

NAL TR-955

ISSN 0389-4010

UDC 662.951.2

536.46

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-955

## 2連式バルブレスパルスバーナに関する研究

——パルス燃焼の安定機構と混合様式——

江口邦久・五味光男・黒沢要治

藤井昭一・斉藤和夫

1987年12月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 2 連式バルブレスパルスバーナに関する研究\*

——パルス燃焼の安定機構と混合様式——

江口邦久\*\* 五味光男\*\*\*\* 黒沢要治\*\*  
藤井昭一\*\*\*\* 斉藤和夫\*\*\*

### Study on Twin Valveless Pulse Burner

— Combustion stability and mixing patterns —

#### Abstract

Ensemble-averaged heat release rates and pressures inside the combustion chambers were measured to better understand the operating characteristics of a twin valveless pulse burner. The combustion flows were also visualized using a high-speed laser schlieren photography. A measurement system of OH chemiluminescence intensity and pressure transducers were used as diagnostic tools. Based on the well-known Rayleigh's criterion, the effects on the combustion stabilities of varying the equivalence ratio and the mass flux are discussed. Results show that the phase difference between heat release rate and pressure contributes significantly to the pulse combustion stability. In addition, the phase difference does not depend on the mass flux but on the equivalence ratio, indicating that the fuel/air mixing is a determinant factor in the phase relationship. This mixing process was successfully visualized on the schlieren photographs.

#### 1. 緒 言

パルスバーナは近年になって、その高効率性、高い燃焼室負荷の可能性、低NO<sub>x</sub>燃焼性などの面から注目されはじめたバーナである。そのため現在内外で家庭用の給湯器<sup>1)</sup>や暖房器<sup>2)</sup>だけでなく、産業用ボイラやガスタービン<sup>3)</sup>などに積極的な応用が図られている。またそれと平行してLDVによる燃焼室内の流速測定や計算機によるシミュレーション等<sup>4)~11)</sup>の基礎的な研究も内外で盛んに進められており、今まで以上にパルスバーナの詳細な燃焼メカニズムも

徐々に解明されつつある。

パルスバーナは、空気や燃料を間欠的に燃焼室へ供給するための一方向弁の構造によって大きく2つのタイプに分けられる。一方はフラップバルブやリード弁などの機械弁を用いる機械弁式パルスバーナ、他方は機械弁の代わりに空力弁を用いるもので、可動部がないことからバルブレスパルスバーナと呼ばれているものである。現在まで製品に応用されたり、また基礎研究の対象となっているのは主に前者の機械弁式パルスバーナで、一つの燃焼室を持つ単筒型がほとんどである。ところがこの機械弁式は実用上高周波数で往復運動する可動弁の耐久性やまた高い騒音と言った潜在的な問題点を持っている。従って、消音器の付設が不可欠であり、製品化する場合このことが大きな障害の一つとなっている。一方後者の

\*昭和62年10月26日 受付

\*\* 原動機部

\*\*\* 株式会社東芝 家電技術研究所

\*\*\*\* 航空機公害研究グループ

バルブレスパルスバーナは応用あるいは基礎研究の両面で遅れている。この理由は、機械弁に比べてその動作特性がさらに複雑化するため、系統だった設計法の確立が困難となり、またその汎用性が狭いことによるものである。しかしバルブレスパルスバーナは、上に述べた機械弁式の問題を克服できる可能性があるため実用上大いに注目されるバーナである。つまり、可動部がないためにバルブの寿命は半永久的であり、また騒音に関しても次に述べる理由で低レベルに抑えることができる。

このバルブレスパルスバーナによる低騒音化は、2つの同一形状のバーナを組み合わせて両者を逆位相で干渉させ、お互いの圧力変動を相殺させることが出来るような構成、つまり2連式にすることによって容易に達成できる<sup>12)</sup>。しかしながら2連式とすることによってその動作メカニズムはさらに複雑となり、現状では設計法はもとより基礎的なデータについても不足している。本研究の目的は2連式バルブレスパルスバーナの基礎的な動作特性を実験的に把握し、設計に有用なデータを整備することにある。本報告の内容は基礎的な動作特性の中でも特に重要となる燃焼室内部の燃焼メカニズムに注目したものである。

ほぼ一定の周期で爆発燃焼を繰り返すパルスバーナは非定常な流れをともなった燃焼器であるため、当然、燃焼室内部の燃焼プロセスや熱発生速度も連続式燃焼器のように一定とならずに、ある一定の周

期つまりパルスバーナの圧力変動に合わせて時間的に変化する。この熱発生速度の変動は、パルスバーナの振動エネルギーに直接関係するファクタであり、これがどのような動作パラメータの影響を受けるかをとらえることは、パルスバーナの基本的な動作特性を理解する上でも非常に重要なことである。ここではこの様な現象の解明のアプローチとして次に示す2つの手段を用いた実験を行った。一つは燃焼の中間生成物であるOH基の中でも励起されたOH基からの化学発光強度を測定することにより、間接的に熱発生速度を求める方法(以下OH化学発光測定法と呼ぶ)、もう一つは燃焼室内部の燃焼プロセスを視覚的に捕らえるために行ったレーザシュリーレンによる流れの可視化である。

## 2. 実験装置

### 2.1 バーナの構造

図1に本実験で用いた2連式パルスバーナの構造を示す。基本的には、幾何学的形状が同一の2つのパルスバーナ(A, B)を並列に配置し、両燃焼器を給気チャンバと排気チャンバで連結した構成となっている。各燃焼器は、円筒型の燃焼室と尾管及び空気と燃料の供給管から構成されており、空気供給管内には、流れの順方向の流量係数が逆方向のそれよりも大きな先細ノズル形状の空力弁が取り付けられている。空気は燃焼室の上流側で接続ポートから供給され、内部に強い旋回流を形成する。燃料ノズ

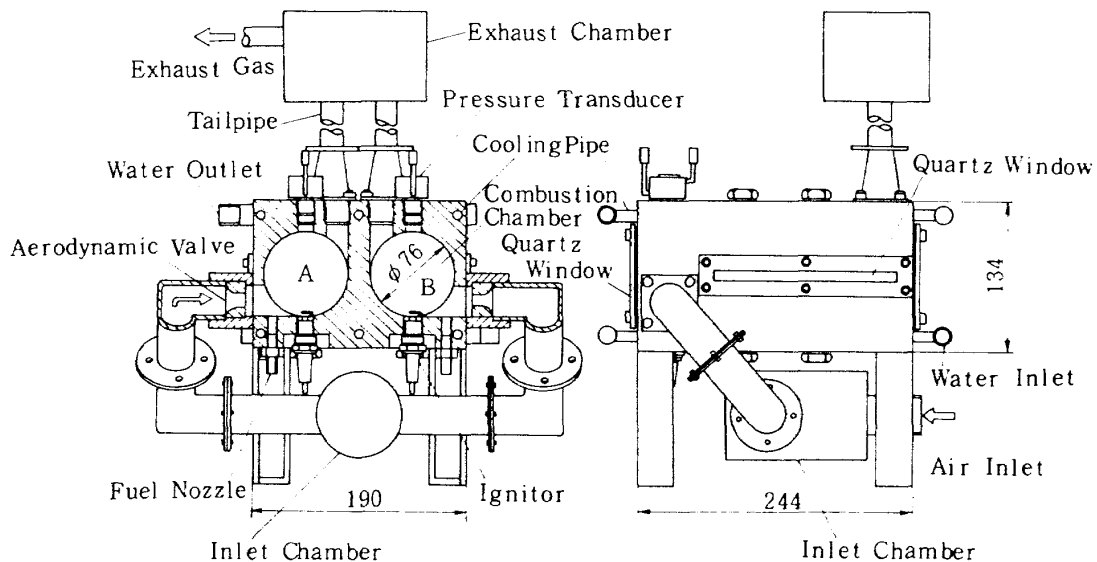


図1 2連式バルブレスパルスバーナの構造

ルは空気弁の下流側で空気供給管に対し垂直に、そして尾管は空気供給管と同様、燃焼室下流側で接続方向に設けられている。円筒形の燃焼室の両端には内部を観察することができるように石英ガラス窓（寸法  $\phi 76 \times 10^4$ ）が設けられている。両燃焼器は着火後給気及び排気チャンバで圧力が干渉し合うため自然に逆位相で動作する。そのため両チャンバ内でお互いの圧力変動が相殺するので、外部へ伝播する圧力変動つまり騒音レベルが減少する。

## 2.2 空気・燃料供給系

図2に本実験に用いた燃料、空気供給系を示す。燃料と空気の流量は、下流側の圧力変動の影響を受けにくいソニックノズルを用いて測定される。空気はソニックノズルを通過後、給気チャンバに入り空気供給管を通してそれぞれの燃焼室へと分配供給される。燃料は2つの独立した経路を通して燃焼室へと供給される。本実験では燃料として天然ガス( $\text{CH}_4$ )を用いた。ソニックノズル内の圧力は圧力変換器を用いて測定し、温度は熱電対を用いて測定する。OH化学発光法の実験では当量比( $\phi$ )と無次元化された質量流束( $M$ )をいずれも0.7~1.0程度変化させてそれらの影響を調べた。ここでいう無次元化された質量流束とは、燃焼室内に流入する燃料と空気の総

質量流量を燃焼室内の断面積で割り、さらにそれを市販されているパルス燃焼器が採用する標準的な質量流束（ここでは  $1.0 [\text{kg}/\text{m}^2 \text{s}]$ ）で割ったものと定義した。各燃焼室の動作条件はマイクロコンピュータによってCRT上にモニターされる。

## 2.3 OH化学発光測定法

図3に本実験で用いたOH化学発光測定法の実験系統図を示す。この方法は燃焼ガス中の電子的に励起されたOH基からの化学発光強度がそのときの熱発生速度に比例するという原理にもとづくものであり<sup>13)</sup>、既に機械弁式の単筒型のパルスバーナに適用されているものである<sup>14)</sup>。2連式バルブレスパルスバーナは2つの燃焼室A、Bを持つため、各々の燃焼室について熱発生速度を測定する。OH発光強度は、光電子増倍管(PMT)によって検出されるが、発光バンドである306.4 nmの光を選択するためにPMTの前に狭帯フィルタ（透過波長のセンタ：306 nm）を設けてある。PMTは各燃焼室の上流端より150mm離れた位置で燃焼室全域を見渡せるように置き、燃焼室全体から発生するOH発光量の総量を測定することができるようになっている。熱発生速度は次に示すようにOH発光強度と燃料流量の関係から求める。図4は燃焼室A内の $\phi=0.7\sim 0.9$ 、 $M=$

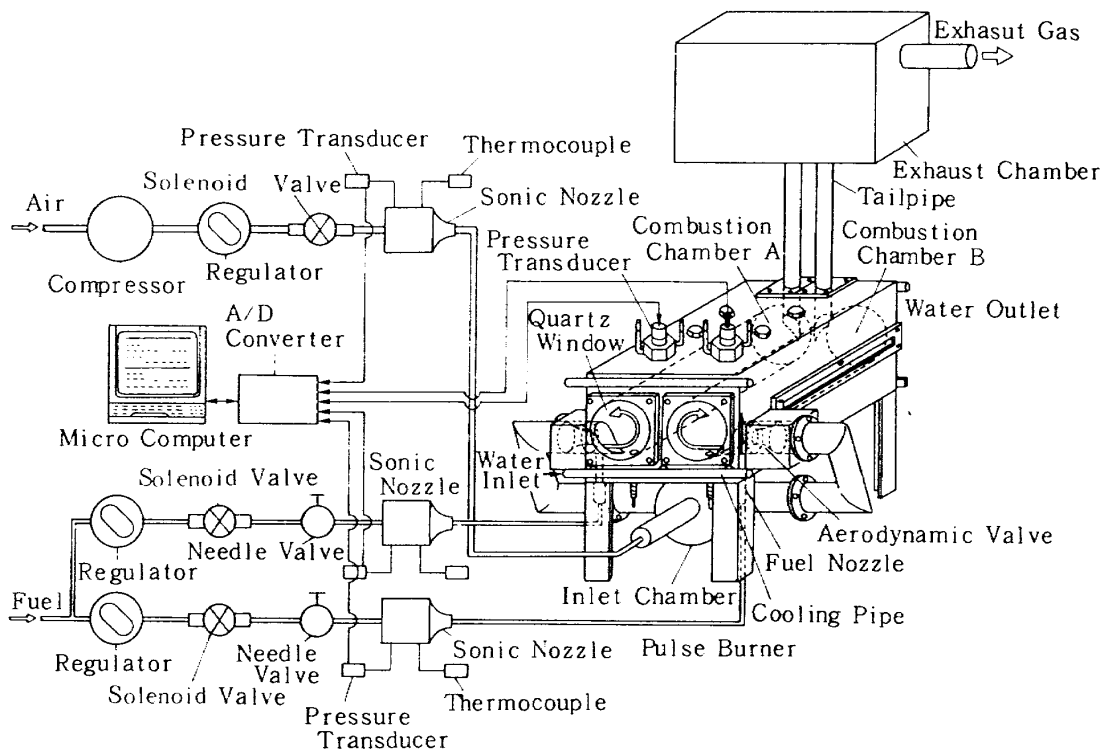


図2 燃料・空気供給系

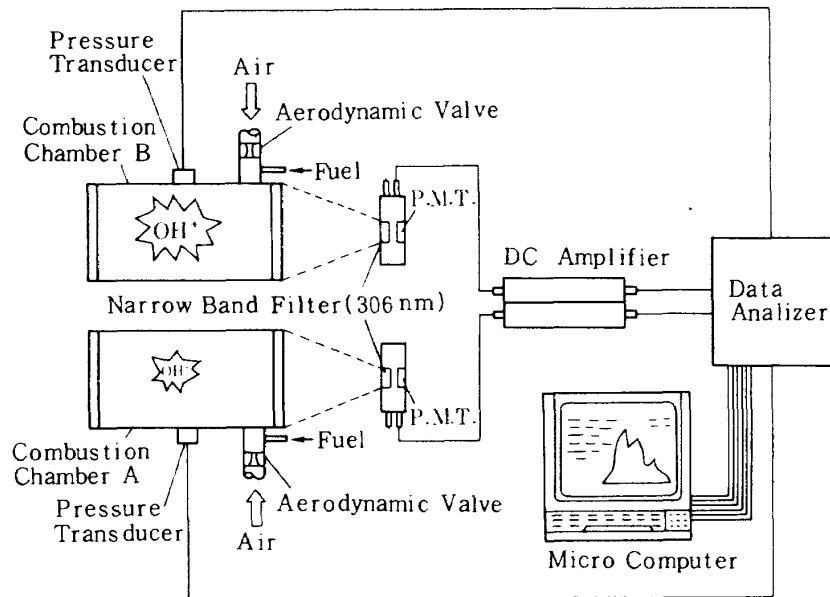


図3 OH化学発光測定装置

0.7~0.8におけるパルス燃焼時の燃料流量とOH発光強度との関係を示したものである。両者はほぼ直線的な比例関係にあり、OH発光強度から燃料流量が決定されることがわかる。燃焼室Bについても同様な結果を得ている。熱発生速度は、供給された燃料が全て熱エネルギーに変換されるとして求めた。また、それと同時に燃焼室内の圧力変動も圧力変換器によって測定され、データアナライザによって両者の相関が求められる。

#### 2.4 シュリーレン可視化装置

図5に本実験で用いたシュリーレン装置を示す。パルス燃焼は1周期が10~20msという高速で給気、爆発、排気を繰り返す非定常の燃焼現象なので、この現象に追従できる記録、再生手段と短い露出時間に見合うだけの強い光源が必要となる。ここでは高速度カメラ(ハイカム社製 400フィート型)とアルゴンレーザを組み合わせたシステムを用いて撮影を行った。シュリーレンは内部の密度変化だけを捕らえるものであり、温度の高低は判断できない。従って、本システムでは給気、爆発といった現象と対応させるために、フィルム上に燃焼室内の圧力変動を基本とするタイミングマークをつけるようにした。具体的には、燃焼室内の圧力変動のAC成分だけを取り出し、それが正から負の方向へと零を横切るときにマークを入れた。このマークを入れる時間は後

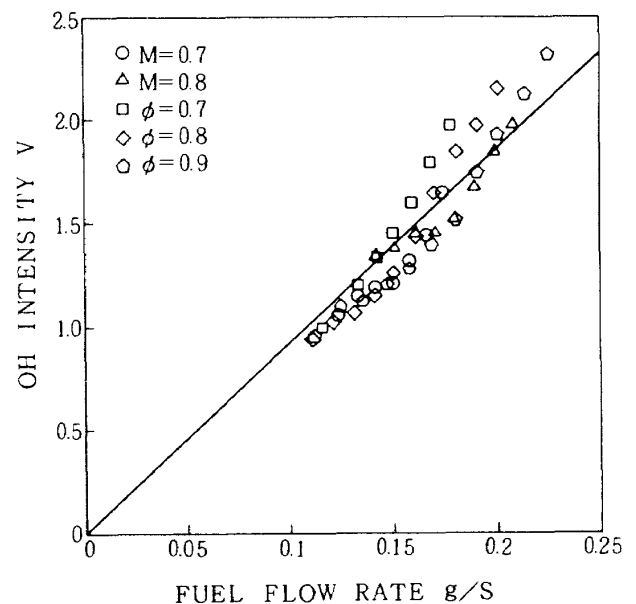


図4 燃料流量とOH化学発光強度の関係

述する熱発生速度及び圧力のアンサンブル平均の時刻零と同じである。これにより圧力との相関ばかりでなく、熱発生速度との相関も知ることができる。撮影は燃焼室Aだけの撮影と燃焼室AとBの同時撮影の2種類について行った。石英窓の熱による変形に起因する像の悪化を最小限に抑えるためどちらの場合も着火後約5~30秒の間で撮影した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 瞬間的熱発生速度と圧力変動

図6(a), (b)に同一条件における燃焼室A, B内の

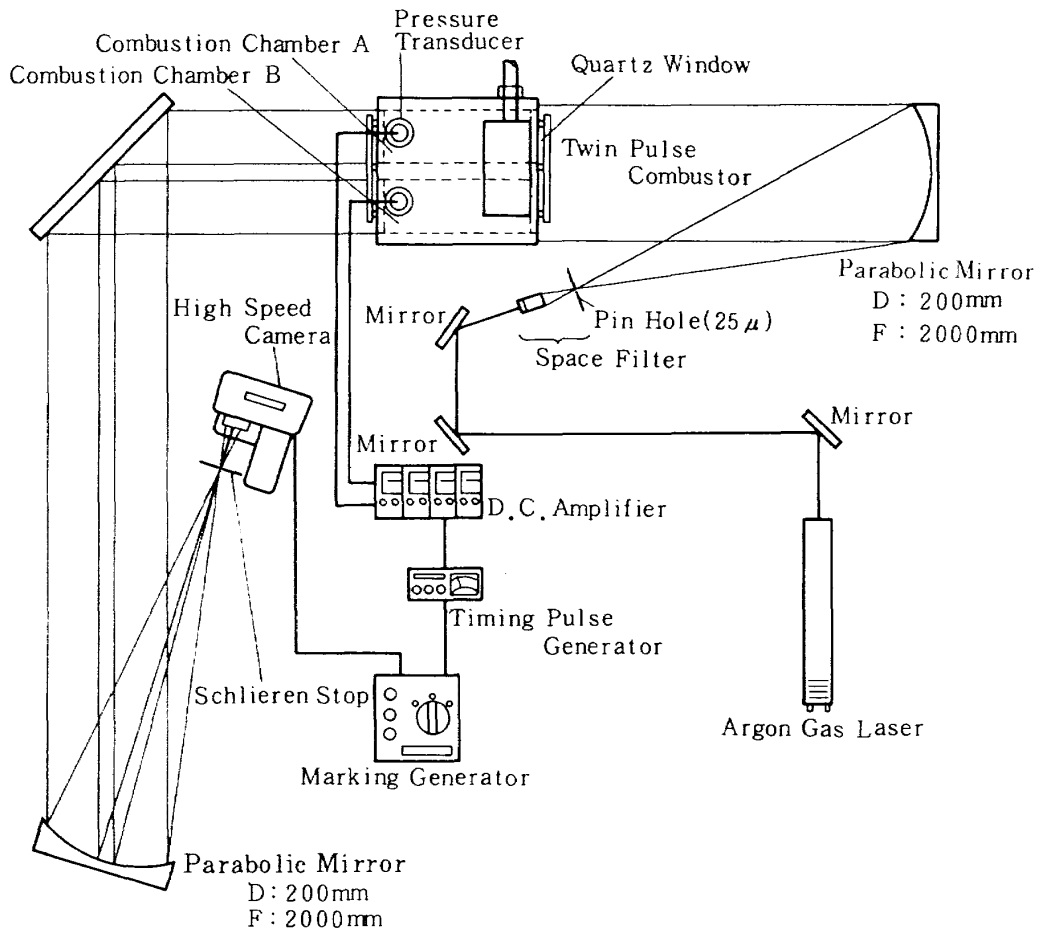


図5 シュリーレン装置

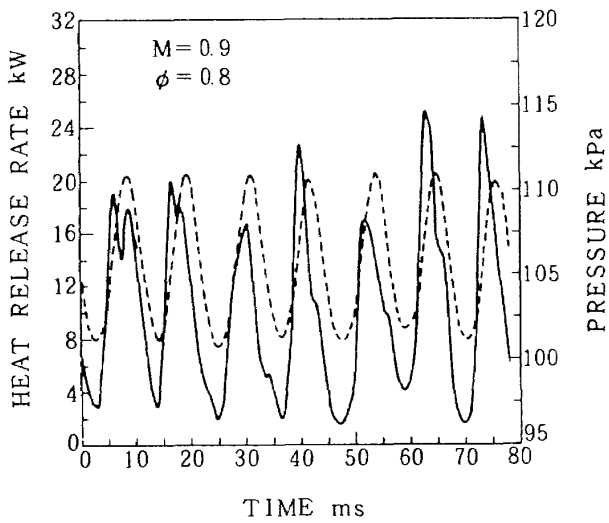


図6(a) 熱発生速度変動と圧力変動(燃焼室A)

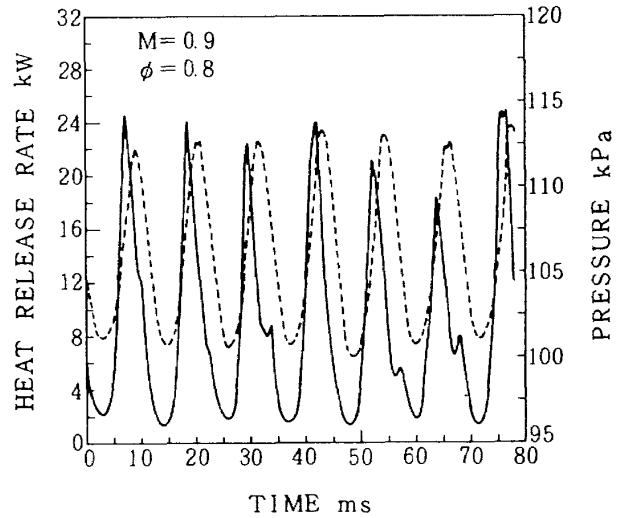


図6(b) 熱発生速度変動と圧力変動(燃焼室B)

熱発生速度変動と圧力変動のリアルタイム波形を示す。燃焼室内には圧力変動と同じ周期で熱発生速度の大きな変動が存在していることがわかる。また、熱発生速度は決して零にはならずあるオフセットを持って変動している。つまり燃焼室内では燃焼反応が一旦停止することなく、絶えず燃焼室内のどこかで化学反応による熱発生が持続している(残留火炎と呼ぶ)ことを示唆している。本バーナではこの残留火炎が次のサイクルの着火源になっていると推定できる。また図をみると安定燃焼中であっても各サイクル間のバラツキはかなり大きいことがわかる。一方圧力変動を見ると、絶えず大気圧以上で変動しているが、これは本実験バーナが強制的に空気を圧送しているためである。

### 3.2 アンサンブル平均

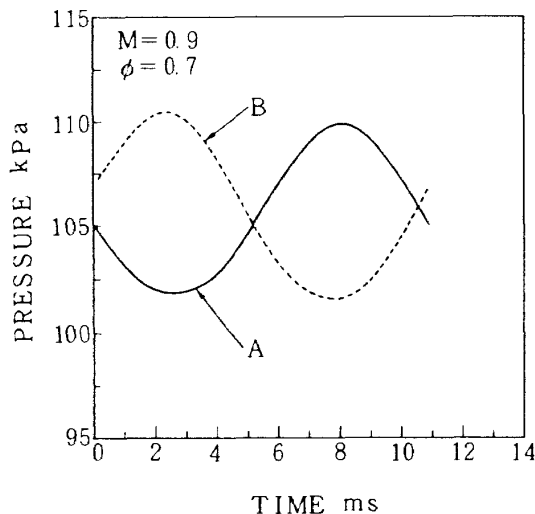


図7 圧力変動のアンサンブル平均

次に瞬間的な波形ではサイクル間のバラツキが大きいため、アンサンブル平均から動作特性の解析を進める。図7は典型的なA、B両燃焼室内における圧力のアンサンブル平均を示すものである。アンサンブル平均は、波形がほとんど変化しなくなるまでの加算平均とし、ここでは256回の平均をとった。図で横軸は前述の時刻零からの経過時間を示している。これより両燃焼器はほぼ逆位相で燃焼サイクルを繰り返していることがわかる。また条件が変化すると若干位相差は変化するが、基本的に逆位相で燃焼する。この圧力のアンサンブル平均から発振周波数と圧力振幅の平均値も求めることができ、その結果については後述する。

図8は燃焼室Aの代表的な熱発生速度と圧力のアンサンブル平均を示すものである。以後燃焼室Bに

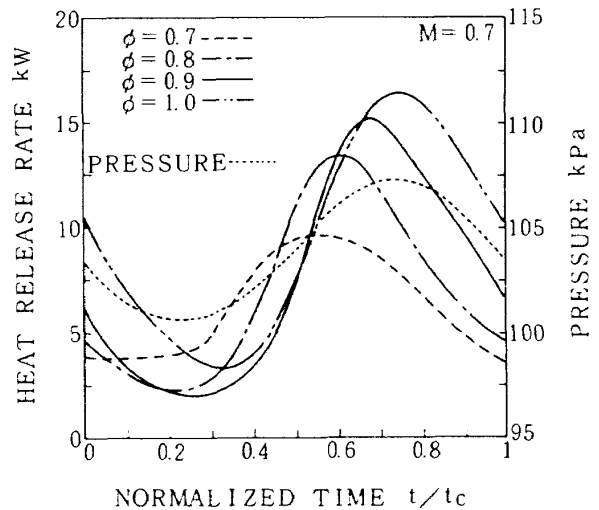


図9 熱発生速度と圧力の関係(当量比の影響)

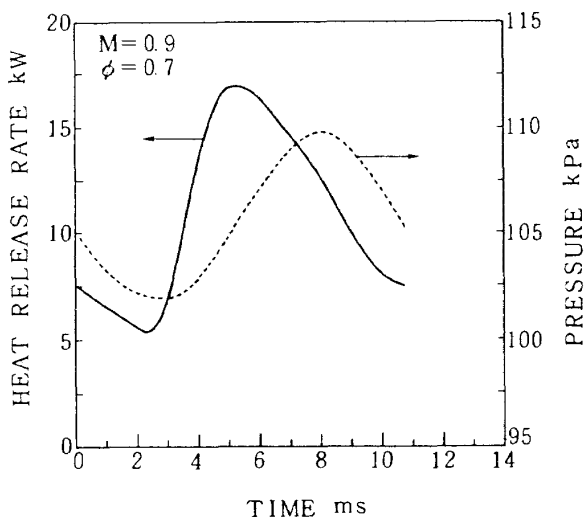


図8 熱発生速度と圧力のアンサンブル平均

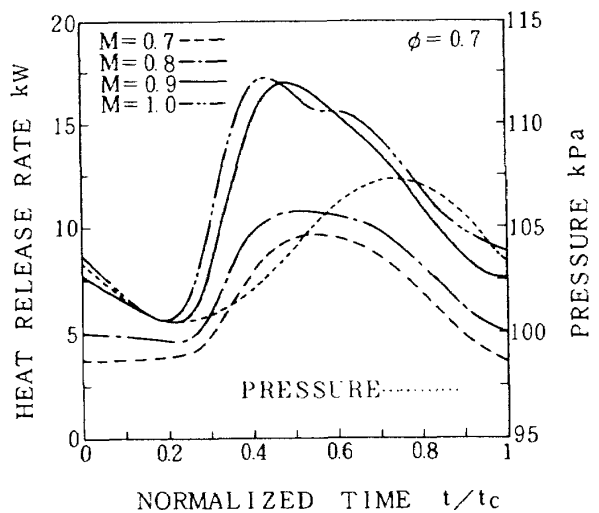


図10 熱発生速度と圧力の関係(質量流束の影響)

については位相のずれ以外 A とほぼ同様の傾向を得たので省略する。この動作条件では熱発生速度のピークは圧力のピークよりもわずかに先行している。このピークの位相差は条件によって変化し、ある条件下においては位相差がほとんどなくなる場合がある。図 9 は質量流束が一定 ( $M=0.7$ ) のとき、当量比の変化が熱発生速度と圧力の位相関係にどのような影響を与えるかを示したものである。圧力は  $\phi=0.7$  のものを代表として示した。横軸は 1 周期にかかる時間 ( $t_c$ ) で割った無次元化した値をとっている。これより、当量比が低いところでは相当大的な位相差が存在するが、当量比が大きくなるにつれて位相差は小さくなり、 $\phi=1.0$  ではほとんど両者は一致することがわかる。この傾向は、質量流束の異なる条件においてもほぼ同様である。機械弁式パルスバーナでは、両者の位相差は当量比によってそれほど大きく変化しないので<sup>11)</sup>、2 連式バルブレスパルスバーナ特有の現象であると考えられる。熱発生速度の極小値をみると当量比が増すにつれて時間的に徐々に遅れる方向へ進むことから、この原因の一つは実際に着火遅れ時間が変化していることがあげられる。着火遅れの実時間は後述する発振周波数を知ることによって求められる。但し本パルスバーナでは、反応が停止することはないので、ここでの着火遅れは熱発生速度が極小値から立ち上がる時と定義した。次に、正の傾きを持つ爆発燃焼期間に相当する領域では熱発生速度の傾きはほぼ一定であることがわか

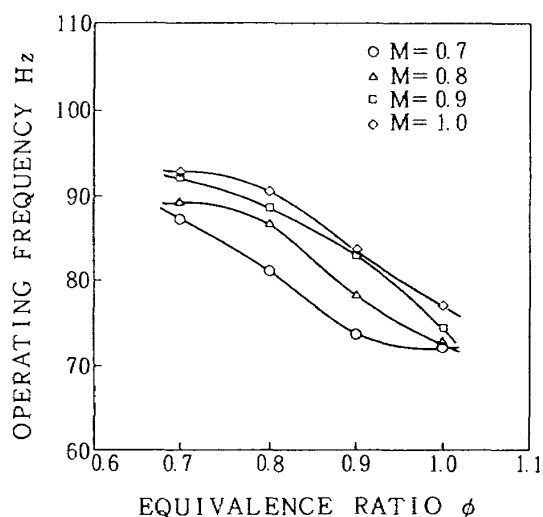


図 11 当量比と質量流束が発振周波数に与える影響

る。これに対し、図 10 は  $\phi=0.7$  一定の時の質量流束の影響を示したものである。この場合熱発生速度と圧力のピークの位相差及び着火遅れは  $M$  が一定の場合ほど変化せずむしろ若干先行きみとなる。

着火遅れの原因として一般的に考えられるのは、

- (1) 化学反応による着火遅れ
- (2) 燃料と空気の混合などの物理的要因に基づく着火遅れ

である。メタンの場合、一定圧力における化学反応による着火遅れは温度と当量比によって変化するが、図 9 の着火遅れは化学反応によるものとは逆の傾向、つまり温度及び当量比の増加とともに遅れ時間が長くなる傾向を持っている。従ってこの着火遅れは化学反応よりもむしろ(2)の物理的要因が支配的であると言える。ここでは着火する条件を満たす燃料濃度に至るまでの時間が、当量比によって左右されるためであろう。

Keller ら<sup>15)</sup>によるパルスバーナ内の詳細な着火遅れの計算によれば、メタンを燃料とした場合(1)による着火遅れは  $\phi=0.8$  で 1.2ms 程度であると予測している。実際に燃料が燃焼室に入り始めてから着火に至るまで約 2~4ms かかっており、この差が(2)に起因する着火遅れに相当すると考えられる。

さて質量流束一定下では内部の混合速度はほぼ一定と考えられるので、当量比を増加する、つまり燃料流量を増加することは燃焼領域の拡大につながり燃焼継続時間の増大を招く。これが熱発生速度のピークが当量比の増加とともに時間的に遅れてくることのもう一つの原因であると考えられる。一方当量比一定で質量流束の増加は混合速度の上昇につながるため、質量流束が増えることによって燃料流量が増加しても、短時間で混合が完了し、燃焼領域はそれほど大きくは変化しない。よって熱発生速度のピークは時間的にはほぼ一定の位置にあり、熱発生速度の大きさが増加する。

### 3.3 発振周波数と圧力振幅

図 11 に当量比と質量流束が発振周波数に与える影響を示す。発振周波数は当量比が増加するにつれて減少し、質量流束が増加するにつれて増加することがわかる。当量比と質量流束の増加はどちらも燃焼室熱負荷の増大につながり実際に温度レベルも上が



っている。ところが両者が発振周波数に与える影響は反対で、とくに当量比の増加とともに周波数が下がる傾向は従来見られなかったもので、これも2連式バルブレスパルスバーナ特有の一つの現象であると言える。機械弁式パルスバーナの場合、発振周波数がヘルムホルツ周波数によって概略予測できることから、発振周波数の増加は温度上昇にともなう音速の増加で説明できた。断熱火炎温度を基準とする概略のヘルムホルツ周波数は、当量比を0.7から1.0へと増加させると、80Hzから85Hzへと増加する。ところが本バーナの場合、温度レベルの上昇が当量比の増加による場合には発振周波数の低下を招き、従来の経験則がそのまま適用できないので、設計上充分注意を要する。

図12は圧力振幅に対する当量比と質量流束の影響を示すものである。全体的な傾向としては、当量比が上がるほどそして質量流束が上がるほど、つまり燃焼室熱負荷が上がるほど圧力振幅は上昇する。これは従来の機械弁式のパルスバーナにもみられた典型的な傾向と同じである。ただし、質量流束が0.7または0.8と小さく、当量比が1に近づくと振幅は減少する。これは主に燃焼反応の未完了による燃焼効率の低下が原因と考えられる。

### 3.4 発振の安定性

パルス燃焼は一種の振動燃焼であり、燃焼器で発生する熱エネルギーの一部が振動エネルギーに変換されることによってパルス燃焼が継続すると説明できる。従って、発生エネルギーの全量に対する振動エネルギー

の割合が大きいほど振動は強く、安定した発振が得られると考えられる。Rayleighは、圧力変動と同位相かまたはある範囲内の位相差を持つような周期的な熱の発生によって、圧力変動の振幅が増幅されることを示した。このRayleighの条件に熱力学的な「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。

$$\frac{R}{C_p \cdot \bar{p}} \oint (q(t) - \bar{q}) \cdot (p(t) - \bar{p}) dt > 0 \quad (1)$$

ここで、 $R$ ：気体定数 [J/kg K]、 $C_p$ ：定圧比熱 [J/kg K]、 $\bar{p}$ ：平均圧力 [Pa]、 $p(t)$ ：燃焼室内圧力 [Pa]、 $\bar{q}$ ：平均熱発生速度 [kW]、 $q(t)$ ：燃焼室内熱発生速度 [kW]、 $t$ ：時間 [s]、 $\oint$ ：1サイクルの積分を示す。

(1)式の左辺が1サイクル当りの振動に与えられる仕事を示す。ここでは実験から得られたアンサンブル平均の $p(t)$ 、 $q(t)$ を用いて、(1)式を積分せず振動エネルギーの時間的変化を各条件について計算した。図13は $M=0.9$ 一定における当量比の変化が振動エネルギーに与える影響を示したものである。横軸には無次元化した時間をとってある。図中最初のピークは吸い込み時の仕事を示し、次のピークは膨張時の仕事を示している。どの条件においても時間で1サイクル分を積分すれば正となり、Rayleighの自励振動の条件を満たすことが明らかである。膨張時の仕事量は吸い込み時の仕事量よりも大きく、また振動エネルギーは当量比が増加するにつれて増加することがわかる。これは熱発生速度と圧力変動の振幅

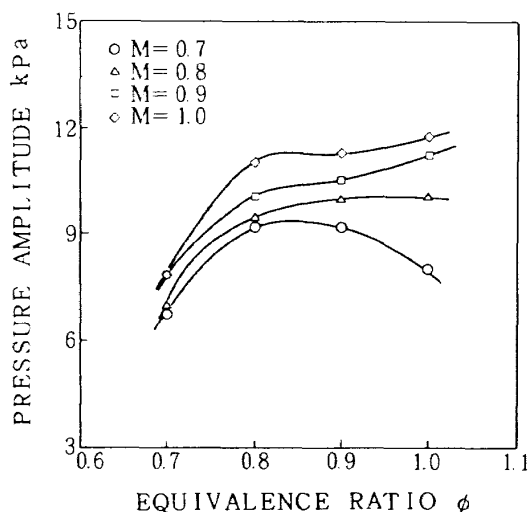


図12 当量比と質量流束が圧力振幅に与える影響

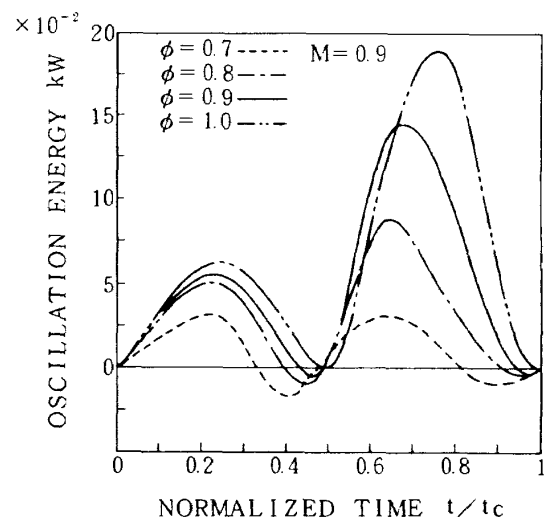


図13 当量比が振動エネルギーに与える影響

が増加することと、両者の位相が徐々にあってくるためである。これに対し、 $\phi = 0.9$ 一定の時の質量流束の変化が振動エネルギーに与える影響を図14に示す。この場合は燃焼性の悪い $M = 0.7$ を除いてそれほど明確な差は現れてこない。

パルス燃焼の振動の安定性を論じるにはただ振動エネルギーの絶対値を比較するだけではなく、全熱発生エネルギー（燃料の熱発生量）に対する振動エネルギーの比、すなわち振動エネルギーの変換割合を求める必要がある。変換割合は、次式で求められる。

$$\frac{E_{oc}}{E_{total}} = \frac{f \cdot R}{C_p \cdot \bar{p}} \frac{\int (q(t) - \bar{q}) \cdot (p(t) - \bar{p}) dt}{f \cdot \int q(t) dt} \quad (2)$$

ここで、 $E_{oc}$ :振動エネルギー[kW]、 $E_{total}$ :全流入エネルギー[kW]、 $f$ :発振周波数[Hz]である。

図15は当量比が振動エネルギー変換割合に与える影響を示し、図16には質量流束が与える影響を示している。図15から変換割合は当量比の増加とともに増加することがわかる。これは図13で示した2つの要因のうち主に熱発生速度と圧力変動の位相があってくることによるものである。ただし質量流束が低いところでは当量比が1になると燃焼性の低下によって生じる減少が見られる。これに対し、図16では変換割合は質量流束に対しほぼ一定値を取る傾向を持つ。但し、 $\phi = 1$ において他の条件とは変わった傾向を持つが、これはやはり燃焼性の悪化がなんらか

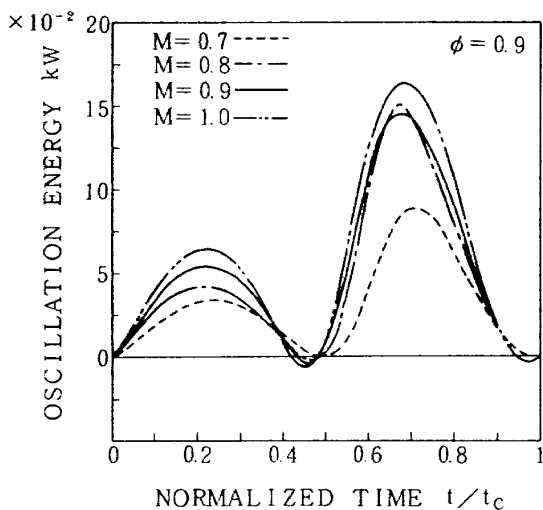


図14 質量流束が振動エネルギーに与える影響

の原因で生じると考えられる。以上より、振動の安定性は熱発生速度と圧力の位相差に依存し、本バーナの場合はこの位相差が当量比に大きく依存することがわかる。

### 3.5 燃焼プロセスの観察

図17は燃焼室Aの撮影結果である。表1に撮影条件を示す。像は燃焼室上流側から軸方向に撮影したもので、燃料ノズル及びエアロダイナミックバルブとの位置関係は図18に示されている。各コマの横の数字はタイミングマークからの経過時間を示している。ここでは1周期が17ms（約60Hz）とこの動作条件における定常時のもの（12ms）に比べてかなり長い。これは着火後まだ間もなく温度レベルが低いためである。フィルムを映写機等で連続的に観

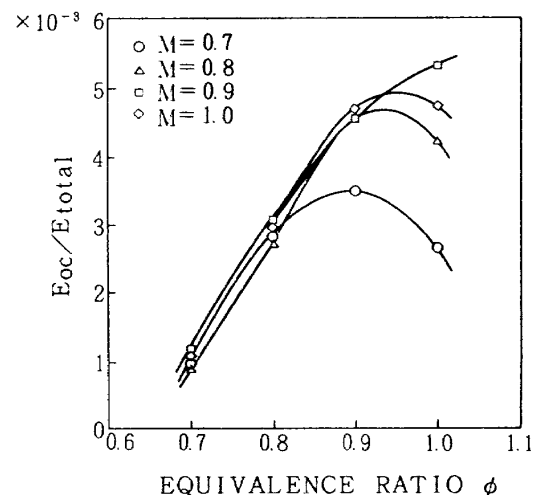


図15 当量比が振動エネルギー変換割合に与える影響

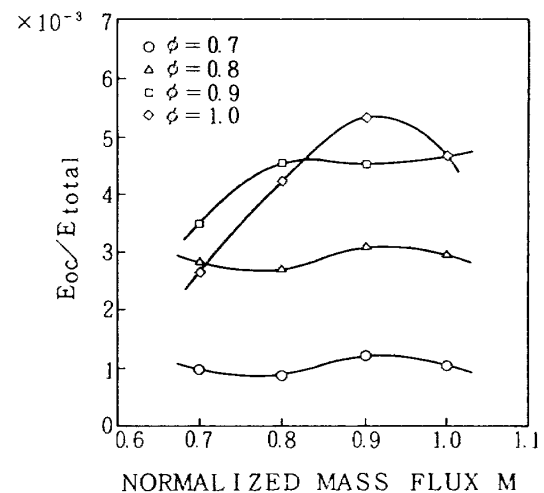


図16 質量流束が振動エネルギー変換割合に与える影響

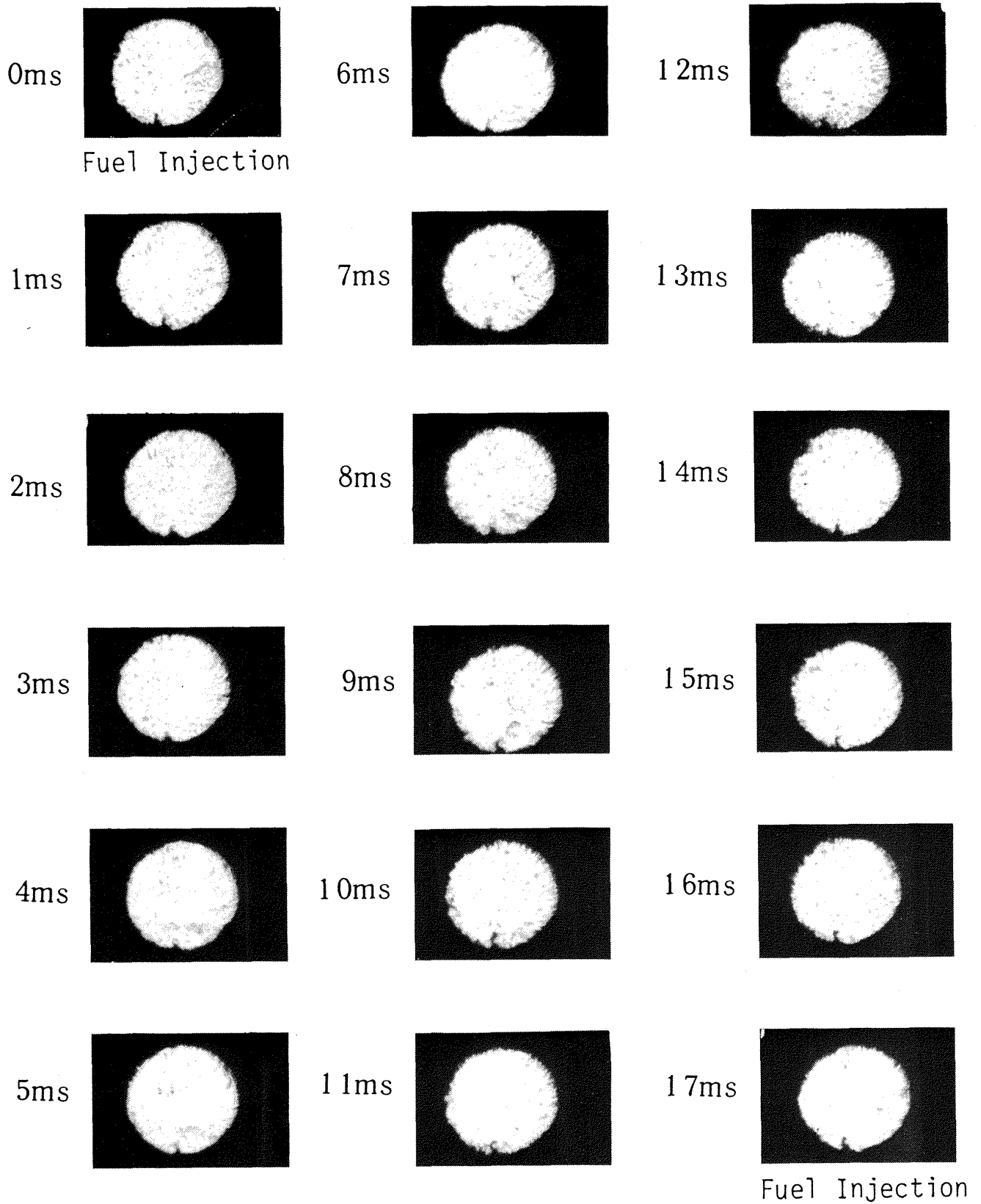
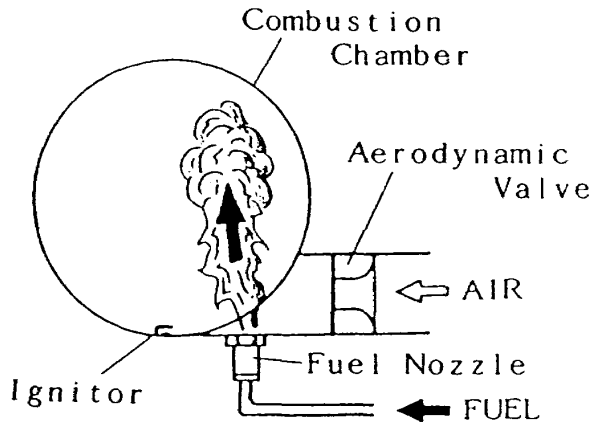
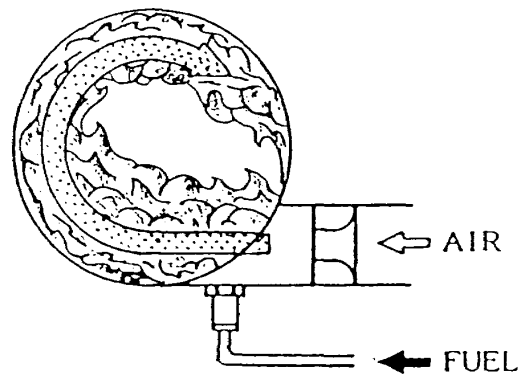


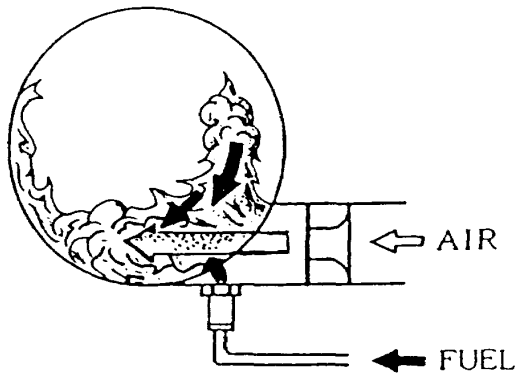
図 17 シュリーレン撮影結果 ( 燃焼室 A )



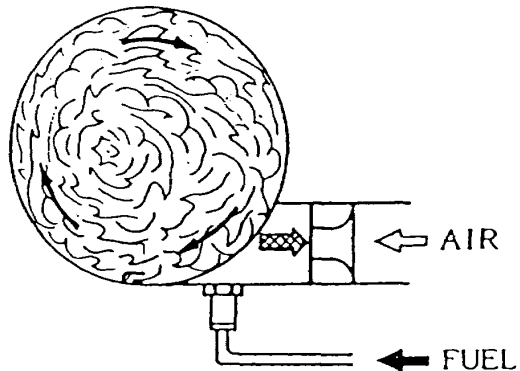
(a) 0ms:  
Fuel injection



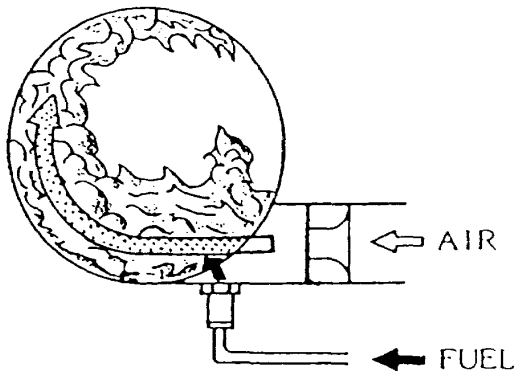
(d) 8ms:  
Reaction in progress



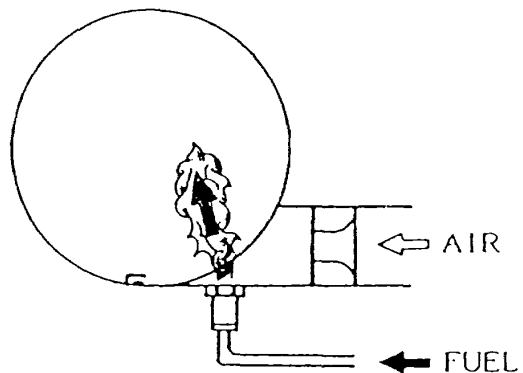
(b) 3ms:  
Mixing by  
air injection



(e) 10ms:  
Most-activated  
reaction



(c) 6ms:  
Reaction initiated



(f) 17ms:  
Quiescent period/  
Re-injection of fuel

図 18 燃焼プロセスの概要

表1 シュリーレン撮影条件

Equivalence Ratio	0.8
Mass Flux	0.7
Camera	Hycam High Speed Camera
Film	16mm, 100ft Ektachrome 7251
Speed	5000 pps
Laser	4W Argon Ion Laser
Laser Output	0.15W

察するとガスの流動状況が詳細にとらえられるが、この様に静止画像にすると流れの動きがよくわからないので図18に模式的なスケッチを示す。以下図18に基づいて1サイクルの現象を説明する。

0 ms (a)：燃料噴射。比較的静的な空間へ燃料が燃料ノズルより噴射される。噴射方向は全体的な旋回流れ方向とは逆向きである。

3 ms (b)：空気の噴射による燃料と空気の混合。燃料噴流中に空気が噴射され燃料との混合を始める。初期に噴射された燃料は、全体の旋回流れと空気の噴流によるエントレメントによって空気流に取り込まれ、空気の噴射中に噴射された燃料は直接空気の噴流に取り込まれ混合する。

6 ms (c)：反応が始まる。燃料と空気は流入を続け燃焼室内は徐々に可燃混合気で満たされる。また新たに流入した混合気の反応が始まる。

8 ms (d)：反応の進行。燃料と空気の噴射はほぼ完了し、燃焼室全体が強い旋回をともなって混合気で満たされ反応が進む。

10 ms (e)：急速燃焼。燃焼室全体にわたって急速に反応が進行し、旋回流は一層加速されその流速は最大となる。燃焼室内は強い乱れをともなって旋回する。

17 ms (f)：静的期間と燃料の再噴射、急速燃焼後に訪れる静的な空間に燃料が再び噴射される。旋回流は弱くなっており、そ

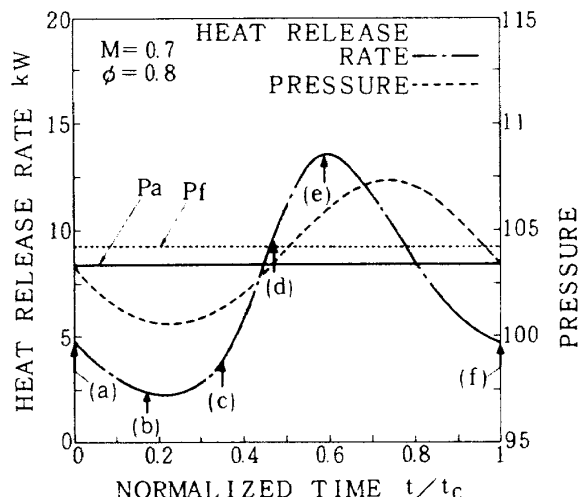


図19 燃焼プロセスと圧力及び熱発生速度との対応

の動作は完全に止まらない。

以上燃焼サイクルは、(1) 0～2 ms：燃料噴射期間、(2) 2～6 ms：空気、燃料噴射混合期間、(3) 6～10 ms：急速燃焼期間、(4) 10～17 ms：静的期間と大きく分けられる。さてこれらの現象が圧力変動及び熱発生速度変動とどのような相互関係にあるかを述べる。特に熱発生速度との比較は、上で述べた現象の説明の裏付けとなる。図19はOH化学発光測定法による1サイクル内の燃焼室内圧力と熱発生速度を示すものである。但し横軸は時間を1周期の時間で割った無次元化した時間を示している。空気の噴出は燃焼器内の圧力がその平均圧力よりも低いところで起こる。またここでは平均の燃料供給圧(Pf)は空気の供給圧(Pa)よりも高い。質量流束一定下での当量比の変化はPfの変化であり、燃料と空気の噴射のタイミングをずらすことにつながり、当然混合過程が大きく異なってくると予測できる。図中矢印はそれぞれ既に述べた図18の(a)～(f)に相当する現象が起こっている時刻である。燃料の噴出時(a)ではまだ熱発生速度は極小値となっておらず、空気の噴出が始まる(b)付近で極小値をとることがわかる。(c)付近で熱発生速度は正の傾きとなり(再着火)(d)で傾きが最大となる。もっとも反応が活発であると考えられた(e)では極大値をとることが明かとなり、ここでの活発な反応を裏付けている。静的期間は主に熱発生速度が負の傾きとなる期間に相当する。

図20に2つの燃焼室を同時に撮影した結果を示す。

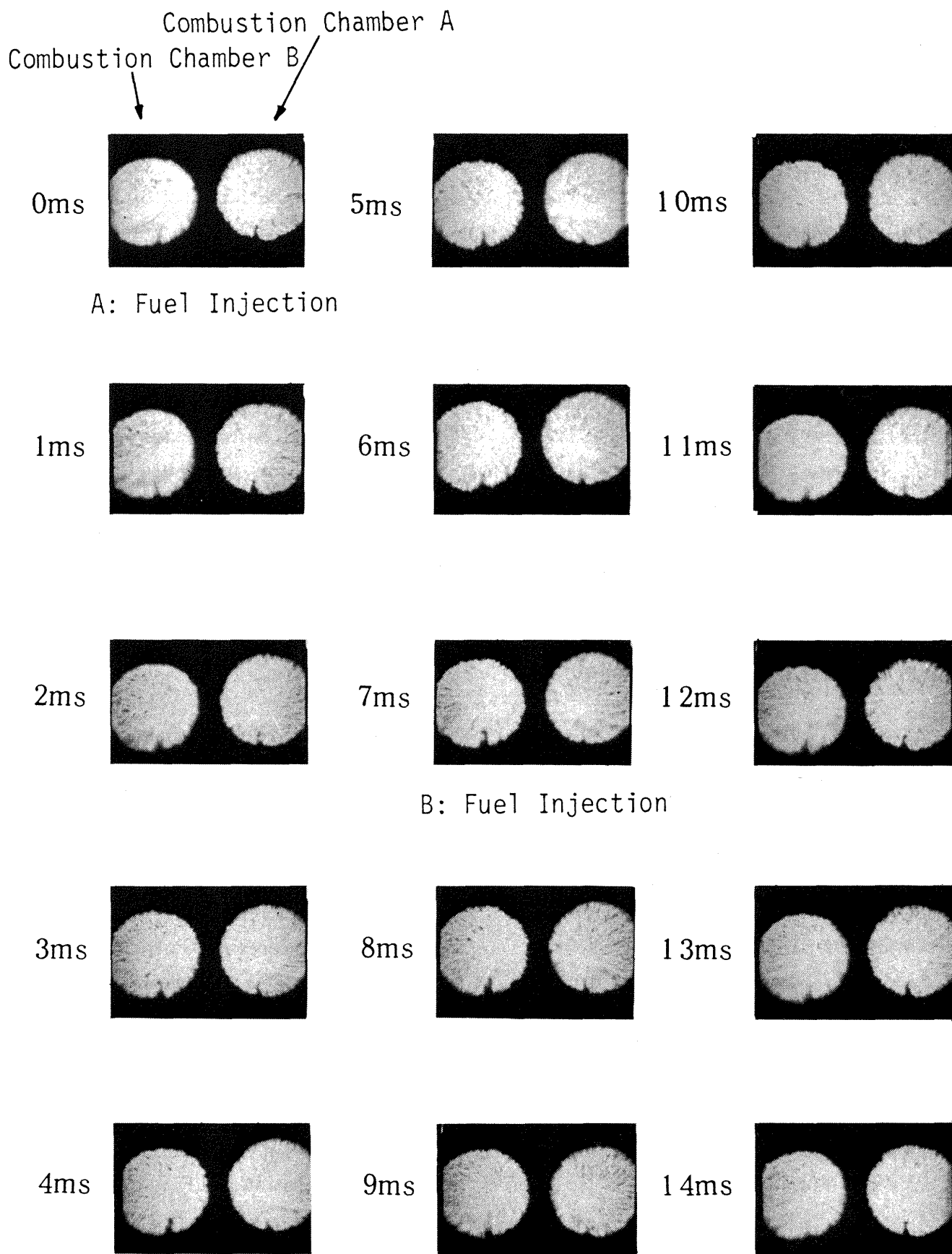


図 20 シュリーレン撮影結果 ( 燃焼室 A & B )

図18と同様各コマの左の数字は基準時刻からの経過時間であり、燃焼室Aを基準としている。撮影条件は燃焼室Aの場合と同じであるが、着火後撮影までの時間が若干長いためコントラストが悪く、また1周期は14msとなり周波数は71Hzとやや高くなっている。各燃焼室の燃焼サイクルは図18と同様であるが、圧力変動や熱発生速度測定結果から予測される通り、両燃焼室は互いに逆位相で動作していることがわかる。

#### 4. ま と め

2連式バルブレスパルスバーナの燃焼室内の熱発生速度と圧力変動の詳細な測定及び流動状況の可視化により、以下のことが明らかとなった。

(1) 熱発生速度の変動は圧力変動と同周期で生じ、かつそのサイクルの極小において熱発生は継続する。この熱発生の継続は、サイクル間の着火源となる残留火炎と見なすことができる。

(2) 熱発生速度と圧力の位相差は、当量比に依存するが、質量流束の影響は受けない。この位相関係を決める重要な因子は、燃料と空気の混合の速度である。

(3) 発振周波数は質量流束の増加とともに増加し、当量比の増加とともに減少する。この事実は従来の単筒型機械弁式パルスバーナにはみられない現象である。

(4) パルス燃焼の安定化には振動エネルギーの変換割合を増加させる必要があり、その有効な一つの手段は熱発生速度と圧力の位相差を少なくすることである。

(5) 燃焼室内部の流れは空気の噴射による旋回流が支配的であり、その旋回速度は急速燃焼期間で加速され最大値となる。

(6) 燃料と空気の混合は、空気噴射以前に噴射した燃料は空気噴流による燃料のエントレメントにより、その後は空気噴流への燃料の噴射によって達成される。

なお、本研究は(株)東芝との共同研究の一環として実施されたものである。今回の実験を進める上で国士舘大学の岸本研究室には多大なる協力を頂いた。

#### 参 考 文 献

- 1) E. A. Lawton, L. Irwin, A. Lawler ; Development of a Gas-Fired Pulse-Combustion Commercial Water Heater, Proc. Sympos. on Pulse Combustion Applications, 1982, pp.19.1-19.10
- 2) C. W. Adams ; Performance of the Lennox Pulse Combustion Furnace Field Trials, Proc. Sympos. on Pulse Combustion Applications, 1982, pp.18.1-18.7
- 3) J. A. C. Kentfield, P. Verneni ; Pulsating Combustion Applied to a Small Gas Turbine, ASME paper 85-GT-52
- 4) J. O. Keller, K. Saito ; Measurement of the Combusting Flow in a Pulse Combustor, Combustion Science and Technology, Vol. 53, 1987, pp.137-163
- 5) J. O. Keller, K. Saito ; An Experimental Investigation of an Unsteady Combusting Flow in a Pulse Combustor, AIAA paper 85-0322
- 6) H. A. Dwyer, T. T. Bramlette, J. O. Keller, B. R. Sanders ; A Numerical Model of a Pulse Combustor, 1985 Spring Joint Technical Meeting of the Central States and Western States Section of the Comb. Inst., paper WSS/C15-2B
- 7) C. K. Westbrook ; Successive reignition of Fuel-Air Mixtures and Pulse Combustion, presented at the Fall Meeting of the Western States Section of the Comb. Inst., Davis, CA. 1985
- 8) D. Reuter, B. R. Daniel, J. Jagoda, B. T. Zinn ; Periodic Mixing and Combustion Processes in Gas Fired Pulsating Combustors, Combustion and Flame, Vol.65, 1986, pp.281-290
- 9) 大岩, 山口, 長谷川, 秦, 岡田 ; パルス燃焼に関する実験的研究, 日本機械学会論文集 (B編), 52巻, 476号, 昭和61年4月, pp.1913-1922
- 10) 辻本, 町井 ; パルス燃焼バーナの理論解析, 燃

- 焼研究, 第70号, 昭和60年, pp.15-53
- 11) 齊藤, 平沢, 斎藤; 小形パルスバーナの研究—  
NO<sub>x</sub> 排出特性について, 第23回燃焼シンポジ  
ウム講演前刷集, 昭和60年, pp.79-81
- 12) 岸本; 双パルス燃焼器の低騒音化, 第23回燃  
焼シンポジウム講演前刷集, 昭和61年, pp.725-  
727
- 13) 昼田, 小泉, 岸本; 管形燃焼室における燃焼振  
動の強さの実験的予測に関する研究, 日本機械  
学会論文集, 45巻, 398号, 昭和54年10月,  
pp.1557-1564
- 14) 齊藤, J.O.Keller, 岸本, 斎藤; パルス熱焼  
器の熱発生速度に関する実験的研究, 日本機械  
学会論文集(B編), 52巻, 479号, 昭和61年  
7月, pp.2722-2728
- 15) J.O.Keller, C.K.Westbrook; Response of  
a Pulse Combustor to Changes in Fuel  
Composition, presented at the 21st Inter-  
national Symposium on Combustion,  
Munich, West Germany, 1986



---

## 航空宇宙技術研究所報告955号

昭和62年12月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7-44-1  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊦182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山5-6-17

---

**Printed in Japan**