

音場における燃料液滴の燃焼

Combustion of Fuel Droplets in a Sound Field

伊藤 忠温・遠藤 敏彦・水町 長生

Tadaharu ITO, Toshihiko ENDO and Nagao MIZUMACHI

1. まえがき

一般に物理的な操作によって燃焼を制御することはかなり困難であるが、いわゆるハルトマン・ホイッスルを液体燃料噴霧バーナと組み合わせ、燃焼用一次空気を利用して流体力学的に強力な音波あるいは超音波を発生させ、これを燃料の霧化促進および燃焼の制御に利用しようという試みがある。ここではこのような音波バーナの問題とも関連して、超音波が燃料液滴の燃焼に対してどのような影響をおよぼすかを実験的に明らかにすることを目的として研究を進めた。

2. 実験方法

音源としては図1に示すような軸付ハルトマン・ホイッスルを用いた。長さ l , d およびノズル前の圧力 p_0 を変えることにより発生音の周波数を自由に变化させることができる。音響測定には図2に示すような装置を用いた。

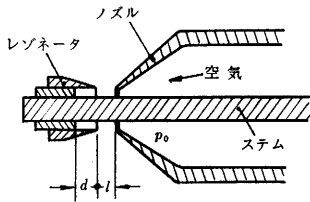


図1 音源

周波数分析の結果、発生音波はほとんど純粋な単一音波とみなしうという結果を得、また音圧の絶対値は音源からの垂直距離に反比

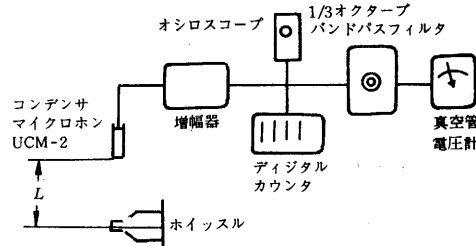


図2 音響測定装置

例することがわかった。なお、この実験に用いたホイッスルで安定かつ強力な音波を発生させることのできる周波数範囲は約 10~30 kcps の間であった。

燃焼の実験は図3のような装置を用いて行なった。すなわち直径 0.1 mm 弱の石英糸に直径 1 mm 前後の燃料液滴をけん垂させ、小さなパイロット・フレイムがそ直下を通過することにより点火させる。この燃料液滴の燃焼過程を影写真あるいは暗視野直接撮影により 16 mm カメラで撮影し、そのフィルムを投影機により 10

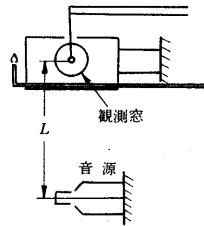


図3 燃焼実験装置

倍から 50 倍に拡大して液滴の寸法および火炎形状を測定した。なお、ホイッスルのジェットによって液滴周囲の空気に流れが生じるのを防ぐため、図に示したように底に 200 メッシュ程度のグリッドを張った箱の中で液滴を燃焼させた。一方音については、周波数は 20 kcps に固定し、音圧は音源からの垂直距離 L を変えることによって段階的に変え、燃焼の前後に燃料液滴と同じ位置にマイクロホン置いて測定した。

3. 実験結果と考察

燃料液滴の直径 D の 2 乗の時間的变化率 $k_b = -dD^2/dt$ は、準定常的燃焼とみなせる場合には一定となることが実験的にも理論的にも知られている。それゆえこの k_b は燃焼速度定数と呼ばれ、その値は燃料の種類、周囲の圧力、温度、風速によって異なる。なお準定常的燃焼とは液滴直径の時間的变化が蒸気や酸素の移動にくらべて緩慢であって、液滴直径が減少していても各瞬間ごとに定常状態が成り立つものとみなすことのできる場合をいい、この実験で扱った常温大気中における直径 1 mm 前後から 0.3 mm までの燃料液滴の燃焼も準定常的燃焼とみなせる。この燃焼速度定数 k_b により実験結果をまとめると図4のようになる。この図から音の影響についてははっきりした傾向をいうのは困難であり、むしろ k_b の値は音によってほとんど影響を受けないものとみなされる。

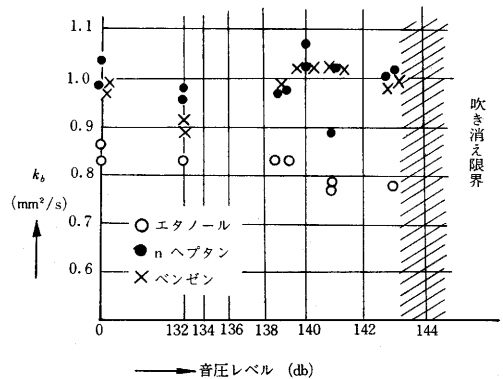


図4 実験結果

燃料液滴の燃焼を球対称、準定常、反応速度無限大と仮定し、火炎面の内側と外側でそれぞれ連続の式とエネルギーの式をたて、境界条件を与えてこれを解くと燃焼速度定数 k_b 、火炎面温度 T_c および火炎面の位置 r_c は次のようになる。

$$k_b = 8 \frac{\lambda}{C_p \rho} \frac{1}{L \varepsilon^2}$$

$$\ln \left\{ \frac{H(1+w_{o_{\infty}}/\varepsilon)^{1/L\varepsilon} - H + C_p(T_{\infty} - T_i)}{L} + 1 \right\}$$

$$T_c = T_i + \frac{1}{C_p} \left\{ H - L - \frac{H - L - C_p(T_{\infty} - T_i)}{(1 + w_{o_{\infty}}/\varepsilon)^{1/L\varepsilon}} \right\}$$

$$\frac{r_c}{r_i} = \ln \left\{ \frac{H(1+w_{o_{\infty}}/\varepsilon)^{1/L\varepsilon} - H + C_p(T_{\infty} - T_i)}{L} + 1 \right\} / \ln(1 + w_{o_{\infty}}/\varepsilon)^{1/L\varepsilon}$$

ただし、 $w_{o_{\infty}}$: 周囲空気中の酸素の重量分率、 ε : 理論混合比、 H : 燃焼熱、 L : 蒸発熱、添字 l -液滴表面、 c -火炎面、したがって温度伝導率 α と拡散係数 D の比であるルイス数 $L_e = \alpha/D$ が一定ならば k_b は温度伝導率 $\alpha = \lambda/C_p \rho$ したがって拡散係数 D に比例するが、 T_c と r_c はこれらとは無関係に一定となる。一般に乱流を扱う場合にはうず動粘性係数およびうず動温度伝導率を用いるが、熊谷・磯田によれば音によるみかけの拡散係数の増加は二次的にも一致する粒子速度 $fA \times$ 振幅 $A = fA_2$ によって表わすのが適当であるとして、振動板を用いて行なった k_b の実験結果を fA^2 によってまとめている (図5参照)。本実験の fA^2 の値は周波数 20 kcps, 音圧レベル 143 dB で $5 \text{ mm}^2/\text{s}$ 程度であり、熊谷・磯田の実験にくらべて非常に小さく、図5のグラフによれば音圧が非常に大きいにもかかわらず k_b の値がほとんど変化しないのは当然であるといえる。

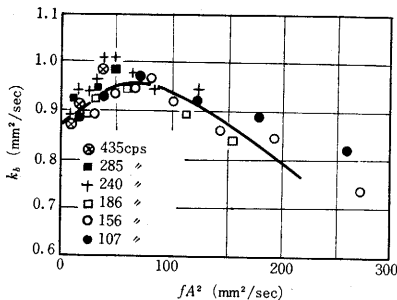


図5 熊谷・磯田の実験

音圧レベルが一定の大きさすなわち 143~145 dB 以上になると、直径 1 mm 前後の燃料液滴は燃焼を継続することができず火炎が消えてしまうことがこの実験でわかった。この現象は実験した周波数 (10~20 kcps) には関係せず、また燃料の種類にもほとんど左右されない。熊谷・磯田の実験では fA^2 を大きくしていくと火炎の

部分的吹き消えがはじまり、そのために k_b が途中から減少しているのであるが、この部分的吹き消えに対応する粒子速度は約 30 cm/sec 以上であり、一方本実験の吹き消え限界音圧レベルでは約 60 cm/sec でありほとんど同じオーダとなっている。したがって吹き消えという現象を支配するファクタは fA^2 ではなく粒子速度であると思われる。

吹き消え現象を考察するために、火炎面における熱流束と火炎温度との関係をノルマルヘプタンの場合について示すと図6のようになる。液滴直径、燃焼速度定数および火炎寸法の実測値から火炎面の外向き平均熱流束が求まり、また音のない場合の火炎面温度は西脇・平田らがスペクトル反転法によって測定した値を用いると、音

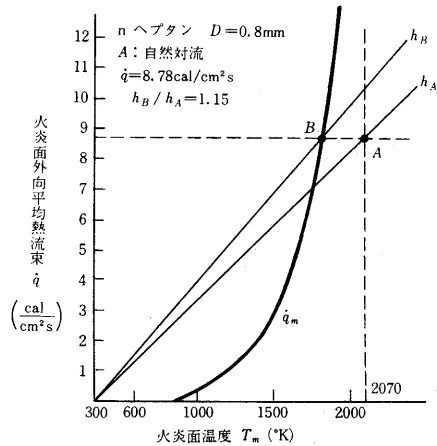


図6 火炎面熱流束と熱伝達率

のない場合の燃焼状態を示す A 点が定まり、A 点と原点を結ぶ直線の傾きから周囲空気中の火炎面に対する平均熱伝達率が求まる。一方 Spalding は化学反応速度を考慮に入れて反応層におけるヒートバランスおよびマスバランスの関係から、拡散火炎における flame strength すなわち単位火炎面当たりの最大可能燃料消費率を導いているが、 q_m はこの flame strength に対応する火炎面の最大外向き熱流束を表わしている。この q_m を求めるための活性化エネルギーおよび反応速度定数は、均質理論混合気中の火炎伝ば速度から推定した。この q_m よりも q が大きくなって A 点が q_m の左側に移動すると火炎の吹き消えが生ずるのであるが、各音圧レベルに対する火炎面の温度を測定していないので A 点が各音圧レベルに対してどの位置にくるか不明である。しかし音が存在する場合にも k_b および火炎形状は変化しないことが実験によりわかっているから、音がある場合にも平均熱流束 q は変わらず、A 点を通る横軸に平行な直線上にあるといえる。それゆえ吹き消え限界音圧レベルは B 点に対応することになり、このときの (p29へつづく)

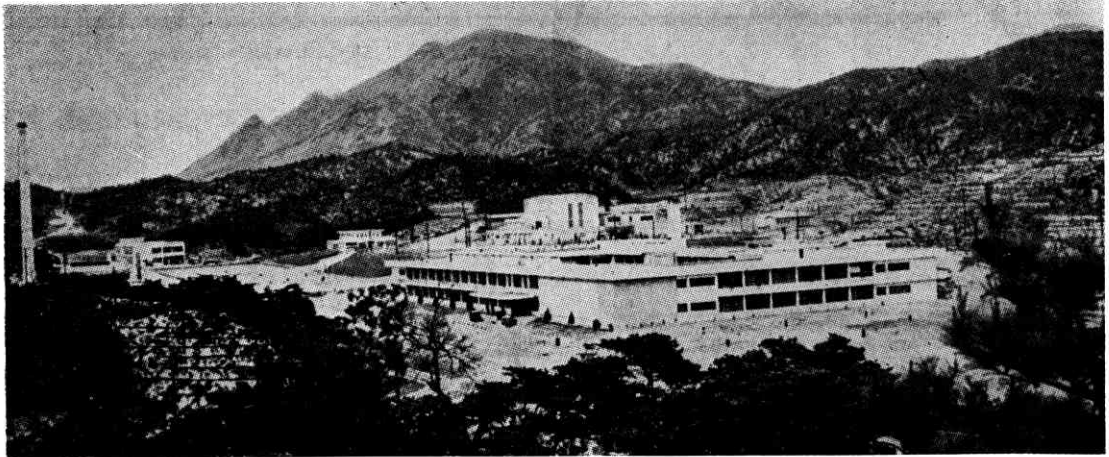


写真 3 原子力研究所全景

年会講演および学会誌にあらわれた研究内容はもちろん多岐にわたるので一概にまとめられないが、石炭、螢石、酸性白土等の韓国産地下資源および農業、漁業産物に関する研究、有機では高分子化学、無機では錯塩関係、物理化学では放射線化学に関する研究が比較的多いようである。また相当基礎的な熱力学的研究のようにあまり時流に媚びない仕事もかなり見受けられた。一方分子構造や分子スペクトル等の分子科学に関する研究は比較的少なく、ESR, NMR 使用の研究は筆者の関心した限り見いだされなかった。

話は構道にそれるが、国立研究所のうち原子力研究所(写真3)を見学する機会に恵まれたので簡単に触れてみる。本研究所が韓国の他の研究機関に比して、資金的にも人的にもきわめて恵まれていることは一見しただけでうなずかれる。研究所は原子力庁という政府機関の下に原子力研究所、放射線医学研究所、放射線農業研究所の3研究所があるが、原子力研究所が後2者に比して遥かに大きい陣容と施設を備えている。

原子力研究所には物理、化学、生物、リアクタ、電子、保健の6部があり、その化学部の研究の活発なことは前述のとおりである。そのゆえか原子力庁は韓国科学技術

庁とともに本年会のスポンサとして名を連ねていた。

最後に筆者の仄聞した韓国の科学研究における問題点であるいわゆる頭脳流出について触れておこう。

韓国の在外化学者は有名な Eyring 門下の季博士を始めとして近年次第に数を増し、ご多聞に洩れず頭脳流出の問題がやかましく言われるようになってきた。これは韓国の給与レベルがまだ低く、殊に公務員において厳しく制限されているので、優秀研究者が米国に流出し、また囑目されて海外に留学した学生がそのまま居ついてしまうという問題である。これに対する対策の試みとして国立の大研究所を設立し、その staff には特例をもって高給を与え、在米の研究者を一挙に呼びもどそうとするなどがある。韓国科学技術研究所はその例であり、筆者もその建設中の処を見学できたが、Seoul 郊外にまず公園のような敷地を選び最新の施設を持つ研究所を建築中であった。また同じ敷地中に官舎や所員の西歐式アパートが同時に建設中であり、厚生施設も完備しているとのことであった。このようなことは韓国の経済水準の現状から見れば破格のことであり、時の政府の頭脳流出防止への熱意がうかがわれるのである。

(1968年8月15日受理)

(p. 31 よりつづく)

平均熱伝達率 h_B は B 点と原点を結ぶ直線の傾きから求まる。このようにして熱伝達率 h_A および h_B を計算すると、この場合 h_B は h_A より 15% 大きいという結果を得た。したがって限界音圧レベルすなわち 143 dB で熱伝達率は音のない場合に比べて 15% 以上増加すものと推定される。

4. む す び

この研究によって明らかになったことを簡単にまとめると次のようになる。

(1) (超)音波によって燃焼速度定数 k_b はほとんど変

化しないが、限界音圧レベル 143~145 dB 以上になると直径 1 mm 以下の燃焼液滴は吹き消える。

(2) (超)音波によってみかけの拡散係数を増加させることは困難である。

(3) (超)音波による周囲空気の燃料液滴火炎面に対する平均熱伝達率の増加は、限界音圧レベル 143~145 dB で 15% 以上であると推定される。

(1968年7月25日受理)

- 文 献 1) S. Kumagai, H. Isoda, 5th Symp. on Comb. (1954), 129
2) D. B. Spalding, Fuel, 33, (1954), 255