

気流の燃焼

—可燃混合流の燃焼と気流の亂れとの關係について—

水町長生

1 まえがき

ガスタービン用燃焼器では、微粒化された液體燃料が流れている空気の中で燃焼するため、その機構は非常に複雑でなかなか解析し難い。そこでまずその問題に入る前に、流動しつつある可燃ガスが燃焼する時、どんな燃え方をするかを明かにしたい。この時燃料の化學的性質も關係するが、ここでは燃料としては氣化されたガソリンを用い、この氣化されたガソリンと空気の混合氣が流動燃焼を行う時に、その氣流の中の亂れ (Turbulence) が燃焼速度にどんな影響を與えるかを調べてみた。

普通には一様な流速 U をもつて流れていると観測される氣流でも、實際の氣流の中では、ガスの各粒子が全部均一な速度 U をもつて運動しているのではなく、主流 U の方向あるいはそれに直角な方向に微小なさまざまな運動をしながら流動し、巨視的にみて、全體として平均流速 U をもつて運動しているに過ぎない。そのような擾亂運動の規模がかなり大きいものが渦動であり、規模が小さいものが亂れである。従つて全體としては流速 U をもつて流れている可燃ガスが燃焼する場合でも、その中にふくまれる擾亂運動の様子によつて、その燃焼の仕方がかなり變りはしないかということは、容易に想像されることである。それは普通の管内の氣流の中でおこる擾亂運動の速度の大きさと、ガスの燃焼速度の大きさとが、大體同一の桁数であるからである。

可燃ガスの燃焼については、特に内燃機關でおこる燃焼等については、かなり研究されている。内燃機關でおこる燃焼も、静止したガスの燃焼ではなく、燃焼室内のガスはさまざまな運動をしているのが普通である。しかしながら内燃機關の燃焼室内でおこるガスのさまざまな運動を測定することはなかなか困難であつて、従つてそのようなガスの運動が、燃焼にどのような影響を與えるかというようなことに関しては、未だ直接的な証明をしたものはない。間接的な証明により、ガスの亂れが燃焼速度をかなり増大させるだろうといわれているに過ぎない。もちろん定量的にはわかつていない。

ガスタービン用燃焼器内の燃焼は、内燃機關の燃焼室内の燃焼とはいくらか異なる。内燃機關の燃焼が燃焼室という一定容積内の燃焼であるに反し、ガスタービン用燃焼器では、ガスは定常的に流動し、流動しつつ燃焼が行われる。

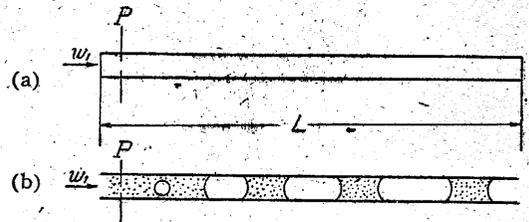
航空用を初めとして、船用、車輛用あるいは發電用等の新原動機として、新しく登場したガスタービンの燃焼器における氣流の燃焼はどんな機構で行われるであろうか。本稿はこの問題に對する一つの基礎資料である。

さういふ流動しつつある氣流の中の亂れの大きさは、比較的容易に測定することができる。そこで管内の氣流に各種の大きさの亂れを積極的に作つて、その亂れの大きさを測定し、一方このガスを管内で燃焼させて燃焼状況を測定し、筆者が考えた管内の燃焼速度を求める理論から燃焼速度を求め、亂れが燃焼速度にどんな影響を與えるかを調べてみた。

2 氣流が燃焼する時の燃焼速度

筆者が考えた氣流の燃焼速度を求める理論を次に述べよう。

第1圖 (a) に示すような一様な斷面積 A を持つ圓管内に、 w_1 なる速度をもつて可燃ガスが流れているとする。



第1圖 燃焼管

P 点において一様な周期 T をもつて斷續的に電氣火花を飛ばす。そうするとある一回の火花でその火花を中心として、ある有限の燃焼速度 c をもつて四方に燃焼は進行していく。同時に氣流の速度をもつて後方に全體として押し流されて行く。次の火花が飛ばすまでは P 点には未燃ガスが流入してくる。ある程度未燃ガスが流入した時に第二回目の火花が飛ぶと、その火花を中心としてまた燃焼が初まる。同時に主流の流速をもつて後方に押し流され、後方に行くに従つて燃焼過程も進行する。また燃焼過程が進行するに従つて、主流の流速も増大する。従つてある瞬間における管内の燃焼状況は第1圖 (b) のようになり、管内には次々に各種の燃焼過程を示す燃焼部分が存在することになる。同圖で白い部分が既燃部分を表わしている。このようにして、流入した可燃ガスの

中の $x\%$ だけ燃焼した未燃、既燃兩ガスの混合ガスが出口から平均速度 w_2 をもつて流出する。

今ガスの流量を G kg/s, その中の未燃の量を G_a kg/s, 燃料の量を G_f kg/s とすれば

$$G = G_a + G_f \quad (1)$$

となる。未燃ガスのエンタルピを i_1 , 出口におけるガスのエンタルピを i_2 , 燃料の低發熱量を H kcal/kg とすれば次の式が成立する。

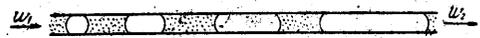
$$\frac{1}{J} G \frac{w_1^2}{2g} + G_a i_1 + G_f \cdot H \cdot x = \frac{1}{J} G \frac{w_2^2}{2g} + G \cdot i_2 + h \quad (2)$$

ただし h は燃焼管を通じて外部に逃げた熱量である。 h が小さく無視できる場合には

$$\frac{1}{J} G \frac{w_1^2}{2g} + G_a i_1 + G_f \cdot H \cdot x = \frac{1}{J} G \frac{w_2^2}{2g} + G \cdot i_2 \quad (2')$$

とすることが出来る。この式で G , G_f は実験に際し測定できる。 w_1 も容易に測定できる。 i_1 および H も既存の数値表からわかる。従つてこの実験で、管出口における温度および壓力を測定し、ピトー管で動壓を測定する。そうすると温度と壓力から密度がわかり¹⁾、流速 w_2 が求められる。さて最後に i_2 であるが、 i_2 は壓力、温度および x の函数である。壓力および温度はわかっているから、 x を假定することによつて i_2 が求められる。このようにして得られた x と i_2 が (2') を満足するように x を決める。このようにして、ある一つの實驗において、その管内において可燃ガスの中の $x\%$ だけが燃焼したことがわかる。この x のことをまた燃焼効率ともいふ。

さて断続的に飛ぶ火花の周期を T sec とすれば、一周の間に流入する未燃ガスの體積は $A w_1 T$ である。このガスは燃焼と同時に流速を増し、出口においては速度 w_2 になる。燃焼管内の各點の流速は、 w_1 から w_2 まで連続的に變化しているわけである。この流速の變化は、直線的であるか、あるいは他の法則に従つて變化しているかはわからない。しかし今大體の見當をつけるために直線的に變化していると假定する。そうすると燃焼管内の平均流速は、 $w_m = (w_1 + w_2) / 2$ とおける。燃焼管の長さを L_m とすれば、ガスが燃焼管を通過するに要する時間は、 $\tau = L_m / w_m$ sec である。一方燃焼は火花を中心として四方に燃焼速度 c m/s をもつて燃焼が進行し、初めの期間は火花を中心として、球状に火焰は進行するが、やがて第2圖に示すように管軸の方向に兩方に焰は進行していく。今大部分の期間が管軸の方向に進行していくと考えると燃焼管を通過するに要する時間 τ の間には、 $2cA\tau$ m³ の體積が燃焼する²⁾。火花の一周の間に流入した



第2圖 火焰の傳播

體積は $A w_1 T$ であり、その中燃焼管内で $x\%$ だけ燃焼したから

$$2cA\tau = xA w_1 T$$

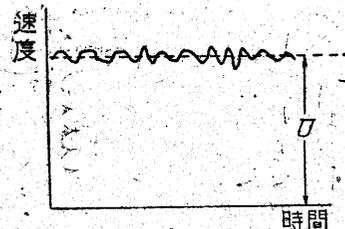
すなわち

$$c = \frac{w_1 T}{2\tau} x \quad (3)$$

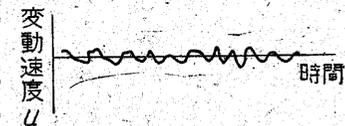
上式で、 x は燃焼實驗から (2') を利用して求められ、 w_1 , T および τ も實驗からわかる。従つてこれから燃焼速度を求めることができる。

3 氣流の亂れと燃焼

前にも述べたように、普通の測定方法によつて、速度 U をもつていると観測される氣流でも、その中の粒子は全部が均一な速度 U をもつて運動しているのではなく、この U の外に、この U に對してさまざまな方向に、またさまざまな微小な速さで運動している。従つてある點の速度は、例えばその點の U 方向の速度は、時間に對して第3圖(a)の



ように變動している。その各瞬間の速度の平均値が U である。この U からの變動の速度を u とすれば、 u は第3圖(b)のようになる。これが氣流の亂れである。この氣流の亂れの大きさを表わすのに u の自乗平均平方根 \bar{u} をだせば、



第3圖 氣流の亂れ

これを亂れの大きさを表わす一つの量とすることができ、普通は無次元量、 \bar{u}/U をもつて亂れの大きさとする。 U の方向を x 軸にとり、それに直角にそれぞれ y 軸、 z 軸の直角座標をとれば、普通の流れでは y 軸および z 軸の方向にもやはり u と同じように速度の變動が存在しそれぞれ \bar{v} , \bar{w} で表わされる。この \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} の値は普通はそれぞれ相異なるが、金網を通過した流れでは、この三つの値は略相等しい。このような亂れを等方性の亂れという。

氣流の中の速度の變動には、以上述べたような比較的規模の小さい亂れの外に、さらに流れによつては、もつと規模の大きい變動も存在する。渦動や、さらに規模の大きい旋回運動等である。

可燃ガスの氣流の中にこのような速度の變動があればこの變動速度がガスの燃焼速度と同じ桁数の場合には、

1) 厳密には燃焼した割合の x がわからないと密度は求められないが、燃料の量は空氣量の約 1/15 であり、燃焼ガスの密度は近似的に空氣の密度に等しいと考へて求められる。(2') において運動エネルギーの變化はエンタルピの變化にくらべてごく小さいから、この近似は許される。

2) 火焰が傳播した體積は、燃焼と同時に體積が膨脹するために、 $2cA\tau$ よりも大きい。

わない時とでは、亂れが同一になるとはがぎらないが、一應空氣のみの時の亂れをもつて、燃焼の時の亂れを表わすことにした。燃料は市販の自動車用ガソリンを使用し、これを予熱しておき、燃料噴射ノズルから噴射して氣化させる。このようにしてできたガソリンと空氣との可燃混合氣に燃焼管入口で電氣火花により點火する。電氣火花は自動車用インダクション・コイルの一次側を振動型遮斷器により斷續して飛ばせる。振動型遮斷器の斷續振動数は 117 cps で、従つて火花が飛ぶ周期は $1/117 = 0.00855$ sec である。ガソリンと空氣との混合割合は、化學的當量である正規混合比に保つた。

燃焼管出口におけるガスの温度は、白金および白金ロジウム熱電對を用いて測定し、速度は、外徑約 1.5 mm の石英製ピトー管により測定し、その流速分布から平均流出速度を求めた。

(b) 亂れの測定

金網を通つた流れは等方性の亂れになつている。従つて主流に直角方向の亂れの強さを測定すれば、いずれの方向にもそれと同一の大きさであると考えて差支えない。主流方向に直角方向に亂れがあれば、それによつて分子の擴散が増長される。亂れが大きい程この擴散も大きくなるわけである。従つてこの擴散の大きさを測定すればよい。これを利用した熱擴散の方法による亂れの測定法が考えられ、一般に使用されている。そこでこの方法によつて亂れを測定した。亂れ測定管内に流れの方向に直角に 0.1 mm φ の白金線張り、これを電流により加熱する。そうすると加熱された空氣は、亂れのために主流に直角方向に擴散して行くため、白金線の後方においては、白金線に直角方向にある温度分布を示す。この温度分布を白金線後方の數點において測定すれば、その温度分布の状態から計算により、白金線の位置における亂れの大きさを求めることができる。この實驗では、温度分布測定用として、0.1 mm 程度の外徑に熔接した銅—コンスタンタンの熱電對を使用し、半徑方向には、最小目盛 1/100 mm のマイクロメーターを改造して移動させた。温度分布は白金線の後方 32, 55, 82 mm の三個所で測定した。

實驗に使用した金網は方眼の金網であつて、第 1 表に示す三種である。

第 1 表

種 類	A	B	C
線 徑 $d(mm)$	0.68	0.50	0.26
線 間 隔 $M(mm)$	3.7	2.5	1.45
d/M	0.18	0.20	0.18

(c) 實驗結果

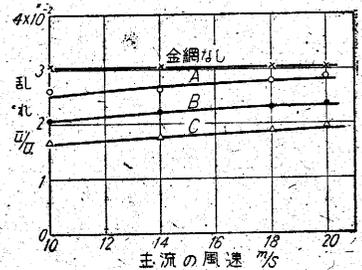
測定結果を第 2 表に示す。

第 2 表

金網の種 類	流入速度 w_1 m/	亂 れ \bar{u}/U	亂 れ \bar{u} m/s	燃焼効率 $x\%$	燃 燒 管 出口 °C t	燃 燒 管 出口速度 w_2 m/s	燃焼速度 C m/s.
なし	7.54	3.05×10^{-2}	0.305	62.0	1455	38.1	0.453
	9.05	"	0.366	60.8	1430	44.1	0.628
	10.55	"	0.427	58.9	1390	50.2	0.807
	12.07	"	0.488	55.9	1325	56.4	0.91
A	7.54	2.55×10^{-2}	0.255	64.4	1500	37.1	0.465
	9.05	2.62	0.314	64.9	1505	44.1	0.666
	10.55	2.70	0.378	64.4	1490	50.9	0.883
	12.07	2.75	0.440	63.2	1470	57.7	1.14
B	7.54	2.08	0.208	63.6	1485	35.5	0.440
	9.05	2.15	0.258	63.7	1475	42.9	0.641
	10.55	2.23	0.312	62.6	1460	49.1	0.841
	12.07	2.29	0.367	60.9	1425	55.1	1.05
C	7.54	1.65	0.165	62.8	1470	34.1	0.422
	9.05	1.72	0.206	61.9	1450	41.4	0.606
	10.55	1.79	0.251	60.9	1425	47.3	0.794
	12.07	1.85	0.296	58.5	1380	52.9	0.979

5 燃焼管内の亂れ

亂れを測定した場所は、燃焼管入口附近である。これを第 5 圖に示す。金網を設けない時の亂の大きさ \bar{u}/U は、流速によつてほとんど變化しないが、金網を入れると、同圖の A, B, C のようになり、流速と共に \bar{u}/U はいくらか増加している。金網を設けない時の亂れは 3.05×10^{-2} であつて、亂れとしてはかなり大きな値である。一般にこのような亂れは、流れの後方に行くに従ひ次第に減衰する。従つてこの實驗で求めた實驗は燃焼管入口附近の亂れであるから、燃焼管内では次第に減衰し、小さくなつていられる。また金網の目が小さい場合程減衰がいちじるしいことがわかつてい



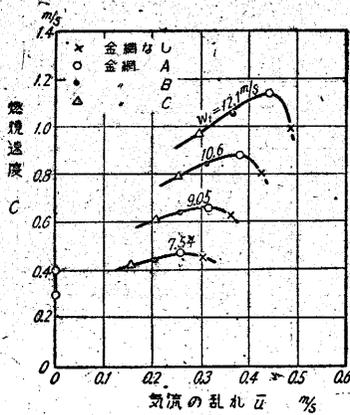
第 5 圖 亂れと流速

い

6 亂れと燃焼速度

この實驗により求められた燃焼速度と亂れ \bar{u}/U との関係を示す。燃焼速度は燃焼管入口速度 w_1 が一定の時、亂れ \bar{u}/U と共に増大している。しかしある程度以上に亂れが大きいかえつて燃焼速度は減少する。すなわちある適当な大きさの亂れまでは、亂れの存在は燃焼速度を促進させるが、それよりも大きい亂れは

燃焼速度の促進には役に立たないことがわかる。亂れが燃焼速度を促進させることは、焰面における熱傳達率の増大、活性分子の擴散現象の活發化等によつて、定性的には説明できるが、大きい亂れが燃焼速度の促進に役に立たない理由はわからない。これらの點は今後のさらにくわしい研究にまたなければならない。



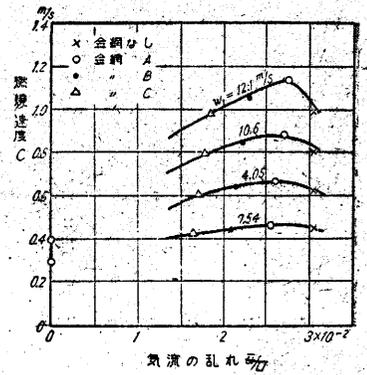
第6圖 亂れと燃焼速度

從來の密閉容器あるいはシャボン玉による燃焼速度の實驗では、ガソリンの燃焼速度は、正規混合比の場合 0.3~0.4 m/s となつている。このような實驗は亂れがない場合の燃焼速度になるわけである。この實驗結果から $w \rightarrow 0$ のところに外挿して行けば、主流の速度の如何にかかわらず大體 0.3~0.5 m/s になる。これからこの實驗は大體正しいのではないかと推察される。なおこの實驗結果から、亂れの存在は燃焼速度に非常に影響し、亂れがない場合にくらべ燃焼速度が數倍になることも可能であることがわかる。

燃焼速度に關係する亂れは w/U であろうか、あるいは w だけであろうか。一見考えるとところによれば、主流の速度 U には無關係に w の大きさだけによつて影響されるように思われる。もしもこの考えが正しければ、 $w \sim U$ の曲線においては、 U の如何にかかわらず、すなわち w_1 に無關係に一本の曲線の上にとまるべきである。

實驗結果から $w \sim U$ の曲線を求めてみると第7圖のようになる。すなわち一本の曲線にばなつていない。 $w \sim w/U$ の曲線にくらべると、かなりまとまつてはきていますが、明らかに w_1 の影響すなわち U の影響が表われて

いる。このことは C の値を求める筆者の理論が不備であるのか、あるいは燃焼速度には w のみならず U の値自身も影響するのかわからない。あるいは亂れの平均値である w だけで考えることが無理であつて、 u の分布自身が効いてくるかも知れない。これらの點もまた今後に残された問題である。



第7圖 亂れと燃焼速度

7. むすび

以上述べたことから、亂れが燃焼速度に非常に影響を與え、亂れがない時の燃焼速度の數倍にもなり得ることがわかつた。また亂れの中には燃焼速度を促進させるものと、促進させないものがあることが推察される。

以上のことから、ガスタービン用燃焼器内のように流動燃焼を行うものでは、亂れの状況を調べないで研究を進めても、それがわかつていなければ、結果はまちまちになり、統一的な結論を得ることはできない。

むしろ問題は今後にある。どんな機構によつて亂れが燃焼速度に影響を與えるのか、熱傳達率の増大を通じて影響をするのか、活性分子の運動を通じて影響するのか、火焰面の面積すなわち傳熱面の面積の變化を通じて影響するのか、あるいはまた w だけばかりでなく、亂れの大きさのスペクトル分布にもよるのか、今後の研究にまたなければならない點が多い。

なおこの實驗は寺田武、武内正廣の兩君が行つたものである。(1951.8.29 受)

生研報告について

生産技術研究所報告に載せる論文は、1 篇としてまとまつた研究成果で、教授・助教授の外特研究生も發表することができる。豊かな國の雑誌にくらべればずいぶんきまきちに編集してある。著者も紙數節減の趣旨からぎりぎりのところで原稿を執筆している。圖版もなるべく小さくしてのせるが、文字に代る便利と節約とから數は比較的多いと思う。原版で印刷しているので鉛版印刷の場合よりも字はだはきれいだといわれている。いろいろ希望や忠告をいただいている。背文字をいれること、各ページに巻號、研究題目等の柱をいれること、圖版はなるべく1段の巾(7 cm)におさめること、英文報告を發行すること、A4 版にひろげること等である。表紙裏1頁に英文 abstract を掲げるのは、外國へ寄贈するためである。現在約 100 部が海を越えて發送される。朝鮮のさる工科大学へも1部送つていたが、いまは申出している*。

次號豫告 (1951年12月號)

研究	自由亂流の問題について.....	谷 一郎 小橋安次郎
	イオン交換平衡について.....	山邊 武郎
	抵抗線歪計の試作.....	大井光四郎 淺野 六郎
	スピンドルの振動.....	小倉 公達 亙厚 厚
	定定化電源.....	野村 民也
	醫療用放射性合金の製造.....	加藤 正夫 武谷 清昭
	かべ.....	坪井 善勝 田治見 宏
その他	速報、實驗ノート、生研ニュース等	

* 豫定した送り先で送れないのは朝鮮だけである、早く戦火が止んでほしい。