

トンネル状空間を伝ばする水素予混合火炎の基礎燃焼特性 に関する実験的検討

中原真也・熊谷守晃・安川哲平・城戸裕之

九州大学 大学院工学研究院

819-0395 福岡市西区元岡744

An Experimental Study of Hydrogen Premixed Flames Propagating in Tunnel Simulated Channel

Masaya NAKAHARA, Moriaki KUMAGAI, Tepei YASUKAWA and Hiroyuki KIDO

Kyushu University

744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

One of the dangers latent in the hydrogen society is that hydrogen has much larger possible for the deflagration to detonation transitions (DDT) than ordinary hydrocarbon fuels, because of its higher laminar burning velocity and wider detonability limits. DDT may easier occur in a long and narrow space such as tunnels and ducts. It is important to be developed for predicting and preventing serious fire or explosion, and detonation. The present study is performed to investigate experimentally the deflagration flame of hydrogen mixtures propagating in a tunnel simulated channel (10x10x2440 mm) with special attention to flame front configurations and speeds, because of DDT caused mostly by enhancement of the flame front propagation. Hydrogen-air mixtures with 0.3~0.4 of equivalence ratio ϕ and hydrogen mixtures having nearly the same laminar burning velocity S_{L0} with $\phi=0.4\sim 0.7$ are prepared, in order to examine effects of the laminar burning velocity and the equivalence ratio on enhancement of the flame speeds. The flame shape and speeds are obtained by using sequential schlieren images recorded under conditions with the center ignition and the both-ends open of channel. The results show that the flame propagation is oscillating due to acoustic instability. Some flames also shows to begin to accelerate after traveling a distance, so that the factors of flame acceleration are discussed.

Key words: propagating flame, hydrogen explosion, tunnel simulated channel, flame acceleration, equivalence ratio, laminar burning velocity.

1. 緒言

来る水素社会に潜在する危険性の一つとして、水素-空気混合気がある広い可燃範囲や低い最小着火エネルギーなどの燃焼特性に起因し、プロパンなど従来の炭化水素燃料の場合に比べて、水素の漏洩が火災もしくは爆発事故に至り易いのではと懸念されている。さらに水素は、その

燃焼形態が重大な被害をもたらす爆ごうへ遷移(DDT)し易いことが挙げられる。これは、水素が同様に従来型の炭化水素系燃料に比べ、燃焼速度が速く、爆ごう限界濃度が広いことなどに起因する。水底トンネルや地下施設内通路等など一方向の寸法が他の二方向に比べて非常に長い空間では、爆ごうに遷移し易いことが知られており、爆ごうへ燃焼形態が遷移すると圧力が十倍以上に増大するため

2007年7月17日受理

に、このような空間で爆ごうが発生した場合には、構築物破壊などの重大事故に繋がることになる[1-3]。したがって、水素社会を安全に迎えるには、火災や爆発に増して爆ごうへの遷移を防止する技術の開発は必要不可欠である。

これまでに、DDTに関しては水素濃度、管長や管径と爆ごう限界との関係[4]など広く研究がなされて来た。しかしながら、水素社会を迎えるに際し、水素に関わる爆ごう現象が解明され、その予防法や抑制法が確立されているとは言い難い。

本研究では、基礎的な検討ではあるが、爆ごうへの遷移が火炎伝ば速度の増大が重要な因子[1-4]であることに着目し、爆ごうへ遷移はさせずいわゆるデフラグレーション(火災)を対象とし、爆ごうに遷移しやすいと考えられる水底トンネルを模擬したトンネル型モデル内を伝ばする水素予混合火炎の燃焼特性を明らかにすることを目的とする。本報は特に、水素-空気混合気の爆ごう濃度下限界15.5 vol%(当量比φ0.44) [1]とされているが、細長い空間を伝ばする希薄水素火炎伝ば速度の加速は、当量比に依存するものなのか、当量比の増大と共に増加する層流燃焼速度に因るものなのかを検討する。

そこで本報では、爆ごう希薄限界近傍当量比(φ0.3~0.4)の水素-空気混合気、さらに層流燃焼速度を50または70 cm/sに揃えた当量比の異なる希薄水素人工空気混合気を対象とし、両端開放の全長約2mのモデル中央で点火した火炎の伝ば状況を観測する。ここでは、火炎の伝ば距離と速度の関係を定量的に検討し、これらの関係に混合気が有する当量比または層流燃焼速度が与える影響を明らかにする。さらに、モデル内の燃焼圧力特性についても検討し、火炎伝ば速度との関係についても明らかにする。

2 実験装置および方法

2.1 実験装置

本研究で使用した水底トンネルを模擬したモデル実験

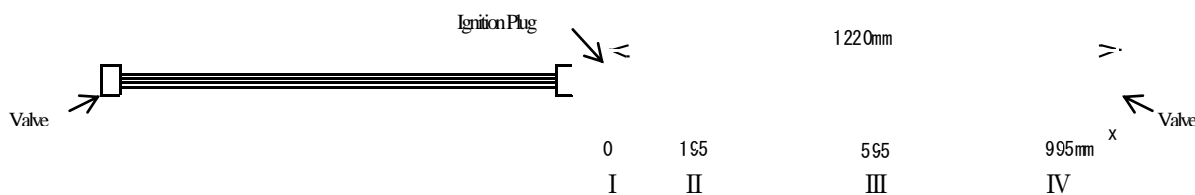


図1 トンネル型モデル燃焼実験装置の概要

装置の概略図を図1に示す。モデル内部のサイズは、断面が10 x 10 mmで中心から端までの長さLが1220 mm (全長2440 mm)で細長い円筒形状である。なお、モデル内の火炎伝ば状況を観測するために、鋼鉄製の点火を行う中心部分には硝子の観測窓、また両端の火炎伝ば観測部はアクリルで作製してある。実験は、図1に示すようにモデルは横置きとし、まず両端部に取り付けたバルブを閉じ、モデル内を真空に引いた後、予め作成した所定の混合気を大気圧まで充填する。次に、両端部のバルブを開放し10秒後に、常温常圧(NTP)の下、モデル中央にて火花点火により着火する。なお、点火エネルギーはコンデンサ容量から算出した値で0.9Jとした。燃焼実験は、各混合気に対し各撮影位置で10回ずつ行った。

火炎伝ばの観測は、直径150 mm凹面鏡を用いた連続シュリーレン撮影法により実施した。撮影は、ナイフエッジを用い、焦点距離105 mmのレンズを装着した高速ビデオカメラ(512x256画素、8bit、2000FPS)で行った。ここで、有効なシュリーレンの撮影直径が約130 mmと制約を受けることから、撮影中心位置を図1に示すように燃焼器中央を原点とし横方向xが0、195、595、995 mmのI~IVの4カ所に移動し撮影した。得られた画像データはPCIに送り、エッジ処理を行った後、火炎面検出を行った。得られた画像の解像度は、0.3 mm/pixelである。

火炎伝ば速度 V_F は、図1中のx方向を正方向とし図2中に矢印で示すモデル縦方向中央での連続的に変化する火炎面位置 X を検出し、撮影時間間隔 dt から次式で算出した。

$$V_F = dX / dt \tag{1}$$

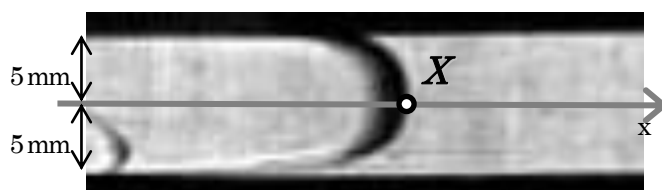


図2 伝ば速度 V_F の定義

本研究での火炎伝ば速度の評価は、各位置 I ~IVでの撮 影では、水素-空気混合気の爆ごう希薄限界当量比より大き

表1 混合気特性

Mixture	ϕ	Molar Fraction			N_2/O_2	S_{L0} cm/s	a_0 mm ² /s	ν mm ² /s	Le	T_p K
		H ₂	O ₂	N ₂						
H03-Air	0.30	1.0	1.67	6.27	3.76	33.9	29.24	17.18	0.403	1187
H035-Air	0.35	1.0	1.43	5.37	3.76	53.5	30.52	17.46	0.420	1309
H04-Air	0.40	1.0	1.25	4.70	3.76	73.1	31.78	17.74	0.438	1425
H04-50N	0.4	1.0	1.25	5.56	4.45	49.6	30.49	17.45	0.421	1309
H05-50N	0.5	1.0	1.00	5.55	5.55	49.8	30.83	17.52	0.426	1344
H06-50N	0.6	1.0	0.83	5.46	6.55	50.3	31.19	17.60	0.431	1380
H07-50N	0.7	1.0	0.71	5.25	7.35	49.7	31.70	17.71	0.439	1429
H04-70N	0.4	1.0	1.25	4.80	3.84	70.0	31.62	17.70	0.436	1411
H05-70N	0.5	1.0	1.00	4.82	4.82	70.3	31.98	17.78	0.441	1448
H06-70N	0.6	1.0	0.83	4.77	5.72	69.5	32.36	17.86	0.447	1485
H07-70N	0.7	1.0	0.71	4.63	6.48	69.3	32.85	17.97	0.454	1532

影範囲が±65 mm程度であることからこの範囲を解析対象とし、この範囲での V_F の平均値を V_{Fm} とした。なお、Iでは左右端方向を別々に解析した。また、後述するように本実験では火炎が周期的な前進と後進をともない燃焼することから、 V_{Fm} の算出には正負の値に偏りが無いよう周期性を考慮した。さらに、複数の火炎面が観察される場合は、未燃混合気側、すなわち開放端側に一番近い火炎面を対象とした。

また、一カ所のみであるが、モデル中央部の点火栓近傍には圧力ピックアップを取り付け、火炎伝ば中のモデル内圧力履歴の観測も同時に行った。

2.2 混合気組成

本研究では、当量比 ϕ または層流燃焼速度 S_{L0} が火炎伝ば距離と伝ば速度の関係に影響を与えるかを定量的に検討するため、水素-空気混合気の爆ごう濃度下限界の $\phi 0.44$ [1]に近い ϕ が0.3、0.35、0.4の水素-空気混合気、さらに水素-空気を窒素で希釈し S_{L0} を50 および70 cm/sにはほぼ揃えた ϕ が0.4から0.7の人工空気混合気を使用した。表1に混合気組成および特性値を示す。なお、表1中、 S_{L0} は内径約120 mmの定容燃焼器を用いて燃焼圧力履歴から測定した値[5-7]、 a_0 は熱拡散率、 ν は動粘性係数、 Le は不足成分の拡散係数 D_{ik} に基づくルイス数(= a_0/D_{ik})、 T_p は化学平衡計算による定圧断熱燃焼温度を表す。

表1 からわかるように、 $S_{L0}=50$ cm/sの人工空気混合気は $\phi 0.35$ 水素-空気混合気と、 $S_{L0}=70$ cm/sの人工空気混合気は $\phi 0.4$ 水素-空気混合気と概ね等しい S_{L0} を有する当量比の異なる混合気として準備した。また水素人工空気混合気

い当量比範囲も対象とした。

3. 実験結果および考察

3.1 火炎伝ば観測

図3に水素-空気混合気(H03-Air, H035-Air, H04-Air)、図4に層流燃焼速度 S_{L0} を50 と70 cm/sに揃えた当量比 $\phi 0.4$ と0.7の水素人工空気混合気(H04-50N, H07-50N, H04-70N, H07-70N)で得られたシュリーレン写真の一例を示す。図中、各写真の中央が、撮影中心である。ここで、図3、4の様に撮影位置Iの写真から、 ϕ および S_{L0} に関わらず、火花放電により形成された火炎はほぼ左右対称に伝ばし、かつ火炎面は乱れることなく層流火炎であることが確認できた。なお、位置I付近で得られた火炎伝ば速度から算出した燃焼速度は、上述の定容燃焼装置を用い算出した S_{L0} [6,8]とほぼ一致した。また、H03-Air予混合火炎では位置IVまで伝ばする確率は25%程度で、他の混合気は100%であった。

まず、両端開放で静止混合気中での燃焼実験にもかかわらず、点火直後の撮影位置Iを除き、撮影位置IIからIVの写真観測から、火炎面が周期的に前進、後退を繰り返しながら開放端へ向かい伝ばする燃焼が生じていることが観察された。なお、この周期的に火炎が変動し伝ばする現象は、本実験条件の全てにおいて観察された。

また図3から、水素-空気混合気では ϕ が0.3から0.4へと

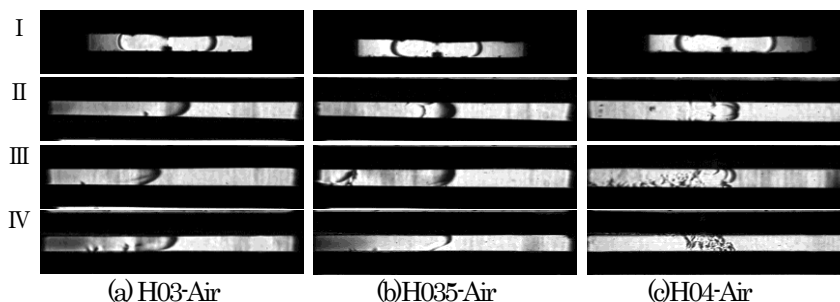


図3 シュリーレン写真 (水素-空気混合気)

大きな混合気ほど、火炎が伝ばするに伴い火炎面に凹凸が

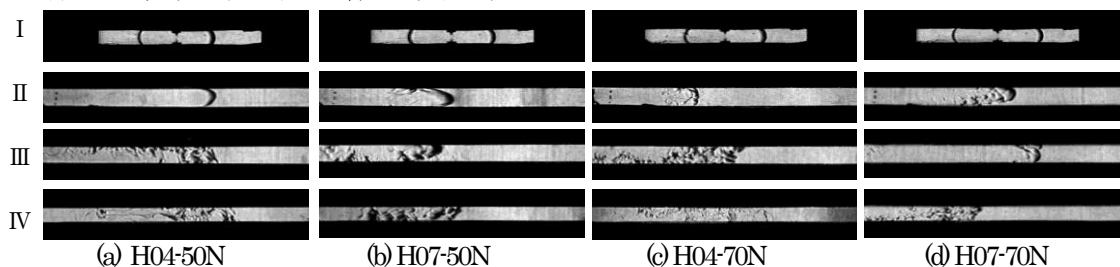


図4 シュリーレン写真 ($S_{L0}=50$ と 70 cm/s に揃えた $\phi 0.4$ と 0.7 の水素人工空気混合気)

発生し、乱流火炎に移行していることがわかる。この現象は、 ϕ が0.3から0.4へ僅かに ϕ が0.1増加する間だけで、顕著に現れている。すなわち、 $\phi 0.3$ 水素-空気混合気では、概ね火炎が撮影位置IVまで伝ばしてもIと変わらず火炎面に乱れはない層流火炎であることが観察された。しかしながら、 $\phi 0.35$ では位置III付近から、 $\phi 0.4$ では位置II付近から火炎面に凹凸や火炎面の複数化が見られ、すなわち火炎面が層流火炎から乱流火炎へ移行したようになり、さらに $\phi 0.4$ では火炎が開放端へ向かい伝ばが進むほどすなわち伝ば距離が長くなるほど火炎面の凹凸が微細化する傾向が観察された。

一方図4から、 $\phi 0.35$ 水素-空気混合気と同等の S_{L0} を有する $S_{L0}=50$ cm/sの混合気では概ね撮影位置IIIから、 $\phi 0.4$ 水素-空気混合気と同等の S_{L0} を有する $S_{L0}=70$ cm/sの混合気では概ねIIから、水素-空気混合気の場合と異なり当量比に因らず、火炎面の凹凸や複数化が発生することが観察された。この観察結果は、希薄水素混合気では、同等の S_{L0} を有する混合気であれば、 ϕ に関わらず、火炎伝ばが進むことにより火炎面形状の崩れが発生し層流火炎から乱流火炎へ移行している火炎伝ば距離が概ね同一であることを示している。

3.2 火炎伝ば速度

図5に、一例として撮影位置IIで得られた伝ば速度 V_F の時系列変化を示す。図5より、火炎面が周期的に前進後

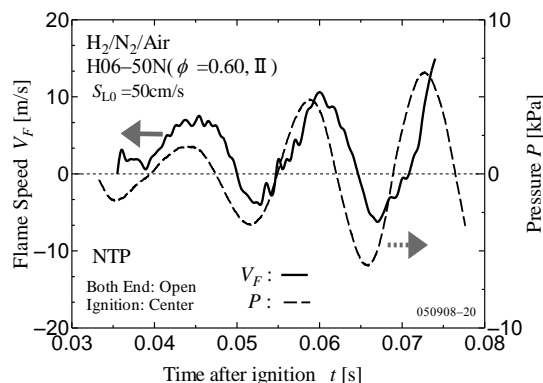


図5 火炎伝ば速度 V_F と圧力履歴の関係 (H06-50N, 撮影位置II)

進を繰り返し振動している様子がわかる。本研究では、図5のように周期性を有し火炎が伝ばすることから、各撮影範囲において、式(1)に基づき測定したx軸正方向に伝ばする火炎の平均伝ば速度 V_{F+} およびその最大値 V_{Fmax} 、負方向に伝ばする火炎の平均伝ば速度 V_{F-} およびその最小値 V_{Fmin} 、そして上述の全体の平均伝ば速度 V_{Fm} を算出した。

図6に水素-空気混合気(H03-Air, H035-Air, H04-Air)、図7に $\phi 0.4$ の $S_{L0}=50$ と 70 cm/s水素人工空気混合気(H04-50N & H04-70N)に対する、 V_{F+} 、 V_{F-} 、 V_{Fm} または V_{Fmax} と V_{Fmin} と撮影位置との関係を示す。図6と7中の横太棒は各撮影位置での観測範囲を表す。

図6と7から、まず V_{F+} と V_{F-} の絶対値は概ね等しいものの V_{F+} が若干大きいことから、火炎面が周期的に振動をしながらも開放端に向かい前進していることがわかる。

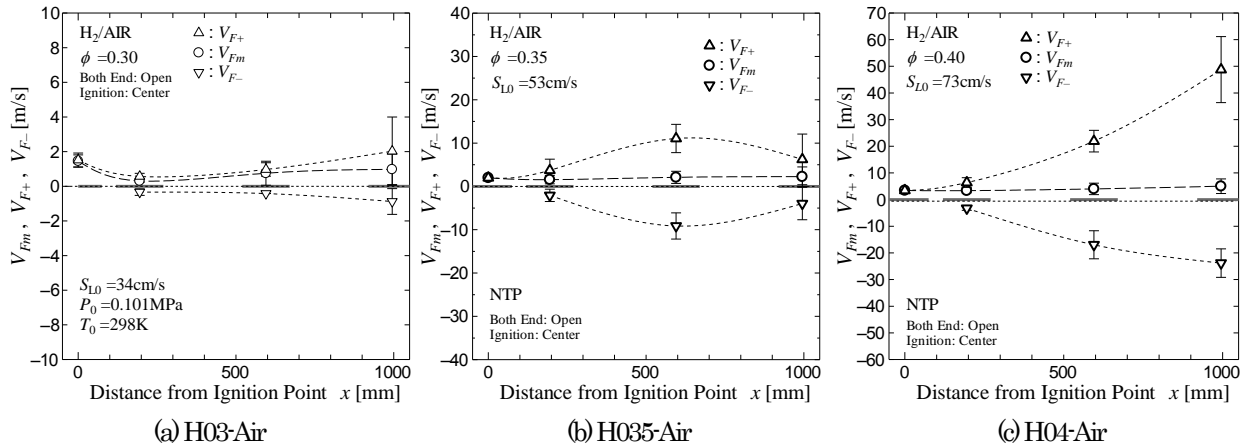


図6 伝ば速度特性 V_{F+} , V_{F-} , V_{Fm} (水素-空気混合気)

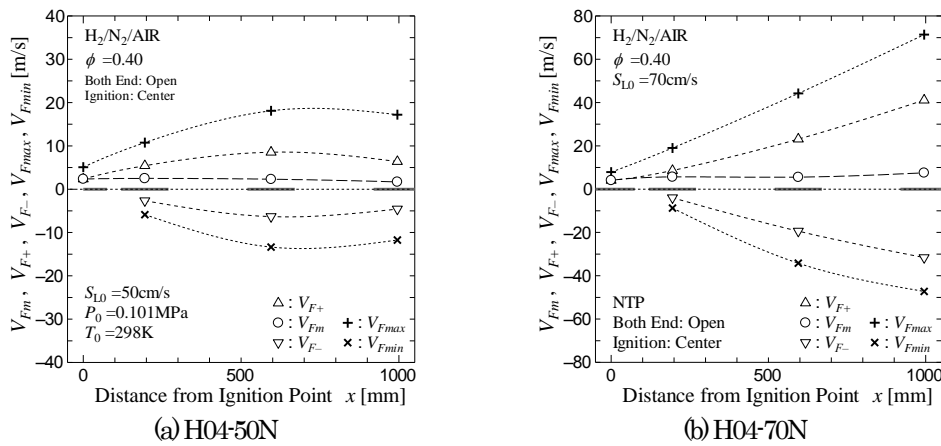


図7 伝ば速度特性 V_{F+} , V_{F-} , V_{Fm} および V_{Fmax} , V_{Fmin} ($S_{L0}=50$ と 70 cm/s に揃えた $\phi 0.4$ の水素人工空気混合気)

図6(a)の $\phi 0.3$ の水素-空気混合気の場合、火炎伝ば距離 x が変化しても V_{F+} と V_{F-} の値には、殆ど差異は見られない。図6(b)の $\phi 0.35$ の場合、位置IからIIでは V_{F+} や V_{F-} の値に大きな差異は見られないが、III付近では V_{F+} と V_{F-} の絶対値は増大し火炎の前進後進の速度が大きくなっていることがわかる。さらにIII付近でピーク値を呈し、その後は開放端近傍のIVでは外部の空気との希釈の影響と思われる V_{F+} と V_{F-} の低下が見られる。図6(c)の $\phi 0.4$ では、位置III付近までは $\phi 0.35$ の場合と概ね同等の V_{F+} と V_{F-} 値を示すものの、開放端近傍の位置IV近傍では火炎伝ば距離と共に V_{F+} と V_{F-} は増大する傾向にあり、火炎が激しく変動している様子がわかる。

図7から、 ϕ は異なるが、 S_{L0} が概ね50 cm/sと等しいH035-AirとH04-50Nは、 S_{L0} が概ね70 cm/sと等しいH04-AirとH04-70Nは、それぞれ同等の V_{F+} , V_{F-} および V_{Fm} の傾向を示すことがわかる。なお、図7からわかるように V_{Fmax} と V_{Fmin} は、それぞれ V_{F+} と V_{F-} の概ね2倍程度である。こ

れらは、他の混合気でも同様に観察された。

なお、図6と7から、全体の平均速度としての V_{Fmk} には火炎伝ば距離が増大しても大きな差異は見られなかった。

ここで、火炎伝ば速度の増大が、燃焼形態が爆ごうへ遷移する重要な因子の一つ[1-4]であり、また本実験のようにモデル中央で点火した場合には基本的に、火炎が開放端へ向かう方向で強い圧縮波が生じ、さらに火炎より開放端側に未燃混合気が存在すると考えられる。したがって、本実験のように火炎が前進後進を繰り返しながら伝ばする場では全体の平均速度としての V_{Fm} の伝ば距離に伴う増大は小さいものの、爆ごうへの遷移の可能性があるのは、火炎が点火栓(モデル中央)方向へではなく開放端方向へ伝ばしている場合であると推測できる。そこで、次に V_{F+} に着目し考察をする。

図8に撮影位置Iでの V_{F+} の値 V_{F+0} で無次元化した V_{F+} とモデル中央から開放端までの距離で無次元化した伝ば距離 X/L との関係を示す。なお図中、単に煩雑さを避ける

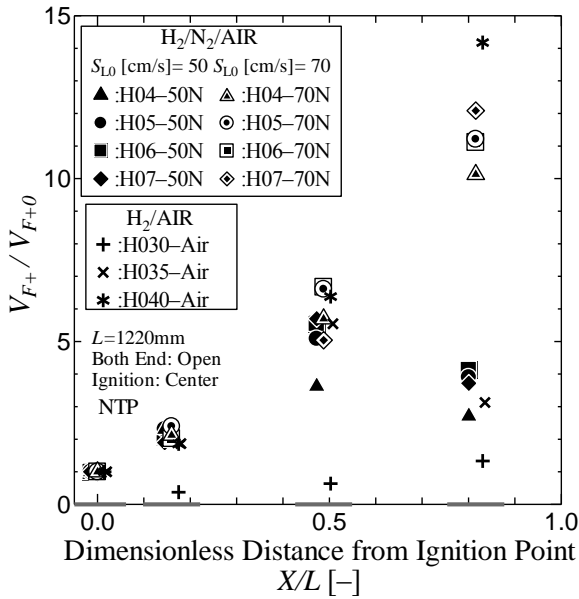


図8 無次元化正方向伝ば速度 V_{F+}/V_{F+0} と無次元化伝ば距離 X/L の関係

ために、各データは同一撮影位置でも若干ずらし表示している。

図8から、まず上述のように水素-空気混合気の場合、 ϕ が大きいほど、 X/L の増大にともない V_{F+}/V_{F+0} が急激に増大することがわかる。すなわち、 ϕ が0.35から0.4の水素-空気混合気では、 X/L が0.5付近までは両者の V_{F+}/V_{F+0} は概ね同等であるが、 X/L がそれより大きな開放端近傍での ϕ 0.4の場合の V_{F+}/V_{F+0} の増大は著しく、 ϕ 0.4の開放端近傍での火炎伝ば速度は、火炎伝ば開始初期の速度 V_{F+0} の14倍程度にたっている。

一方、 S_{L0} を50cm/sに揃えた混合気では、 ϕ に因らず X/L の増大と共に V_{F+}/V_{F+0} は増加するものの、 X/L 0.5付近で最大を呈し、その後は低下する傾向を示す。この傾向は水素-空気混合気で S_{L0} が概ね等しい ϕ 0.35の場合 (H035-Air) と良い一致を示す。ただし、火炎伝ばが進んだ X/L が0.5付近では、H04-50Nは、他の S_{L0} =50cm/sの混合気が概ね等しい値を示すのに対して、これらより若干低い値を示す。しかしながら、 ϕ 0.35から0.4の水素-空気混合気で観察された、 ϕ の増加に伴う急激な V_{F+}/V_{F+0} の増大は見られない。さらに、 S_{L0} を70cm/sに揃えた混合気では、位置IVでは若干低い値を示すものの、50cm/sに揃えた場合と同様に、 S_{L0} が概ね等しい ϕ 0.4水素-空気混合気 (H04-Air) と ϕ に関わらずよい一致を示す。

図8からは、少なくとも本実験範囲では、火炎伝ばの進行にともなう伝ば速度の加速には、混合気が有する ϕ では

なく S_{L0} が重要な因子であることが明白である。本実験結果は、 S_{L0} が70 cm/s程度より大きい混合気では、火炎伝ば速度の伝ば距離に対する感度が大きくなることを示唆している。

ここで、図3および4で得られた火炎形状と図6~8で得られた伝ば速度の関係について考察する。まず ϕ が0.3の水素-空気混合気のように、火炎伝ば距離が増大しても伝ば速度には大きな変化が見られない場合、火炎形状にも大きな差異は観測されない。一方、 S_{L0} が概ね等しい混合気では、火炎伝ば距離にともなう火炎伝ばの変化および火炎面形状の変化は概ね等しい。すなわち、 S_{L0} が概ね50cm/sのH035-AirおよびH04、H05、H06、H07-50Nは、伝ば速度の加速が位置III付近で見られるが、火炎面に凹凸が発生するのも概ねこの位置である。さらに S_{L0} が概ね70cm/sのH04-AirおよびH04、H05、H06、H07-70Nは、 S_{L0} 50cm/sの混合気に比較して、開放端近傍でも伝ば距離と共に伝ば速度が加速し、火炎面に凹凸が発生する伝ば距離も若干短く、

そして開放端近傍では火炎面の凹凸の微細化が顕著な乱

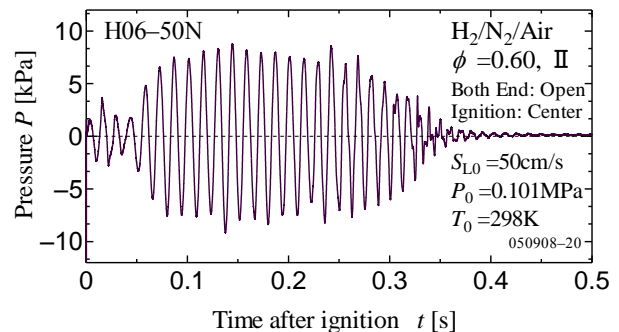


図9 燃焼圧力時系列変化の一例 (H06-50N)

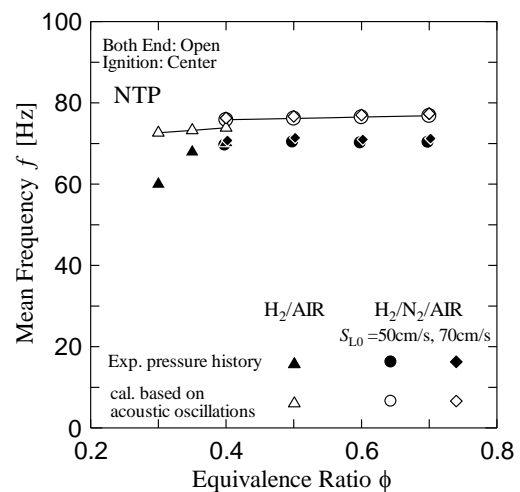


図10 圧力変動から算出した周波数と音響学的振動による周波数との関係

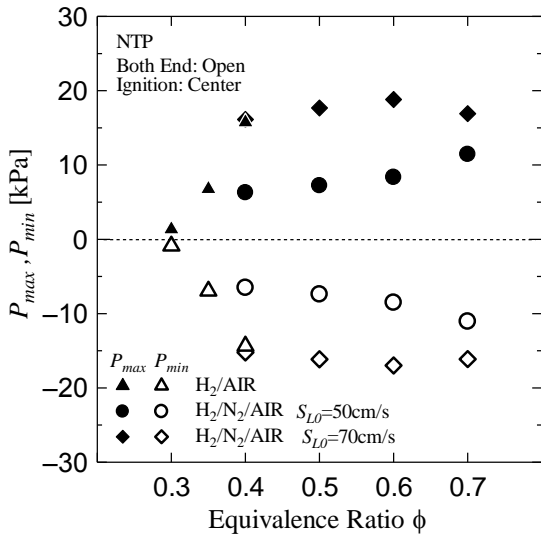


図1 1 正および負の最大圧力の平均値 P_{max} および P_{min}

流火炎へと移行している。この様に、火炎形状の乱流火炎面化と伝ば速度の加速は、一般的に言われているように強い相関関係にあることが確認できた。

なお、一般に管のような細長い空間での火炎の加速現象は、火炎伝ばにともない混合気の流動が生じ壁面との間に剪断流が発生し乱れとなり、火炎面が乱れることにより火炎が加速することが知られている[2]。したがって、 S_{L0} が大きい火炎ほど発生する乱れも大きくなり、上述のように火炎伝ば速度が火炎伝ばにともない増大する傾向を示したものと推察できる。さらに、 S_{L0} が大きい混合気ほど火炎面の乱流化が短い伝ば距離で発生する現象も、 S_{L0} が大きいほど早く火炎面に影響を与える乱れを発生することに起因するものと推察できる。ただし、 $S_{L0}=70\text{ cm/s}$ の混合気が、 $S_{L0}=50\text{ cm/s}$ の混合気と比較して、 S_{L0} 値が1.4程度なのに、開放端近傍での伝ば速度が2.5倍程度以上になっている。このことは、 S_{L0} のみでは火炎伝ばにともなう火炎の加速が議論できないことを示唆しており、今後さらに火炎面の凹凸のスケールや各混合気が有する乱流燃焼速度特性並びに火炎が開放端に至る時間(モデル内滞留特性時間)の影響等に関して詳細に検討する必要がある。

3.3 燃焼圧力特性

モデル中央でのみの計測であるが、燃焼圧力履歴の一例としてH06-50Nの場合を、図9に示す。図9中、圧力 P はゲージ圧表示である。図9から、上述したように着火後モデル内圧力も変動していることが明らかである。さらに、図9の圧力波形を図5中に示す。図5から、 V_F はやや圧力の変動より位相が遅れていることがわかる。すなわち、圧

力変動に追従し、火炎伝ばが振動する燃焼が起きていることが推測できる。

図10に、得られた圧力変動をFFT解析[9]し最大強度を呈した周波数を示す。また、両端開または両端閉における気柱共鳴による音響学的振動周波数 $f[1]$ は、次式で表せる。

$$f = c \cdot n_z / 2L_z \tag{2}$$

ここで、 c は音速、 n_z は固有振動モード[=1,2,..]、 L_z は管長である。図10中に、 n_z を1次モードで算出した式(2)の値を合わせて示す。なお、モデル内は火炎伝ばの進行とともに、未燃混合気と既燃ガスが共存し、温度分布も存在し、さらにこれらの分布も変化する場となるが、ここでは式(2)中の c は、点火前の状態(未燃混合気)から算出した。

図10からわかるように、水素-空気混合気の ϕ が小さい所でやや差異は大きくなるものの、実験から得られた値は、音響学的振動の一次モードでの理論値と概ね一致する。したがって、音響学的振動による圧力の変動にともない火炎が振動していることが推測できる。

ここで、本研究で観察された火炎が周期的な前進と後進をともない伝ばする現象は、この火炎伝ば周期が図10のように、音響学的振動周波数とほぼ一致することから、参考文献[10,11,12]と同様なメカニズムに基づき発生しているものと推測できる。すなわち、静止場で点火後、火炎が球状に形成され壁面へ近づくにつれ火炎伝ばが加速され、この時発生した弱い圧力波が開放端に向かい、開放端に達し反射した圧力波が、火炎の所に戻り火炎へ影響を与える。したがって、細い空間内の音響学的振動に大きく影響を受け、火炎が周期的に前進と後進を繰り返しながら開放端へ向かい伝ばする現象へと移行するものと考えられる。

図11に、圧力変動から算出した正および負の最大圧力の平均値 P_{max} および P_{min} を ϕ に対して示す。図11から、 P_{max} および P_{min} の絶対値は、ほぼ等しいこと、水素-空気混合気では ϕ の増加にともない増大する傾向にあることがわかる。さらに、火炎伝ば速度の場合と同様で、 S_{L0} が概ね等しければ、 P_{max} および P_{min} の値も概ね等しいことがわかる。言い換えれば、火炎伝ばの振動を伴う燃焼では、伝ば速度が大きい場合ほど、圧力変動の振幅も大きくなる傾向にある。また本実験条件では、両端開放であるにも関わらず、火炎が周期的に前進後進し伝ばすることにより、その変動値の絶対値は小さいものの圧力が増減する。

4. 結論

断面が10x10 mm 全長約2 mのトンネル状モデルを用いて、希薄水素-空気混合気および層流燃焼速度 S_{D0} を揃えた当量比 ϕ の異なる希薄水素人工空気混合気を使用して火炎伝ば特性を実験的に検討した。主に次のような知見が得られた。

- (1) 本実験条件では両端開放にも関わらずモデル内を伝ばする予混合火炎は、周期的に前進後進を伴い伝ばする燃焼形態へ移行することがわかった。
- (2) 火炎伝ば速度の加速には、水素混合気が有する ϕ より S_{D0} が重要な因子であることが示唆された。本実験装置では、希薄水素混合気では S_{D0} が70cm/s程度の混合気では、火炎伝ば距離の増大と共に伝ば速度が加速する傾向が確認できた。
- (3) また火炎伝ば速度の加速と火炎面形状の乱流火炎化とは強い相関関係が観察された。
- (4) 火炎伝ば速度の変動は、概ね音響学的振動数と一致し、圧力の変動と強い相関関係にあった。

謝 辞

終わりに、本研究において九州大学・上田俊二氏、九州大学学生・原裕二郎君および黒石亮君のご協力を頂いた。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

1. 日本機械学会；燃焼工学ハンドブック, p.123(1995).
2. 平野敏右；ガス爆発予防技術, p.64(1983).
3. 水素・燃料電池ハンドブック編集委員会；水素・燃料電池ハンドブック, p.907(2006).
4. 松井 英憲；管径、圧力と燃焼-空気混合ガスの爆ごう限界、第19回燃焼シンポジウム前編集, pp.68-70(1981).
5. Lewis, B., and von Elbe, G.；Combustion, Flames, and Explosion of Gases, 3rd ed., Academic Press, p.389(1987).
6. 城戸 裕之, 中原 真也, 井上 貴芳；水素混合気の乱流燃焼時における選択拡散の効果, 機論B, 62-600, pp.3198-3203(1996).
7. 中原 真也, 城戸 裕之, 中島 健四郎；希薄水素混合気の乱流燃焼速度特性に与える希積ガスの影響, 水素エネルギーシステム, Vol.30, No.2, pp.58-65,(2005)
8. Andrews, G. E. and Bradley, D.；Determination of Burning Velocity by Double Ignition in a Closed Vessel, *Combust. Flame*, 20, p.77-89(1973).
9. 日野 幹雄；スペクトル解析, p.193(1986).

10. Markstein, G. H. Non-steady Flame Propagation, *Pergamon* New York, p.75-105(1984).
11. Clanet, C. and Searby, G.；On the "tulip flame" phenomenon, *Combust. Flame*, 105, p.225-238(1996).
12. Bjerketvedt, D., Kristoffersen, K., Vaagsaether, K., Miaavatten and Thomas, G. O.；A Method for estimating the burning velocity in a tube by using experimental pressure records and the one-dimensional RCMLAB code, *Combust. Sci. and Technology*, 176, p.1725-1734(2004).