

超過エンタルピ火炎の実験的研究（第二報）

竹野 忠夫・佐藤 研二

A Further Experimental Study on the Excess Enthalpy Flame
By
Tadao TAKENO and Kenji SATO

Abstract: A further experimental study was performed on the excess enthalpy flame proposed recently by the present authors. In the light of the previous experimental study, a burner was newly designed to reduce the heat loss and to prevent the metal block from formation of the detrimental oxide film on the surface. The burner was found successful to extend the range of stable flame region. In addition, the sole effect of the internal heat recirculation inside the block was examined by using a special burner in which the effect of preheat in the upstream of the block was removed.

概 要

我々は、最近提案した超過エンタルピ火炎の方法の超希薄混合気の燃焼に対する有効性を確かめるために、特別な燃焼器を設計製作して、火炎の安定範囲および温度分布の測定を行ってきた。

本研究では、より希薄な混合気の燃焼を実現するために、これまでの燃焼器の問題点を改良した燃焼器を製作して実験を行うとともに、超過エンタルピ火炎の方法の有効性をより直接的に調べる実験を行った。

1 ま え が き

最近我々は希薄可燃限界以下の超希薄混合気や低発熱量ガスを燃焼させる方法の一つとして、超過エンタルピ火炎の方法を提案した[1]。この方法は、一次元火炎帯内に熱伝導率の大きな通気性固体を挿入し、その固体部分を通じて下流側から上流側に熱を循環させることによって、超過エンタルピ火炎を実現しようとするものである。最初に火炎理論にもとづく簡単な解析によって、このような火炎のすぐれた性質を明らかにした[1]~[4]。

一方、この方法の超希薄混合気の燃焼に対する有効性を調べるために、特別な燃焼器を設計製作して実験を行い、火炎安定範囲等を調べてきた[3]、[5]、[6]。これまでの実験では、火炎安定範囲が希薄可燃限界以下まで拡がることが示されたが、その拡がりには予想して

いた程には大きくなかった。この原因として、燃焼器からの熱損失が大きいこと、通気性固体として用いた鉄製のメタルブロック（焼結法により製作）の表面に厚い酸化膜が形成され、固体と気体との間で熱交換が十分行われなかったことの二点が考えられた。また、用いた燃焼器では通気性固体の内部での熱循環のほかに、通気性固体の外部での熱循環も存在したために、両方の熱循環の効果が重なって現われ、通気性固体単独の効果を明らかにすることができなかった。

そこで本研究では、まず従来の実験に用いた燃焼器よりもさらに希薄な混合気の燃焼を実現するために、前述の問題点を考慮し改良を加えた新しい燃焼器を設計製作して実験を行った。さらに、通気性固体内部の熱循環による効果のみでも火炎が安定化されることを直接的に調べる実験も行った。

2 実験装置

実験装置は空気および燃料供給系、燃焼器、温度記録計等で構成されているが、燃焼器以外の部分は前報[5]、[6]で報告したものとほぼ同じであるので説明を省略する。実験はメタン空気混合気を用いて行った。

2.1 Type B 燃焼器

従来の燃焼器（[3]、[5]、[6]）をType A、新しく製作した燃焼器をType Bと呼ぶことにする。図1にType B燃焼器の断面図を示す。Type A燃焼器においては、高温の燃焼ガスが、低温の未燃ガスの外側を流れる構造としたが、このため外界と燃焼ガスとの間に大きな温度差が生じ、熱損失が増加する要因となったものと考えられたために、Type B燃焼器では逆に低温の未燃ガスが周囲を流れて高温の燃焼ガスを囲む構造とした。

この燃焼器は、混合気導入部と燃焼ガス排出ノズルを兼ねたステンレスでできた燃焼器上部、熱損失を少なく抑えるために熱伝導率の小さい石英でつくられた内筒および外筒から構成されている。内筒の内部には上に向かって順に多孔質発泡金属（以下、発泡金属と略す）、メタルブロック、ヒータ、さらにもう1個の発泡金属が置かれている。

あらかじめ混合気室で混合されたメタン空気混合気は、燃焼器上部の外壁の吹出口から燃焼器に入り、すきまを通り、さらに内筒と外筒との間の流路を下に向かって流れ、高温の燃焼ガスと熱交換を行って、ノズルを通してメタルブロックに導かれる。図2にメタルブロックの外観を示す。このブロックは通気性固体の役割を果し、この燃焼器の最も重要な部分で、流路全体に流れ方向に平行な多数の細い穴があいている。混合気がこの穴の中を化学反応を行いながら通過し、反応で発生した熱が熱伝導率の大きな固体部分を通じて上流の低温の気体に循環され、未燃混合気が予熱されることによって超過エンタルピがもたらされるように意図されている。Type A燃焼器で用いた鉄製のメタルブロックでは、その表面に厚い酸化膜が形成されたために、Type Bではブロックをより耐酸化性のすぐれたステンレス（SUS 430）で製作した。穴の配置の形状は鉄製のものと同じであり、ブロック長さは16.5 mmである。ブロックの周囲部分は、ふく射によるブロックから半径方向外側への熱の流れを少なくするために、熱伝導率の小さなジルコニアセメントを用いて成形してある。ヒータには、発熱体としてType Aで使用したのと同じカンタル線を用いてあり、カンタル線を囲む部

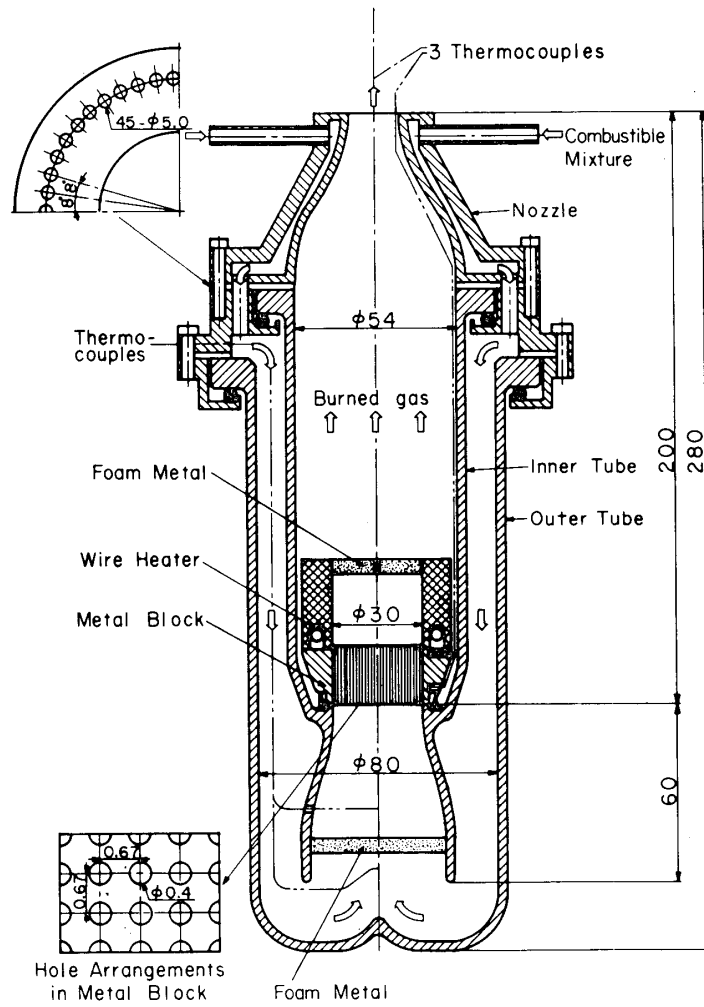


図1 TypeB 燃焼器断面

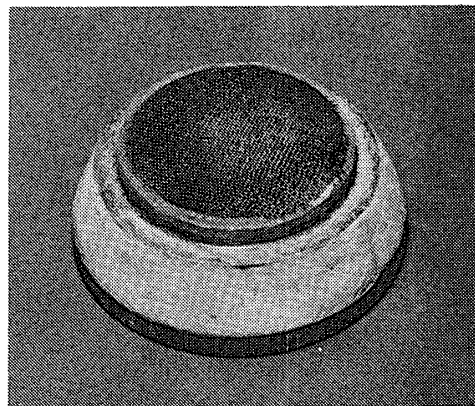


図2 メタルブロック外観

分はセラミックスでできている。メタルブロックを出た燃焼ガスは、下流の発泡金属を通り、内筒上部のノズルを通して上方に流れ出る。内筒の外面および外筒の内面と外面には、ふく射による熱損失を少なくするためにクロム蒸着が施されている。

燃焼器には、ブロックの上流側の気体の温度測定用に3個、ブロック固体部分の温度測定用に2個の Pt/Pt-Rh 13% シース熱電対（素線径 0.32 mm, シース外径 1.6 mm, 接点露出型）が取り付けられており、その出力は打点式記録計に記録される。ブロックの下流側の高温の気体の温度測定には、分解能をより高くし、かつふく射による測定誤差を少なくするために、素線径が 0.1 mm の Pt/Pt-Rh 13% 熱電対を外径 1.2 mm の二つ穴がいしに入れたものを用いた。この熱電対は二次元微動装置に取り付けられて、上下方向および半径方向に移動できるようになっており、その出力は X・Y-t 記録計に記録した。ブロックの穴の中の気体の温度を正確に測定することは技術的に非常に困難であるため行わなかった。

なお、燃焼器からの熱損失の影響をより小さくするために、燃焼器は断熱材で作った容器に入れて実験を行った。図3にこの容器の概略を示す。

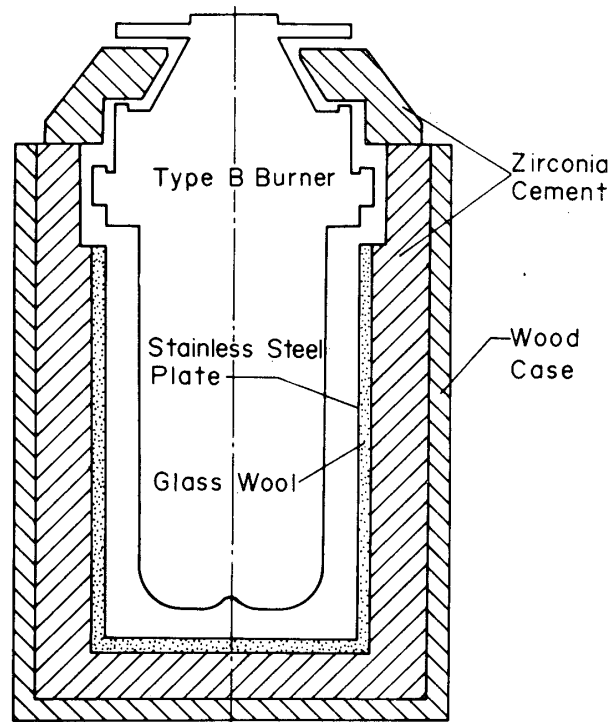


図3 断熱容器

2.2 Type B' 燃焼器

Type B 燃焼器では、可能な限り希薄な混合気の燃焼の実現をめざした。そのため、熱損失をできるだけ軽減する目的で、高温の燃焼ガスと低温の未燃ガスとの間で積極的に熱交換を行う構造となっている。したがって、未燃ガスがメタルブロックの入口に至るまでにす

に予熱されていることになる。これに対し、このようなブロックの外部での熱循環（外部熱循環）による予熱の効果を取り除き、通気性固体としてのブロック内での熱循環（内部熱循環）の効果のみを直接的に調べるために Type B' 燃焼器を製作した。

図4に Type B' 燃焼器の断面図を示す。この燃焼器は、Type B 燃焼器を利用して製作したものであり、その主要部は Type B と共通である。すなわち、Type B の外筒を取り除いて、内筒および上方のノズル部分はそのまま用いている。内筒入口の上流側には混合気導入用に薄いアルミ製のダクトが取り付けられており、混合室から供給された混合気がダクトの底部から入るようになっている。ダクト部は、メタルブロックからのふく射等による温度上昇を抑えるために、その側方に置かれた送風機によって空冷される。メタルブロック入口から下流側の内筒の外側は、半径方向外側への熱損失量を少なくするために、耐熱性の良いガラス繊維で囲み、さらにその表面をステンレス板でおおった。

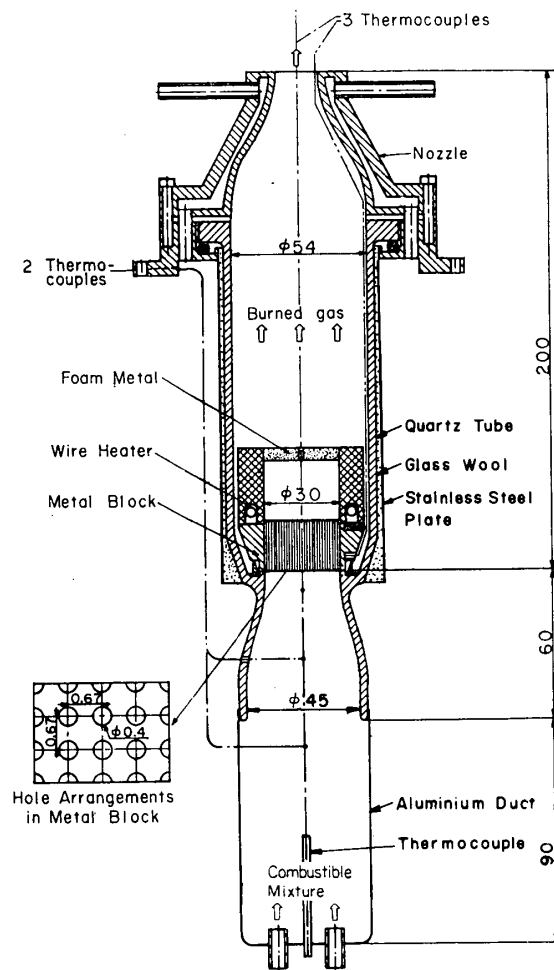


図4 Type B' 燃焼器断面

3 実験方法

Type B 燃焼器での実験方法は Type A のものと同じである。すなわち、着火は、最初に少量の空気を流しておき、メタルブロックの固体部分の温度をヒータによって 1100 K に加熱したところで空気流量を増加した後メタンの供給を開始する。着火後、当量比を希薄可燃限界付近の値に保ったまま混合気流量を増加し、同時にヒータ出力を徐々に下げ、出力を零とした状態で定常状態に到達するのを待つ。流量と当量比による火炎の安定範囲の測定では、空気流量を一定のままメタンの流量を少し減少させて当量比を小さくし、その当量比で定常状態に達することを確認する。この操作を、消炎が生じる当量比に至るまで繰り返す。定常状態の判断は、温度記録計で系全体の変化がなくなったとみなせる時点からさらに 30 分間一定の状態が持続することを基準とした。温度の空間分布の測定も定常状態に到達したところで行った。

メタルブロックは、長時間の連続使用により、固体表面上に酸化膜が形成されるので、ある限界以上に酸化膜が形成されたブロックは新しいものと交換することにした。このため、Type A 燃焼器の場合と同様に、毎回実験前に $500\text{ cm}^3/\text{sec}$ の流量の空気を流してメタルブロックでの圧力損失を調べ、それが 40 mm Aq 以上に達した場合に交換することにした。しかし、本研究で用いたステンレスのブロックでは、その表面の酸化膜は鉄製のものに比べて薄く、圧力損失は 20 mm Aq 以上には増加せず、このためほとんど交換する必要が生じなかった。なお、この酸化膜の形成の様子は金属顕微鏡写真によってより詳細に調べることにした。

一方、Type B' 燃焼器では、前述したように外部熱循環による予熱の効果を取り去って、ブロック内部での内部熱循環の効果のみを調べることにした。しかし、外部熱循環を取り去ると、ブロックからの熱損失もまた増加し固体温度が低下することになる。そこで、この熱損失の影響を打ち消す必要がある。この実験では、熱損失とつりあうようにヒータによってブロックに熱を与え、見かけ上ブロックからの熱損失のない状態をつくりだすようにした。すなわち、ブロックからの熱損失がなければ、その出口下流の最高温度は断熱火炎温度に一致することになるはずなので、ヒータの出力は、測定によって得られた最高温度が断熱火炎温度に一致するように調整した。実験では、このような条件のもとで、希薄可燃限界以下の混合気が燃焼できるかを調べることにした。

4 実験結果

4.1 Type B 燃焼器の実験結果

4.1.1 火炎安定範囲

図5に Type B 燃焼器の実験で測定した火炎安定範囲を示す。横軸は当量比 Φ を、縦軸は混合気流量を示す。太い実線が安定限界である。比較のために、Type A 燃焼器の安定限界も破線で示した。希薄可燃限界の値としては文献[7]のものを示した。空気流量を一定とし、メタンの流量を減らしていくとき、限界値に達すると、Type A と同様に定常状態に達することなく燃焼器全体の温度が降下し続け、ついにはメタルブロック出口と下流発泡金属との

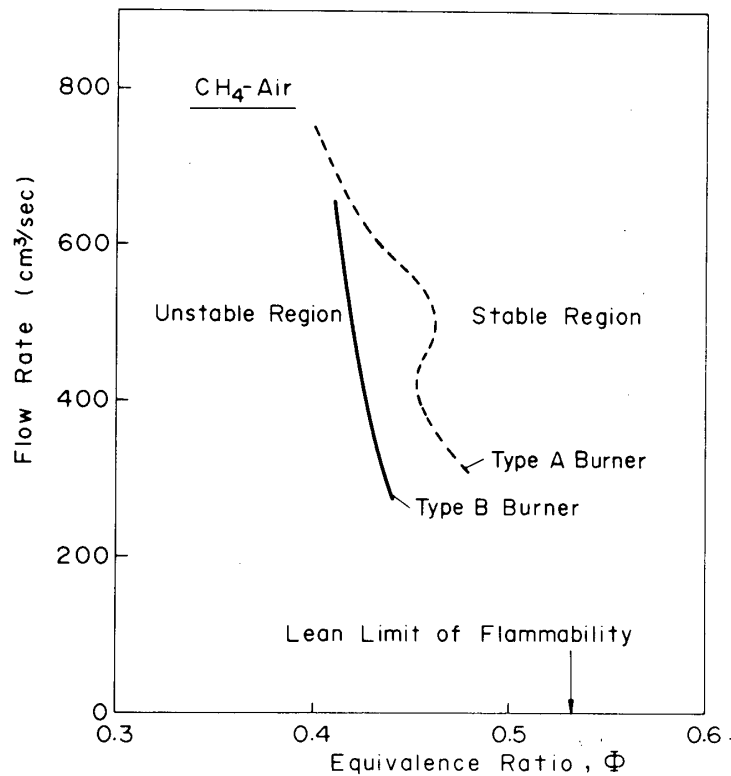


図5 火炎安定範囲

間の気体の温度が急激に下がり消炎する。燃焼ガス出口からの目視観察によると、このとき下流発泡金属部が急激に暗くなるのがみられる。火炎安定範囲は希薄可燃限界以下まで広がっており、測定を行った流量範囲では流量が増加するほど拡がりは大きい。Type A に比べるとより希薄側にまで広がっていることがわかる。

4.1.2 流れ方向温度分布

図6に、流量を一定とし当量比 Φ を変えたときの流れ方向温度分布の変化を示す。△、▲印は、それぞれ気体および固体の測定温度を表わす。気体の温度は、流路中心軸上で測定したものである。 T_{ba} は、平衡計算で求めたその当量比に対する断熱火炎温度を示す。

温度分布は、Type A 燃焼器のものに比べ全体的に高温になっている。メタルブロック入口の上流側ですでにかなり予熱されており、最高温度は断熱火炎温度よりも高温になっている。ブロック下流の発泡金属では放射による下流方向への熱損失のためかなり大きな温度降下がある。またブロックの固体部分の温度勾配は、Type A のものにと比べて大きくなっている。ブロック出口での気体と固体との間の温度差は、かなり大きい。 Φ を小さくすると、固体温度および気体の最高温度はともに低下する。

図7は、 Φ を一定とし混合気流量を変化したときの流れ方向温度分布の変化を示す。メタルブロック入口上流での気体温度はほとんど変化しないが、流量が多いほど最高温度は高くなる。一方固体温度は流量の変化に対してほとんど変化しないが、流量が多いほど温度勾配

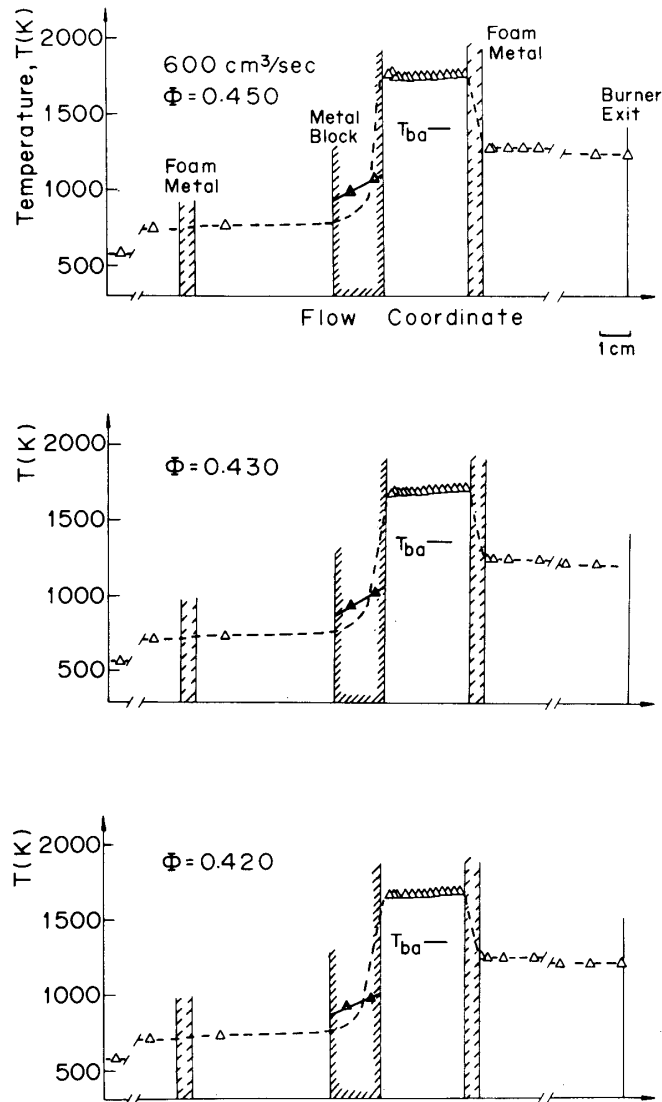


図6 流れ方向温度分布 (Type B 燃焼器)

が大きくなっている。

4.2 Type B' 燃焼器の実験結果

図8にType B' 燃焼器を用いて行った実験で得られた典型的な流れ方向温度分布の例を示す。当量比 Φ は0.450で、これは希薄可燃限界 ($\Phi = 0.533$) よりも希薄な条件となっている。図から明らかなように、メタルブロック入口の上流側の気体の温度がほとんど室温と同じ状態で火炎が安定化されている。なお、この場合もメタルブロック出口では、気体と固体との間にかなり大きな温度差が存在する。

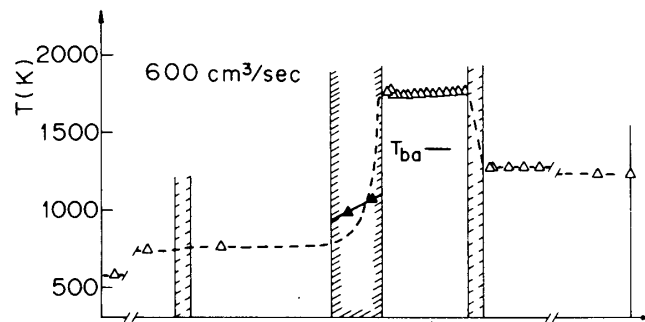
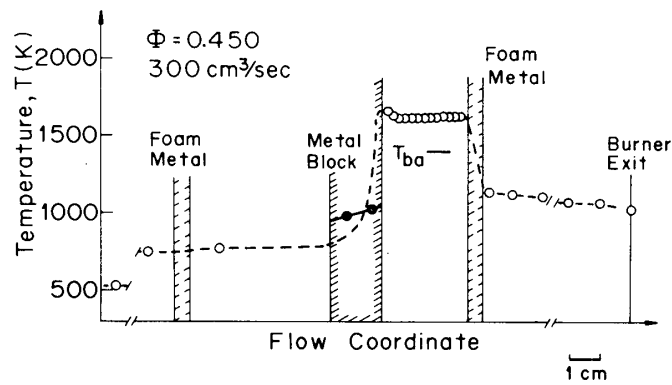


図7 流れ方向温度分布 (Type B 燃焼器)

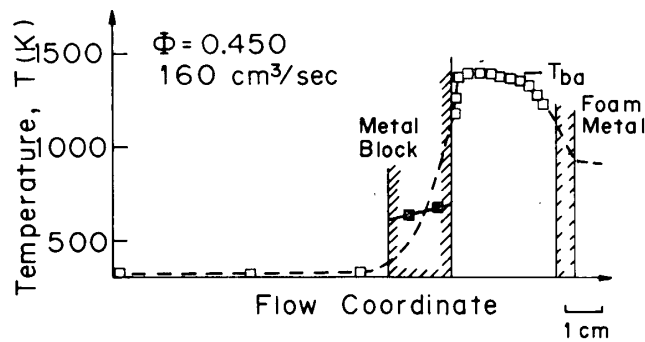


図8 流れ方向温度分布 (Type B' 燃焼器)

4.3 メタルブロックの顕微鏡写真

図9, 10は, それぞれ鉄製およびステンレス (SUS 430)製のメタルブロックの金属顕微鏡写真を示す. これらの写真は, ブロックの一部を切断してエポキシ樹脂に入れて加圧加熱して製作した試料の表面を研磨し, 金属顕微鏡により撮影したものである. 実験前および

実験後の写真を，流れに平行な断面と垂直な断面について示している．白っぽい部分が金属部である．

図9において，(a)は実験前のものであるが，金属部分のところどころに，暗くみえる空洞が存在している．メタルブロックは，加工上の問題から，焼結金属を用いて製作したが，写真で明らかなように，普通の金属そのものようには組織がち密でないことがわかる．(b)は実験後の状態を示しているが，0.1 mm程度の厚い酸化膜が形成されているのがみられる．

また，図10はステンレスのブロックの写真を示すが，実験前の断面を見ると，金属部にかなり多くの空洞を含んでいる箇所が存在する．実験後の写真において，流れに平行な断面は比較的酸化の少ない部分を示した．一方垂直な断面は比較的酸化が生じやすい下流部分を示しているが，酸化膜厚さは鉄製のブロックに比べると薄くなっている．

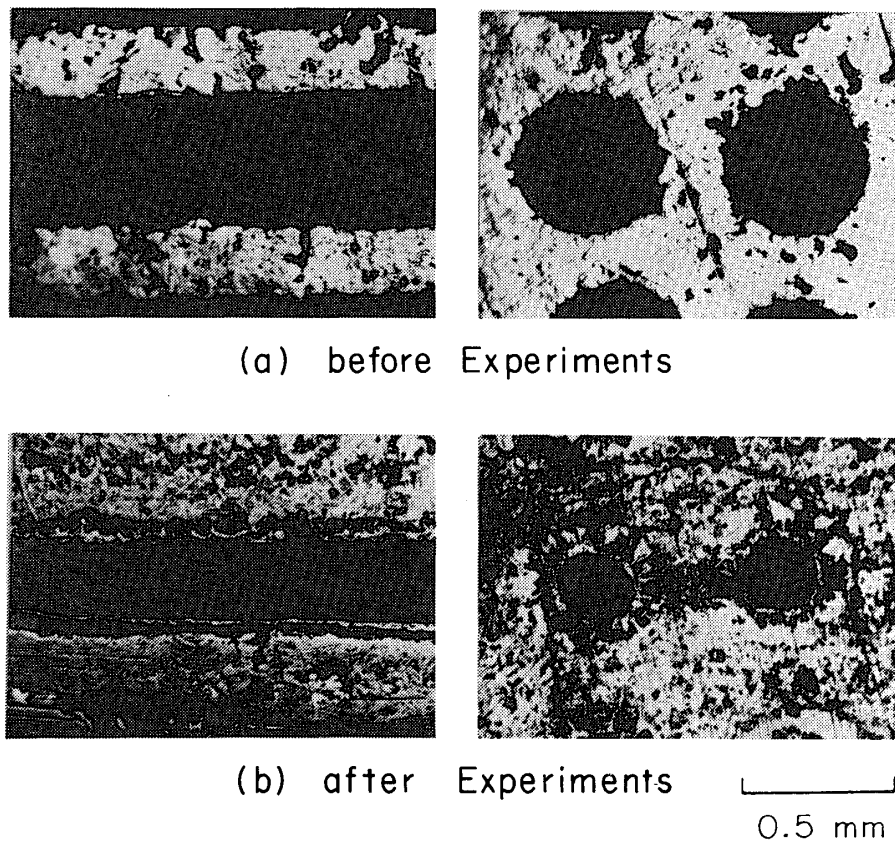


図9 鉄製メタルブロックの顕微鏡写真

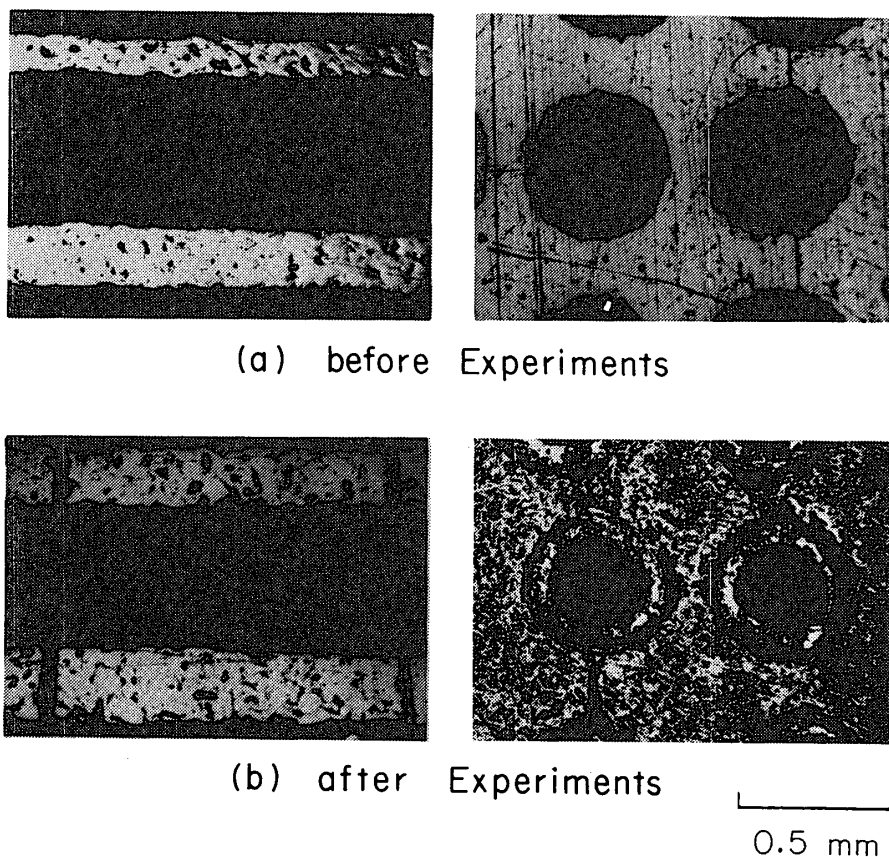


図10 ステンレス製メタルブロックの顕微鏡写真

5 考 察

Type B 燃焼器での測定で得られた火炎安定範囲は、Type A のものと同様、流量が増加するほど希薄側に大きく広がっているが、これは、流量を増加するほど燃焼器の全発熱量に対する熱損失の影響が相対的に少なくなってくるためと考えられる。また、Type B では、Type A に比べて安定範囲の拡がり大きいのが、これには構造を変えたことによって熱損失量が減少した効果が大きく寄与しているものと考えられる。

ところで、燃焼器の内部での熱循環は、前述したように通気性固体として用いたメタルブロックの内部での内部熱循環と、ブロックの外側での外部熱循環とに分けて考えることができる。超過エンタルピー火炎の方法[1]の超希薄混合気の燃焼に対する有効性を確かめるためには、本来は内部熱循環だけが存在する装置での実験がわかりやすい。しかし、Type B 燃焼器では、可能な限り希薄な混合気の燃焼を実現させようとしたために、燃焼器をできるだけ熱損失の少なくなるような構造とした。その結果、未燃ガスの大きな温度上昇を引き起こす外部熱循環が生じ、実際には内部熱循環と外部熱循環の効果が共存した形になっている。Type B 燃焼器では Type A に比べ、その構造の違いにより、外部熱循環によるメタルブロック入口上流での予熱の効果が大きい。

最高温度の値は室温を基準として計算によって求めた断熱火炎温度よりも高いが、この値

は空気温度をブロック入口の上流での温度として求めた断熱火炎温度[8]にはほぼ等しい。ところで、ブロック入口までは反応はほとんど進行せず、また最高温度となる位置では反応はほぼ終了しているものと考えられる。これらのことからブロック入口のすぐ上流と最高温度の位置との間の熱のバランスを考えると、この最高温度の値は、主として外部熱循環によってブロック入口上流の温度が上昇したためと考えられる。流量が少なくなると最高温度は低下するが、これは流量が減少するほどブロックからの熱損失が相対的に増加するためと考えられる。

一方、Type B' 燃焼器を用いた実験では、メタルブロック入口上流側の気体の温度がほぼ室温と同じで、最高温度が断熱火炎温度と等しいという状態で、希薄可燃限界以下の混合気の火炎を安定化させることができた。この状態では、外部熱循環による予熱の効果およびメタルブロックからの熱損失がなく、内部熱循環の効果のみが存在する場が形成されていると考えられる。このことにより、通気性固体の内部熱循環のみでも超希薄混合気の燃焼が可能であることが示されたと考えられる。

ただし、Type B' 燃焼器の実験でも、メタルブロック出口での固体と気体との間の温度差は大きい。これは、顕微鏡写真でみられるように、用いたブロックの組織が普通の金属そのものようにち密でないために、固体内部で流れ方向の熱伝導が効率よく行われていないこと、表面に形成された酸化膜のために固体と気体との間の熱交換が十分に行われていないことの二点が原因になっているものと考えられる。

一方、Arbib らは流れによって容器内を循環する粒子中に火炎をつくり熱循環を計り超希薄混合気を燃焼させる実験を行っている[9]が、熱循環が十分になされていないことが報告されている。この原因として、粒子と気体との間の熱交換が十分に行われていないことがあげられている。このように、熱循環を用いた方法では、円滑な熱循環を行うことが大きな課題となっている。通気性固体を用いる我々の方法では、金属以外で耐熱性、耐酸化性があり、しかも比較的熱伝導率の良い物質を通気性固体として使用することが望ましい。このような物質を用いてより円滑な熱循環が得られる工夫を試みることによって、さらに希薄な混合気の燃焼を可能にすることができるものと考えられる。

5 結 論

- (1) 通気性固体を用いて熱循環をはかる超過エンタルピ火炎の概念にもとづいて製作した燃焼器においては、火炎安定範囲は通常の希薄可燃限界よりも希薄側にまで拡がり、その拡がりには流量が大きいほど大きい。
- (2) 火炎安定範囲の拡がりには、通気性固体内での内部熱循環の効果と、その外側での外部熱循環の効果によるものである。
- (3) 通気性固体の出口下流側に、断熱火炎温度よりも高い温度が実現された。これは主として外部熱循環によるものである。
- (4) 外部熱循環の存在しない燃焼器を用いた実験により、内部熱循環のみでも超希薄混合気を燃焼させることに有効であることが示された。
- (5) 内部熱循環は期待していたほどまだ十分には行われていない。この原因としては、通気

性固体として用いたメタルブロックの組織がち密でないために固体内部で流れ方向の熱伝導が効率よく行われないうこと、メタルブロック表面での酸化膜の形成により固体と気体との間の円滑な熱伝達が阻害されたこと、さらにブロックから周囲へのふく射熱の流れによる固体温度の低下が考えられる。

最後に、実験に協力していただいた奥村正一氏および竹野研究室の方々、メタルブロックを提供していただいた東京焼結金属KKの征矢達也氏、金属顕微鏡写真の撮影でお世話になった小原研究室の武藤範雄氏に感謝の意を表します。

1980年12月12日 原動機部

参 考 文 献

- [1] 竹野忠夫, 佐藤研二, 第10回流体力学講演会講演集 (1978), 244.
- [2] Takeno, T. and Sato, K., *Comb. Sci. Tech.* 20 (1979), 73.
- [3] Takeno, T. and Sato, K., A Theoretical and Experimental Study on an Excess Enthalpy Flame, Paper presented at the 7th Intern. Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems, Göttingen, August 1979 (to appear in *Progress in Astronautics and Aeronautics Series, AIAA*).
- [4] Takeno, T., Sato, K., and Hase, K., A Theoretical Study on an Excess Enthalpy Flame, 18th Symp. (Intern.) on Comb. (in press).
- [5] 竹野忠夫, 佐藤研二, 第6回衝撃工学, 宇宙・特殊環境工学シンポジウム (1979), 97.
- [6] 竹野忠夫, 佐藤研二, 宇宙航空研究所報告, 第16巻 第1号(C) (1980), 573.
- [7] Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion Flames and Explosions of Gases* (2nd Ed.), Academic Press, (1961).
- [8] 湯浅三郎, 東京都立工科短期大学研究報告 (1980), 71.
- [9] Arbib, H.A., Sawyer, R.F., and Weinberg, F.J., The Combustion Characteristics of Spouted Bed, 18th Symp. (Intern.) on Comb. (in press).