

水を噴霧した場合の管内伝ば火炎の消炎挙動*

八島正明**

Quenching behavior of a propagating flame in a duct with water sprays

by Masaaki YASHIMA**

Abstract: An experimental study on extinction limits of premixed flame has been performed in order to develop a new explosion suppression system applied to gas and dust explosions. This kind of study on explosion suppression system started from the later term of World WarII in the U.K. Since then many practical studies have been conducted to suppress gas or dust explosions in coal mines and chemical engineering plants. However, they have not been clarified how the propagating flame in a duct is quenched by suppressant agents dynamically. Elucidating the quenching mechanisms by suppressant agents is indispensable to make a suppression model and to develop the system.

The experiment was conducted in a vertical duct of 0.2m×0.2m cross section and 2m long, with both-ends-opened, top-end-closed and bottom-end-opened. The behavior of the flame propagating in the middle of the duct was observed through two glass plates of 0.38m long serving as duct walls. Methane - air and LPgas(propane 98.1% vol.) - air premixed gas were used and water was used as suppressant agent, which was harmless and could be obtained with ease. The results are as follows.

- (1) It is found that the propagating flame is laminar state without water sprays, and when the flame can not be quenched with the sprays, the flame front is disturbed and propagating velocity increases.
- (2) When the case of flame is quenched by the sprays, it does not extinguish instantaneously; it takes some time to be extinguished.
- (3) The optimizing conditions of the water sprays effect on the flame quenching, are examined in various concentrations of the mixture. In case of both - ends - opened,

$$\phi = 0.7; D_{SMD} = 175 \mu\text{m} (D_{AV} = 92 \mu\text{m}); T_i \leq 660 \text{ ms} \uparrow (V_f \leq 3.7 \text{ m/s}),$$

$$q_w \geq 108 \text{ mg/cm}^2\text{s}, T_D \geq 280 \text{ ms.}$$

$$; D_{SMD} = 293 \mu\text{m} (D_{AV} = 172 \mu\text{m}); T_i \leq 660 \text{ ms} \uparrow (V_f \leq 3.7 \text{ m/s}),$$

$$q_w \geq 144 \text{ mg/cm}^2\text{s}, T_D \geq 850 \text{ ms.}$$

† $T_i = 660 \text{ ms}$ is the maximum value in the present condition.

$$\phi = 1.0; D_{SMD} = 215 \mu\text{m} (D_{AV} = 97 \mu\text{m}); T_i \leq 260 \text{ ms} (V_f \leq 2.9 \text{ m/s}),$$

$$q_w \geq 135 \text{ mg/cm}^2\text{s}, T_D \geq 500 \text{ ms.}$$

$$; D_{SMD} = 235 \mu\text{m} (D_{AV} = 130 \mu\text{m}); T_i \leq 210 \text{ ms} (V_f \leq 2.4 \text{ m/s}),$$

$$q_w \geq 144 \text{ mg/cm}^2\text{s}, T_D \geq 850 \text{ ms.}$$

Where ϕ Equivalence ratio, T_i Spray start time from ignition, V_f Flame Propagating velocity, D_{SMD} Sauter mean diameter, D_{AV} Arithmetic mean diameter, q_w Water flux of sprays (mean), T_D Duration of sprays:

* 平成 9 年 11 月 28 日, 第 30 回安全工学研究発表会, 平成 10 年 5 月 20 日, 日本火災学会研究発表会, 平成 10 年 12 月 3 日, 第 31 回安全工学研究発表会において, 本研究の一部について各々発表した。

**化学安全研究部 Chemical Safety Research Division

Keywords; Premixed flame, Flame propagation, Extinction, Quenching, Explosion suppression, Water, Suppressant agent, Extinguisher, LPG

1. ま え が き

水は、古くから消火剤として利用されてきた。これは、毒性がなく、安価で大量に入手でき、冷却効果が大きいといった長所があるためである。火災に対する水を使った消火法としては、ホースからのいわゆる棒状注水やスプリンクラからの噴霧があり、効果的な消火実現のためにこれまで多くの研究がおこなわれてきた^{1-11,27)}。

火災において見られる火炎は、拡散火炎であることが多いが、ガス爆発に見られる伝ば性を有する火炎は予混合火炎であることがほとんどである²⁶⁻²⁸⁾。火炎の水消火の基礎研究として古くから調べられてきたのは、拡散火炎と水滴群の相互作用である^{2-7,10)}。本研究では、爆発抑制の目的で水の利用を検討しているが、そのためには、予混合火炎と水滴群の相互作用を予め把握する必要がある。このことに関連する水を使ったガス爆発抑制あるいは予混合火炎の消炎については、これまでにいくつかの研究がなされている^{1,12-22,25,31)}。

Sapko ら¹²⁾は、内径 15.5 cm、長さ 1m のアクリル円管を用い、メタン-空気予混合火炎について消炎実験をおこなった。研究では、着火前に予め雰囲気の水噴霧（蒸気）を混入させておく不活性化実験と伝ばする火炎に水を噴霧する実験をおこない、消炎に及ぼす水滴径、水の濃度などが調べられた。van Wingerden ら¹³⁻¹⁴⁾は、水噴霧の停止後に火炎を伝ばさせた実験をおこない、消炎しない場合には、火炎が乱れ、火炎の伝ば速度が増加するという結果を得た。彼らの研究の特徴は、火炎伝ば速度が大きく、それに伴う気流が大きい場合には、粒径が大きい水滴は分裂 (break up) するので、消炎効果が高くなることを示したことである。Wolfe と DeSipio¹⁵⁾は、水滴径を小さくするために二流体ノズルを用い、一流体ノズルよりも少ない水量で消炎できるという結果を得た。Lutz ら¹⁶⁾は、水素-空気予混合火炎と単一水滴の相互作用を一次元モデルによる数値シミュレーションにより調べた。Moore¹⁹⁾は、消火剤噴霧式の爆発抑制装置に関する研究をおこなっている。その研究では、30 気圧以上の高圧で多量の水を球形容器内 (1m³) に放散し、容器内の圧力変化から抑制の効果が検討され、消火剤としての水の効果が調べられた。この場合には、消火が達成できたことよりも、圧力上昇を抑えることができたことのほうが重要である。一流体ノズルを用いる場合には、高圧で噴霧することにより水滴の微細化がはかれるが、そ

れとともに誘起される周囲の流れも大きくなる。従って、その火炎が水滴群によって消炎しているのか、高速の流れによって吹き飛び、消炎に至るのかが不明瞭である。爆発抑制装置に組み込む消火剤としての水は、燃焼のごく初期段階を除き、その消火効果は小さいとされている^{1,19,21)}。

ガス爆発抑制のために水で消火をおこなう場合には、予め雰囲気水を燃焼下限界以下になるように不活性にしておくのではなく、何らかの着火源により燃焼が開始し、火炎が伝ばして初めて水を噴霧することになる。予混合火炎の消炎に及ぼす水（蒸気）添加量は、燃焼限界の測定とともに既に調べられている²²⁾。しかし、燃焼開始後に水を噴霧する場合には、水滴が蒸発するまでに時間を要するので、水蒸気を予め添加した消炎の結果とは異なるはずである。また、噴霧によって場に水滴を導入する方法では、場を攪乱し流れを生じさせるので、噴霧による効果についても検討を加える必要がある。従来の研究からは、伝ば火炎に水噴霧をおこなった場合の火炎の非定常挙動などはあまり詳細に調べられておらず、どのように消炎に至るのかが不明瞭な点が多い。そこで本研究では、水をガス爆発抑制の消火剤として利用することを考慮し、その基礎的知見を得る目的で、管内を伝ばする予混合火炎に水を噴霧した場合の火炎の非定常挙動、消炎限界、噴霧の適用限界などを調べた。

2. 記号表

A	: 燃焼管の断面積 = 400 (cm ²)
B	: B ナンバー (文献 28)
C_s	: 水滴表面の飽和蒸気圧 (atm)
D	: 一般的に水滴径を表し、 D_{AV} と D_{SMD} を含む (μm)
D_{AV}	: 算術平均粒径 (μm)
D_{SMD}	: ザウター平均粒径 (μm)
D_f	: 蒸気の空気中への拡散係数 (m ² /s)
G	: 管断面にわたる噴霧水量 = $q_w \cdot A \cdot T_D$ (g) 注) 壁面に付着した水量は含まない。
G_T	: 総噴出水量 (g)
P	: 貯水タンク内の圧力 (MPa)
P_i	: 貯水タンクへの初期加圧 (MPa)
q_w	: 水滴の質量流束 (g/cm ² s)
Re	: レイノルズ数 (= $U \cdot D/\nu$)
S_L	: 層流燃焼速度 (m/s)
S_L'	: 水噴霧中の時間経過に伴う燃焼速度 (m/s)

Table 1 Experimental condition.
実験条件

(1) 対象火炎 (a) メタン—空気予混合火炎, $\phi = 0.7 \sim 1.1$ (b) LP ガス (プロパン 98.1%)—空気予混合火炎, $\phi = 0.7 \sim 1.1$ → T_f, S_L, δ, V_f などの変化
(2) 燃焼管 (200 mm×200 mm 正方形, 長さ 2 m) (a) 両端開放 (b) 上端閉—下端開 (c) 上端開—下端閉 → V_f の変化
(3) 消火剤 水
(4) ノズル (—流体ノズル) (a) 種類, $P_i = 0.39 \sim 0.83$ MPa → $D (D_{AV}, D_{SMD}), q_w, V_w, V_g$ の変化 注) 各変数は時間・空間の関数である (b) T_i の可変 → T_i 時における V_f の影響 (c) T_D の可変 → G の変化
(5) 噴霧方向 (a) 上端から下方へ, ノズル 1 つ, ノズル出口は管上端よりも約 20 mm 上 (b) 側壁から水平へ, ノズル 1 つ, No. 3 センサポート (c) " , ノズル 2 つ, No. 3 と No. 6 センサポート (d) " , ノズル 2 つ, No. 6 と No. 9 センサポート → 管内の局所的 $D (D_{AV}, D_{SMD}), q_w, V_w, V_g$ の変化

3.3 実験方法

実験では、はじめに燃料を一定時間だけ混合タンクに供給し、送風機で燃焼管内を循環させることで均一な予混合気になるようにした。そして、所定の時間の後に干渉計式ガス濃度計によって濃度を確認し、管の上と下の開閉用のシャッターを開き、それとともに点火させ、上方から噴霧をおこなった。これらは、すべてタイマを使った時間制御によっておこなっている。

火炎の様子は、直接光についてはビデオカメラ (SONY DCR-VX1000, 30 駒/秒)、シュリーレン像については高速度ビデオカメラ (500 駒/s) を用いて観測した。水滴の移動速度は、高速度ビデオカメラを用いた影写真撮影法と一定の高さに水平にレーザ光を照射し、水滴通過に伴う散乱光をフォトランジスタでとらえる方法によって調べた。さらに詳細な動きを把

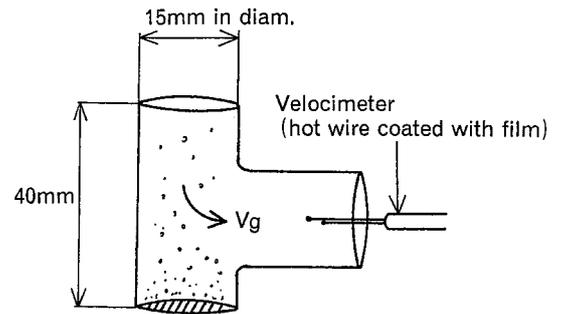


Fig. 2 Measurement of V_g .
 V_g の測定

握するために、PIV (Particle Image Velocimetry) も使用した。この PIV システム (米国 TSI 製) は、シンクロナイザ、ダブルパルスミニ YAG レーザ (532 nm, 12 mJ)、高解像度カメラから構成されている。

水噴霧の質量流束 q_w は、観測窓をはずし、その高さに小さいサンプル瓶一列に並べ、そこに一定時間水滴を受け止め、後で各瓶の質量を測る方法によって求めた。 V_g は Fig. 2 に示したように、コーティングされた熱線流速計 (時間分解能 10 Hz) を曲管部に設置しておき、鉛直に降下する水滴は液溜めでトラップされ、多少飛沫があるものの曲管へは誘起された気体があるので、平均的な気流速度を測定することができる。平均水滴径は液浸法によって求めた。

4. 実験結果及び考察

4.1 水噴霧の性状

Table 2 に示した 5 種類のノズルの名前 S ノズルと W ノズルとは、本研究で便宜的に定めたもので、S シリーズのノズルは拡がり角が平均 60° 、W ノズルが 32° である。開放空間に噴霧した場合には、S シリーズのノズルは一樣な質量流束分布もち、W ノズルは、ガウス分布のような中心軸の質量流束が大きく、中心軸から離れるに従って小さくなる分布をもっている。しかし、本研究のように燃焼管内に噴霧する場合には、壁面の影響があるので、噴霧性状が異なるはずである。消火実験に先立ち水噴霧の性状を調べた。

Table 2 には、本実験に用いたノズルの主な噴霧性状として、 $D_{AV}, D_{SMD}, \bar{q}_w$ を示した。 \bar{q}_w は P_i に強く依存するもので、S シリーズのノズルは P_i の増加とともに \bar{q}_w が増すことがわかる。W8.5 ノズルでもその傾向は同様であるが、 P_i が 0.83 MPa になると、逆に 0.68 MPa のときよりもわずかに \bar{q}_w が減少する。これは、 P_i が増すと噴出拡がり角が増すので、壁に多く当たると

Table 2 Characteristics of spray nozzles.
噴霧ノズルの特性

ノズル名	噴射角	出口径	噴出量 0.69 MPa において [ℓ/min] ※メーカー 測定値	平均水滴径 [μm]								水噴霧の平均質量流束 q_w [mg/cm ² s] (燃焼管上端か ら 650 mm 位置, 流路断面)			
				算術平均粒径 D_{AV}				ゲータ平均粒径 D_{SMD}				0.39 MPa	0.59 Mpa	0.68 MPa	0.83 Mpa
				0.39 MPa	0.59 MPa	0.68 MPa	0.83 MPa	0.39 MPa	0.59 MPa	0.68 MPa	0.83 MPa				
S1.7	60° ± 10	1.0	1.7	93	87	75	92	159	175	164	175	40	41	55	65
S5	"	2.0	5.0	88	79	72	97	192	202	156	215	78	103	113	135
S10	"	3.1	10.0	133	117	104	130	227	250	207	235	87	106	127	142
S20	"	4.3	20.0	171	179	175	172	321	348	276	293	92		146	160
W8.5	32°	3.5 (平均)	8.5				142				268	232		292	286

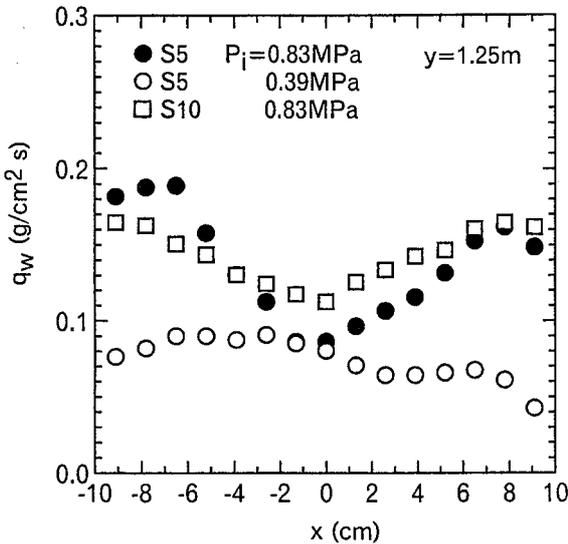


Fig. 3 Distribution of water flux (a).
水噴霧の流束分布 (a)

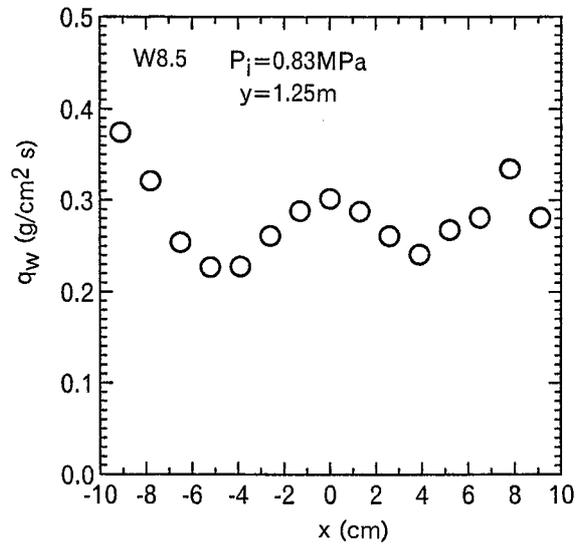


Fig. 3 Distribution of water flux (b).
水噴霧の流束分布 (b)

めであると考えられる。

Fig. 3(a) と (b) は、それぞれ S シリーズのノズルと W ノズルの質量流束 q_w の分布で、燃焼管上端から下に 650 mm ($y = 1.25$ m), 観測窓にあたる高さで調べた。まず, Fig. (a) より, 圧力が大きいと, q_w は中心軸よりも壁のほうが大きい分布となり, P_i の減少に伴って分布が次第に平坦になってくることがわかる。Fig. (b) の W ノズルでは, 中心と壁で q_w が大きい。燃焼管内で 60° 拡がり角のノズルから水を噴霧した場合には, 開放空間とは異なる水滴径, 水滴の質量流束分布になる。水滴は円錐状に拡がり, 管壁に衝突し, 管の上端では壁と水滴の衝突する角度が大きいため水滴が微細になるとともに跳ね返り, 壁と衝突する角度

が小さい場合には, 管壁に付着して, 壁に沿って下に流れるものと考えられる。さらに, 噴霧に伴う周囲気体の流れが生じるので, その誘起流れが流路下方で発達する。

Fig. 4 は, P_i と水滴の平均速度 V_w の関係を示したものである。 P_i とともに V_w は増加するが, 単調増加するのではなく, P_i に対する V_w の増加率は次第に減少する。

Fig. 5 は, 水滴の噴出によって誘起される速度 V_g について調べたものである。これらの結果より, P_i に対する V_g は V_w よりも小さいことと, V_g は V_w に比例して変化することがわかる。なお, 窒素のみを噴出させた場合の V_g は, ノズルに近づくほど大きい³⁰⁾。水滴は

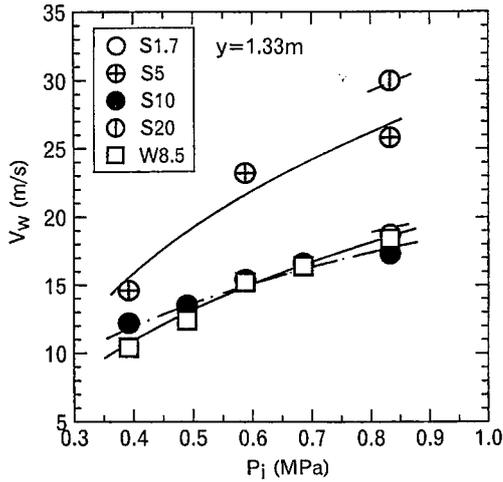


Fig. 4 Variation of V_w with P_i .
 P_i に対する V_w の変化

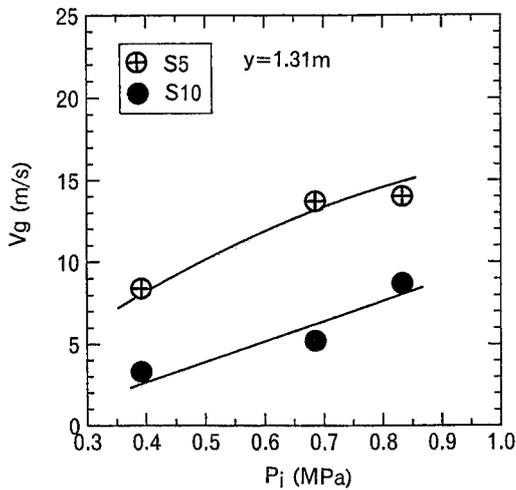


Fig. 5 Variation of V_g with P_i .
 P_i に対する V_g の変化

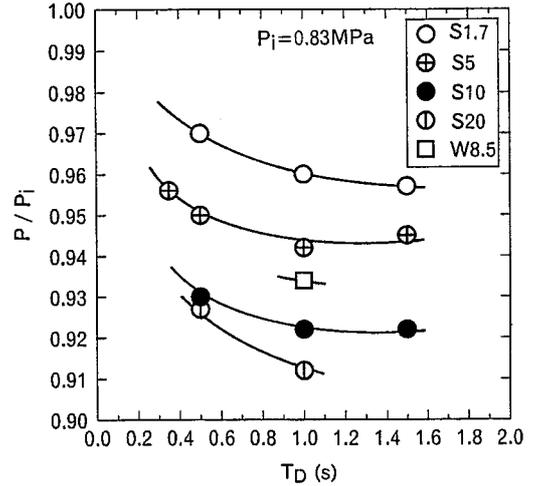


Fig. 6 Variation of P/P_i with T_D .
 T_D に対する P/P_i の変化

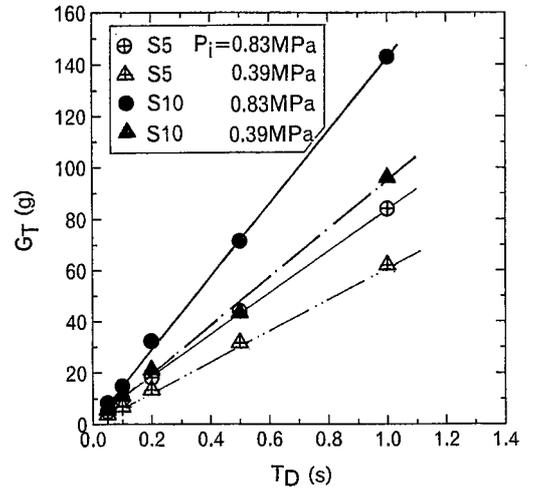


Fig. 7 Variation of G_T with T_D .
 T_D に対する G_T の変化

粒径が増加すると、粘性よりも慣性が大きくなり、落下とともにその移動速度が増加し、その水滴群の終速度に達する。

Fig. 6 は、 T_D 時点での貯水タンク内圧の減少量を調べたものである。 T_D が長くなると、タンクの内圧が減少するのは明らかである。とはいえ、本研究で主に用いた S5 ノズルにおいて $P_i = 0.83$ MPa、1 秒間の噴霧時間では、 $P/P_i = 0.94$ 、すなわち 6% 程度の減少にすぎないことがわかった。

また、Fig. 7 は、その T_D に対する水噴霧量 G_T を示したものである。 $T_D = 1$ s まで調べた範囲では、内圧が低下しても噴霧量はほとんど低下しないことがわかった。

4.2 水噴霧をしない場合の火炎伝ば速度

水噴霧をおこなう前に、この実験装置における基礎

的な燃焼特性として火炎の伝ば速度を調べた。Fig. 8 は、両端開放条件のもとで、当量比 ϕ の異なるメタン-空気と LP ガス-空気の子混合火炎について、時間経過とともに管内を伝ばする火炎先端の位置を示したものである。これらは、フォトランジスタをセンサポート No1~3, 6, 8 に装着して調べた。なお、2 本の 1 点破線部内 (0.96~1.34m) は観測窓に相当し、ここを通してビデオカメラによって火炎伝ばの様子を観察した。図からわかるように、火炎は点火後、加速しながら伝ばを続け、次第にその加速が小さくなる。Fig. 9 は、メタン-空気予混合火炎について、上端閉じ、下端開の管端条件における火炎先端位置の時間経過を示したものであるが、初め火炎が加速し、上端に近づくにつれて逆に減速する傾向がみられる。

Fig. 10 は、メタンと LP ガスについて、 ϕ に対する平均伝ば速度 \bar{V}_f を求めたものである。この \bar{V}_f は観測窓、

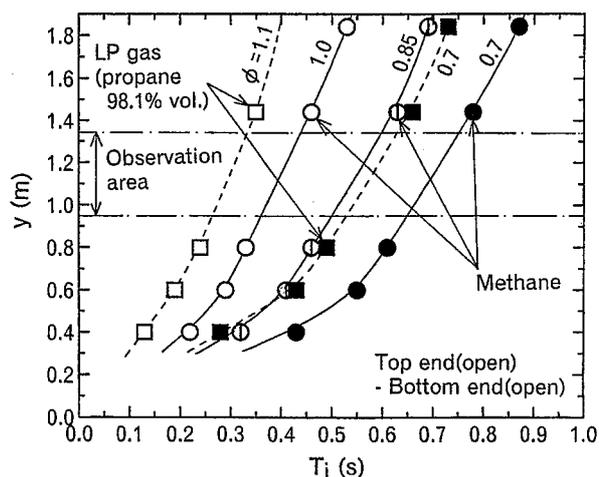


Fig. 8 Position of propagating flame with time (Top end open - Bottom end open).
時間に対する伝ば火炎の位置 (両端開放管端条件)

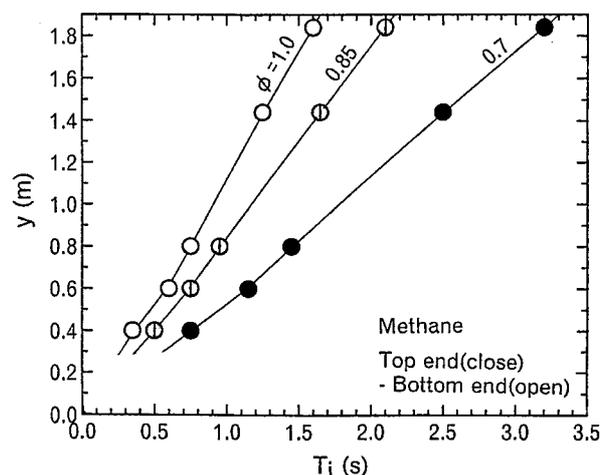


Fig. 9 Position of propagating flame with time (Top end close - Bottom end open).
時間に対する伝ば火炎の位置 (上端閉じ—下端開の管端条件)

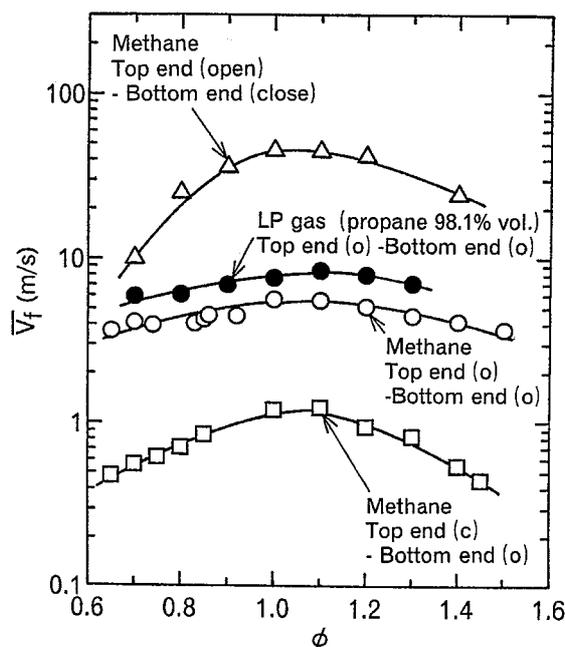


Fig. 10 Variation of \bar{V}_f with ϕ .
 ϕ に対する \bar{V}_f の変化

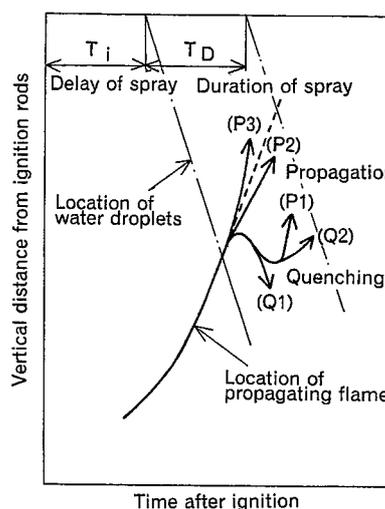


Fig. 11 Delay of spray and duration of spray.
噴霧開始時間と噴霧持続時間

すなわち燃焼管中央付近を伝ばする速度である。 ϕ が1.0から1.1のときに最大値をもち、このような結果は、バーナを使ったこれまでの実験と一致する²⁶⁾⁻²⁸⁾。上端開、下端閉じの管端条件における火炎の伝ば速度は、ほかの管端条件よりも大きく、その火炎伝ば速度は最大で45 m/sほどにもなる。逆に上端閉じ、下端開の管端条件においては、その速度は最大で1.2 m/s程度である。LPガス—空気予混合火炎のほうが、メタン—空気予混合火炎よりも伝ば速度が大きいことがわかった。燃焼管の開放の有無によって伝ば速度が異なるのは、浮力とともに火炎と同じ上方へ向かう未燃焼流れが拘束されずに流動できるためと考えられる。

4.3 水噴霧時の消炎：燃焼管両端開放

4.3.1 消炎挙動及び水滴の動き

初め管両端のシャッターは閉じておき、シャッターを開くとともに点火し、上方に伝ばする火炎に対してある時間遅れのもとで噴霧をおこなった (Fig. 11)。消炎の判定は、目視により、噴霧ノズルより前方で消炎したとき、すなわち、管上端から火炎が見られないときと定めた。なお、毎回の実験では、管内部を観測窓を通してビデオカメラ撮影をおこない、消炎に至る火炎の挙動を観察している。

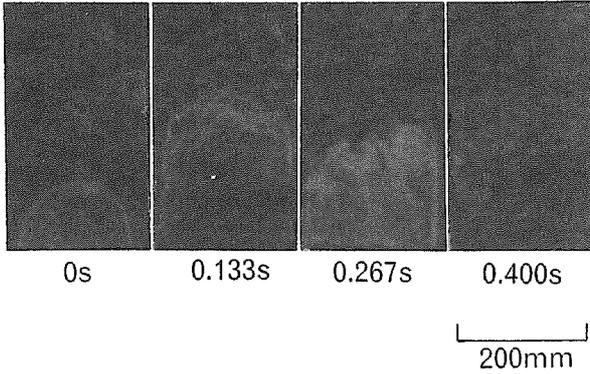


Photo 1 Quenching behavior of propagating flame.
伝ば火炎の消炎挙動

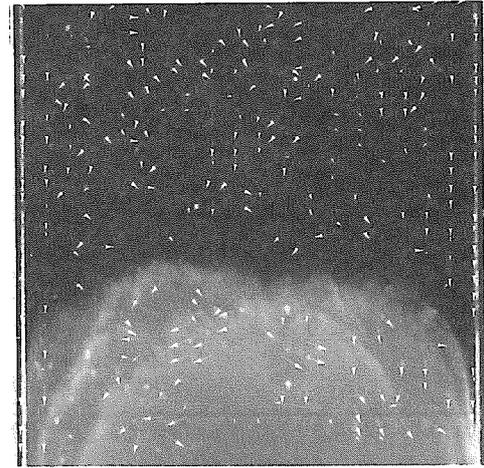


Photo 2 Movement of water droplets measured by PIV.
PIVで測定した水滴の動き

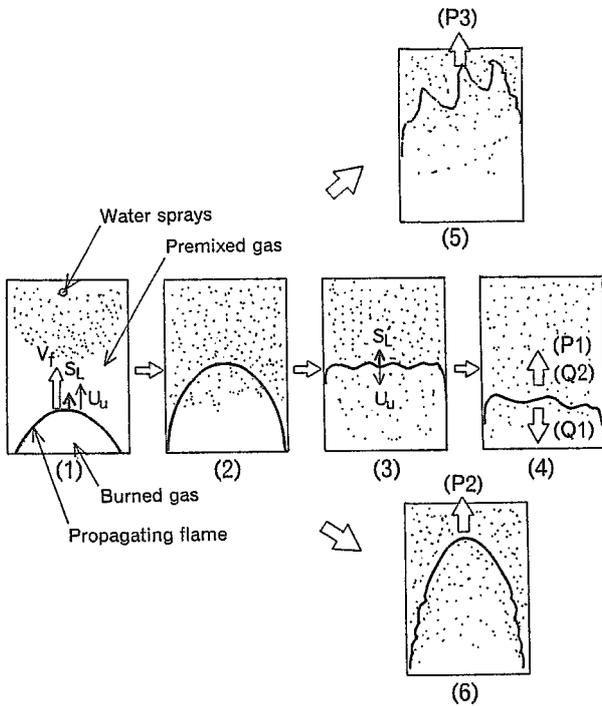


Fig. 12 Illustration of quenching behavior of propagating flame.
伝ば火炎の消炎挙動の概要図

Photo 1 は、燃焼管両端開放条件における代表的な水噴霧による消炎の様子で、 $\phi = 0.7$ のメタン-空気予混合火炎に対し、S5 ノズルを $P_i = 0.83$ MPa, $T_i = 0.63$ s, $T_D = 0.35$ s の条件で噴霧したものがある。初め火炎は、滑らかな形状をもって上方に伝ばを続けている (0 s)。上から水噴霧があり、火炎面に水滴が流入するとともに、火炎面が乱れ、次第に伝ばの速度が低下していき、後退するようになる (0.133 から 0.267 s)。その後、逆に火炎は上方に伝ばしながら消えていく (0.4 s)。このような一連の火炎の挙動から、消炎は一瞬にして起こるのではなく、消えるまでにはある時間を要することがわかる。

実験の結果、噴霧に伴う火炎の挙動は、概ね五つに分類できることがわかった。Fig. 12 は、水噴霧の際に消炎する場合としない場合を模式的に示したものである (Fig. 11 も併せて参照のこと)。図の (Q1), (Q2) は消炎する場合で、(P1), (P2), (P3) は消炎しない場合である。(Q1) では、わずかに上方に伝ばした後、後退すなわち下方へ伝ばし消えていく。(Q2) は Photo 1 に見られるように、一旦後退するが、後で上方に伝ばするようになり、伝ばしながら消えていく。(P1) の場合も一旦後退するが、その後急激に上方に伝ばし、消炎しない。この挙動では、火炎が後退するとともに火炎全体の左右の対称性がくずれ、その後、火炎先端は片側に寄って伝ばすることが多い。しかし、燃焼管の下から観察したところ、流路の四隅付近を先行して伝ばすることはなかった。(P2) では後退せず、伝ば速度が低下するものの上方に伝ばを継続する。(P3) では、すぐに火炎が乱れ、伝ば速度が増加し、加速的に伝ばする。この場合も消炎せず、管上端から音を発して火炎が噴出する。消炎しない場合に最も多く見られた火炎の挙動は、この (P3) である。

Photo 2 は、水噴霧の際の水滴の動きを PIV で求めた一例である。高解像度白黒ビデオカメラにより撮影した $\phi = 0.7$ のメタン-空気予混合火炎に対して、水滴の移動を示すベクトルを重ねて示した。この火炎は、Fig. 12(3) から (4) の (Q1) に相当する状態である。火炎面には凹凸のある乱れが明瞭に見られる。水滴の動きを見ると、火炎前方、すなわち火炎よりも上の領域の水滴は、下向きあるいは斜め下向きに動いている。その方向が一樣ではないことから、水滴の動きは乱れていることがわかる。しかし、水滴全体が火炎前方で逆流し、上方に移動することはなく、火炎面に

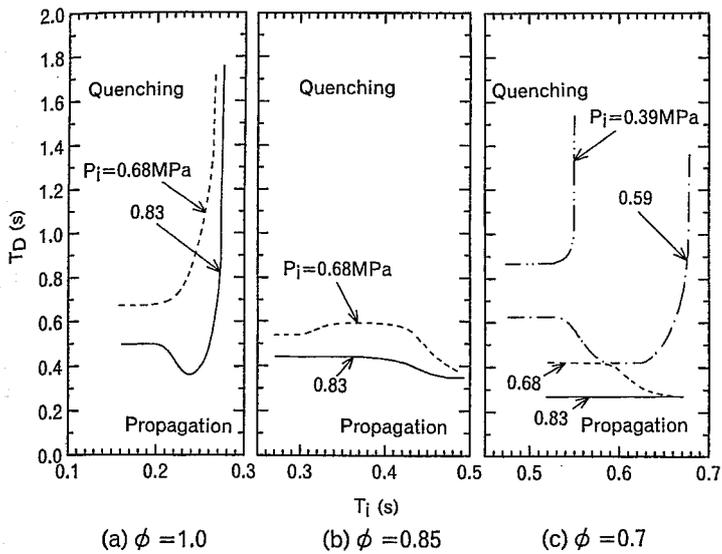


Fig. 13 Relation between T_i and T_D for flame quenching (S5 nozzle).
消炎に及ぼす T_i と T_D の関係 (S5 nozzle)

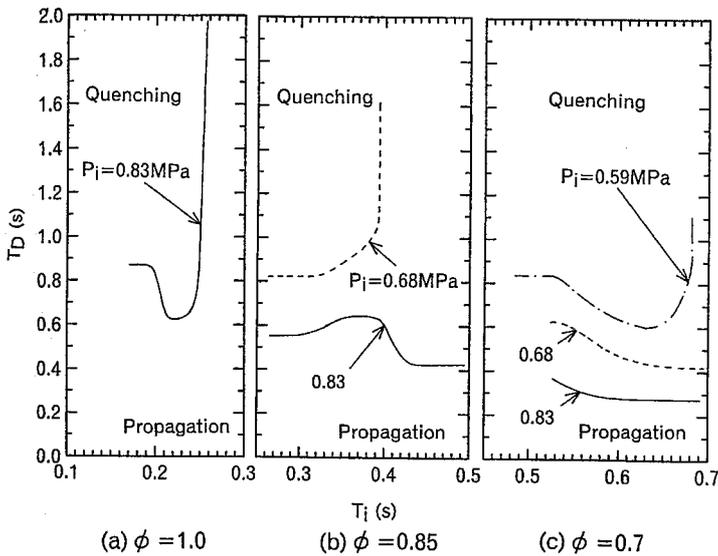


Fig. 14 Relation between T_i and T_D for flame quenching.
消炎に及ぼす T_i と T_D の関係 (S10 nozzle)

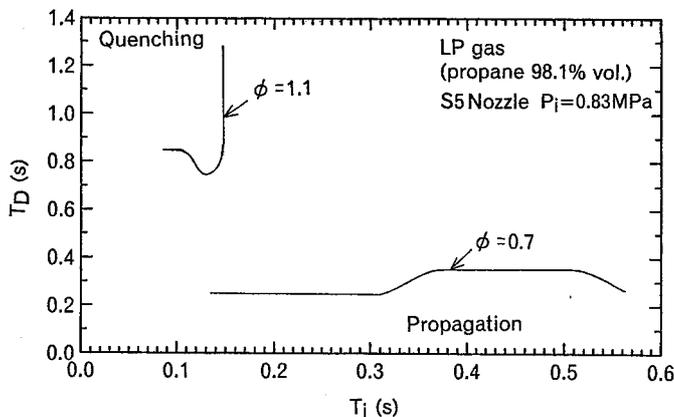


Fig. 15 Relation between T_i and T_D for flame quenching.
消炎に及ぼす T_i と T_D の関係 (LP gas, S5 nozzle)

流入し、総じて、下方へ向かうことがわかる。

高速度シュリーレン撮影をおこなった結果からは、Fig. 12(2)の状態では、水滴が火炎面を通過し、それまで滑らかであった火炎面に凹凸が見られるようになる。100 μm 程度の粒径を持つ水滴は、火炎面前方で蒸発しきらずに火炎面を通過する (5.2節)。水滴の数密度と火炎面の凹凸のスケールからすると、個々の水滴が火炎面位置に流入し、流入した個々の位置にくびれができ、それが発達するわけではないことがわかった。

4.3.2 消炎限界

噴霧開始時間と噴霧持続時間を変えた場合の消炎限界は、Fig. 13~15の通りである。Fig. 13(a)~(c)は、メタン-空気予混合火炎を対象に、S5ノズルを用いた場合の消炎限界を示したもので、予混合気の濃度と P_i を変化させて求めた。これらの図では、各曲線よりも上あるいは左上が消炎する範囲であり、曲線よりも下あるいは右下が消炎しない範囲を示している。この時間 T_i は、電磁弁の作動遅れを予め調べ補正を加えたもので、着火を始めてから実際に水がノズル孔から噴出する時間である。これらの図から、① P_i が大きいほうが短い T_D で消炎が達成できること、② P_i を一定とすると、 ϕ が小さく、燃料気体が薄い火炎になるに従って短い T_D で消炎できること、③ T_i が早い段階でも最低限必要とする水噴霧量があること、④ T_i が遅くなると、消炎できないこと、⑤ 1.2 s 以上噴霧しても消炎には寄与しないこと、などがわかる。さらに、 $\phi = 1.0$, $P_i = 0.83$ MPa の曲線において $T_i = 0.22$ s, $T_D = 0.7$ s 付近の湾曲、同様に $\phi = 0.85$, $P_i = 0.83$ MPa の曲線における湾曲 (下への凸部)、 $\phi = 0.7$ の各曲線に見られるように、早く噴霧しても消炎せず、逆に遅く噴霧しても効果的に消炎する場合があることがわかった。このことに関しては次節で述べることにする。

Fig. 14(a)~(c)は、S10ノズルを用いた場合の消炎限界であるが、傾向はS5ノズルと同じである。ただし、S10ノズルを使った場合は、S5ノズルに比べて消炎範囲がやや狭いことがわかる。すなわち消炎達成のためには、早い T_i 、長い T_D を要する。本研究では、S5ノズルが最も効果的に消炎が達成できた。

Fig. 15は、LPガス-空気予混合火炎を対象に、S5ノズルを用いた場合の消炎限界を示したものである。 $\phi = 0.7$ についてみると、消炎達成のためにはメタンの場合よりも噴霧持続時間を長く必要とすることがわかる。 $\phi = 1.1$ の結果からは、消炎が達成できる T_i は、せいぜい 0.15 s までである。LPガス-空気予混合火炎のほうがメタンのそれよりも消炎できる範囲は狭く、多くの水量を必要とする。

Fig. 16は、Fig. 13(a)~(c)の時間 T_i と T_D につい

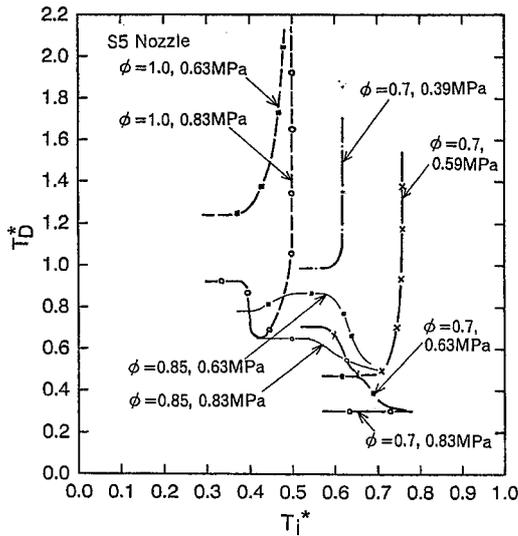


Fig. 16 Relation between T_i^* and T_D^* for flame quenching.
 消炎に及ぼす T_i^* と T_D^* の関係

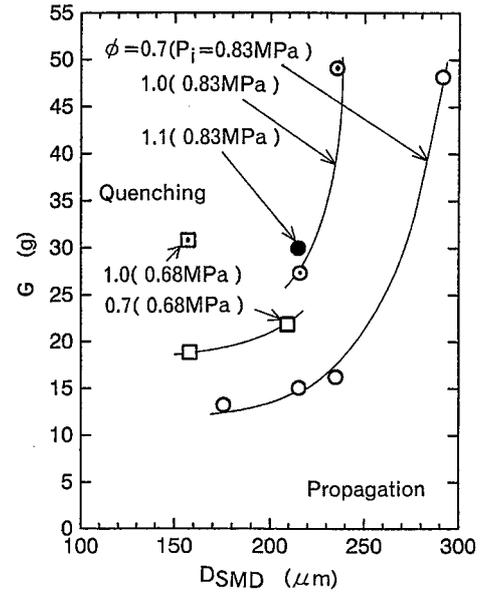


Fig. 18 Variation of G with D_{SMD} for flame quenching.
 消炎に関する D_{SMD} に対する G の変化

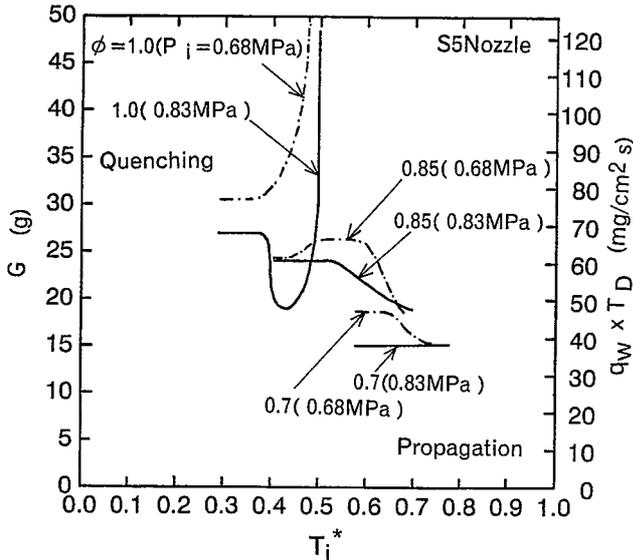


Fig. 17 Relation between T_i^* , G and $q_w \cdot T_D$ for flame quenching.
 消炎に及ぼす T_i^* , G と $q_w \cdot T_D$ の関係

て、水を噴霧しない場合に火炎が燃焼管上端に達するまでの時間 T_e で無次元化をおこなったものである (Fig. 8 参照)。伝ば速度が大きい $\phi = 1.0$ では無次元時間 $T_i^* = 0.4$ まで、伝ば速度が小さい $\phi = 0.7$ では、 $T_i^* = 0.75$ までは消炎が達成できることがわかる。

また、Fig. 17 は、S5 ノズルについて、消炎限界値となる T_D と \bar{q}_w から消炎に必要な水噴霧量を求めた結果である。この消炎限界値となる T_D としては、消炎限界曲線が T_i^* に対して大きく変化しない範囲で最大値をとった。例えば、Fig. 13(a) において、 $P_i = 0.68$ MPa では T_D が 0.68 s、0.83 MPa では T_D が 0.5 s という

様である。また、 G は、流路断面積 $A \times \bar{q}_w \times T_D$ から求めたもので、壁に付着した水滴を除き、断面に噴霧された水滴が全て火炎面に流入し消炎に寄与するものとした。その Fig. 17 を見ると、 $\phi = 0.7$, $P_i = 0.83$ MPa では、 $T_i^* = 0.78$ (0.69 s) までは流路断面に 15g, 39 mg/cm² 以上の質量流束で、 $\phi = 1.0$, $P_i = 0.83$ MPa では、 $T_i^* = 0.35$ (0.19 s) さらに 0.5 (0.24 s) までは流路断面に 27g, 69 mg/cm² 以上の質量流束で消炎することがわかる。なお、それぞれの P_i での水滴径は、Table 2 の通りである。

Fig. 18 は、4 種類の S ノズルについて、消炎に及ぼす D_{SMD} と G の関係を示したものであるが、水滴径が小さいほど少ない水量で消炎が達成できることがわかる。また、一定の水滴径で見ると、 ϕ の増加とともに G が増加する傾向が見られる。例えば、 $D_{SMD} = 210 \mu\text{m}$, $P_i = 0.83$ MPa の場合を比較をすると、 ϕ が 0.7, 1.0, 1.1 となるに従い、 G はそれぞれ、15, 28, 30g と増加する。

4.3.3 V_g の効果

対象とする火炎が同じで同じ水滴径でもあっても、消炎のための水量が P_i によって異なることに注意を要する。例えば、Fig. 18 より、 $\phi = 0.7$ について $D_{SMD} = 210 \mu\text{m}$ で見ると、 $P_i = 0.83$ MPa では G は 15g, $P_i = 0.68$ MPa では 22g を消炎のために必要とする。4.1 節で述べたように、 V_g は P_i とともに変化する。 P_i が小さい場合には V_g も小さいので、火炎の伝ば速度の低下への寄与が小さくなる。

Fig. 12(1) 中に示したように、層流燃焼速度 S_L 、火

炎前方の未燃焼予混合気の流速を U_u とすると、火炎の伝ば速度 V_f は、上方を正号にとり、

$$V_f = S_L + U_u \quad (1)$$

で表される。 $\phi = 0.7$ では、 $S_L = 0.2 \text{ m/s}^{27}$ 、噴霧しない場合には、Fig. 10 より $V_f = 4 \text{ m/s}$ であるので U_u は正号であり、未燃焼混合気は上向きを持つ。火炎が後退する場合には、 V_f は負号となり、 S_L の減少、 U_u が逆に下向きの速度を持つようになる。すなわち、この状態では、絶対値 $|U_u| < |V_g|$ である。これは、消炎の効果に対向気流の増加も重要であることを示している。 S_L が減少する様子は、火炎の長さが増加することからも推測できる (Fig. 12(6))。 V_g が変わらないのに消炎せずに火炎が加速的に伝ばするのは、層流火炎から乱流火炎に遷移し、 S_L が増加し、乱流燃焼速度になり、見かけ上、それまでの S_L 値よりも大きい値となるためと考えられる。

4.3.2 節で示した消炎限界曲線で湾曲し、 T_i は遅いが短い T_D で効果的に消炎できるのは、ノズルに火炎が近づき、下向きの予混合気流れの速度が大きいためである。しかし、 V_g の増加だけでは消炎は達成されない。なぜなら、火炎が伝ばしようとする前方にすでに予混合気が存在するからである。 V_g の効果により V_f が低下し、十分な水滴が火炎面に流入し、 S_L を低下させることができれば、消炎が達成できる。

4.4 水噴霧時の消炎：上端閉—下端開あるいは上端開—下端閉

Fig. 19 は、上端閉—下端開にした管端条件において、 $\phi = 0.7$, $P_i = 0.83 \text{ MPa}$ の消炎限界を示したものである。消炎の判断は、センサーポート No.8 に取り付けられたフォトトランジスタに出力が無い場合とした。図からわかるように、上端を閉じた場合では伝ば速度が小さいとはいえ (Fig. 9,10)、早く噴霧を開始しても消炎しない。実験において、このときの火炎の挙動を見ると、乱れた火炎が上方に伝ばするのが観察された。このことから、早く噴霧することで予混合気が乱され、早い段階で乱流火炎に遷移することがわかる。一見すると、両端開放の管端条件とは異なり、 T_i が遅い場合に消炎が達成しやすそうである。しかし、この場合には、両端開放条件において、水滴群によって消炎するという挙動ではなく、むしろ、火炎が吹き飛び、下方に後退しながら消炎していくという消炎挙動を示す。すなわち、ノズルに近い部分では V_g が大きく、その対向気流によりノズルに近づいた火炎が吹き飛ばされるように後退し、消炎している。この管端条件において、噴霧しない場合の V_f は 1 m/s 程度であり、式 (1) から U_u

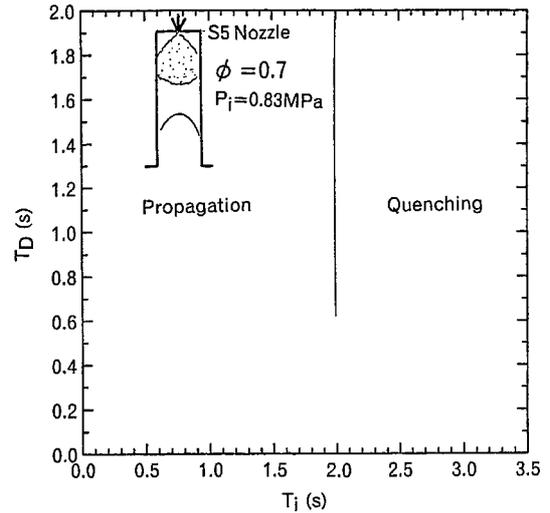


Fig. 19 Relation between T_i and T_D for flame quenching. 消炎に及ぼす T_i と T_D の関係 (S5 nozzle)

も小さい。この状態では、 $|U_u| < |V_g|$ であり、消炎に関して相対的に V_g が強く影響しているものと推測できる。なお、 $\phi = 1.0$ の条件では、消炎を達成することができなかった。

上端開、下端閉の管端条件では、消炎が達成しやすと思われた $\phi = 0.7$ について、早い段階の T_i 、長い T_D でさえも、消炎させることができなかった。 $\phi = 0.7$ の V_f は 10 m/s 程度であり、相対的に V_g の効果が小さく、火炎の伝ば速度を減少させるには至らないようである。

4.5 側壁から水を噴霧した場合の消炎

ノズルを側壁に取り付けた消炎実験の条件は、Table 1 に示した通りである。ただし、燃焼管の両端は開放である。

① 条件 (b) の燃焼管 No. 3 の位置に S1.7 から S20 のノズルを一つ取り付けた場合；

いずれの条件でも消炎しないことがわかった。ノズルを取り付けた側の壁に沿って火炎が先行して伝ばする様子が多く観測された。

② 条件 (c) の No. 3 と No. 6 の 2 カ所に S5 ノズルを取り付けた場合；

消炎せずに、加速的に伝ばした。このときには、条件 (b) と同じように、ノズルを取り付けた側に壁に沿って火炎が先行して伝ばする様子が見られた。このような消炎しない挙動を示すのは、おそらく壁に水滴が当たり、そのことで流路断面で均一な水噴霧分布とならないためであると考えられる。

③ 条件 (d) の No. 6, No. 9 の対向する位置に S5 ノズルを取り付けた場合；

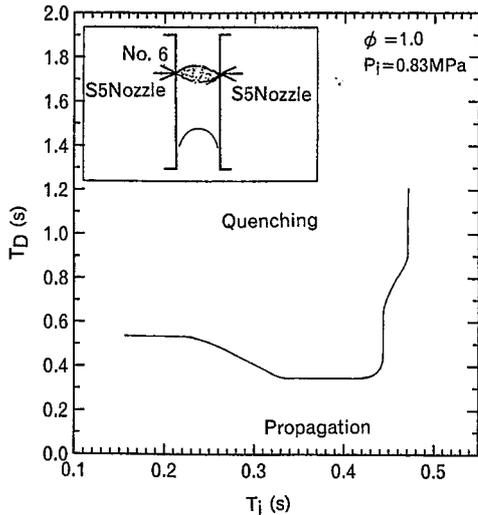


Fig. 20 Relation between T_i and T_D for flame quenching. 消炎に及ぼす T_i と T_D の関係 (S5 nozzle×2)

Fig. 20 は、この条件の消炎限界曲線である。まず、この限界曲線からわかることは、Fig. 13(a) に比べて消炎範囲が広いことである。 T_i に関して見れば、火炎先端がノズル取り付け位置を少し通過しても消炎が達成できる。すなわち、火炎背後からの水噴霧によっても消炎が達成されている。 $T_i = 0.33$ から 0.44s の範囲では、 T_D が 0.35s と短く、効果的に消炎が達成されていることがわかる。

Fig. 21 は、このノズルの設置条件について、非燃焼状態、 $y = 1.3m$ において求めた質量流束分布である。対向する水滴が管中心で衝突するので、中心軸の q_w が大きく、壁面の q_w が小さい分布をしている。 q_w の平均値は 221 mg/cm^2 である。

この噴霧方法では、噴霧方向が火炎の伝ば方向に垂直なので、予混合気をそれほど乱さずに局所的に予混合気の濃度が低い領域を作り出し、それまでの層流火炎が乱流火炎に急激に遷移することなく消炎を達成できるものと考えられる。壁面付近にも水噴霧があるので四隅を火炎が伝ばすることがない。

4.6 消炎条件の整理

Table 3 は、主な消炎条件を整理したものである。側壁からノズル 2 つを対向的に用いた場合を除くと、上端から噴霧したときは、伝ば速度が 3.8 m/s までの範囲で消炎が達成できることがわかった。噴霧持続時間は 0.85s 以上が必要である。上端閉—下端開の管端条件においては、火炎がノズルに近づき、それが吹き飛ぶことで消炎がおりやすい。

消炎限界曲線からわかるように、 T_i が遅くなると消炎が達成できない。これは、火炎が瞬間的には消えな

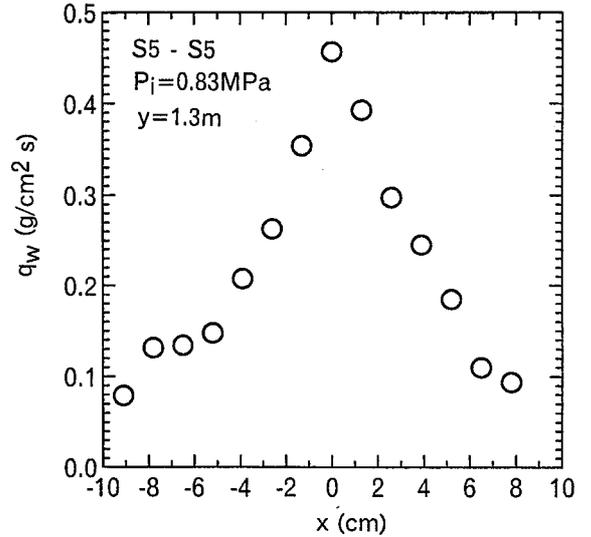


Fig. 21 Distribution of water flux. 水噴霧の流束分布

いので、水噴霧の中を火炎が上方に伝ばを継続し、燃焼管上端までに消炎が達成できないためである。

噴霧ノズルについて、SノズルとWノズルを比較すると、広い範囲に噴霧できるSノズルのほうが消火効果が大きいことがわかった。すなわち、一様な噴霧流束分布を持つノズルは、燃焼管壁に沿って火炎が伝ばするのを抑えることができる。Wノズルは、中心軸での噴霧流束が大きく、それとともに V_g も大きい。そのため、中心付近での対向気流が火炎面を大きく変形させ、場合によっては非対称な火炎となる。そのことが乱流火炎への遷移となり、加速的に伝ばするため、消炎できない一つの理由と考えられる。

5. 考 察

5.1 他の研究との比較

消火剤の消炎効果を比較する方法の一つとして、ある粒径の水滴が単位面積、時間あたりにどれだけ火炎面に流入したか比較検討するというのがある。そこで、他の研究と比較してみた。

Sapko らの実験¹²⁾の消炎条件は、メタン—空気予混合火炎 9.1% ($\phi=0.95$)、 23°C について、 $D_{SMD} = 100\mu\text{m}$ では $127 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ 、 7.0% ($\phi=0.72$) については $58 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ 、 $200 \mu\text{m}$ については $127 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ である。また、簡単な計算から、最も効果的に消炎できる水滴径が $10\mu\text{m}$ であるとした。さらにその研究では、水の温度 (20°C と 54°C) についても調べ、水温が高いほうが効果的に消炎できている。しかし、水の温度については、それほど効果がないという研究結果もある¹⁵⁾。Proust¹⁷⁾は、円形

Table 3 Flame quenching condition (S5 nozzle).
主な消炎条件 (S5 ノズル)

管端開放の有無	ノズルの位置 個数	燃料気体	濃度, Vol % (当量比 ϕ)	算術平均 粒 径 D_{SMD} [μm]	ザータ平 均粒径 D_{AV} [μm]	発火から噴霧開 始時間 T_i [ms]	噴霧しない 場合の T_i 時 刻の伝ば速 度 [m/s]	水滴の平均 質量流束 q_w [$\text{mg}/\text{cm}^2\text{s}$]	噴霧持続 時間 T_D [ms]
両端開放	管上端, 一つ	メタン	6.9% (0.7)	92	175	660 以内 (※ 1)	3.7 以下	108 以上	280 以上
"	"	"	"	172	293	660 以内 (※ 1)	3.7 以下	144 以上	850 以上
"	"	"	9.5%(1.0)	97	215	260 以内	2.9 以下	135 以上	500 以上
"	"	"	"	130	235	210 以内	2.7 以下	144 以上	850 以上
上端閉じ- 下端開	"	"	6.9%(0.7) 9.5%(1.0)	97	215	ノズルに火炎が近づくと吹き飛び消炎する。しかし、 両端開放の場合と同じような水噴霧条件では消炎でき なかった。			
上端開-下 端閉じ	管上端, 一つ	"	6.9%(0.7)	97	215	消炎しなかった。			
両端開放	側壁, 火位置か ら 0.8m, 一つ	"	6.9%(0.7) 9.5%(1.0)	—	—	上から噴霧で両端開放と同じような水噴霧条件では 消炎できなかった。			
"	側壁, 点火位置 から 0.8m と 1.44m, 二つ	"		—	—				
"	側壁, 点火位置 から 1.44mm (水 平対向), 二つ	"	9.5%(1.0)	—	—	450 以内	5.7 以下	221 以上	530 以上
両端開放	管上端, 一つ	LP ガス (プロパン 98.1%)	2.9%(0.7)	97	215	145 以内	3.3 以下	135 以上	850 以上
"	"	"	4.4%(1.1)	97	215	560 以内 (※ 2)	3.8 以下	135 以上	350 以上

※ 1) ※ 2) 本実験条件で制御した最長時間

バーナ上に定在予混合火炎を形成し、未燃焼側の混合気、すなわち上流側からノズルを使って水噴霧をおこなった。この研究は、Joulin³¹⁾や Mitani²⁵⁾の漸近解析による結果と比較するためにおこなわれたものである。消炎限界を求めた結果、Joulin の理論値の最適水滴径 $D_{SMD} = 80\mu\text{m}$ とは良好な一致が見られなかった。Gieres¹⁸⁾は、 $5 \times 5 \text{ cm}$ 正方形流路、長さ 1.2m の燃焼管を用い、上方に伝ばするメタン-空気予混合火炎について、上から水噴霧をおこなった。消炎に及ぼす質量流束は、 $D_{AV} = 195\mu\text{m}$ で $250 \text{ mg}/\text{cm}^2\text{s}$ 、 $D_{AV} = 30\mu\text{m}$ で $110 \text{ mg}/\text{cm}^2\text{s}$ である。

以上の研究結果と本研究結果を比較すると、水滴径に対する水噴霧の質量流束のオーダは一致しているといえる。

5.2 予混合火炎の消炎

水噴霧による予混合火炎の消炎としては、①熱的による効果、②水蒸気の添加による燃焼の不活性効果、そして③対向気流による吹き飛び効果などがある²⁶⁻²⁸⁾。ここでは、①と②について述べることにする。

まず、②の不活性効果とは、燃焼下限界にすることであり、火炎前面で水滴が蒸発し、未燃焼の混合気を希釈することで消炎が達成される。このとき、予混合火炎の消炎について、消火剤のピーク濃度（最小添加量）で評価されることがある。7 % (Vol.) メタン-空気予混合火炎の水（蒸気）添加のピーク濃度は 26.8 % (Vol.) である²²⁾。従って、空気の濃度は、66.2 % (Vol.) である。

噴霧された全水滴が燃焼管内に浮遊していると考え、実験結果、 $\bar{q}_w = 150 \text{ mg/cm}^2\text{s}$ で T_D が 1s の場合、 G は 60g となり、燃焼管 $8 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ にはわずか $6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ の水滴 (ただし、予混合気は乾燥しているとする) しか含んでいないことがわかる。この結果は、上記のメタン-空気予混合火炎のピーク濃度からすると、かなり小さい。このことからすると、流路内を伝ばする火炎の消炎は、伝ばする前方の予混合気の量で消炎濃度を評価したほうがよいことが推測できる。すなわち、火炎前方のある距離 (領域) での予混合気が消炎濃度となり、その距離 (領域) を火炎が伝ばする時間に消炎すればよい。ただし、水滴と火炎が十分に接触して蒸発する必要があり、これには V_g が寄与する。対向気流速度が増加することで、火炎の伝ば速度が減少し、接触時間を長くできる。例えば、消炎時間が 1 秒で、そのときの対向気流による影響で火炎の伝ば速度が減少し、燃焼速度に近い速度 0.3 m/s であったとすれば、平面火炎としてその時間に火炎が移動する距離に占める予混合気の体積は、 $0.3 \times \text{断面積 } 0.04 \text{ m}^2 = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ となる。実際は、火炎面近傍で予混合気の濃度はより減少しているはずである。

①の熱的による効果で消炎に至るには水滴の蒸発が欠かせない。火炎からの熱で水滴が蒸発する際の蒸発時間 t_v は、次式のように表せる²⁸⁾。

$$t_v = D^2/\beta \quad (2)$$

$$= (\rho_w \cdot D^2)/[8 \cdot \rho_g \cdot \alpha_g \cdot \ln(1+B)]$$

ここで、

$$B \sim Re^{1/2} \quad (3)$$

のように、気流の速度の増加に比例して B ナンバーが増加、蒸発が促進されると考えられる。本研究での気流速度は、水滴の相対速度 $U_u - V_g$ で表される。すなわち、 t_v は、気流の速度の増加によって小さくなる¹⁴⁾。

また、水滴の火炎面を通過する時間 t_p は、

$$t_p = \delta/(V_f + V_w) \quad (4)$$

である。静止水滴中を燃焼速度で火炎が伝ばする際の通過時間は δ/S_L であり、その時間に蒸発が完了すればよいので、正田と秋田は、最適な水滴径を次式のように表した²⁶⁾、

$$D = 2[(2 \cdot D_f \cdot C_s \cdot \delta)/(\rho_w \cdot S_L)]^{1/2}. \quad (5)$$

この D のオーダーは $10 \mu\text{m}$ 以下である。

火炎の伝ば速度が増加すると、水滴との相対速度が増加し、式 (2) の蒸発時間が小さくなくても、式 (4) の火炎通過時間がより小さくなるので、火炎面での水滴

の蒸発による消炎の寄与が小さくなる。水滴と火炎が接触している時間が長くなるように、噴霧することが好ましいといえる。さらに詳細な解析をおこなうためには、火炎帯 δ における熱損失を考慮する必要がある。

5.3 水滴分裂の可能性

対向気流が増加すると大きな水滴は扁平になり、分裂することがあるが、この臨界条件はウエーバ数 We で表されることがある^{14,29)}。

$$We = (\rho_g \cdot U \cdot D/\sigma). \quad (6)$$

衝撃波を伴う流れでは、水滴の分裂効果が見られるので²³⁾、あえて水滴を微細にしないこともある。文献 (29) によると、臨界条件は We 数 = 13 である。本実験の値、 $V_w = 26 \text{ m/s}$ を U として用い、 $D_{AV} = 100 \mu\text{m}$ 、温度 20°C の気体と水の物性値を代入すると、 $We = 1.1$ となる。 50 m/s 、 $200 \mu\text{m}$ としても、 We は 8.4 程度である。すなわち、この程度の速度では水滴が分裂することはない。

6. 結 論

本研究では、水をガス爆発抑制の消火剤として利用することを考慮し、その基礎的知見を得る目的で、管内を伝ばする予混合火炎に水を噴霧した場合の火炎の非定常挙動、消炎限界、噴霧の適用限界などを調べた。対象とした伝ば火炎は、メタン-空気と LP ガス-空気予混合火炎である。得られた結果は次の通りである。

- (1) 火炎は瞬間的に消えるのではなく、ある時間経過後消える。
- (2) 水滴径が小さいほど少ない水量で消炎が達成できるが、最低限必要とする水量がある。当量比を 0.7 から 1.0 まで変えて調べた結果、予混合気の濃度とともに消炎に必要とする水量が増加する。
- (3) 着火から早い段階で消炎を達成することが好ましいが、早く噴霧を開始しても消炎しないことがある。噴霧によって予混合気を攪乱することになるので、逆に燃焼を促進させることがある。
- (4) 噴霧に伴い誘起される未燃焼混合気の対向流れは、火炎の伝ば速度を減少させ、結果としては水滴と火炎の接触時間を長くし、効果的な消炎に寄与する。
- (5) 消炎が達成しない場合には、むしろ燃焼を促進させ、加速的に伝ばすることがわかった。
- (6) 噴霧開始直後の初期段階では、水滴群による火炎面への攪乱は小さい。しかし、時間とともに火炎面に凹凸のある乱れが見られるようになり、その乱れが発達する。

- (7) 側壁から2つのノズルを対向するように水平に噴霧した場合には、消炎が効果的に達成できることがわかった。

参考文献

- 1) Jones, A. and Nolan, P.F., Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression, *J. Loss Prev. Process Ind.*, **8-1**(1995), 17-22.
- 2) Rasbash, D.J., The extinction of fires by water sprays, *Fire Research Abstracts and Reviews*, **4**(1962), 28-53.
- 3) Fristrom, R.M., Combustion Suppression (A literature survey with commentary), *Fire Research, Abstracts and Reviews*, **9**(1967), 125-160.
- 4) Williams, F.A., A review of flame extinction, *Fire Safety J.*, **3**(1981), 163-175.
- 5) Atreya, A., Crompton, T. and Suh, J., An experimental and theoretical study of mechanisms of fire suppression by water, PB Rep., PB-95-104964, (1994), 67-68.
- 6) 矢治頼夫, 噴霧消火に関する研究, 日本火災学会論文集, **9-2**(1960), 58-62.
- 7) 矢治頼夫, 噴霧消火に関する研究 (第2報), 日本火災学会論文集, **11-1**(1961), 21-25.
- 8) 秋田一雄, 消火設備(1), 安全工学, **2-2**(1963), 127-132.
- 9) 木田 甫, 消火薬剤の消火効果の評価について, 火災, **21-3**(1971), 148-154.
- 10) 中久喜 厚, 高橋正一, 液体火災—水噴霧消火, 日本火災学会論文集, **20-2**(1971), 83-99.
- 11) 稲村勝正, ウォーターミスト消火システムに関する国際会議の概要報告, 火災, **44-3**(1994), 31-34.
- 12) Sapko, M.J., Furno, A.L. and Kuchta, J. M., Quenching methane - air ignitions with water sprays, Bureau of Mines(USA), R.I. **8214**(PB-266 727) (1977).
- 13) van Wingerden, K. and Wilkins, B., The influence of water sprays on gas explosions. Part 1: water-spray-generated turbulence, *J. Loss Prev. Process Ind.* **8-2**(1995), 53-59.
- 14) van Wingerden, K., Wilkins, B., Bakken, J. and Pedersen, G., The influence of water sprays on gas explosions. Part 2: mitigation, *J. Loss Prev. Process Ind.* **8-2**(1995), 61-70.
- 15) Wolfe, J.E. and DeSipio, P.A., Evaluation of fine water mist for applications in naval aircraft fire protection and explosion suppression, FED-Vol. 211, Fluid Measurement and Instrumentation, ASME (1995), 35-40.
- 16) Lutz, A.E., Marx, K.D. and Dwyer, H.A., A model of flame interactions with water droplets, AIAA-84-0127 (1984), 1-10.
- 17) Proust, Ch., Flame-water droplets interactions, Proc. Specialist Meeting on Gas Explosions, (1996), Norway.
- 18) Gieres, M., Interaction of water droplets with propagating gaseous flames, (1996), Warsaw University of Technology.
- 19) Moore, P. E., Suppressants for the control of industrial explosions, *J. Loss Prev. Process Ind.*, **9-1**(1996), 119-123.
- 20) 工業技術院資源技術試験所編, 可燃性ガス爆発防止野外実験特集, 採鉱と保安, **11-12**(1965) 617-639.
- 21) Bartknecht, W., The course of gas and dust explosions and their control, Proc. First Int. Loss Prev. Symp., (1974), Ed. Bushmann, C.H., Elsevier Scientific Publishing Co., 159-174.
- 22) Zabetakis, M.G., Flammability characteristics of combustible gases and vapors, Bureau of Mines (USA) Bulletin **627**(1965).
- 23) Gelfand, B.E., Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag, *Prog. Energy Combust*, **22**(1996), 201-206.
- 24) Shtemler, Y.M. and Sivashinsky, G.I., On upward propagating flames, *Combust. Sci. and Tech*, **102**(1994), 81-93.
- 25) Mitani, T., A study on thermal and chemical effects of heterogeneous flame suppressants, *Combust. Flame*, **44**(1982), 247-260.
- 26) 疋田 強, 秋田一雄, 燃焼概論, コロナ社
- 27) 日本火災学会編, 火災便覧 (第3版), 共立出版 (1997), 42.
- 28) Kuo, K.K., Principles of Combustion, John Wiley and Sons (1986), 379.
- 29) Perry, R.H. and Green, D.W., Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th Ed. McGraw-Hill (1997).
- 30) 八島正明, 第31回安全工学研究発表会予稿集 (1998), 81-84.
- 31) Joulin, G, Asymptotic analysis of non-adiabatic flames: heats losses towards small inert particles, Proc. 18th Symp.(Int.) on Combust., (1980), 1385-1404.

(平成11年3月4日受理)