

NAL TR-973

ISSN 0389-4010
UDC 662.951
536.46
536.462
621.375.826

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-973

2連式バルブレスパルスバーナに関する研究

——パルス燃焼時の温度分布特性——

江口邦久 黒沢要治 五味光男
斉藤和夫

1988年4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*

——パルス燃焼時の温度分布特性——

江口邦久** 黒沢要治*** 五味光男****
斉藤和夫*****

Study on a Twin Valveless Pulse Burner (Temperature Characteristics during Pulse Combustion)

Abstract

Detailed temperature profiles in a twin valveless pulse combustor have been measured using a simplified CARS (coherent anti-Stokes Raman spectroscopy) technique to understand the fundamental pulse combustion process for burner design purpose. Time- and ensemble-averaged temperatures in the combustion chamber were obtained from a constant 20Hz data sampling and a phase locked data sampling, respectively. The CARS method successfully offered a near-real-time, non-intrusive temperature measurement system with high spatial and time resolutions. Results show that very large temperature oscillations of up to 600K exist near the wall upstream of the combustion chamber, while stable and homogeneous temperature regions were created in other regions. The maximum temperature was found to be lower about 200 to 400K than the adiabatic flame temperature. From a comparison of one-cycle ensemble data between temperature and heat release rate, there observed a similar tendency, this indicating that fuel-air mixing rate affects significantly the ignition delay time during pulse combustion as described previously.

1. 緒 言

パルスバーナは従来の連続式燃焼器とは異なった周期的な非定常燃焼を特徴としている。パルスバーナ特有の低いNO_x排出, 高い燃焼負荷, 高い熱伝達効率はまさにこの周期的な燃焼方式が主要因であるといえる。現在までパルスバーナの燃焼メカニズム

をとらえるために燃焼室内部の様々な測定が行われてきた。Laser Doppler Velocimetryによる流速分布の測定⁽¹⁾⁽²⁾, OH化学発光強度測定法による熱発生速度の測定⁽⁸⁾⁽⁴⁾, Laser Schlierenによる燃焼ガスの流れの可視化⁽⁵⁾⁽⁶⁾, イオンプローブを用いたイオン電流の測定⁽⁷⁾等によってその現象の解明は大きく進展してきた。著者らも低騒音化を狙った2連式バルブレスパルスバーナの基本的な動作特性の把握を目的に, OH化学発光法を用いたパルス燃焼の安定性に関する考察⁽⁸⁾を行った。しかしながら燃焼現象を解明する上で一つの重要なファクタとなる局所的な温度変動に関しては測定された例が極めて

*昭和63年 4月 4日 受付

**宇宙研究グループ・原動機部併任

***原動機部

****熱流体力学部

*****株式会社東芝・家電技術研究所

少ない。これは燃焼室内部の温度変動が、パルス燃焼の高い発振周波数と同周期でしかも大きく変動するために、従来の熱電対プローブを用いた方法では、その応答性の限界から高い精度を期待できない。熱電対の時間遅れを1次遅れと仮定し、時定数を補償する方法によって応答性の高い測定を行った例がある⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかし、この方法でも時定数を一定と仮定しなければならず、パルスバーナのように内部の燃焼ガスの流速が大きく変化するため、時定数そのものが時間的にも空間的にも変化してしまうような流体温度の測定にはどうしても測定精度に限界がある。またパルス燃焼は本質的に脈動を伴ったものであり、熱電対の挿入がその上流側の流れ場を乱してしまうことも避けられない事実である。

最近、レーザによる燃焼ガス中の温度計測技術が急速に進歩し、比較的手軽に非接触でしかも時間的そして空間的に高い分解能での温度測定ができるようになった。Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS) はその代表的なものの一つであり、信号となるCARS光が非常に強く、高いS/N比が得られることから、レーザ計測法の中でも最も注目されているものである。本研究の目的は、CARS法を2連式バルブレスパルスバーナの燃焼室

内の温度測定に適用し、非定常場での温度測定の可能性を明らかにすると共に、時間平均温度分布とアンサンブル平均温度を求めパルス燃焼特有の温度の変動場を明らかにし、2連式パルスバーナの燃焼メカニズムを解明するための基礎的データの蓄積を行うことである。

2. 実験装置

本実験で用いた2連式バルブレスパルスバーナ及びその燃料と空気の供給系統を図1に示す。燃焼器は同一形状にある円筒形の燃焼室と尾管を有する2つのバルブレスパルスバーナを並列に配置したもので、両バーナ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。空気は燃焼室の上流ポートから接線方向に供給され内部に強い旋回流を形成する。燃焼室両端部にはCARS測定のために、石英ガラス窓が設けられている。詳細は文献⁽⁸⁾で述べてあるので参照されたい。また温度測定に用いたCARS温度計測の原理についても多くの解説⁽¹¹⁾があるので詳細は省略する。ここでは実際に用いた計測システムを中心に説明する。本研究で用いたCARS温度計測システム(CARS法)は、データ処理方法を従来のものに比較して大幅に簡易化し、ほぼリアルタ

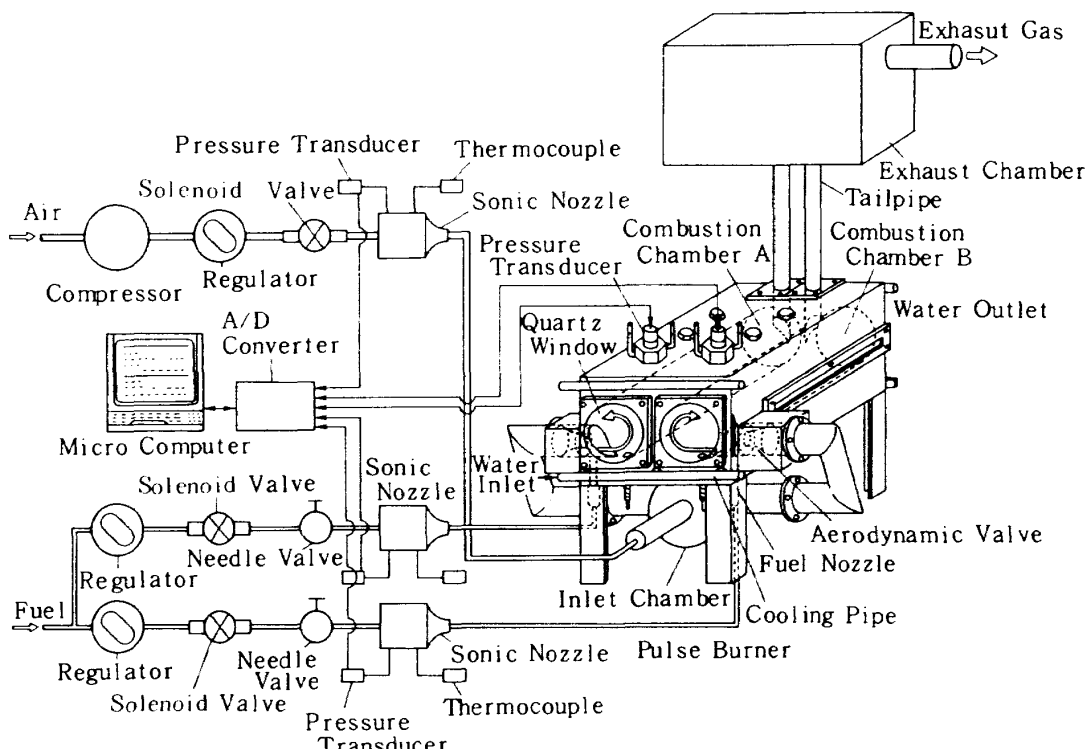


図1 2連式バルブレスパルスバーナと装置系統図

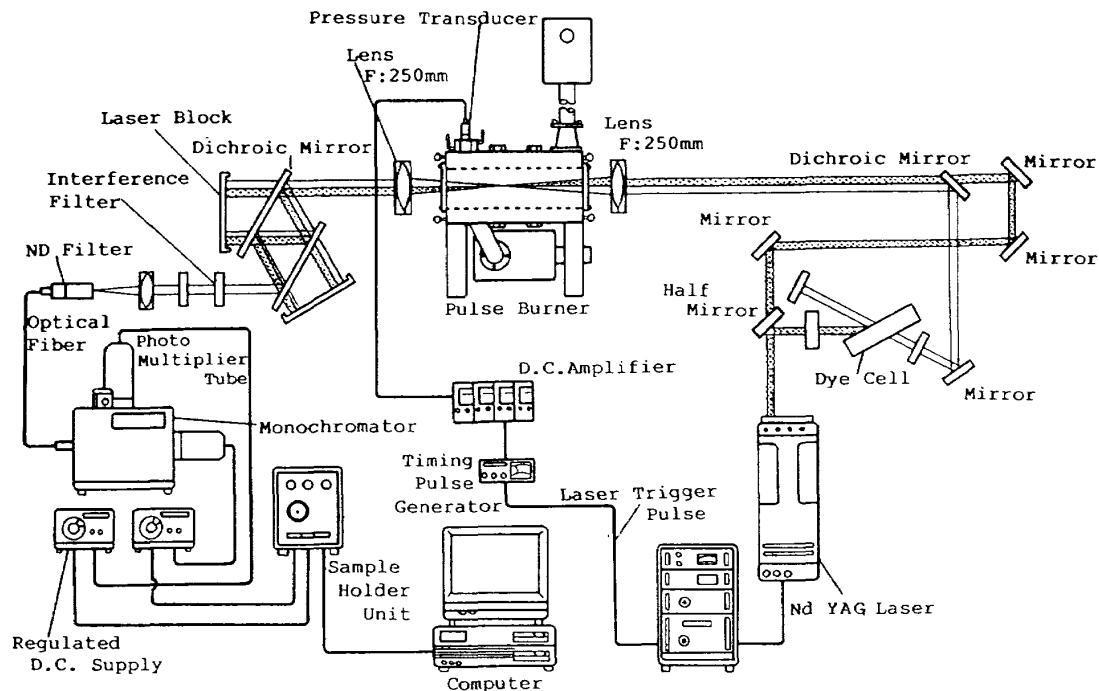


図2 CARS 温度計測システム

イムに近い温度測定を可能にしたことを特徴としている。図2は本実験に組み込んだCARSシステムの構成図で、受光側は従来用いていた大型のモノクロメータと多チャンネル受光器(OMA)の代わりに、小型の分光器と2つの光電子増倍管により構成される。基本的な測定原理は、検出したCARS光のスペクトラムを異なった幅を持つ2つのスリットへ導き、各々を通過したスペクトル光の強度の比が温度の関数となる事実に基づいている。Nd/YAGパルスレーザを光源とするレーザ(周波数 ω_1)は2つに分けられ、一部は色素レーザ部へ導かれ周波数 ω_2 のビームとなり、残りは ω_1 のまま集光レンズへと送られる。両方のレーザ光は焦点距離250mmのレンズで石英窓ガラスを通して燃焼室内部の一点に集光され、その点からCARS光($2\omega_1 - \omega_2$)が発生する。このCARS光及び2つのレーザ光は再びレンズで平行光線にされ、多重反射ミラーによって ω_1 、 ω_2 の光が徐々に取り除かれる。そして最後に干渉フィルタによってCARS光だけを選択した後、光ファイバを介して分光器へ送られる。分光器内にはハーフミラーがセットされており、CARS光を異なる幅を持つ2つのスリットへ導き、そのスリットを通過した光の強度(I_1 、 I_2)を2つの光電子増倍管で測定する方法を採用している。このようにして得られた

2つの信号は、A/D変換器、サンプルホルダユニットを経てマイクロコンピュータへ送られ、その強度比から温度が計算される。図3は温度を算出するのに用いた強度比(I_1/I_2)と温度の一義的な関係を表す一つの検定曲線である⁽¹²⁾。

CARSシステムにパルスレーザを使用する限り、連続的なデータサンプリングはできず、レーザの発振周期を最大とする間欠的なサンプリングとなる。本CARSシステムには発振周期が最大22Hz、最小18Hz、標準20HzのNd/YAGレーザを使用している。パルス燃焼は周期的な非定常燃焼を伴うもので、しかもその燃焼システムの共鳴周波数はレーザの発振周波数を大きく上回る。そのため一定の周期でレーザを発振させた場合、1周期の温度変動をとらえることはできず時間平均温度だけの測定になる。従って周期的な温度変動を時間分解してとらえるにはバーナの発振周期とレーザの発振周期を同期させ、アンサンブル平均温度を測定する必要がある。本CARSシステムでは、レーザを外部トリガで発振させるための電気信号をレーザへ供給するタイミングパルス信号発生器を設け、バーナとレーザの発振同期を図っている。図4はCARSのデータサンプリングのシーケンスを示すものである。前述したように、発振周波数はバーナの方が高いため、1周期毎のサ

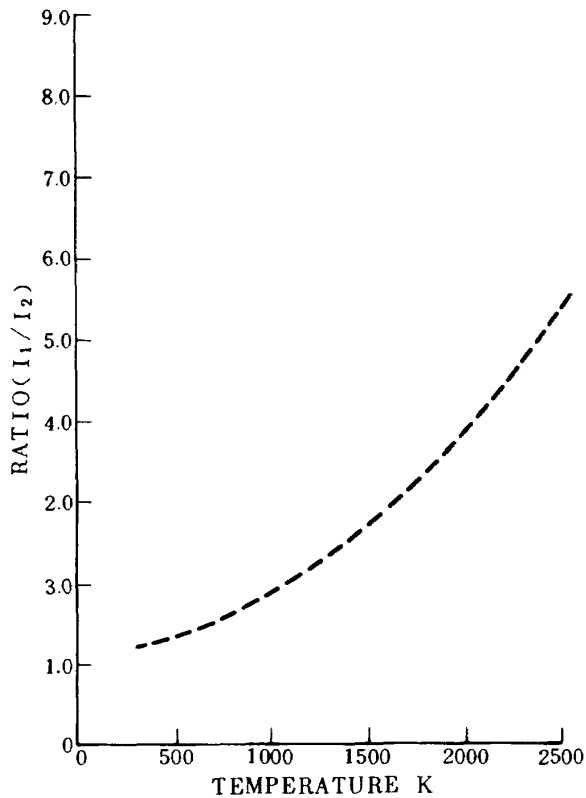


図 3 CARS 光の強度比 (I_1 / I_2) と温度の関係

ンプリングは不可能で、サンプリングレートが $18\text{Hz} \sim 22\text{Hz}$ となるような数周期毎のサンプリングとなる。特にレーザ保護の目的で、タイミングパルス信号発生器にパルス送出後のパルス発生禁止期間 ($1/22$ 秒) をとり、レーザ発振が決して 22Hz 以上にならないよう保護回路を設けた。さらに同発生器は 1 サイクルの任意の位相での温度を測定するために、ある基準時刻からの遅れ時間 (t_d) を変化させることができる。ここで用いた基準時刻とは、燃焼室内部の圧力がその平均値を正から負へと横切ったときと定義した。なお、本バーナは 2 つの燃焼室を持つが、一方の燃焼室 (燃焼室 A) だけを測定対象とした。

実験は、レーザを同期させるのに最も適した共鳴周波数 (約 80Hz) となる平均質量流束 (以下質量流束と呼ぶ) $M=0.7$ 、平均当量比 (以下当量比と呼ぶ) $\phi=0.8$ の条件を基準条件とし、この条件において詳細な時間平均温度分布、アンサンブル平均温度などを求め、さらに測定可能な範囲で質量流束、当量比を変化させた場合の温度測定も行った。質量流束とは燃焼室内を通過する空気と燃料の全質量流量を燃焼室の断面積で割った値であり、本実験では

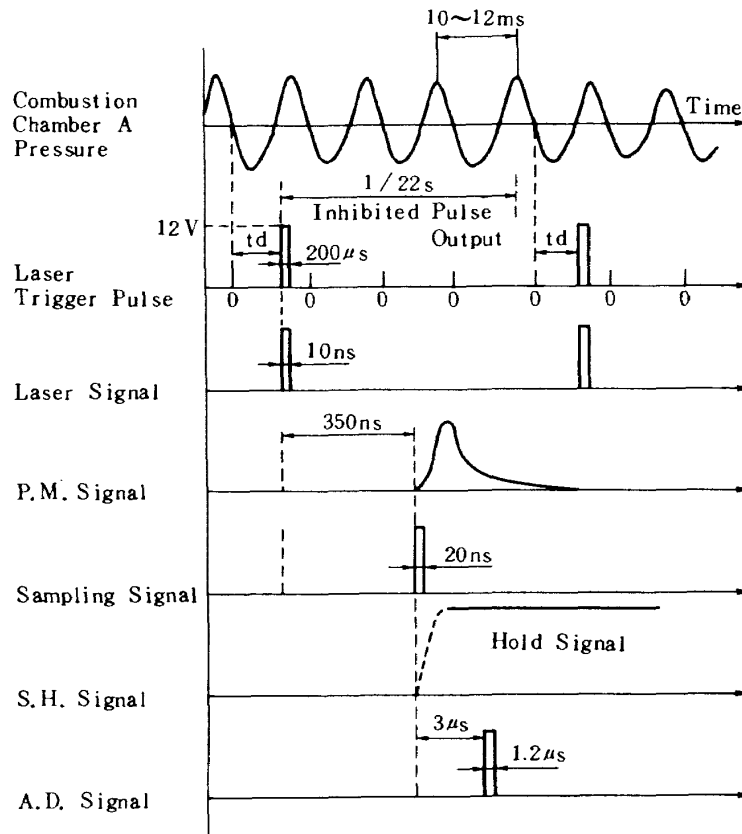


図 4 CARS 測定時のデータサンプリングのシーケンス

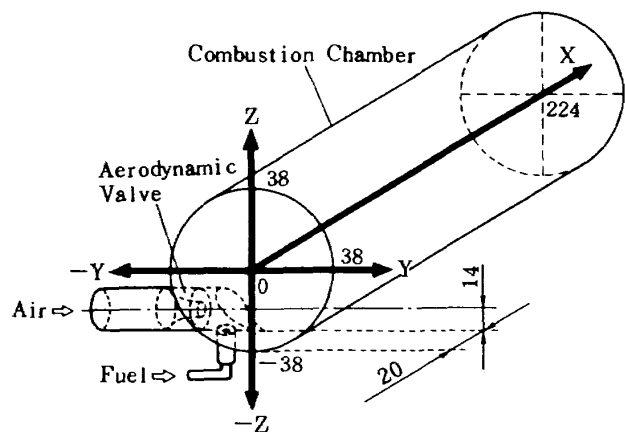


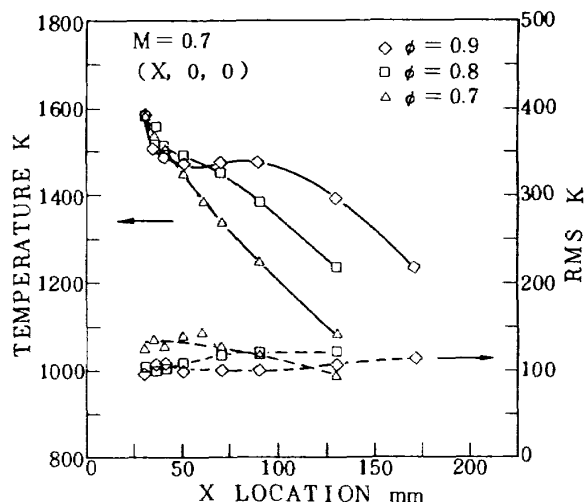
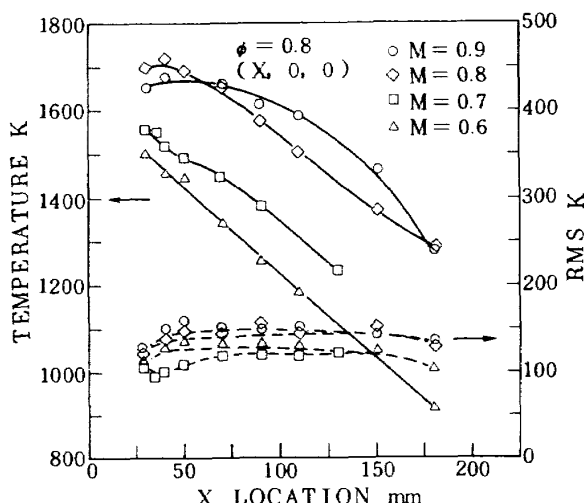
図5 燃焼室の座標系

市販のバルブレスバーナの標準的な質量流束 ($1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$) を基準にした無次元の値を用いている。これは熱負荷の程度を表す一つの指標となる。時間平均温度はレーザを 20 Hz 一定で発振させ、 1000 個の温度データの算術平均として求め、アンサンブル平均温度はパルス燃焼の1サイクル中を 1 ms 毎に 1000 個の平均温度として求めている。実験バーナは三次元トラバース装置上にセットされ、任意の位置に測定点を移動設定することができる。測定点の位置を表す燃焼室内の座標系を図5に示す。空気及び燃料の吹出しポート中心は $X = 20 \text{ mm}$ の平面内にある。

3. 実験結果と考察

3.1 燃焼室内の平均温度分布

図6と図7は、それぞれ質量流束一定における当量比の変化および当量比一定における質量流束の変化が、燃焼室中心軸上の時間平均温度およびそのRMS値の分布に与える影響を示したものである。最も上流側の測定位置は $X = 30 \text{ mm}$ でそれより上流側は石英ガラスがレーザ光によって破損されるため測定できない。図から中心軸上の温度は、下流側に向かってほぼ単調に減少し、又そのRMS値は全体に $100 \text{ K} \sim 150 \text{ K}$ にあり、比較的溫度変動の幅が小さい。但しRMSについては、本CARSシステム自体に $50 \text{ K}^{(12)}$ 程度のバラツキが存在するので、実質上のRMSは 100 K 以下にあると考えられる。このように周期的な非定常燃焼場であるにもかかわらず中心軸上の温度が安定している理由は、燃焼室内の流れが旋回流に支配され、低温の空気および燃料の噴

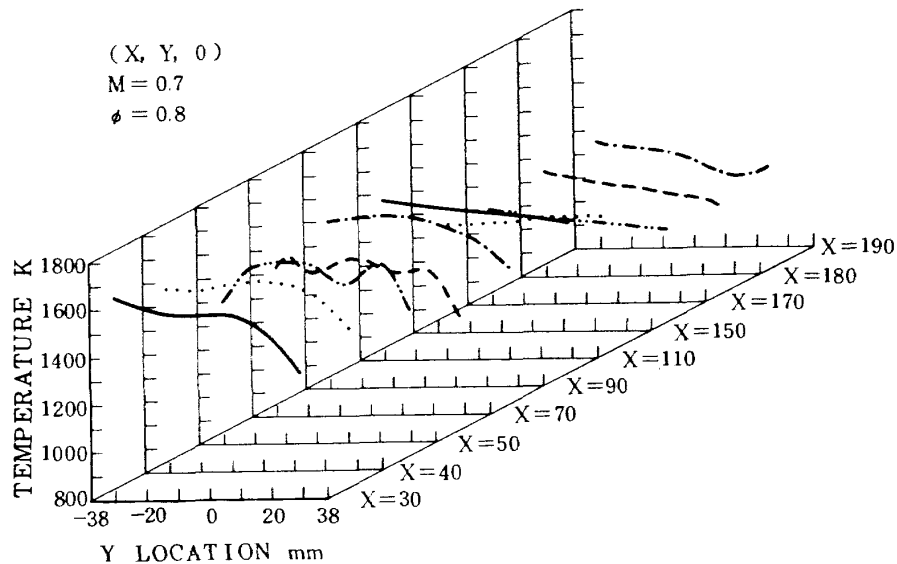
図6 燃焼室中心軸上の時間平均温度分布 ($M = 0.7$)図7 燃焼室中心軸上の時間平均温度分布 ($\phi = 0.8$)

出と混合や活発な反応が燃焼室壁面に沿って行われるので、燃焼室の中心軸上にそれらの変化が出現しないためである。一方、後述するように中心軸近傍はほぼ燃焼室内の時間平均最高温度を示すが、図7より最高温度は $M = 0.8$, $\phi = 0.8$, $X = 40 \text{ mm}$ における 1720 K で、各条件における平均当量比での断熱火炎温度に比べて 200 K から 400 K 近く低い値を示している。パルス燃焼は瞬間的、そして局所的に当量比は大きく変化すると考えられ、場所によっては量論比に近い混合比になる可能性もある。しかしこの測定結果が示すように燃焼室内の温度は断熱火炎温度よりも相当低くしかも上流側の高温度領域でも温度変動が小さいことは非常に興味深い現象である。

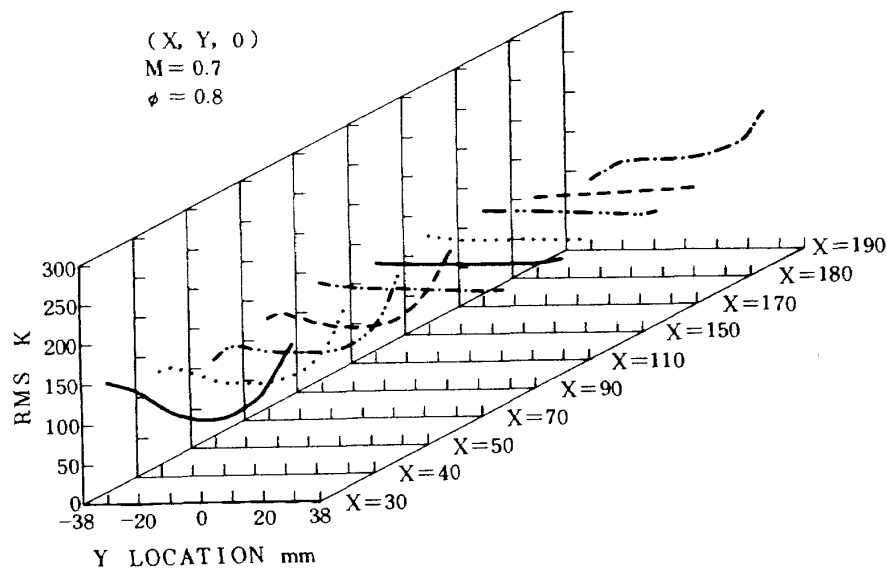
次に、図 6 より質量流束一定下では当量比の増加は最高温度の上昇にはつながらず、むしろ高温の温度領域を下流側に広げる役割をすることがわかる。下流側にわたる高温領域の拡大は、OH による熱発生速度の実験結果から予測した内容と定性的に一致する⁽⁸⁾。すなわち、質量流束一定のもとでは燃料と空気の混合速度はほぼ一定と考えられ、当量比の増加による燃料流量の増加分が反応領域を下流側に押し広げるので、その結果中心軸上の高温域は当量比の増加につれて下流側へ拡大する傾向を示す。これに対して図 7 によると、当量比一定では質量流束の増加が最高温度の上昇につながり、そして下流側に向

かっての温度降下の傾きはほぼ一定となることわかる。この結果もやはり熱発生速度の結果と定性的に一致する。つまり当量比一定のもとでは、質量流束の増加は燃料と空気の混合を促進させる。質量流束の増加によって燃料流量が増加しても、短時間のうちに混合が完了するので反応領域は下流側にそれほど広がらず上流側での発熱密度の増加を招く。上流での最高温度が質量流束の増加によって上昇する傾向は、この発熱密度の増加に起因する。

図 8 (a), (b) は、 $M = 0.7$ 、 $\phi = 0.8$ における燃焼室内部の平均温度と RMS 温度について、 $Z = 0$ mm の $X - Y$ 平面上での温度分布を三次元的に示してい



(a) 燃焼室内部の時間平均温度分布



(b) 燃焼室内部の時間平均 RMS 温度分布

図 8

る。前述したように平均温度は下流側に向かって徐々に低下し、 $X = 30\text{ mm}$ を除いて中心軸近傍に最高温度域が存在する。上流域での半径方向の温度分布は、 Y の正方向に向かって低下する。つまり、空気ポートから噴流の下流側に向かって温度が低くなっているが、図8(b)のRMS温度の分布を見ると反対に壁付近で急激に上昇し、この付近の温度変動が激しいことを示している。この大きい温度変動は周期的に流入する低温の空気と反応によって温度上昇した燃焼ガスとの激しい混合によるものである。空気の噴流は接線方向に流入するため、円筒壁面に沿ってその旋回流れはらせん状に進む。この低温の流れに基づく壁面近くの温度の低下は $X = 90\text{ mm}$ 近くまで観察され、この条件においては低温の空気の噴流が少なくとも $X = 90\text{ mm}$ 近くまでは影響していると考えられる。これより下流側では燃焼室中心軸上と同様RMS温度も 100 K 前後と変動幅も小さく安定した温度領域となっている。図9は $Y = 30\text{ mm}$ の壁近傍の温度の確率密度関数(PDF)が軸方向下流側に向かって変化する様子を示したものである。上流側では下流側よりもPDFの幅が広く低温の空気噴流の存在を裏付けている。なお、図8に見られた $X = 190, Y = 25\text{ mm}$ から壁に向うRMS値の上昇は、出口ポート近くで尾管からの逆流の影響を受けているためと考える。図10は測定断面の最上流部($X = 30\text{ mm}$)における平均温度の確率密度関数を示

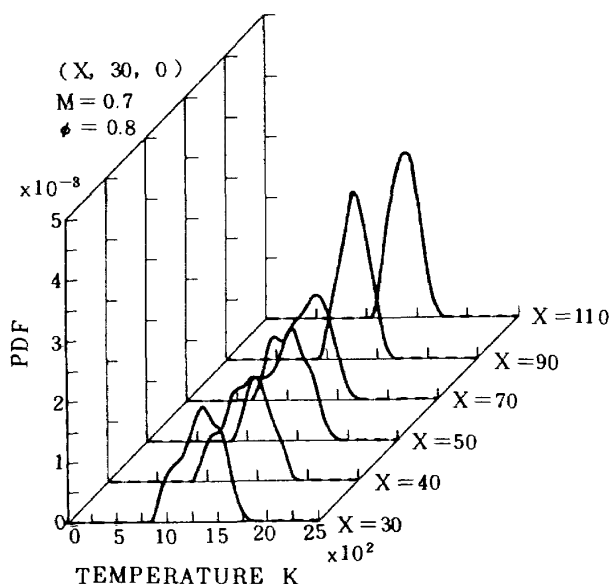


図9 温度変動の確率密度関数(軸方向変化)

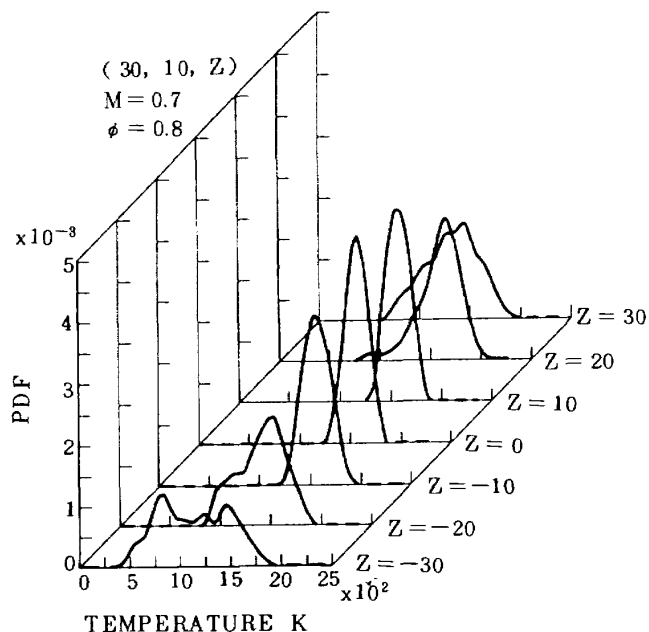
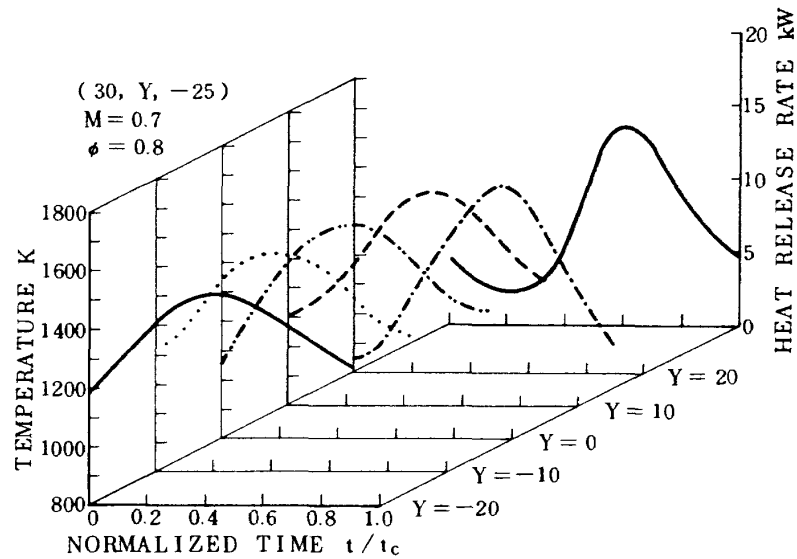


図10 温度変動の確率密度関数(垂直方向変化)

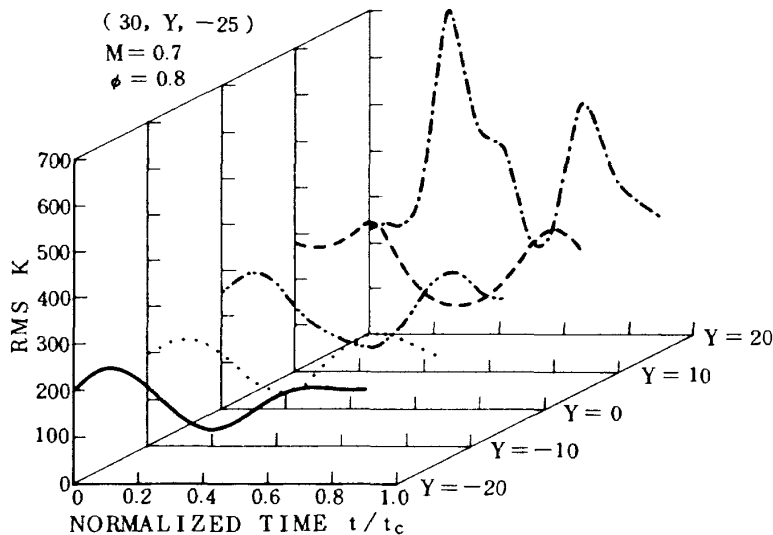
している。空気ポートに近い $Z = -30\text{ mm}$ では低温の空気噴流の影響を示すbi-modalの形状が顕著に現れている。また中心軸に比べて壁近傍はPDFの広がりが大きく、温度変動の激しい様相を示している。さらに燃焼ガスが 1800 K 以上で存在する確率は非常に少ない。一般に言われるようにThermal NOの生成が増大し始める温度が 1800 K 程度にあるとすれば、パルス燃焼の低 NO_x 化の1つの要因は、NO生成のための反応域の温度がこの温度レベル以上になる確率が低いことにあると考えられる。この燃焼ガスの低温化は、パルス燃焼特有の高熱伝達による壁への放熱および1サイクル内の大きな当量比の変動、そしてそれらの相乗効果によるものである。

3.2 1周期の温度変動特性

図11(a)と(b)は、 $M = 0.7, \phi = 0.8$ における $X = 30\text{ mm}, Z = -25\text{ mm}$ 軸上のアンサンブル平均温度とそのRMS値の1サイクル変動を示す。横軸は時間を1周期(t_c)で割った無次元化した時間で表されており、すなわち図11は、1周期の平均の温度サイクルを表す。またこの条件における熱発生速度の変化も図中に示してある。空気噴流ポートの中心に相当する空気弁(ノズル開孔直径 12 mm)は $X = 20\text{ mm}$ の平面上にあり、本温度測定の本上流断面 $X = 30\text{ mm}$ よりさらに 10 mm 上流に位置する。本来噴流断面の測定を意図すべきであるが、前述したような



(a) 1 サイクルのアンサンブル平均温度

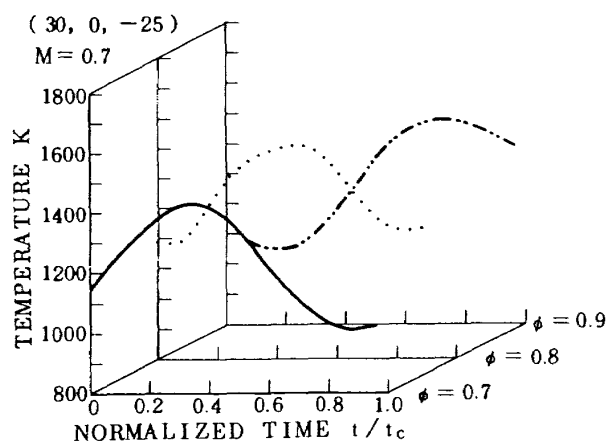


(b) 1 サイクルのアンサンブル平均RMS温度

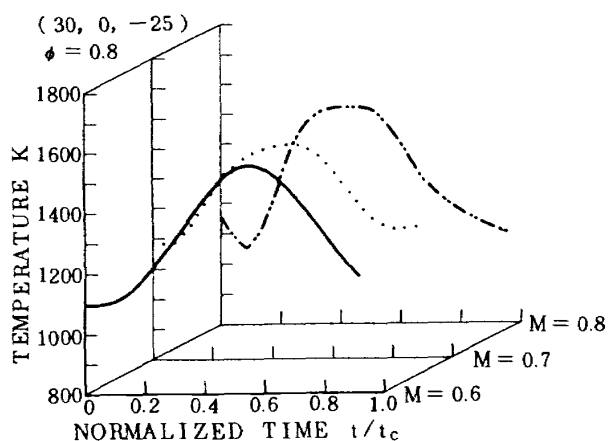
図 11

測定上の限界からそれは不可能であった。しかしらせん状に進むポートからの空気の旋回流を考えれば、本温度データは空気噴流付近の温度変化をとらえるのに十分であると言える。 $t/t_c = 0$ はほぼ空気の噴出開始時に相当する。1 サイクル内の温度は、 $t/t_c = 0$ ではほぼ最小となり $t/t_c = 0.4 \sim 0.5$ で最大、 $t/t_c = 1$ 近くで再び最小となる。これは熱発生速度の1 サイクル変化と傾向的に一致し、熱発生速度が大きいと温度が高くなる様子を示す。温度と熱発生速度のピークの位相が若干ずれるのは、熱発生速度が燃焼室全体の平均であるのに対し、温度は局所的なものであるためである。また図11(a)からわかる

ように、噴流がポートの反対側の壁に向かって進むにつれ1 サイクルの温度変動は大きくなる。これは前述したように測定位置 ($X = 30 \text{ mm}$) が噴流の中心軸上になく、下流に進む噴流の広がりとともに徐々にその低温空気と燃焼ガスの激しい混合が現れるためである。 $Y = 20 \text{ mm}$ の壁近傍では、噴流が壁に衝突して周囲に広がるため直接低温の空気噴流の温度を検出しているものと考えられる。 $Y = 20 \text{ mm}$ では1 サイクル中で約 800 K から 1400 K と変化し、 600 K に近い大きな温度振幅を持っている。図11(b)のRMS温度は(a)の温度変化の傾きが急な所で極大値を取り高温では比較的小さい温度変動となる。図12(a)は、



(a) 当量比の変化が1サイクルの温度変動に与える影響



(b) 質量流束の変化が1サイクルの温度変動に与える影響

図 12

$M = 0.7$ 一定にした場合、当量比の変化が1サイクルの温度変動に与える影響を示し、図12(a)は、 $\phi = 0.8$ 一定にした時の質量流束の変化が温度変動に与える影響を示す。測定位置は大きな温度変動が存在する空気ポート下流側の位置(30, 0, -25)である。これより、当量比の増加は温度ピークの出現時間を遅らせるのが明かであり、質量流束の増加は温度ピークを若干早めるだけで変動サイクルにそれほど大きな変化は与えていない。これらは次のように説明できる。パルス燃焼時のシュリーレンによる流れの可視化⁽¹³⁾によっても明らかのように、給気過程では燃料が噴出した後遅れて空気が噴出する。従って空気ポート付近の局所的な燃料濃度はサイクル開始時は高く、空気の噴出とともに徐々に減少する。そして着火可能な燃料濃度に達したときにはじめてその

サイクルの着火反応が開始する。ここで質量流束が一定の時は、当量比の増加とともに燃料流量は増加するため、サイクル初期の燃料濃度は高くなる。一方混合速度はほぼ一定と考えられるので、着火可能な燃料濃度に達するまでの時間つまり着火遅れの時間は当然長くなり、従って温度のピークは時間的に遅れることになる。これに対して当量比一定の時は、同様に質量流束とともに燃料流量は増加するが、質量流束の増加により混合速度が高まり、燃料濃度の減衰速度が急になるため同程度の時間で着火可能な濃度に達する。従って、着火遅れはそれほど大きく変化しない。これらの結果は、熱発生速度の実験結果で示された着火遅れの傾向とよく一致する⁽⁸⁾。以上のことから、本パルスバーナの燃焼機構を決定する重要な因子の一つは燃料と空気の混合速度であることが今回の温度測定によっても裏づけられることがわかった。

4. ま と め

CARS法を用いて測定されたパルス燃焼室内の温度分布データから、パルス燃焼機構について以下の結果を得た。

(1) 燃焼室内の上流側壁近傍に非常に激しい温度の変動領域が存在し、それ以外の領域では極めて安定した一様な温度領域を形成する。そして時間平均の最高温度は、上流の燃焼室中心部近傍に存在し、そのレベルは断熱火炎温度に比較して200Kから400K程度低い値となる。

(2) パルス燃焼における平均当量比の増加は、最高温度の上昇よりもむしろ高温領域を下流側へ拡大し、平均質量流束の増加は最高温度のレベルを上昇させる。

(3) 空気ポート出口近傍では、最高600Kに達する周期的な温度変動が存在する。これは1サイクル内での空気噴出と急速な燃焼に伴う相乗効果によるものであり、この温度変動の様相は熱発生速度変動のそれと傾向的に一致する。

(4) 2連式バルブレスパルスバーナの動作時に見られる着火遅れの時間は、空気と燃料の混合速度の大きさに決定される。

本研究は、航空宇宙技術研究所と㈱東芝との共同

研究として行われたものである。本研究を進めるにあたって有益な御助言を頂いた航空宇宙技術研究所の藤井昭一室長，国土館大学の岸本助教授に深く感謝すると共に，実験に協力頂いた国土館大学学生の松井健太郎，須永哲也両君にも感謝いたします。

5. 参考文献

- 1) J.O.Keller, K. Saito; An Experimental Investigation of an Unsteady Combusting Flow in a Pulse Combustor, AIAA 23rd Aerospace Science Meeting, No.85-0322, 1985.
- 2) J.M. Corliss, D.D. Paul, R.H. Barnes, W. A. Ivancic; Species and Fluid Mechanic Measurements in an Operating Pulse Combustor, Proceeding of International Gas Research Conference, 1986, 10.
- 3) J.O. Keller, C.K. Westbrook; Response of a Pulse Combustor to Changes in Fuel Composition, presented at the Twenty-First International Symposium on Combustion, 1986.
- 4) 齊藤, J.O.Keller, 岸本, 斎藤; パルス燃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.
- 5) 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.
- 6) 齊藤, 平沢, 斎藤; 小型パルスバーナの研究—NOx 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.
- 7) 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.
- 8) 江口, 五味, 黒沢, 藤井, 齊藤; 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), 航空宇宙技術研究所報告, TR-955, 1987年12月.
- 9) 岸本, 斎藤, 齊藤; 旋回流式バルブレスパルス燃焼器内の温度変動について, 第25回燃焼シンポジウム講演前刷集, 昭和62年, pp.259-261.
- 10) J.O.Keller, K. Saito; Measurement of the Combusting Flow in a Pulse Combustor, Combustion Science and Technology, 53, 1987, pp.137-163.
- 11) 例えば, A.C.Eckbreth; CARS Thermometry in Practical Combustors, Combustion and Flame, Vol. 39, 1980, pp.133-147.
- 12) 藤井, 五味; レーザによる高温ガス温度計測の簡易化, 日本航空宇宙学会誌, 第35巻, 401号, 昭和62年6月, pp.303-310.
- 13) 齊藤, 江口, 五味, 斎藤; 2連式バルブレスパルスバーナの研究(流れの可視化による燃焼プロセスの観察), 第25回燃焼シンポジウム講演前刷集, 昭和62年, pp.256-258.

航空宇宙技術研究所報告973号

昭和63年4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