低酸素・高温空気燃焼におけるイオン電流の特性*

古川 純一^{*1}, 持田 晋^{*2}, 長谷川 敏明^{*2}Characteristics of Ion Current Obtained from Low-Oxygen,
High-Temperature Air CombustionJunichi FURUKAWA^{*3}, Susumu MOCHIDA and Toshiaki HASEGAWA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan College of Technology,
1-10-40 Higashi-ohi, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-0011 Japan

An attempt has been made to examine the characteristics of ion current obtained from Low-Oxygen, High-Temperature Air Combustion. Non-luminous zone is seen in the upstream region and luminous zone is seen in the downstream region in low-oxygen, high-temperature air flame, while only the luminous region is seen in the high-temperature air flame. The sharp spike like signals are seen on the ion current obtained from the luminous zone of both high-temperature air and low-oxygen, high-temperature air flames. The spike like signal is not seen on the ion current obtained from the non-luminous zone of low-oxygen, high-temperature air flame. The ion current looks quite similar with that obtained from turbulent premixed flames in the reaction sheet regime. It implies that the local structure of low-oxygen, high-temperature air flame is not the flameless combustion but similar to that of turbulent premixed flames in the reaction sheet regime, in which the local reaction zone is separately defined from burnt and unburnt gases.

Key Words: Combustion, Diffusion Flame, Flame Structure, Ion Current, High-Temperature Air

1. 緒 論

高温空気燃焼⁽¹⁾は、日本発の次世代燃焼技術として注目を浴びている。酸素濃度が低い高炉排気などを酸化剤として使用できること、発熱量の低い低質燃料を燃焼させることができること、高温の空気を酸化剤として使用しているにもかかわらず、窒素酸化物の排出濃度が低いこと、などが高温空気燃焼の優れた特徴である。

窒素酸化物の排出濃度が低くなる原因として、局所的な火炎伸長や局所的な反応帯の構造が変化している、などの解釈⁽¹⁾⁽²⁾が行われているが、必ずしも満足のいく説明ではなく、高温空気燃焼のメカニズムは依然として不明な点が多く残されている。

そこで、本研究では、低酸素濃度の高温空気流中に燃料を噴射した際に形成される火炎の局所的な構造を明らかにすることを目的として、イオン電流を詳しく調べてみた。

2. 実験装置および方法

本研究で使用した高温空気発生装置の概略を図1に、燃焼室の概略を図2に示す。高温空気発生装置は、燃焼室、燃焼室に供給する空気を予熱するためのハニカム蓄熱体、流量制御装置、ブロワなどから成り立っている。燃焼室は、縦260 mm、横200 mm、厚さ130 mmであり、内径1.0 mmの燃料ノズルと観測用の石英ガラス窓が取付けられている。燃焼室入口の上流には、空気を加熱するためのハニカム蓄熱体が設置されている。実験に先立ち、ハニカム蓄熱体をあらかじめ燃焼ガスにより約1200°Cまで予熱した。

ブロワにより吸入された空気は、流量制御装置を経て、予熱されたハニカム蓄熱体を通過し、加熱され、1100°Cで燃焼室に供給される。本研究では、低酸素濃度の高温空気流中に燃料を噴射した際に形成される乱流拡散火炎の局所的な構造を調べることを目的としたので、空気に窒素を混入し、酸素濃度を21%(通常の空気)から3%の範囲で変化させた。空気中の酸素濃度はガスクロマトグラフにより確認した。空気流量は燃焼室入口で15 m³/hとした。空気流量を燃焼室断面積で除した平均流速は、空気温度が約1000°Cの場合、約5.0 m/sである。なお、あらかじめ加熱したハ

* 原稿受付 2004年5月26日。

^{*1} 正員、東京都立工業高等専門学校機械工学科(〒140-0011 東京都品川区東大井1-10-40)。^{*2} 正員、日本ファース工業(〒230-8666 横浜市鶴見区尻手2-1-53)。

E-mail: furukawa@tokyo-tmct.ac.jp

Fig. 1 Schematic illustration of the experimental arrangement

ニカム蓄熱体を空気が通過し、加熱されるので、燃焼室に供給される空気の温度は時間の経過とともに減少する。ハニカム蓄熱体の下流には、Pt-Pt・13%Rd 熱電対を設置し、燃焼室に供給される空気の温度を計測した。ふく射に関する補正は行っていない。熱電対の上流には、予熱されたハニカム蓄熱体が配置されているので、実際の空気温度は、熱電対で計測される値より、低いと考えられる。論文で示す空気温度はすべて、熱電対の指示値である。

燃焼室内で高温空気が流れる方向は垂直上向きであり、燃料はこれに対し水平方向に噴射される。燃料にはプロパンガスを使用し、噴射量は $0.05 \text{ m}^3/\text{h}$ とした。燃料流量をノズル断面積で除した燃料の平均流速は約 18 m/s である。

本研究で使用した燃焼器では、酸素濃度が5%以下の空気を酸化剤として使用した場合には、空気温度が約 900°C 以下では燃焼が維持できなかった。先に述べたように、本研究では、低酸素濃度の高温空気流中に炭化水素燃料を噴射した際に形成される火炎から得られるイオン電流を詳しく調べ、局所的な火炎構造を明らかにすることを目的としたので、空気温度が約 900°C より低い条件で火炎を保持するための新たな工夫を行わず、燃焼室入口における空気の温度は約 800°C から約 1100°C の範囲で実験を行った。先に述べたように、本研究では、燃焼室に観察用の石英ガラス窓を取付けてあるので、燃焼が維持できる最低の温度が約 200°C 程度上昇している。

本研究で使用した静電探針の概略を図3に示す。静電探針の素線には直径 0.3 mm の白金線を使用し、受感部の長さは約 1 mm とした。素線の受感部以外は、細い石英管で被覆し、その外側を真ちゅう管で被覆し、その外側を水冷できる構造とした。本研究で使用した静電探針は、高温雰囲気中での使用を可能とするために、これまでに乱流予混合火炎の計測に使用した静電

Fig. 2 Combustion chamber

Fig. 3 Illustration of design of the electrostatic probe

探針⁽³⁾に比べて、素線を太く、水冷を強化した構造とした。

高温空気燃焼のような高温雰囲気中で静電探針を使用する場合には、乱流予混合火炎の計測に使用する場合よりも十分な冷却が必要である。冷却が不十分であると、石英管の絶縁が破壊され、ベース電流が上昇して、正しいイオン電流波形が計測できない⁽⁴⁾。火炎は浮上がり火炎となるために、パーナ本体を補償電極として使用することができない。そこで、図3に示すように、二つの受感部を有する静電探針を使用し、流れの上流側に設置した電極を受感部として、流れの下流側に設置した電極を補償電極として使用した。

イオン電流は 12 bit 、 100 kHz の分解能で A-D 変換し、いったん 128×10^6 ワード/ch のメモリーに収録した後、パーソナルコンピュータに記録した。イオン電流とともにハニカム蓄熱体の下流の空気温度を記録し、同時に火炎のようすをビデオカメラで撮影した。

3. 実験結果および考察

3・1 燃焼のようす 酸素濃度が21%の空気(通

Fig. 4 Aspects of the flame for various air temperature under oxygen concentration of 21%

常の空気)を酸化剤に使用した場合、空気温度が約800°Cから約1100°Cの範囲で、燃焼のようすがどのように変化するかを図4に示す。酸素濃度が21%の空気では、空気温度が約800°C以上で火炎は全域が輝炎で、不輝炎の領域は見られない。空気温度が変化しても、火炎全体が輝炎で、火炎の長さなどにも顕著な差異は見られない。

酸素濃度が15%から5%の空気を酸化剤に使用した場合、空気温度とともに、燃焼のようすがどのように変化するかを図5に示す。

酸素濃度が15%の空気を酸化剤に使用した場合、空気温度が約830°C以下の場合には、燃焼が維持できなかった。空気温度が約840°Cの場合には、火炎の基部が不輝炎となり、下流部分は輝炎となる。空気温度が増加すると、火炎基部の不輝炎領域は減少し、輝炎領域が増加し、火炎全体の輝度も増加する。空気温度が変化しても、火炎の長さには大きな変化はない。酸素濃度が21%の空気を酸化剤に使用した場合に比べると、火炎の長さは増加する。

酸素濃度が10%の空気を酸化剤に使用した場合、空気温度が約900°C以下の場合には、燃焼が維持できなかった。空気温度が約900°Cの場合には、火炎は浮上がり火炎となる。火炎は全域が不輝炎となるが、火炎からの発光は微弱である。空気温度が約930°Cの場合、火炎基部の不輝炎の下流にほとんど発光のない暗い領域ができ、その下流に輝炎が形成される。これ以上の温度では、空気温度が増加すると、火炎基部の不輝炎領域が減少し、下流の輝炎領域が増加し、火炎全体の輝度も増加する。空気温度が増加すると、火炎のようすは、不輝炎から輝炎へ、著しく変化する。酸素濃度が15%の空気を酸化剤に使用した場合に比べて、さらに火炎の長さは増加する。

酸素濃度が8%の空気を酸化剤に使用した場合、空気温度が約900°C以下の場合には、燃焼が維持できなかった。空気温度が約900°Cの場合には、火炎は浮上がり火炎となる。火炎は全域が不輝炎となるが、火炎からの発光は、酸素濃度が10%の場合よりも、さらに微弱である。空気温度が約910°Cになると、下流に輝炎領域が形成される。これ以上の温度では、空気温度が増加すると、火炎基部の不輝炎領域が減少し、下流の輝炎領域が増大する。酸素濃度が21%の空気を酸化剤に使用した場合に比べて、火炎の長さは数倍程度となる。

酸素濃度が5%の空気を酸化剤に使用した場合、空気温度が約920°C以下の場合には、燃焼が維持できなかった。空気温度が約920°C以上になると、浮上がり火炎が形成される。火炎は全域が不輝炎となるが、火炎からの発光は極めて微弱である。空気温度が増加すると、燃料ノズル出口から火炎基部までの距離が減少する。空気温度が約960°Cになると、下流に輝炎領域が形成される。これ以上の温度では、空気温度が増加すると、火炎基部の不輝炎領域が減少し、下流の輝炎領域が増大する。酸素濃度が21%の空気を酸化剤に使用した場合に比べて、火炎の長さは数倍程度となる。

図5には示していないが、酸素濃度が3%の空気を酸化剤に使用した場合には、空気温度が約960°C以下の場合には、燃焼が維持できなかった。火炎は全域が不輝炎となるが、火炎からの発光は極めて微弱である。

以上をまとめると、(1)酸素濃度が減少すると、燃焼が維持できる空気温度が増加する、(2)酸素濃度が10%程度以下の場合、空気温度が低いと火炎全体が不輝炎となる、(3)空気温度が増加すると、上流の不輝炎領域が減少し、下流の輝炎領域が増加する、(4)酸素濃度が低く、温度が低いほど火炎の長さは増加する。

3.2 イオン電流に見られる特徴 酸素濃度が21%の空気を使用した場合に見られるイオン電流波形の代表的な例を図6に示す。イオン電流の計測は、燃料ノズルから約60 mm 下流の高さで行った。イオン電流波形を見ると、全域にギザギザしたスパイク状の信号が観察されることに気づく。

一般に、イオン電流にはスパイク状のノイズが記録されてしまうことが多い。本研究では、ノイズを除去するように十分に注意して実験を行ったにもかかわらず、このようなスパイク状の信号が得られた。

酸素濃度が21%の空気を使用した場合には、空気温度が約800°Cから約1100°Cの範囲で火炎全体が輝炎

Fig. 5 Aspects of the flame for various air temperature and oxygen concentration

であり、得られたイオン電流波形にはすべてこのようなスパイク状の信号が観察された。このようなスパイク状の信号は、高温空気燃焼の輝炎領域から得られるイオン電流波形にはすべて見られるのかを確かめるために、酸素濃度が5%の空気を酸化剤として使用した

場合に、下流の輝炎領域で得られるイオン電流波形を調べてみた。その結果を図7に示す。イオン電流の計測は、空気温度が1 000°C、燃料ノズルから約200 mm下流の高さで行った。酸素濃度が5%の空気を使用した場合でも、輝炎領域から得られるイオン電流波形に

Fig. 6 Ion current obtained from the luminous zone of regular air diffusion flame (O_2 21%, 1000°C)

Fig. 7 Ion current obtained from the luminous zone of low-oxygen air diffusion flame (O_2 5%, 1000°C)

はギザギザしたスパイク状の信号が観察される。

後述するように、不輝炎領域で得られるイオン電流波形にはこのようなスパイク状の信号は見られないことから、これはノイズではなく、高温空気燃焼の輝炎領域でのみ見られる特有の現象と思われる。

そこで、イオン電流波形に見られるギザギザしたスパイク状の信号が得られる理由を確かめる目的で、静止大気中に気体燃料を噴出させる乱流拡散火炎を使用して、イオン電流を計測してみた。この乱流拡散火炎は火炎基部をのぞき、ほぼ全域で輝炎であった。この火炎の輝炎領域で得られるイオン電流波形には、図6および図7に示したような、ギザギザしたスパイク状の信号は観察されなかった。本研究で得られたイオン電流波形に見られるギザギザしたスパイク状の信号は、高温空気燃焼を行った場合の輝炎領域で記録されるイオン電流に特徴的に見られる現象であることがわかった。この現象は、火炎中の固体炭素粒子の影響によるものであると推測するが、それを明らかにするた

めにはさらに詳細な検討が必要となる。

ところで、図6と図7に示すイオン電流波形を比べると、以下の2点に気づく。(1)両者のイオン電流の極大値はほぼ同程度である。(2)単位時間あたりイオン電流のピークの数が図7のほうが少ない。

両者のイオン電流の極大値はほぼ同程度であることに関して、以下のように考えた。すなわち、イオン電流の極大値は、局所的な反応帯の近傍におけるイオン濃度分布と局所的な反応帯が静電探針を通過する際の速度に依存することが知られている⁽⁵⁾。そこで、局所的な反応帯が静電探針を通過する際の速度を調べるために、新たに補償電極を火炎の下流領域に挿入して、静電探針の二つの受感部を使用して、局所的な反応帯が静電探針を通過する際の速度の垂直方向成分を計測してみた⁽⁶⁾。その結果、酸素濃度が21%の空気を酸化剤に使用した場合および酸素濃度が5%の空気を酸化剤に使用した場合、局所的な反応帯が静電探針を通過する速度の垂直方向成分の平均は、それぞれ、7.37

Fig. 8 Ion current obtained from the non-luminous zone of low-oxygen air diffusion flame (O_2 5%, 1 000°C)

Fig. 9 Ion current obtained from the non-luminous zone of low-oxygen air diffusion flame (O_2 5%, 900°C)

m/s および 7.32 m/s であり、大きな差異はないことが確かめられた。すると、イオン電流の極大値は局所的な反応帯の近傍におけるイオン濃度分布のみに依存するはずである。両者のイオン電流の極大値が同程度であることは、空気中の酸素濃度が異なっても、局所的な反応帯の近傍におけるイオン濃度も同程度であることを示しており、燃焼状態も大きな差異はないことが推定できる。

単位時間あたりのイオン電流のピークの数図 7 のほうが少ないことに関して、以下のように考えた。すなわち、単位時間あたりのイオン電流のピーク数は、局所的な反応帯が単位時間あたりに静電探針を通過する頻度に比例する。下流領域では、上流領域に比べて、火炎が変動する領域が広くなるために、局所的な反応帯が単位時間あたりに静電探針を通過する頻度が低下したためと考えられる。

酸素濃度が 5% の空気を酸化剤として使用した場合、上流の不輝炎領域で得られるイオン電流波形の代表的

な例を図 8 に示す。イオン電流の計測は、空気温度が 1 000°C、燃料ノズルから約 60 mm 下流の高さで行った。ベース電流が零にならず、冷却が十分ではないことを示しているが、先に示した輝炎領域で記録されたイオン電流波形とは、ようすが大きく異なることがわかる。不輝炎領域で記録されたイオン電流波形には、ギザギザしたスパイク状の信号は観察されない。

イオン電流波形には明確なピークが観察される。二つのピークがあるペアのイオン電流波形が数多く観察される。二つのピークがあるペアのイオン電流波形は、乱流予混合火炎でしばしば観察される特徴的なイオン電流波形である。これは、イオンが存在する領域とイオンが存在しない領域が明確に区別できることを示している。

さらに輝炎領域で記録されたイオン電流波形に比べて、単位時間あたりのピークの数が多く、通過する局所的な反応帯が通過する頻度が高いことがわかる。

酸素濃度が 5% の空気を酸化剤として使用した場合、

Fig. 10 Typical ion current obtained from a turbulent premixed flame

発光が極めて微弱な不輝炎領域で得られる代表的なイオン電流波形を図9に示す。イオン電流の計測は、空気温度が900°C、燃料ノズルから約200 mm下流の高さで行った。イオン電流値は極めて小さく、図8に示すイオン電流波形とは大きく異なり、明確なピークも見られない。先の、図6に示したイオン電流波形について述べたように、ギザギザしたスパイク状の信号が見られる。ノイズを除去するように十分に注意して実験を行ったにもかかわらず、このようなスパイク状の信号が得られた。イオン電流に鋭いピークが見られないことから、活発な化学反応がほとんど起きていないことが推定されるが、極微量のイオンは存在する。わずかな化学反応は起きていると思われる。このようなイオン電流波形は、酸素濃度が8%、900°Cの場合にも観察された。温度が低く、燃焼が維持できる、限界付近の温度条件では、このようなイオン電流波形が観察される。

乱流予混合火炎において記録されるイオン電流波形の代表的な例を図10に示す。これは、内径26 mmの円管から当量比1.10のプロパン・空気混合気を平均流速4.0 m/sで流出させたときに形成される乱流予混合火炎において、四つの受感部を有する静電探針により記録されたイオン電流波形の一部を乱流予混合火炎における記録されるイオン電流波形の代表的な例として示した。したがって、静電探針の寸法などは本研究で使用したものとは異なる。低酸素濃度時の不輝炎領域で記録されたイオン電流波形と酷似していることがわかる。

イオン濃度の高い領域が主たる燃焼反応の起きている領域、すなわち、局所的な反応帯であると考え、図8で示した低酸素濃度の空気を酸化剤として使用した場合の上流の不輝炎領域で得られるイオン電流波形から、火炎構造に関して以下のことが推定できる。イ

オン電流波形には、明確なピークが観察される。高温空気燃焼であっても、燃焼反応が起きていない領域にイオンは存在しないと考えられるから、高温空気燃焼の火炎帯はイオンが存在する領域とイオンが存在しない領域が明確に区別できる。すなわち、火炎帯は未燃焼混合気あるいは燃焼ガスと、局所的な反応帯が明確に区別できる場であることが推定できる。これまで、低酸素濃度の空気を酸化剤として使用した場合、燃焼のようすは、至る所で化学反応が起きている、Flameless Combustion⁽²⁾であると考えられてきたが、本研究により、初めて、局所的な反応帯が明確に定義できる場であることが明らかになった。

先に述べたように、高温空気燃焼では、高温の空気を酸化剤として使用しているにもかかわらず、窒素酸化物の排出濃度が低いことが大きな特徴である。火炎帯における温度こう配が低下することをその理由の一つとしてあげている。しかし、現実には局所的な温度こう配が低下しているという実験的な確証は得られていない。むしろ、局所的な火炎構造は層流予混合火炎のそれに近いと考えられ、局所的な温度こう配も同程度と推定するのが妥当であると考えられる。窒素酸化物の排出濃度が低いことの理由として、必ずしも従来の説明が妥当であるとは考えにくい。この件に関しては、高温空気燃焼における局所的な反応帯の厚さを計測するなど、さらに詳細な議論が必要となると考える。局所的な反応帯の厚さの計測に関しては、現在その準備を行っており、詳細な議論は今後の研究成果に譲りたい。

4. 結 論

低酸素濃度の空気を酸化剤として使用した場合の高温空気燃焼における火炎構造を調べる目的で、イオン電流の特性を調べた。その結果、以下のような結論を

得た。

(1) 高温空気燃焼を行った場合の輝炎領域で記録されるイオン電流にはギザギザしたスパイク状の信号が観察される。

(2) 高温空気燃焼を行った場合の不輝炎領域で記録されるイオン電流波形には明確なピークが観察され、乱流予混合火炎で記録されるイオン電流に類似している。イオンが存在する領域とイオンが存在しない領域が明確に区別できる。すなわち、火炎帯は未燃焼混合気あるいは燃焼ガスと、局所的な反応帯が明確に区別できる場であることが推定できる。

本研究を行うにあたり、東京都立工業高等専門学校 学生 加藤正憲君にご協力いただいた。また、東北大

学流体科学研究所名誉教授 新岡嵩先生には、貴重なご意見・ご討論を賜った。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Katsuki, M. and Hasegawa, T., *Proc. Combust. Inst.*, **27** (1998), 3135-3146.
- (2) Wüning, J. A. and Wüning, J. G., *Paper presented at 4th Symp. High Temperature Air Combust.*, (2001), Paper No. 1.
- (3) 古川純一, 東京都立工業高等専門学校研究報告, **38** (2003), 25-30.
- (4) Furukawa, J., ほか 3 名, *J. Fluid Mech.*, **462** (2002), 209-243.
- (5) 古川純一・岡本京子, 燃焼研究, **93** (1993), 45-50.
- (6) 古川純一・ほか 2 名, 燃焼の科学と技術, **1** (1992), 51-57.