662.948:662.612

内部蒸発燃焼器の研究*

(第1報, 一般的な特性)

棚沢 泰**, 永井 伸樹**, 梅原 正彦**

A Study on the Internal Vaporizing Combustor

(1st Report, The General Characteristics)

by Yasusi TANASAWA, Nobuki NAGAI, and Masahiko UMEHARA

Instead of the vaporizing combustor of the externally heated type, a very simple internal vaporizing combustor of high combustion intensity has been investigated, using a combustor consisted of an air blown atomizer and a cylindrical tube.

As shown in Fig. 5, the combustion characteristics concerning the mixture ratios have revealed the existence of three regions.

As it requires much flow rate at the time of ignition, the fuel spray burns at the outside of the cylindrical tube in a yellow flame. This yellow flame region exists at the right hand side of the line 3.

But if the flow rate of fuel is decreased gradually, the flame enters into the inside of the cylinder, accompanying a kind of intermittent explosion, called "Bumping". The bumping region lies between the line 2 and the line 3.

When the flow rate of fuel is further decreased, a blue flame combustion of very high intensity of 10^8 kcal/m³·h·atm happens at a place between the line 1 and the line 2.

At the left hand side of the line 1, the mixture is too weak to burn.

1. は し が き

昭和 33 年 6 月著者のひとりにはトヨタ自動車工業会社が使用中の第 1 図のようなふん囲気調節炉の燃料をプロパンガスから軽油に切替える研究を依頼された。

この炉は完全に密閉されており、窒素、水素などのガスを封入して無酸化ふん囲気中で金属材料を加熱して調質するものである。

加熱はひれ 8 付の U 字形放熱管 7 によって行なわれ、U 字管の入口に主バーナ 6 とパイロットバーナ 5 がついている。

主バーナは炉温が所要の温度、たとえば 900°C 以上になると運転を中止し、以下になると運転を開始する on-off 方式によって制御されているが、小形のパイロットバーナは常に燃え続けている。

燃焼ガスは U 字管をとった後、圧縮空気 1, 拡大風路 9 で形成されたエゼクタによって吸出される。

バーナの燃料を高価なプロパンから安い軽油に切替えるとき、障害となるのは U 字形放熱管 7 の内径が

100~125 mm 程度に細いことで、このように細い管中で液体燃料を完全燃焼させることはかなり困難である。

またパイロットバーナは外径 10 mm 程度の細さであるから、これを軽油にすることは更に困難である。

このような場合には外部蒸発燃焼方式によって軽油をいったん蒸気とすればプロパンガスと同様に取扱える。

特に外部蒸発器の壁面温度を極大蒸発率点に保て

第 1 図 ふん囲気調節炉

* 昭和 34 年 11 月 7 日 仙台地方講演会において講演、原稿受付 昭和 35 年 9 月 6 日。

** 正員、東北大学工学部 (仙台市片平丁)。

保って実験をはじめたとする。

この場合には燃料流量 w_f を点線で示した直線 3 より右側の値、すなわち $0.4 \sim 0.6 \text{ g/s}$ という多量の流量を供給しないと円筒外で点火することはできない。

点火後燃料流量 w_f をしだいに少なくすれば円筒外にある火炎はしだいに短くなるが、直線 3 が示す $w_f = 0.25 \text{ g/s}$ までは黄色の火炎をあげ、層流拡散火炎に近い状態を示す。燃焼音もほとんど聞えない。气流噴射弁近くでは正、負いずれのイオンも検出されない。

ところが直線 3 の左側、すなわち $w_f = 0.25 \text{ g/s}$ 以下とすれば、長い周期をもってボンボンと鋭い間欠的な爆発が起り、黄色の火炎中に青色が混入してくる。

さらに直線 2 の示す燃料流量 $w_f \approx 0.17 \text{ g/s}$ に近づくにつれ、間欠爆発の周期は早くなって、黄色と青色が交互に混った火炎となる。

燃料流量をなお少なくして直線 2 の左側、すなわち $w_f \approx 0.17 \text{ g/s}$ 以下にすると間欠的な爆音は連続的な激しい燃焼音 (combustion noise) と変り、火炎は青色となって円筒内に侵入する。円筒壁温度は高くなって、みるみる赤熱される。

燃料流量をさらに少なくして直線 1 に近づくると燃焼音はかすれかすれとなり、直線 1 の左側、すなわち $w_f \approx 0.11 \text{ g/s}$ 以下にすると火炎は吹消え、燃焼は行なわれなくなる。

試みに直線 1 の空燃比を求めると $w_a/w_f \approx 2/0.11 = 19$ となり、軽油蒸気と空気の混合気の可燃限界の下限に一致することがわかる。

同様に直線 2 の空燃比を求めると $w_a/w_f \approx 2/0.17 = 11.8$ となって上限に近い。

すなわち直線 1 と 2 の間にはさまれた領域は軽油蒸気と空気の、連続燃焼に対する可燃限界であり、直線

2 と 3 の間の領域は間欠的に爆発する領域、直線 3 の右側は黄色炎燃焼の領域である。

実験的に直線 1, 2, 3 を求めるには气流噴射弁に供給する空気圧 p_a を種々に変えながら、燃料流量 w_f を調節して、火炎の消える点、間欠爆発の始まる点、黄色火炎の出始める点を求めればよい。しかし後で述べるように燃焼器の種類によっては、その限界がぼやけることも、ちがった傾向の限界を示すこともある。

第 6 図は青色炎燃焼領域、間欠爆発領域、および黄色炎燃焼領域での燃焼状況、燃焼音、イオン電流を記録した一例である。

イオンを検出するのは火炎面の動きを捕えるのが目的であるから、火炎面と密接な関係を持つ正イオンを検出することとした。すなわち電極を負電位 -90 V に保ち、電極付近の正イオンを集め、これを $0.5 \text{ M}\Omega$ の抵抗を通して地面に流し、抵抗両端の電圧を増幅してオシロスコープに記録させた。

(1-A) 図の青色炎燃焼時には、円筒 a は着火後たちまち赤熱して 1000°C 近くなり、(1-B) 図のように燃焼音 d は激しいが、正イオン電流 e は変化せず、噴射弁近くまで火炎面は逆もどりにしないことがわかる。

この場合の円筒内の平均混合比は可燃限界内にはいって、炎は円筒外にほとんど現われない。

(2-A) 図は可燃限界の上限に近い濃い混合気が $20 \sim 30 \text{ c/s}$ と、割合早い振動数で間欠爆発を繰返す場合である。

第 4 図 実験した軽油の性質

$D=30 \text{ mm}$, $L=150 \text{ mm}$, 気孔径 $AO=4.5 \text{ mm}$

第 5 図 $L=150 \text{ mm}$ の燃焼器の混合比特性曲線

(1-A) 青色強乱流炎燃焼

(1-B) 乱流燃焼時の音響とイオン

(2-A) 短周期間欠燃焼

(2-B) 短周期間欠燃焼時の音響とイオン

(3-A) 長周期間欠燃焼

(3-B) 長周期間欠燃焼時の音響とイオン

(4-A) 黄色拡散炎燃焼

(4-B) 拡散燃焼時の音響とイオン

a: 燃焼筒, b: 青色火炎, c: 黄色火炎, d: 音波, e: イオン
 $f=1/150$ s 時印, $D=30$ mm, $L=150$ mm, 1号軽油, (原版はカラー写真)

第6図 $L=150$ mm 燃焼器の燃焼状態とそのとき発生する音響とイオン

円筒の温度は低くなり、円筒先端から青色の火炎 **b** と黄色の火炎 **c** が交互に排出され、(2-B) 図のように鋭い衝撃音 **d** と火炎面の逆もどりによるイオン **e** が記録される。

この種の振動燃焼はジェットエンジンやロケットエンジンで、しばしば発生するので、外国では多くの研究が行なわれている。

その内 *screech* や *screaming* とよばれる 1000 c/s 程度の振動数の高いものは、燃焼室との共鳴によること、*chugging* とよばれる 100 c/s 以下のものは、爆発圧とそれによる燃焼流量の変化の位相がずれ、たがいに助け合って発生されることが明らかにされた⁽²⁾。

その他、燃料の着火おくれと空気供給系との干渉によるものと燃焼室内のうずによるものとが指摘されているが、まだ研究されていないものも多い。

内部蒸発燃焼器内で起る間欠的な爆発も、これらの振動燃焼と全くちがう性格を持っているから、これらの俗語に対応して、バンピング (*bumping*) と名づける。これはバンバンという音、および英語の *bump* (爆発する) という文字をもじったものであるが、学術的には、他に類似の燃焼がみつかるまで間欠爆発燃焼とよんだほうがよいかも知れない。

(3-A) 図は 10 c/s 内外の振動数の低いバンピングを示す。青色火炎 **b** によって黄色火炎 **c** の塊が強く押出されている。

平均混合比は振動数が高い (2) 図の場合より濃くなっているが、爆発の状態は変わらない。

(4) 図は混合気が濃くなって円筒外で普通の拡散炎燃焼を続けている状態である。火炎 **c** は黄色で、燃焼音 **d** や火炎の逆もどり **e** もない。

第 6 図 (1) の青色燃焼では燃焼効率 η_b は 95~98 % となっているが、この値には円筒からの熱損失を補正していないから、補正すれば 100 % に近くなるであろう。

燃焼強度 q_b も火炎が円筒内におさまっているとみて、円筒内容積 $\pi D^2 L / 4 \text{ m}^3$ を火炎容積として計算すれば、燃料流量 $w_f = 0.3 \text{ g/s}$ 、発熱量 $E = 10\,200 \text{ kcal/kg}$ に対して

$$q_b = \frac{3.6 w_f E}{(\pi/4) D^2 L} = 1.04 \times 10^8 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}$$

と非常に高くなる。

しかしバンピングを起し、さらに黄色炎燃焼をするようになると、 η_b も q_b も急に低くなる。

4. 燃焼器の寸法の影響

第 5 図のような燃焼器の混合比特性曲線に対する燃

焼器の寸法の影響を知るため、直径と長さを系統的に変えて実験した。

まず円筒内径 $D = 30 \text{ mm}$ のまま、長さ L を 200 mm に増すと、噴霧状態や空気量をどのように変えても、円筒外においたグロープラグで着火させることはできない。

L をこれより短くすると、着火は次第にやさしくなる。

この原因を調べるため全燃焼噴霧流量 $q_f \text{ cm}^3/\text{s}$ のうち何パーセントが円筒内壁に集滴するかを調べてみると第 7 図となる。

図は燃焼を行っていないときの集滴流量 q_f' を、円筒からしたたり落ちる量を測って求めたものであるが、 $L = 200 \text{ mm}$ のときには $q_f'/q_f \approx 0.69$ すなわち約 70 % の燃料が集滴している。したがって着火時に円筒から噴出する混合気は非常に薄く着火は困難である。

これに対して長さ $L = 150 \text{ mm}$ とすれば集滴率は 52.5 % となり、噴射弁近くで最濃可燃混合気を作れば、円筒出口で最薄可燃混合比が得られることとなって着火ができるようになる。

さらに $L = 120 \text{ mm}$ とすれば集滴率は 17.5 %、 $L = 100 \text{ mm}$ とすれば、ほとんど集滴しなくなって、着火は容易である。

次にこれらの円筒燃焼器の特性を求めると第 8 図～第 11 図となる。

燃焼特性中一番重要な青色炎完全燃焼の領域、すなわち直線 1 と 2 で囲まれた領域を比較すると $L = 150 \text{ mm}$ と $L = 120 \text{ mm}$ はほとんど差がないが、 $L = 100 \text{ mm}$ 、 $L = 80 \text{ mm}$ と短くなるにつれて、領域は広まり、噴射弁から供給する混合気が濃くなり、空燃比 w_a/w_f は小さくなる。

第 7 図 $D = 30 \text{ mm}$ の燃焼筒内壁への集滴量 (無着火時)

これは円筒内で完全燃焼する部分が少なくなり、円筒外で外気中の酸素を得て燃焼する部分が多くなるためである。

$L=50\text{ mm}$ とすれば円筒内で青色炎燃焼することができず、外気中で黄色の炎をあげてめらめらと燃えるにすぎない。

したがって燃料噴霧に常温で直接着火させ、青色炎完全燃焼をさせるためには長さ L に限界があり、 $D=30\text{ mm}$ の場合には L が 150 mm から 200 mm の間

に最大限界長さがあり、 L が 80 mm から 50 mm の間に最小限界長さがある。

間欠爆発が止まり、黄色炎燃焼に移る境界、すなわち特性曲線(3)は明らかなものではなく、黄色炎燃焼に移っても長周期の爆発が消えないこともある。しかし一般に長さ L が短くなるほどバンピングの領域はせまくなり、同時に衝撃的な爆音も非常に小さくなる。

円筒の内径 D の影響はまだ広い範囲にわたって調べてないので、一般性のある結論は得られていないが、第12図は $D=40\text{ mm}$, $L=200\text{ mm}$, $L/D=5.0$ のとき、第13図は $D=40\text{ mm}$, $L=133\text{ mm}$, $L/D=3.3$ のときである。

この特性はそれぞれ $D=30\text{ mm}$, $L=150\text{ mm}$, $L/D=5.0$ の第5図と $D=30\text{ mm}$, $L=100\text{ mm}$, $L/D=$

第8図 $L=120\text{ mm}$ の燃焼器の
混合比特性曲線

第9図 $L=100\text{ mm}$ の燃焼器の
混合比特性曲線

第10図 $L=80\text{ mm}$ の燃焼器の
混合比特性曲線

第11図 $L=50\text{ mm}$ の燃焼器の
混合比特性曲線

3.3 の第 8 図とはほぼ似ており、内径が大きくなれば、長さはそれに比例して大きくしてさしつかえないことを示している。

内径 D を 30 mm より小さくすると円筒内壁への集滴量が増すので着火が困難になる。

これを防ぐため長さ L を縮めると、噴射弁の空気穴から噴出する高速の気流が十分広がり切らないうちに円筒出口から噴出するので円筒内の流速が火炎の伝ば速度以上となって吹飛び傾向が生れる。

第 12 図 $D=40$ mm, $L/D=5$ の
燃焼器の混合比特性曲線

第 13 図 $D=40$ mm, $L/D=3.33$
の燃焼器の混合比特性曲線

第 14 図は燃焼可能な最小の燃焼筒の特性で、 $D=20$ mm, $L=68$ mm である。

青色炎燃焼をする領域 1~2 はほとんどなく、強く間欠的に爆発する領域 2~3 と、黄色炎燃焼をする 3 より右の領域だけである。

しかも図の a, b 两点以上に燃料流量 w_f または空気流量 w_a を増すと吹飛びを起し、燃焼を続けることができなくなる。

したがって、この寸法が、気流噴射弁を使い、常温常圧で着火のできる円筒形燃焼器の最小のものと思われる。

以上の実験から、内径 $D=20\sim50$ mm の円筒燃焼器で、常用できる長さ L の範囲は、 $L/D=2\sim6$ で、 L/D が大きいほど円筒内で燃える部分は増し、内部での燃焼効率は高くなるが、間欠爆発する傾向も増すことがわかる。

5. 結 論

(1) 本研究はふく射加熱管(radiant heater tube)内に装備する小形の液体燃料燃焼器が製作できるかどうかを検討したものである。

(2) 気流噴射弁と円筒形燃焼筒の組合せによって内径 $D=30$ mm 程度の小形なものが製作可能で、しかも、燃焼効率 $\eta_b \approx 100\%$ 、燃焼強度 $q_b \approx 1 \times 10^8$ kcal/m³·h·atm の燃焼が可能であることがわかった。

(3) 燃焼には円筒外で燃える普通の黄色炎拡散燃焼と、円筒内で激しい燃焼音を発する青色炎燃焼と、その両者の過渡状態で起る間欠爆発燃焼の 3 種がある。

(4) 燃焼筒の長さ L が長いと青色炎燃焼の領域

第 14 図 最小な軽油燃焼器

は狭く、間欠爆発の領域は広がる。同時に青色炎燃焼の燃焼音も、爆発時に発生する衝撃波の振幅も大きくなる。

(5) 燃焼筒の長さには最大限と最小限があり、 $D=30\text{ mm}$ のものでは、長さ $L=200\text{ mm}$ になると、円筒内壁への燃料集滴量が過大となり、常温での着火が困難になる。

$L=50\text{ mm}$ となると噴射弁から噴出する微粒化用高速気流が円筒内で広がり切らない間に円筒出口から噴出するため、吹飛び現象が起り、青色炎完全燃焼は行なわれない。

一般に燃焼効率は L が長いほど高い。

以上本研究はいちおうふく射加熱管用の小形液体燃料燃焼器を対象としたものであるが、この種の考えはもちろん、少し形を変えることによって、内燃機関、ガスタービン、ジェットエンジン、ロケットエンジン内の燃焼の改良にそのまま役立つ。

著者のひとは昭和 27 年から昭和 30 年の間、日立製作所の古賀善雄氏に協力してガスタービン用の燃焼器を研究した。

燃焼器内の燃料噴霧法と二次空気導入孔の大きさと配列を改良して燃焼効率 $\eta_b \cong 95\%$ とすることができたが、燃焼強度 q_b は $2 \times 10^7 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}$ 程度で温度も軽油や重油の場合には 1400°C を越えることはまれであった(ただし使った熱電対は直径 0.6 mm

程度の太いもので火炎の局所の温度は測れなかった)。

その後内外各社のガスタービンの燃焼状態を二、三見学したが、いずれも燃焼強度が低く、満足することはできなかった。

これに対して本研究は高負荷燃焼をさせる一つの手段を与えていると思われるので、以下青色炎完全燃焼の原因となる速度こう配や乱れの作用、間欠的爆発の実体とその防止法、噴霧粒の影響、燃料の種類の影響、二次空気の導入法、燃焼筒の耐熱性の向上、などに研究を細分して、おのおのについて検討することとした。

さらに、その結果を使ってメタンから重油まで多種の燃料に適する高負荷、高効率の燃焼器を試作し、同時に各種の熱原動機内の燃焼を改良する資料を得る計画をたてた。

終りに本研究は吉岐房彦氏の努力によることが大きく、また小林昱夫、太田 穰両君の助力も得た。

実験費の一部はトヨタ自動車工業会社、三菱石油会社研究部および文部省科学研究費の援助によることを記して感謝の意を表わす。

文 献

- (1) 棚沢, 田村, *Seventh Symposium on Combustion*(1959), 509, Butterworths.
- (2) たとえば L.Crocco & J.Grey, *Proc. Gas Dynamics Symposium on Aerothermochemistry*(1956), 55, Northwestern Univ. Press.

機械工業振興賞設定

通産省ではこのほど機械工業の振興に貢献した人を表彰する機械工業振興賞の設定を正式にきめた。

その実施要領によると同賞の設定で政府が機械工業の振興を強力に推進する意味から機械工業振興協会が実施するという当初の計画をやめて、同協会を振興賞選定の機関とし、通産省が主体となって表彰することにしており、表彰は年 1 回、恒久的に実施することになっている。

被表彰者には通産大臣賞と機械工業振興協会から副賞として賞金を贈呈することになっており、第 1 回は本年 4、5 月ごろになるもようである。

実施要領大要つぎのとおり。

1. 機械工業の技術および生産の合理化に顕著な功績があり、経営の向上に貢献したとみられたものに機械工業振興賞を与える。

2. 同賞の対象者を選定するため、機械工業振興協

会に機械工業振興賞審査委員会をおく。

3. 同委員会は行政官庁の職員および学識経験者で構成し、委員は 15 名以内とする。なお、委員の選定については通産大臣の承認を得、同協会の会長が委嘱するものとする。

4. 委員会は賞の対象者の審査および調査を主体とする。

5. 賞の決定については通産省が同委員会および省内各局とよく協議したうえきめる。

6. 表彰は通産大臣が行ない、大臣賞を贈呈するほか、機械工業振興協会から賞金を与える。この賞金は特別会計でまかなう。

(いまのところ機械工業振興協会の基金 5000 万円の利子で行なう)。

7. 表彰は年 1 回行なう。(服部敏夫)