パルス燃焼器の熱発生速度に関する実験的研究*

斉藤 和夫**, Keller, J. O.***
岸 本 健****, 斎藤 俊彦**

An Experimental Study of the Heat Release Rate in the Pulse Combustor

by Kazuo SAITO, J. O. KELLER,
Ken KISHIMOTO, and Toshihiko SAITO

Heat release rate in a gas-fired pulse combustor has been measured by detecting OH chemiluminescence intensity to explain the fundamental operating mechanism of the pulse combustor. A square type pulse combustor with full optical access into the combustor was used in this experiment. The effects of changing the equivalence ratio and changing the mass flux of the reactants passing through the combustion chamber on the heat release rate as well as the combustion chamber pressure were studied in detail. Results indicate that combustion never stops under any operating condition, and this continuing combustion causes re-ignition to the next combustion cycle. It was found that the pulse combustion satisfies the Rayleigh's criterion. The effect of equivalence ratio on the oscillation energy is weak; on the other hand, the effect of mass flux is significant. For oscillation stability, under constant equivalence ratio, there exists an optimum mass flux creating an optimum mixing for this particular pulse combustor.

Key Words: Combustion, Pulse Combustor, Heat Release Rate, Pressure, Hydroxyl, Chemiluminescence, Equivalence Ratio, Mass Flux, Oscillation Energy

1. 緒 言

パルス燃焼器は家庭用や業務用・産業用の熱機器としてその経済性、コンパクト性、低公害性の面から近年特に注目されている燃焼器である。その構造は単純で、例えばヘルムホルツ形のパルス燃焼器では、主に燃焼室、その下流側に位置する尾管および燃焼室の上流側に位置する空気、燃料用の一方向弁で構成されている。パルス燃焼器は従来の連続式の燃焼器とは燃焼方式が異なり、燃焼室内で繰返される一種の爆発燃焼により生じる圧力上昇・低下を利用して、空気と燃料を吸引する自律燃焼器である。したがって起動時以外は燃焼用空気供給ファンを必要としない特徴がある。さらにその他の特徴として、高速脈動燃焼ガスによるガス側熱伝達率の向上、高負荷燃焼が可能、低 NO_x 燃焼といったメリットがある反面、騒音・振動が大きいというデメリットがある。

パルス燃焼器は決して新しい技術ではなく、1900年代初頭にフランスにおいてガスタービンへの応用が試みられている。第2次大戦におけるドイツのV-1ロケットもそのエンジン部にパルス燃焼器を利用していた。最近では省エネルギー指向を反映し、駆動源として用いるよりもむしろボイラなどの熱源として用いた場合の高効率性が注目され、1960年代にカナダにおいて家庭用ボイラに應用されて以来、米国、日本、スイスなどで次々と実用化された。

このようにパルス燃焼器は古くから知られまたすでに実用化されているにもかかわらず、その基礎的な燃焼メカニズム例えば低 NO_x 燃焼機構や火炎伝播状況などはほとんど理解されていないのが現状である。従来の研究⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾がいずれも性能試験や設計法の確立などを目的としたため、パルス燃焼器を従来の燃焼器の延長線上にとらえ、グローバルな実験的研究しか行われていなかったためである。この燃焼メカニズムの理解不足が原因で燃焼器設計上最も重要となるスケーリングや混合手段が試行錯誤的に行われており、またパルス発振のシミュレーションに関する研究でもDharら⁽¹¹⁾のように熱発生速度に関し、非現実的な燃焼モデルを使用しなければならない状況となっている。

従来の研究がグローバルな実験的研究に片寄ってい

* 昭和61年3月15日 東海支部第35期総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年9月9日。

** 正員、(株)東芝家電機器技術研究所(〒416 富士市夢原336)。

*** 米国Sandia国立研究所(Sandia National Laboratories, Livermore, CA 94550, U. S. A.)。

**** 正員、国土館大学工学部(〒154 東京都世田谷区世田谷4-28-1)。

た一つの理由は、パルス燃焼自体が持つ燃焼メカニズムの複雑さが燃焼器内部のさまざまな計測を困難にしていたためであろう。最近計測器の進歩とともに徐々にパルス燃焼器の基礎的研究が始められている⁽¹²⁾。著者らもレーザシュリーレン法による燃焼室内の流れの可視化⁽¹³⁾や、レーザドップラ流速計による流速測定⁽¹⁴⁾を行い、燃焼室内部の流動状況を明らかにした。しかしながらこれらの研究はパルス燃焼現象を本質的に理解するにはまだ十分ではない。

本研究では、パルス燃焼を理解する上でも特に重要と思われる燃焼室内の熱発生速度に注目し、これを火炎中に存在する OH 基からの化学発光を用いて測定することによって、当量比や空気と燃料の質量流束がパルス燃焼の安定性に与える影響を明らかにした。

2. 実験装置

2.1 パルス燃焼器 実験に利用したパルス燃焼器および燃料・空気供給系を図 1 に示す。燃焼器はヘルムホルツ形で主に混合室、燃焼室、尾管および空気と燃料のフラップバルブで構成されている。フラップバルブを通った燃料と空気は混合室にて混合・着火(スタート時のみ点火栓で着火)され主に燃焼室内で爆発燃焼した後、尾管を通して排気される。このとき尾管を通る高速の燃焼ガスの慣性により燃焼室内部が負圧となり、再びフラップバルブを通して新しい燃料と空気が供給され自動的に着火して同じサイクルを繰り返す。燃焼室と尾管の断面形状は正方形となっており、燃焼室内部のさまざまな光学的計測を可能にしている(燃焼室壁はすべて石英ガラスで作られている)。混合室は円筒形で、燃料と空気が互いに 60° の角度をもって混合室周壁にほぼ接線方向に流入し、混合室内部に旋回流を形成する。さらにこの混合室の上流側壁も石英ガラスの窓が備えつけられており、軸方向の光学的測定を可能にしている。燃料・空気のフラップバルブはいずれも混合室の上流約 200 mm 程度のところに

位置している。図ではレーザ流速計用のガス供給系も示されているが、本研究では利用していない。燃料流量、空気流量はいずれもソニックノズルを利用して測定した。実験は当量比と無次元化された質量流束をいずれも 0.6~1.0 程度変化させてその影響を調べた。ここでいう無次元化された質量流束とは、燃焼器内に流入する燃料と空気の質量の和を燃焼室内の断面積で割り(質量流束)、さらにそれをパルス燃焼器として標準的な質量流束(実際には $M_s = 1.0 \text{ [kg/m}^2\text{s]}$, M_s : 標準的な質量流束)で割ったものと定義した。なお、使用した燃料はメタンである。

2.2 熱発生速度測定装置 本研究では、燃焼室内の熱発生速度を測定するために、火炎内の中間生成物である励起された OH 基からの化学発光強度を検出する方法(以下 OH 化学発光測定法と呼ぶ)を用いた。OH 化学発光測定法は昼田ら⁽¹⁵⁾により考案された方法で、非定常燃焼現象のリアルタイムな熱発生速度の測定に便利である。昼田らによって、燃焼室全体での熱発生速度と OH 化学発光強度は、当量比が 0.7~1.3 の範囲において互いに比例関係にあることが確認されている。励起された OH 基からの発光スペクトルは波長 306.4 nm で近紫外に近く、他の発光スペクトルの影響を受けにくい。またそのライフタイムは Gaydon ら⁽¹⁶⁾によれば、1.5 μs と短く、たかだか 50 Hz 程度のパルス燃焼の熱発生速度の変動を測定するには十分である。測定は次の二通りの方法で行った。

- (a) パルス燃焼器内全域の測定
- (b) スリットを用いた部分的測定

図 2 に方法(a)の概略図を示す。OH からの化学発光は 304 nm を中心とし通過帯幅 60 nm を持つ光学フィルタによって選択され、光電子増倍管(PMT)によって検出される。PMT は混合室の上流端に位置した石英ガラスを通し燃焼器内のほぼ全域を見渡せるように設置されている。したがって燃焼器全体からの熱発生

図 1 パルス燃焼器と燃料・空気供給系

図 2 OH 化学発光測定装置

速度を測定することができる。方法(b)は光学フィルタの前に幅2mmのスリットを設け、燃焼室の横側つまり中心軸に対して90°の方向から測定するようになっている。これにより、燃焼室内の熱発生速度の空間分布を求めることができる。

図3は方法(a)により得られたOH化学発光強度と燃料流量との関係を示す図である。ここでは通常のパルス燃焼下で、質量流束(無次元) $M=0.9$ 一定とし、当量比を変化させた。図3からわかるように、完全燃焼していると思われる領域 $\phi=0.5\sim 0.85$ (ϕ :当量比)では両者はほぼ比例関係にあり、それより過濃側では、燃料流量によらず化学発光強度は一定値をとる。また当量比を一定にし、質量流束を変化させた場合にも、両者の間には比例関係があることが確認されている。以後熱発生速度は以上の関係をもとに、OH強度に対応する燃料流量から算出する。

方法(b)では絶対的な熱発生速度は求めず、相対的な値で燃焼室内の熱発生速度空間分布を求めた。

熱発生速度は、燃焼室内の圧力変動(圧力変換器で測定)とともにコンピュータによりサンプリングされ、解析、処理、グラフ化される。

図3 OH化学発光強度と燃料流量との関係

図4 熱発生速度と圧力の変動

3. 実験結果

図4にOH化学発光測定法の方法(a)により得られた典型的な熱発生速度の変動の様子と、そのときの燃焼室内の圧力変動の様子を示す。これより燃焼器内部には圧力変動と等しい周期を持つ大きな熱発生速度の変動が存在することがわかる。また熱発生速度は零とはならず、絶えずあるレベルを保っていることから、サイクルとサイクルの間には火炎は消滅しないことがわかる。パルス燃焼の再着火機構(スタート時以外は点火栓なしでも燃焼が継続する機構)は、燃焼器内部に絶えず存在する火炎が火種となっていることで説明できる。つまりパルス燃焼器は、間欠的に火炎が形成されるのではなく、大きな熱発生速度の変動を伴う一種の連続燃焼器であるといえる。

図5, 6は方法(b)より得られた熱発生速度の軸方向空間分布であり、それぞれ当量比 ϕ 、質量流束 M の影響を示している。熱発生速度は時間平均されたものである。当量比の影響を調べるには質量流束を0.9

図5 熱発生速度軸方向空間分布

図6 熱発生速度軸方向空間分布

一定にし、質量流束の場合は当量比を0.9一定にした。軸方向座標は混合室と燃焼室の境界を零とし、尾管側を正にとってある。また燃焼室長さは約90 mmである。図からわかるように熱発生速度のピークはいずれの場合も燃焼室内部へ18 mm程度入ったところに存在し、軸方向距離が増加するにつれて熱発生速度は減少していく。当量比を変化させてもピークの絶対値にそれほど大きな変化はないが、質量流束のほうは小さくなるにつれてピークは小さくなる。また当量比はピーク値には変化を及ぼさないが、下流側領域に影響を与えることがわかる。すなわち当量比が大きくなるにつれて燃焼室下流側の熱発生速度が増加していく、つまり反応領域が下流側に広がっていくことがわかる。これは燃焼室外部からの火炎の観察の結果とも定性的に一致する。

図7, 8は、パルス燃焼1サイクルの熱発生速度と圧力の関係をさらに詳細に調べるため行った両者のアンサンブルアベレージを示すものである。図7は質量流束0.9一定時の当量比の影響を、図8は当量比0.9一定時の質量流束の影響を示している。横軸の時間はサイクル上のある基準点からの経過時間を示し、縦軸の左側に熱発生速度を、右側に圧力のスケールをとっ

てある。ここでいう基準点とは、燃料フラップバルブ上流側の圧力変動の発振周波数に等しいAC成分だけを取りだし、その信号が正から負へ変わるときの零を基準点として定義した。本実験のパルス燃熱器の周波数は約50 Hzなので、どのプロットも20 ms前後のところで1周期分が終わっている。またどのプロットも500 サイクルの平均のアンサンブルアベレージである。圧力については代表的なもの一つを示している($\phi = 0.9, M = 0.9$)。すでに指摘したように、熱発生速度が零にならないことは、図7, 8からも明らかである。また熱発生速度の上昇は、圧力に比較して急激で、両者のピークの間には約1~2 msの位相差があることがわかる。図9, 10には図7, 8に対応する圧力のアンサンブルアベレージが示されており、両者を対応させることにより位相差が求められる。さてここで熱発生速度の傾斜に注目すると、当量比が変化しても傾斜にそれほどの変化は現れないのに対し、質量流束の場合は変化を生じる。これは燃焼器内の燃料と空気の混合状態に深く関連していると思われる。本実験のように、質量流束一定下での当量比の変化は燃焼量の変化を左右し、当量比一定下での質量流束の変化は、燃焼器内の燃料と空気の混合度を左右すると考えられ

図7 熱発生速度と圧力のアンサンブル平均

図9 圧力のアンサンブル平均

図8 熱発生速度と圧力のアンサンブル平均

図10 圧力のアンサンブル平均

る。したがって混合状態がほぼ等しいと考えられる図7での熱発生速度の傾斜はほぼ等しく、混合状態がそれぞれ変化している図8では、混合が最も悪くなる $M=0.6$ で傾斜がいちばんゆるやかとなる。また図7において $\phi=1.0$ と、 $\phi=0.9$ の間にほとんど変化がないのは、 $\phi=1.0$ における不完全燃焼によるものと思われる。図8において $M=1.0$ が欠けているのは、装置の都合上長時間に及ぶ安定したパルス燃焼が得られなかったためである。

4. 振動の安定性

Rayleigh は、周期的な熱の発生が、圧力振動と同位相かまたはある範囲内での位相差を持つ場合には、圧力振動の振幅が増幅されることを示した。この Rayleigh の条件に仕事の概念を導入し整理すれば次の自励振動の条件式が導かれる。

$$\frac{R}{C_p \bar{p}} \oint \bar{p}' q' dt > 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 R : 気体定数、 C_p : 定圧比熱、 $\bar{p}$: 平均圧力、 $\bar{p}'$: 圧力変動成分、 q' : 熱発生速度変動成分、 t : 時間、 $\oint$: 1 サイクルの積分、を示す。

式(1)の左辺は1サイクル当たりの振動に与える仕

事を示している。ここではこの振動のエネルギーについて話を進める。図11, 12はそれぞれ図7, 8のアンサンブルアベレージのデータをもとに計算を行ったもので、振動エネルギーが1サイクルの間に時間とともにどのように変化しているかを示している。振動エネルギーは、式(1)の左辺を積分しない形、 $(R/C_p \bar{p}) \cdot (\bar{p}' \cdot q')$ で求めている。図11は当量比の、図12は質量流束の影響を示している。図より明らかなようにどの場合も1サイクルについて積分を行うと正となり、Rayleigh の条件を満たしていることがわかる。図中第1の山は吸い込み過程の仕事を示しており、第2の山は膨張過程の仕事を示している。図11を見ると、当量比が振動エネルギーに与える影響は少ないのに対し、図12では、質量流束が与える影響は大きいことがわかる。つまり質量流束一定下で当量比(燃焼量)を変化させても振動エネルギーはほとんど変化せず、主に質量流束によって振動エネルギーは左右される。この当量比の影響については著者らがレーザドップラ流速計を用いた実験⁽¹⁴⁾において指摘した、当量比が流速変動の振幅に与える影響は非常に小さいという結果と一致する。一方図11, 12の振動エネルギーの谷に注目すると、第1の谷はすべての条件下で零と接しているのに対し、第2の谷はすべて零と交差し負となる。これは第1の谷、つまり膨張過程の途中で熱発生速度と圧力の位相は一致し、第2の谷では両者の位相はずれていることを示している。これはパルス燃焼特有の現象であると考えられる。

図13は、燃焼器全体での熱発生量(E_{co})に対する振動に加えられたエネルギー(E_{oc})の割合が、質量流束、当量比の変化に対してどのように変化するかを示したものである。 E_{co} は図7, 8の熱発生速度を1サイクル分時間で積分して求め、 E_{oc} は図11, 12を同様に積分して求めた。図13は、熱エネルギーが振動エネルギーに変換される割合を示すもので、この値が大きいほ

図11 振動エネルギーと時間の関係

図12 振動エネルギーと時間の関係

図13 E_{oc}/E_{co} に対する当量比と質量流束の影響

ど振動, つまりパルス燃焼が安定であるといえる。さて当量比の影響についてみると, 当量比が大きくなるにしたがい E_{oc}/E_{co} は減少していく。これは振動エネルギーが当量比に無関係に一定値であるのに対し, 熱発生量は当量比の増加とともに増加するためである。これに対して質量流束について見ると, $M=0.7\sim0.8$ の間にピークがあることがわかる。すでに述べたように, 質量流束は燃焼器内部の混合状態と密接な関連があり, ピークを持つということは, ある最適な混合状態が存在することを物語っている。つまりある一定の当量比(燃焼量)において, 最も安定したパルス燃焼が得られる最適な混合状態が存在することがわかり, 単に混合状態をよくするだけでは, パルス燃焼の安定性には寄与しないことを示している。この結果はパルス燃焼器のスケーリングにも関連し, 混合状態を左右する質量流束が燃焼器のスケールアップまたはダウンに, 一つの重要な要因となると思われる。

5. 結 言

パルス燃焼器の熱発生速度を, OH 基化学発光強度測定法により詳細に調べることににより以下のことが明らかとなった。

- (1) パルス燃焼器内部には絶えず火炎が存在し, この火炎が次サイクルの着火源になると考えられる。また内部には大きな熱発生速度の変動が見られる。
- (2) 当量比の増加に伴い, 燃焼器内部の反応領域は下流側に広がる。
- (3) 熱発生速度と圧力の間には, 膨張過程時に両者の位相が一致するという関係がある。
- (4) 振動エネルギーは, 質量流束に強く依存し, 当量比(燃焼量)にはほとんど依存しない。
- (5) 一定の当量比のもとで, 安定したパルス燃焼を得るには, ある最適な質量流束が存在する。このことはまた, パルス燃焼の安定性には, 燃料と空気の混合状態が深く関連していることを示している。

なお本研究は, 米国 Sandia 国立研究所の Combustion Research Facility において, 当研究所と(株)東芝との共同研究で得られた結果を中心に述べたものである。当時本共同研究の Supervisor であった, Dr. T. M. Dyer, 氏, Technical Staff の Dr. T. T. Bramlette, 氏の援助に感謝するとともに, 共同研究の機会を与えていただいた同研究所の Director, Dr. D. L. Hartley, 氏と, 当時(株)東芝・家電機器技術研究所所長であった岡塚尚氏に甚大なる謝意を表する。

文 献

- (1) Whitlock, D., ほか 2 名, *Proc. Sympo. on Pulse Combustion Applications*, (1982), 17-1.
- (2) Blomquist, C. A., ほか 2 名, *Proc. Sympo. on Pulse Combustion Applications*, (1982), 1-1.
- (3) Vogt, S. T., ほか 3 名, *ASHRAE Trans.*, 86, Part 1 (1980), 126.
- (4) Kolodgy, R. J., Liljenberg, G. W., *American Gas Assoc. Labs., Annual Rep.*, (1981-1982), GRI Contract No. 5080-345-0369.
- (5) Belles, F. E., Griffiths, J. C., *American Gas Assoc. Labs., Annual Rep.*, (1981), GRI Contract No. 5014-341-0112.
- (6) 久岡・ほか 4 名, 第 20 回燃焼シンポジウム前刷集, (昭 57-11), 356.
- (7) 斎藤・ほか 3 名, 第 21 回燃焼シンポジウム前刷集, (昭 58-11), 67.
- (8) 田中・斎藤, 第 22 回燃焼シンポジウム前刷集, (昭 59-11), 187.
- (9) 平沢・斎藤, 第 22 回燃焼シンポジウム前刷集, (昭 59-11), 190.
- (10) 斎藤・ほか 5 名, 機論, 51-469, B (昭 60), 3068.
- (11) Dahr, B., ほか 4 名, *Proc. Sympo. on Pulse Combustion Applications*, (1982), 4-1.
- (12) Ponizy, B., Wojcicki, S., *Fall Meeting of the Western States Section of the Comb. Inst.*, No. 82-71 (1982).
- (13) Keller, J. O., ほか 2 名, *Fall Meeting of the Western States Section of the Comb. Inst.*, No. 84-56 (1984).
- (14) Keller, J. O., Saito, K., *AIAA 23rd Aerospace Scie. Meeting*, No. 85-0322 (1985).
- (15) 埜田・ほか 2 名, 機論, 45-398, B (昭 54), 1557.
- (16) Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., *Flames* (4th Edition), (1979), 250, Chapman and Hall.

討 論

〔質問〕 伊 藤 献 一〔北海道大学工学部〕

パルス燃焼に関し知見を加えられたことに敬意を表す。

(1) OH 化学発光と熱発生速度との比例関係は, 燃料, 燃焼方法, 燃焼器の違いにより影響を受けるものと考えられる。図 3 では OH 強度の低い場合のデータが示されておらず, また, 図 7 からは $\phi=0.75$ 以上

での比例関係は認めがたく, この比例関係の成立にやや疑問が残るがどうか。

(2) 再着火機構は燃焼器内にたえず残る火炎によるとしておられるが, そうすると, 火炎維持に最小限必要な熱発生速度が存在することになる。 M あるいは ϕ に対して, このような値を求めておられたならお示し願いたい。

(3) 混合状態が、パルス燃焼の安定性に関連すると述べておられるが、具体的に混合状態のどのような点を指しておられるのか。

〔回答〕 (1) 図3における燃料流量とOH発光強度の関係を見ると、燃料過濃側でOH発光強度が頭打ちになっていることがわかる。この領域は当量比が0.85以上に相当し不完全燃焼により未燃分が排出されるため、それ以上の熱発生速度が得られなくなることが主な原因である。図7で当量比が増加するにつれ熱発生速度の変化が少なくなるのは主にこの不完全燃焼が原因であると思われる。つまり実際に熱発生速度の変化は少なくなるのであって、OH発光強度との比例関係が原因ではないと考えている。この比例関係については、図3の完全燃焼に近い領域で、燃料流量とOH発光強度との間に十分な比例関係が認められるので、OH発光強度と熱発生速度の間には当量比にかかわらずほぼ比例関係があると判断している。なおOH発光強度が低いところでは安定したパルス燃焼が得られなかったため両者の関係は求めている。

(2) 燃焼器内に絶えず残っている火炎の熱発生速

度は、それを質量流束または当量比に対して制御することが本実験装置では困難であったため、求めている。これはパルス燃焼の安定性や燃焼限界にも関連する重要な問題であるので、今後更に研究していく必要があると考えている。

(3) 混合状態が熱発生速度に与える影響を指している。Rayleighの自励振動の条件式からも明らかなように、熱発生速度の変動が圧力変動と同位相になったとき、振動に加えられるエネルギーは最大となり、より安定したパルス燃焼が得られる。本実験では図7および図8に見られるように、圧力が上昇していく領域において熱発生速度の傾きが圧力に対して急であるため、両者のピークには数msの位相のずれが生じている。この熱発生速度の傾きは燃料が同じ場合混合状態に深く依存する。つまり混合状態が良ければ急となり悪ければ緩やかとなる。したがって、両者の位相を一致させるような熱発生速度の傾きを与える混合状態を作り出すことがパルス燃焼の安定性に重要となる。