

球形容器法による燃焼速度の測定

竹野 忠夫・飯島 敏雄*

The Burning Velocity Measurement by Means of the Spherical Bomb Technique

By

Tadao TAKENO and Toshio IJIMA

Abstract: In the previous papers we proposed a method to derive the burning velocity from measurement of the pressure change during flame propagation in a spherical combustion chamber. In this paper the method was applied to obtain the burning velocity for the stoichiometric methane-air and hydrogen-air mixtures. The results were compared with those of other investigators and the reliability of the proposed method was discussed.

概 要

我々はこれまでに準定常一次元火炎面モデルにもとづく解析をもとに、球形容器内に満たされた予混合気をその中心で着火したときの圧力の時間的変化の測定から燃焼速度を求める方法を提案してきた。本報告では、この方法を用いて理論混合比のメタン・空気および水素・容気混合気の燃焼速度を求め、他の研究者達の結果と比較検討するとともに、この方法の妥当性についても検討した。

1 ま え が き

燃焼速度は燃焼学上非常に重要な量である。この燃焼速度は、火炎が未熟ガスに侵入する速度の火炎面に垂直方向の成分とされ、可燃混合気の状態によって決まる物理量である。このように燃焼速度の定義は極めて簡単であるが、これに対して燃焼速度の測定はそれほど簡単なものではなく、昔から数多くの測定法が開発され、正確な測定を行うことが試みられてきた。それにもかかわらず、得られた燃焼速度の値は、測定者や測定方法などによってかなりばらつきが存在している。たとえば1972年のAndrewsとBradleyの燃焼速度に関する総合報告を行っている[1]。これによると、圧力が1 atmで温度が298 Kの場合のメタン・空気混合気の最大燃焼速度は、1950年以降のみのデータについて比較してみても、31 cm/s

* 東海大学工学部

から 50cm/s まで非常に広範囲にわたってばらついている。このように燃焼速度の正確な測定法は未だ確立されていないと言っても過言ではなく、現在でも引続き多くの人々により、この測定法についての研究が行なわれている。

また近年高圧、高温条件下での燃焼速度の値が要求されてきているが、このような条件下での測定例は余りなく[2][3][4]、十分に信頼できるデータが得られていない。

球形容器を用いる方法は、バーナ法、シャボン玉法などの他の方法に比べて比較的信頼できるものと考えられている[1]。この方法において、火炎伝播初期の圧力一定期間における火炎の大きさの時間的変化の測定から燃焼速度を導くことは簡単である。しかし初期の火炎伝播においては火炎帯の厚さや曲率にもとづく誤差が生じやすく、そのため火炎が充分大きくなり、圧力が上昇した段階での測定が望ましい。しかしこの段階では燃焼ガス中に密度の空間分布が存在し、正確な燃焼速度を導くためには、この効果を正しく評価することが必要である。我々はこれまでに準定常一次元火炎面モデルを用いてこのような密度分布の効果をとり入れた密閉容器内の火炎伝播の解析を行ってきた[5][6]。この解析結果を利用すれば、実験による圧力の時間的変化の測定のみにより、伝播の各瞬間の圧力と未燃混合気温度に対応した燃焼速度を導くことができる。

前報[7]においてはこの測定方法の考え方と実際にこの方法にもとづいて燃焼速度の測定を行うために製作された実験装置について報告した。今回はこの実験装置を用いて、初期圧力 1 atm、初期温度 290.5 K の理論混合比のメタン・空気および水素・空気混合気の燃焼速度の測定を行い、他の研究者らの結果と比較検討した。また火炎面位置と圧力の関係の理論と実験とを比較することにより本測定法の妥当性を検討した。

2 モデルと解析結果

図1に示すような密閉容器内の完全に静止した様な混合気をその中心で着火し、瞬間的に形成された火炎が伝播を開始して壁面に到達するまでの過程を考える。このときの非定常的ふるまいを準定常一次元火炎面モデルを用いて解析した結果、火炎伝播中の各時刻 t における燃焼速度 S_u 、圧力 P および火炎面位置 r_* の間に、次のような関係が成立つことが導かれている。

$$S_u = \frac{1}{F_1(\pi)} \frac{r_c}{P} \frac{dP}{dt} \quad (1)$$

$$r_* = F_2(\pi) r_c \quad (2)$$

ただし、 r_c は燃焼容器の半径、 $\pi \equiv (P - 1) / (P_e - 1)$ は無次元圧力、また P_e は最終圧力である。(1)および(2)式における $F_1(\pi)$ と $F_2(\pi)$ は、それぞれ容器の形状と混合気の初期状態が指定されれば、 π のみの関数として、あらかじめ計算して求めておくことができる。表1は球形容器で、初期圧力 1 atm、初期温度 290.5 K の理論混合比のメタン・空気混合気および水素・空気混合気について計算されたこれらの関数を、 π の 7 次式で表示したときの係数を示している。また図2および図3はこれらの関数の π による変化の様子を示し

たものである。そこで実験により、圧力の時間的变化のみを測定すれば、(1)式により燃焼速度を導くことができる。

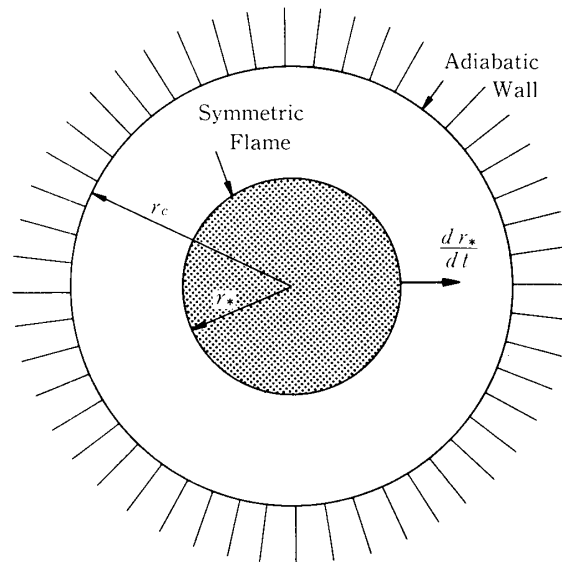


図1 解析モデル

表1 F_1, F_2 の7次式表示

$$F = \sum_{n=1}^7 a_n \cdot \pi^n$$

$$T_0 = 290.5 \text{ K}$$

$$P_0 = 1 \text{ atm}$$

$$P_e = \begin{cases} 9.001 \text{ atm, CH}_4\text{-AIR} \\ 8.197 \text{ atm, H}_2\text{-AIR} \end{cases}$$

$$\pi \equiv \frac{P-1}{P_e-1}$$

$$\phi = 1$$

MIXT	CH ₄ - AIR		H ₂ - AIR	
	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂
a ₁	224	13.45	186	12.28
a ₂	-1464	-89.54	-1116	-74.86
a ₃	5115	321.93	3595	248.27
a ₄	-10230	-656.72	-6660	-469.48
a ₅	11690	760.42	7084	506.26
a ₆	-7086	-465.15	-4015	-289.72
a ₇	1765	116.61	939	68.25

一方火炎面位置と圧力に関する(2)式は、燃焼速度に関する(1)式とは全く独立に成立する。従って火炎面位置と圧力との関係について、(2)式による計算結果と実験により測定された結果とを比較することにより、この測定方法の妥当性を検討することができる。

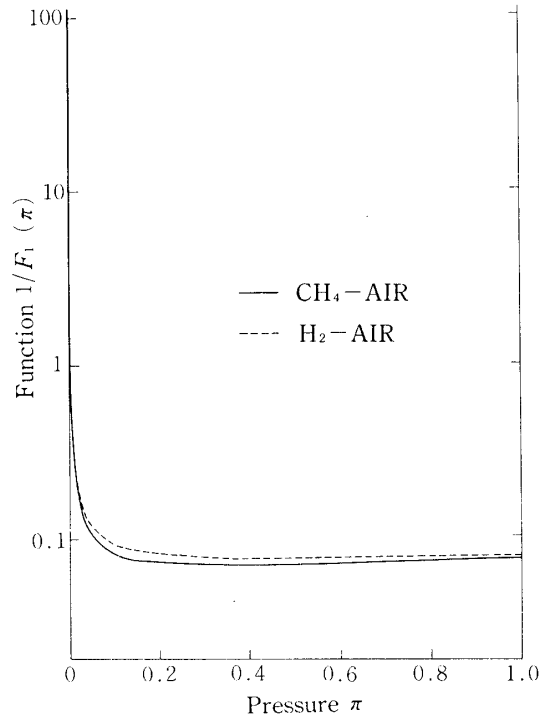


図2 $1/F_1$ と π の関係

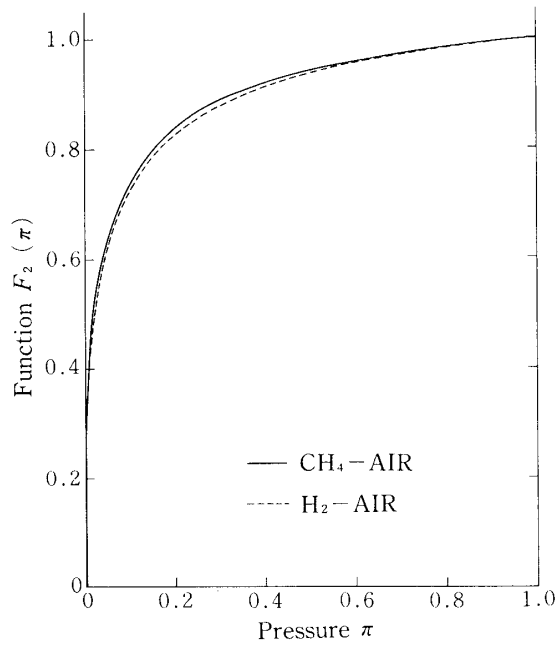


図3 F_2 と π の関係

3 実験装置および実験方法

図4は実験装置全体図を示す。実験装置は、混合装置、燃焼室、着火装置、計測装置およびデータ処理装置から構成されている。球形燃焼室は直径160mmで、その壁面には圧力変換器、熱線プローブ、イオンプローブ、熱電対、点火栓等が取り付けられている。各種計測器はデータ集録用の7チャンネルデータレコーダおよびトランジェントメモリに接続され、さらにトランジェントメモリはデータ処理を行うミニコンピュータに接続されている。

混合装置、燃焼室、着火装置、計測装置等の詳細については、既に前報で報告しているので、ここでは省略する。なお今回新たにデータ処理に用いたミニコンピュータは、ソード社製、M223-MARK VI型(容量64K Byte)、プリンタは、ソード社製、MSLP-200型またプロッタは渡辺測器製、WX4671型である。

実験においては、まず真空ポンプにより、混合室と燃焼室を真空にする。次にボンベ内の燃料と空気と水銀マンオメータを利用して所要の割合で混合室に吸入し、均一に混合するまで、約2時攪拌する。形成された混合気は水タンクの位置を上下させることにより、所定の圧力になるまで燃焼室内に供給する。吸入弁を閉じてから混合気が完全に静止状態に達するまで5分の時間を経たのち混合気に着火を行う。着火後の各種計測器からの出力はデータレコーダに集録すると同時に、圧力の時間的変化については直接トランジェントメモリを経由して、

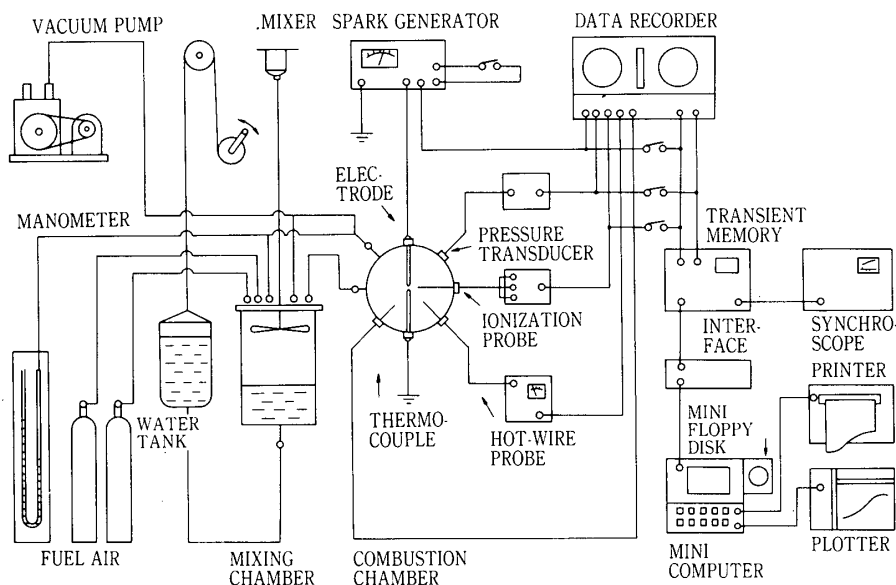


図4 実験装置全体図

シンクロスコープで正常な燃焼を確認したのち、伝播の各瞬間における燃焼速度をミニコンピュータで計算する。結果はプリンタおよびプロッタに出力され、また同時にミニフロッピーディスクに記録して保存する。

4 実験結果

(1) 所要混合時間

燃焼実験に供する混合気は、燃料と空気が完全に均一に混合されたものでなければならない。そこでまずポンベから混合室に吸入された燃料と空気が、攪拌を開始してから均一に混合するまでに要する時間の測定を行った。

あらかじめ真空にされている混合室にメタンと空気をそれぞれ理論混合比になるような割合で吸入したのち攪拌を開始する。その後、0, 10, 20, 30, 60, 120, 180 分経過毎に混合室上部の吸入弁の横で混合気のサンプリングを行い、それをガスクロマトグラフィで分析した。図5はその分析結果を示したものである。混合室には先ずメタンを、次いで空気の順序でガスを吸入した。このため攪拌開始時の当量は約0.95と、燃料が稀薄な混合比となっている。その後攪拌とともに混合が進み、約60分で当量比1となり、完全に均一に混合していることがわかる。実験においてはさらに余裕をみて、混合気の攪拌時間を2時間とすることとした。

(2) 所要混合気静止時間

着火は混合室から燃焼室内へ吸入された混合気が完全に静止状態になってから行わなければならない。そこで吸入弁の90°横方向位置で、かつ燃焼室壁面より中心に向かって20mm突

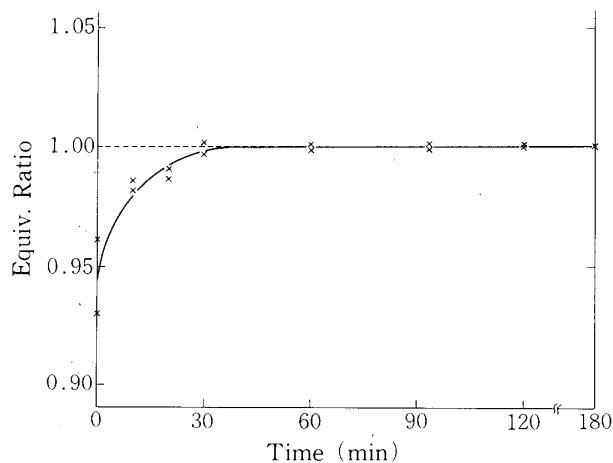


図5 所要混合時間

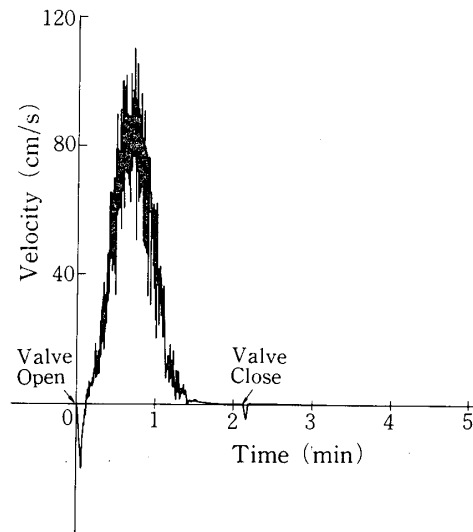


図6 燃焼室内混合気の静止所要時間

出した線径 $10\ \mu\text{m}$ のタングステン熱線プローブを使用して、燃焼室内へ吸入にともなう混合気の変化を測定した。図6はその結果を示す。先ず吸入弁開放後燃焼室内の混合気は速度は次第に増加していく。さらに混合気の充填が進むと吸入速度は逆に減少していき、混合気の動きは低下していくことがわかる。吸入開始より約2分後燃焼室内が所定の圧力に達して吸入弁を閉じる時には、混合気は完全に静止している。本実験では余裕をみて、吸入弁閉鎖後さらに5分の時間を経たのち着火を行うこととした。

(3) 火炎伝播の対称性

図7の上の曲線は、初期圧力1 atm、初期温度290.5 Kの理論混合比のメタン・空気混合

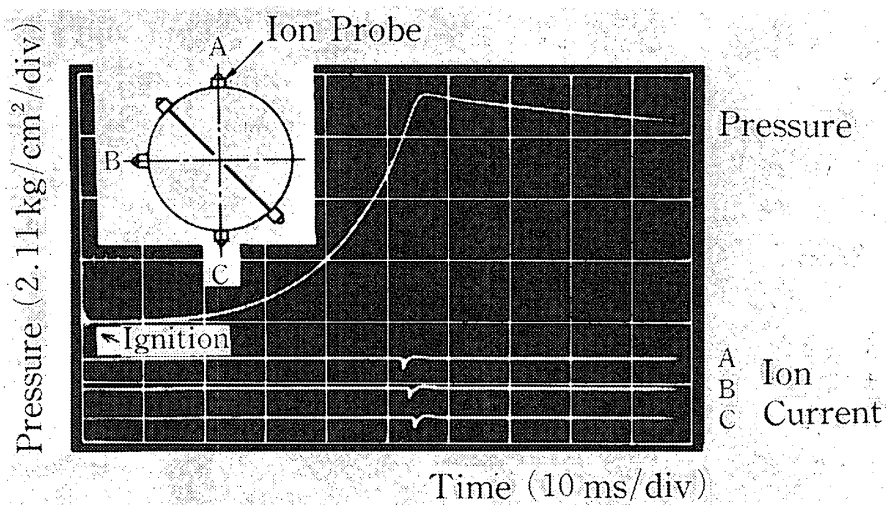


図7. 圧力の時間的变化と火炎の壁面到達時刻

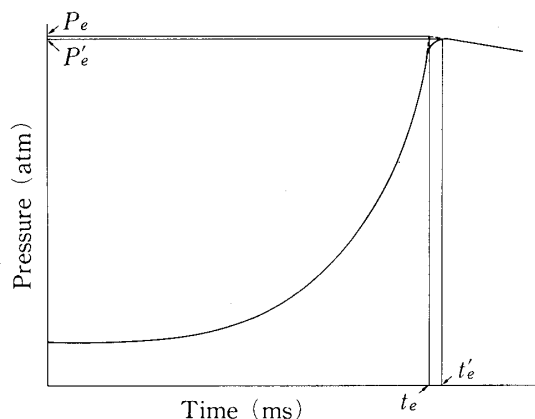


図8 伝播時間および最終圧力の定義

気に着火したのちの圧力の時間的变化を示す。圧力は火炎の伝播とともに上昇し、火炎が容器壁面に到達した瞬間に最大値を示す。その後、壁面への熱損失とともになだらかに減少する。またこの下の3本の信号は燃焼室壁の上(A)、中(B)、下(C)位置に取りつけた3本のイオンプローブへの火炎の到達時刻を示したものである。伝播時間は常に上方が下方よりも約3%短かく、理論混合比のメタン・空気混合気では浮力の効果が若干存在することを示している。なお下方のイオンプローブへの火炎の到達時刻は最大圧力になる時刻とほぼ一致している。このような火炎伝播の非対称性が存在すると、火炎の一部が壁面に到達した瞬間から火炎面面積が減少することによって圧力上昇速度は減少するはずである。図7において観察される伝播の最終段階における圧力上昇速度の減少は、このことを示しているものと考えられる。

このように火炎の対称性がくずれている場合には、火炎の伝播時間を明確に決定することはできない。そこで我々は図8の圧力の時間的变化の曲線において、破線で示すように、圧力の上昇速度が減少を開始する直前の曲線部と最大圧力後の冷却曲線の両方の外挿曲線の交点で、伝播時間 t_e と最終圧力 P_e を定義した。約20回の実験を行った結果、この伝播時間と最終圧力はそれぞれ $t_e = 53.0 \sim 55.2$ ms, $P_e = 8.70 \sim 8.90$ atm であり、またその算術平均値は $t_e = 54$ ms, $P_e = 8.80$ atm となった。この最終圧力は理論的に計算された最終圧力9.00 atm と約2%異なるだけでかなりよく一致している。

(4) 火炎位置と圧力の関係

図9は圧力の時間的变化と、イオンプローブへの火炎の到達時刻を示したものである。イオン電流信号A, B, C, Dは燃焼室中心からそれぞれ, 30, 67.5, 75, 80 mm 位置に取りつけられた4本のイオンプローブへの火炎の到達時刻を示している。この図より火炎面位置と圧力の関係を知ることができる。

図10は火炎面位置と圧力の関係について、上述の実測値と、解析から導かれた(2)式による計算結果とを比較したものである。両者はかなりよく一致している。(2)式は燃焼速度を求めるための(1)式に無関係に導かれるものである。この式が実験的に成立していることは、も

との解析の火炎面モデルが妥当なものであることを示している。このことから本測定法が燃焼速度測定法として信頼できるものと考えてよいと思われる。

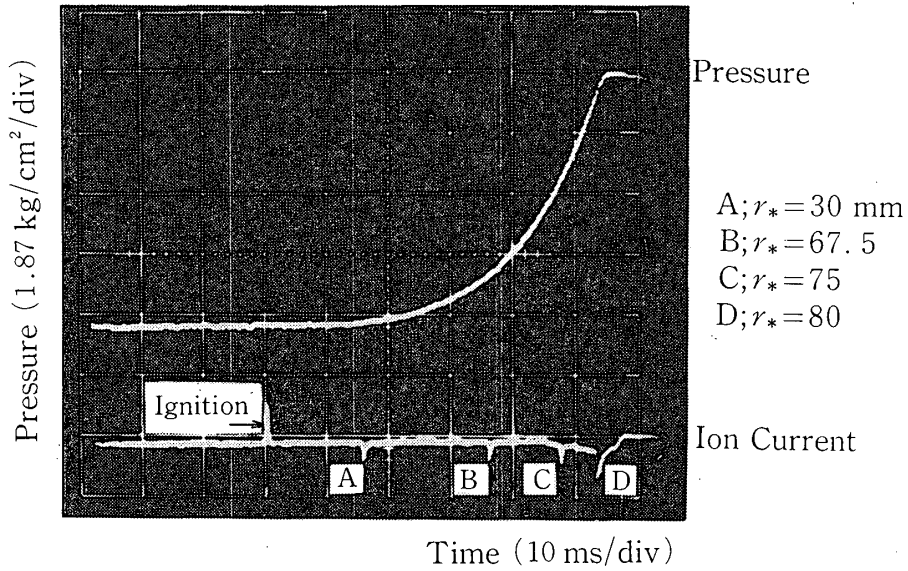


図9 圧力の時間的变化と各イオケプローブへの火炎到達時刻

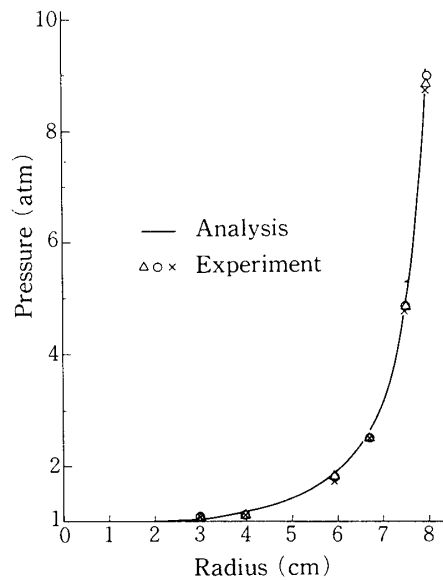


図10 火炎面位置と圧力についての実験結果と解析結果の比較

(5) メタン・空気混合気の燃焼速度

図11は初期圧力1 atm, 初期温度290.5Kの理論混合比のメタン・空気混合気について, 同一条件下で行われた3回の燃焼実験において測定された燃焼速度と伝播の各瞬間における

燃焼室内における混合気の圧力との関係を示したものである。なおこの時の圧力の時間的変化に対応して、未燃混合気の温度も等エントロピ的に変化するが、その変化の様子を図12に示す。図11の燃焼速度は、この圧力と温度の両方の効果を合わせて受けたものである。得られた燃焼速度の値は、圧力の上昇とともに少しずつ増加していくことがわかる。また図11には比較のために他の研究者達の結果[2][3]も一諸に示しているが、我々の結果は他の研究者達の結果に比べ、圧力の全範囲にわたってやや低い値を示している。

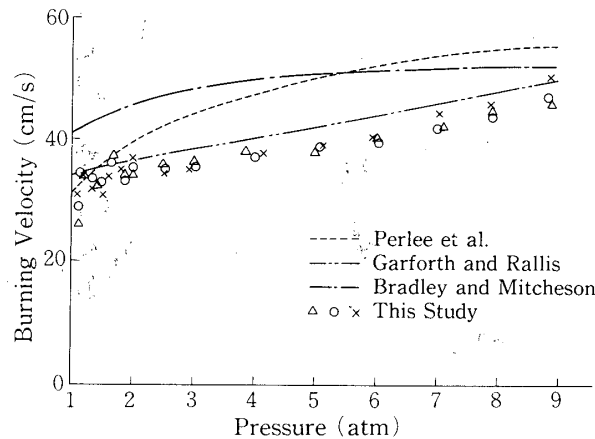


図11 メタン・空気混合気の圧力と燃焼速度

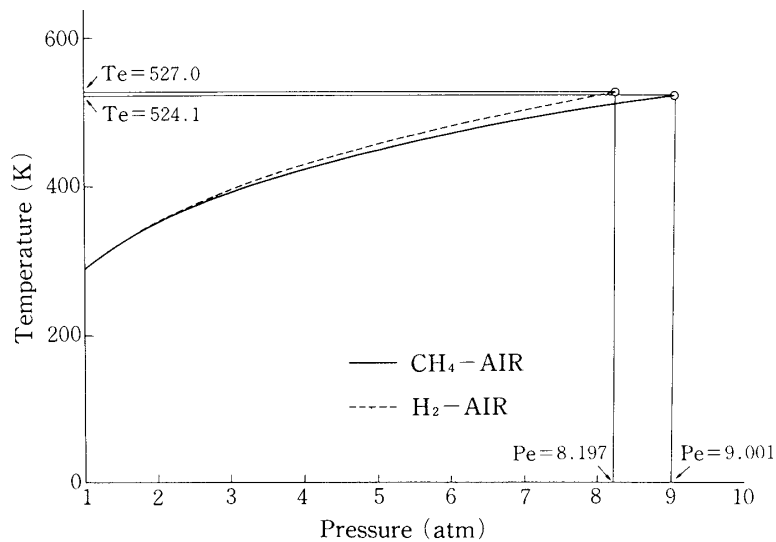


図12 圧力と未燃混合気温度

(6) 水素・空気混合気の燃焼速度

図13は同じく初期圧力1 atm, 初期温度290.5 Kの理論混合比の水素・空気混合気について得られた燃焼速度と圧力との関係を示している。メタン・空気混合気経比べ、圧力に対する燃焼ガスの増加割合はかなり大きいことがわかる。またDrell [9]の結果と比較すると、我々の結果はやや高い値を示している。

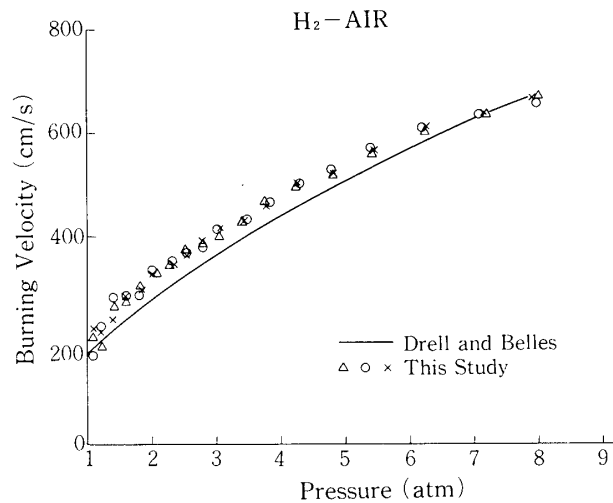


図13 水素・空気混合気の圧力と燃焼速度

5 考 察

(1) 測定上の問題点

燃焼速度の測定法にはいくつかの方法が存在する。他の測定方法にもそれぞれ固有の問題点が存在するが、以下に我々の提案した方法におけるいくつかの問題点について考察する。

図11および図13に示すように、圧力1 atm付近において我々の測定した燃焼速度の値はかなりばらついている。このばらつきの原因としては、容量10 kg/cm²の圧力変換器で伝播初期の1 atm付近から最大圧力までの全圧力範囲の測定を行っており、着火直後の1 atm付近での測定精度が悪いことが考えられる。また、この圧力変換器からのアナログ信号を10ビットのトランジェントメモリでデジタル化する際に、伝播初期の圧力のあまり変化しない領域での圧力の時間的変化の測定誤差がかなり大きくなることも原因の一つとなっている。そこでこのような問題点を解決するためには

(a) 小容量の圧力変換器を併用して、1 atm付近の圧力の測定精度の向上をはかる。

(b) 燃焼速度を計算するために必要な圧力の時間微分については、圧力変換器の出力を微分回路を用いて微分した後にデジタル化する。

などの工夫をする必要があるものと考えられる。

図7に示すように理論混合比のメタン・空気混合気では燃焼ガスの浮力の効果が若干現われる。しかしこの効果は火炎伝播時間のわずか3%程度の影響を与えるに過ぎない。また最終圧力が理論的に計算された値と約2%しか異ならないことや、図10に示す火炎面位置と圧力の関係の理論と実験との対応などから考え合わせても、この浮力の効果は無視できるほど十分に小さいものと考えられる。しかし混合気の当量比が可燃限界（稀薄または過濃）に近づくとともにこの効果が無視できなくなることも考えられ、この方法を用いて燃焼速度を求める際に十分注意する必要がある。

今回の圧力の時間的変化の測定においては、点火栓での火花放電時刻を時刻0としている。しかし実際には火花放電してから球対称の伝播火炎が形成されるには若干の着火遅れが

存在するはずであり、これに対応した時刻の仮想原点は火花放電時刻とは異なる。しかし(1)式に見られるように燃焼速度の算出には時刻の絶対値は直接入って来ず、このような時間のずれは得られた結果に対して殆ど影響しないものと思われる。

以上の考察から明らかなように、火炎伝播の初期段階での圧力測定を精度よく行うことができれば、提案した方法によって燃焼速度を正確に測定することが可能であると考えられる。

我々の提案した燃焼速度の測定法は、他の方法と比較して次のような特長を有する。

- (a) 実験的には圧力の時間的変化のみの測定から燃焼速度の値を直接導く。従ってこの方法に簡単なデータ処理装置を組み合わせることによって、実験と同時に最終的な値を求めることができ、燃焼速度測定法として簡便な方法を与える。
- (b) 一度の実験である範囲の混合気の圧力と温度の組み合わせに対する燃焼速度を求めることができる。そこで混合気の初期条件を種々に変化させて実験を行うことによって、燃焼速度の圧力および温度に対する依存性を分離して求めることができる[4]。

6 結 論

以上の結果をまとめると、

- (1) 我々の提案した燃焼速度測定法は、圧力の時間的変化のみの測定で簡単に燃焼速度を導くことができる。
- (2) 火炎面位置と圧力の関係の理論と実験とを比較することにより本測定法の妥当性が確認された。
- (3) 実際にこの方法を用いて、理論混合比のメタン・空気混合気および水素・空気混合気の燃焼速度を測定することができた。

7 謝 辞

本実験を遂行するにあたり、東海大学工学部4年、村越正美君に多大の協力をしていただきました。ここに深く感謝の意を表します。

1980年12月12日 原動機部

参 考 文 献

- [1] Andrews, G.E. and Bradley, D., *Combustion and Flame*, **18**, 133 (1972).
- [2] Garforth, A.M. and Rallis, C.J., *Combustion and Flame*, **31**, 53 (1978).
- [3] Bradley, D. and Mitcheson, A., *Combustion and Flame*, **26**, 201 (1976).
- [4] Metghalchi, M. and Keck, C.J. *Combustion and Flame*, **38**, 143 (1980).
- [5] 竹野忠夫・飯島敏雄, 第16回燃焼シンポジウム, 22 (1978).
- [6] Takeno, T. and Iijima, T., 7th Int. Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems, Göttingen, August 1979.
- [7] 竹野忠夫・飯島敏雄, 東京大学宇宙航空研究所報告, 第16巻第1号(C), 561 (1980).
- [8] 飯島敏雄・竹野忠夫, 第18回燃焼シンポジウム, 76 (1980).
- [9] Drell, I.L. and Belles, F.E., *NACA Report 1383* (1958).