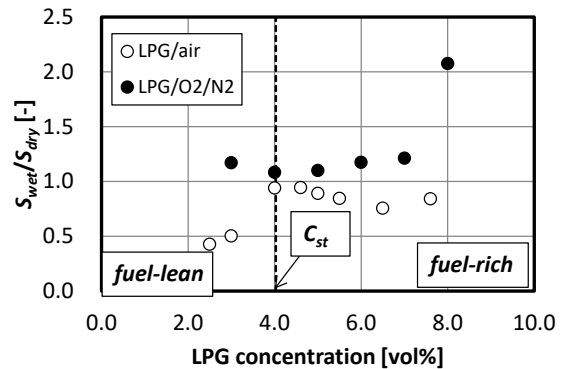


図5 乾燥状態及び水分存在下での火炎伝播速度比とLPG濃度の関係

燥状態よりも火炎伝播速度の値が大きく、特に燃料過濃組成ではLPG濃度の増加に伴って  $S_{wet}/S_{dry}$  の値が大きくなり、LPG濃度8 vol%では  $S_{wet}$  は  $S_{dry}$  に比べて約2倍となった。

#### 4.2.3 LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>混合気の火炎伝播速度に及ぼす初期湿度の影響

図6は燃料過濃組成における火炎伝播速度と初期湿度の関係を示したものである。いずれのLPG濃度の場合も、乾燥状態よりも初期湿度が幾分かある条件下のほうが大きな火炎伝播速度を示した。火炎伝播速度が最大値をとる初期湿度は、LPG濃度5 vol%では約10 %R.H.であるが、6 vol%で約20 %R.H., 7 vol%で約28 %R.H.のように、LPG濃度が高くなるにしたがって高湿度側にシフトする傾向がみられた。

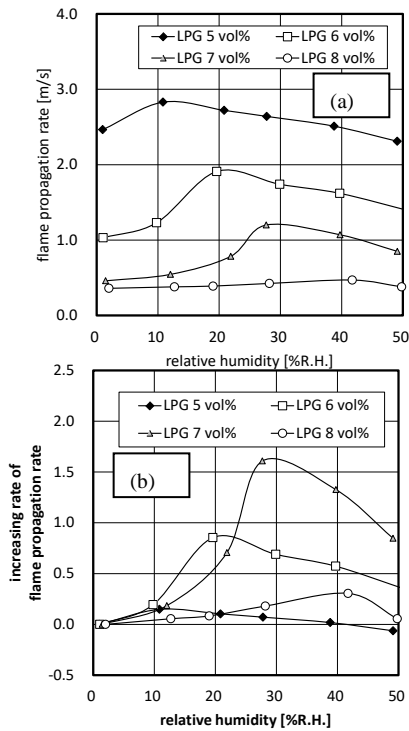


図 6 火炎伝播速度の上昇率と初期湿度の関係

#### 4.2.4 火炎伝播速度に及ぼす初期湿度の影響メカニズム

以上の結果をもとに、火炎伝播速度に及ぼす初期湿度の影響のメカニズムについて、図 7 及び以下に示す仮説を立てた。

図 7(a)に示すように燃料希薄組成の場合は、LPG と反応する酸素は混合気中に十分にあるので、初期水分はその潜熱及び顕熱によって、燃焼を抑制する働きをすると考えられる。しかし図 4(b)より乾燥状態と水分存在下で火炎伝播速度がほとんど変わらないことから、その影響は小さいものと思われる。LPG/空気混合気の場合は同じ LPG 濃度であっても水分添加によって乾燥状態より酸素濃度が低下するので、その分火炎伝播速度も低下する。これに対し図 7(b)に示す燃料過濃組成の場合

は、LPG は混合気中の酸素だけでは完全反応に足りないため、水分中の O 原子及び H 原子に由来する O ラジカル及び OH ラジカルと反応する。LPG 濃度が大きくなればなるほど、未燃の LPG が多量に存在することになるので、これと反応するために多量の水分を必要とするため、火炎伝播速度が最大値を示す初期湿度の値が大きくなったものと推測される。ただし初期湿度が高くなりすぎると、水分添加による上記の燃焼反応促進効果もさることながら、当然ながら上述の顕熱及び潜熱による燃焼抑制効果も顕著になってくるので、水分添加によって火炎伝播速度が無限に上昇するわけではなく上に凸の曲線を描いたものと推測される。

LPG/空気混合気の場合は、水分添加に伴って空気濃度が低下するため、混合器全体としては同じ LPG 濃度であっても初期湿度によって LPG/空気混合気中の LPG 濃度が低下するので、燃料希薄組成ではより乾燥状態よりも小さい火炎伝播速度を示し、燃料過濃組成でも上述の水分添加による燃焼促進効果と、酸素不足による燃焼抑制効果とが同時に表れて、LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 混合気よりも小さい火炎伝播速度を示したと考えられる。

CHEMKIN-PRO を用いた化学平衡計算により、水分添加による燃焼反応生成物量を調べたところ、図 8 に示すように初期湿度の増加に伴って、不完全燃焼で生じる CO の発生速度が減少し、完全燃焼で生じる CO<sub>2</sub> の発生速度が増加する傾向が認められた。以上により、上記の仮説が立証されたと考えられ、水分存在下における LPG の燃焼は①水分添加に伴う O ラジカル及び OH ラジカルとの反応促進による燃焼促進効果、②水分の潜熱及び顕熱による燃焼抑制効果、③水分添加に伴う酸素不足による燃焼抑制効果のつり合いで決まると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- 1) Imamura, T., Ohtsuki, M., Kumata, S.,

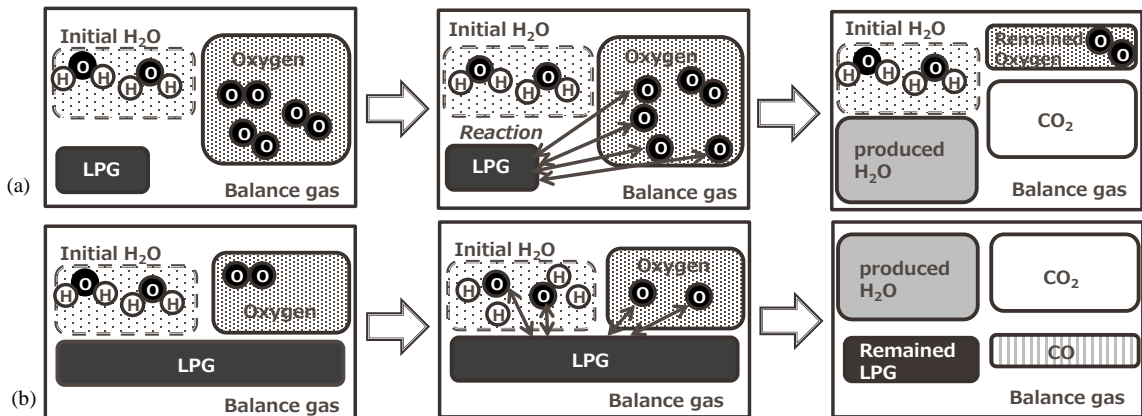


図 7 水分存在下における LPG 燃焼のメカニズム

(a) 燃料希薄組成 (b)燃料過濃組成

Furuya, Y., Ohno, R., Tanaka, A., Kawaguchi, A.: "Influence of Initial Humidity on the Flame Propagation Rate of LPG/Air and LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Mixtures", Proceedings of 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 2018 (accepted).

- 2) Imamura, T., Ohno, R., Tanaka, A., Kawaguchi, A., Ohtsuki, M., Kumata, S., Furuya, Y.: "Influence of Moisture on Flame Propagation Rate of LPG/Air and LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Mixture", Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety 2017, 2017, Paper No.SA5-01, with reviewed.

[学会発表] (計 3 件)

- 1) Imamura, T., Ohtsuki, M., Kumata, S., Furuya, Y., Ohno, R., Tanaka, A., Kawaguchi, A.: "Influence of Initial Humidity on the Flame Propagation Rate of LPG/Air and LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Mixtures", 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Taipei, 2018.10 (accepted).
- 2) Imamura, T., Ohno, R., Tanaka, A., Kawaguchi, A., Ohtsuki, M., Kumata, S., Furuya, Y.: "Influence of Moisture on Flame Propagation Rate of LPG/Air and LPG/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Mixture", Asia Pacific Symposium on Safety 2017, Kitakyushu, 2017.12.
- 3) 六川京也, 平野良周, 滝澤優, 今村友彦: "可燃性ガスの燃焼威力に及ぼす環境因子の影響—環境湿度の効果—", 第48回安全工学研究発表会, 新潟, 2015.12.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

今村 友彦 (IMAMURA, Tomohiko)

諏訪東京理科大学

工学部 機械工学科 准教授

研究者番号: 50450664

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし

### (4)研究協力者

なし