

超過エンタルピ火炎の実験的研究

竹野 忠夫・佐藤 研二

An Experimental Study on An Excess Enthalpy Flame

By

Tadao TAKENO and Kenji SATO

Abstract: In our previous papers a simple idea was proposed to produce an excess enthalpy flame by inserting a high-conductivity porous solid into the one-dimensional flame zone to recirculate heat through the solid from the downstream high temperature region to the upstream low temperature region. The potentiality of the proposed artificially modified flame system was analyzed on the basis of the simplified flame system to reveal several attractive features of the system. In this experimental study a special burner was designed on the basis of the proposed idea and the stability characteristics for the burner was studied to examine whether the proposed system can actually be realized.

概 要

我々は、希薄可燃限界以下の超希薄混合気を燃焼させる方法の一つとして、一次元火炎帯内に熱伝導率の高い通気性固体を挿入し、その固体部分を通じて熱循環を計ることによって超過エンタルピ火炎をつくる方法を提案し、これまで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特徴を明らかにしてきた。

本研究は、この方法の超希薄混合気の燃焼に対する有効性を実際に確認するためのもので、特別な燃焼器を設計製作して実験を行い、火炎の安定範囲および温度分布を測定によって求めるとともに、得られた結果に対して検討を行った。

1. はじめに

近年、石油危機を発端とするエネルギー供給事情の悪化に伴って、新エネルギーの開発あるいはエネルギーの有効利用が大きな問題となっている。太陽エネルギー、原子力エネルギーをはじめ種々の比較的新しいエネルギー源についての研究も盛んに行われているが、当面エネルギーの大部分は化石燃料を中心とした燃焼によってもたらされるものと考えられている。このような理由により、最近の燃焼技術の重要な課題の一つとして、低品位燃料や普通の方法では燃焼が困難な物質を何らかの工夫をすることによってうまく燃焼させ熱エネルギーを有効に取り出

す方法の開発があり、このための基礎的および実用的研究が盛んに行われるようになってきた。

たとえば、炭鉱における換気後のガス、製鉄における高炉ガス、石油精製プラントにおける廃ガスなどは多量の燃料成分を含んでいるが、可燃限界以下の超希薄混合気であるために、通常の方法では燃焼させることができずむだに捨てられているものもあり、大気汚染の原因にもなっている。このような超希薄混合気を燃焼させることができれば、有効な熱エネルギーとして回収されるばかりでなく、大気汚染の防止にも役立つことになるのでいくつかの燃焼方法が考案されている。その一つに予熱法があるが、これは混合気を外部熱源を用いて予熱することによって反応帯の温度を高め反応を促進させる簡単な方法であるが、低コストで供給できる外部熱源がない限り実用化は困難であるとされている[1]。

これに対し、1971年に Weinberg は超希薄混合気を燃焼させる方法の一つとして、外から熱を補給することなく熱交換器を用いて燃焼ガスから熱を循環して未燃ガスを予熱し安定な燃焼をさせる、いわゆる超過エンタルピ燃焼の概念を提案した[2]。等圧燃焼においては、最初と最後の全エンタルピは同じで、化学エンタルピが熱エンタルピに変化する。この方法では未燃ガスが熱の循環によって予熱され、反応で化学エンタルピを消費することなく熱エンタルピを得ることになり、燃焼の過程において最初と最後の全エンタルピより大きな超過エンタルピがもたらされる。これによって最終ガス温度より高い温度が火炎帯内部に実現し、反応が促進されて安定な火炎がつくられることになる。その後の Weinberg らの一連の解析的および実験的研究によって、この概念にもとづく方法が火炎の安定範囲を希薄可燃限界よりも希薄な領域に広げるのに有効であることが示された[3]。これまでにいくつかの熱交換の具体的方法が提案され検討されている。

Weinberg らの方法では何らかの熱交換器を用いて燃焼ガスから未燃ガスへと熱を循環させるが、熱は火炎帯の外側を循環し、火炎構造は火炎帯に入る未燃ガスの温度が高くなるだけで本質的には普通の火炎のものと同じと考えられる。これに対して我々は、一次元火炎帯の中に耐熱金属等の熱伝導率の高い通気性固体をそう入するという簡単な方法によって、火炎構造そのものを変化させて直接的に超過エンタルピを得る方法を提案した。これまでに、この超過エンタルピ火炎について火炎理論にもとづく簡単な解析によってその特徴を検討し、そのすぐれた性質を明らかにしてきた[4]～[7]。この提案で火炎帯内部における具体的な熱循環の方法としてはいろいろなものが考えられるが、図1にその一例を示す。これは、固体に普通の火炎帯厚さ δ に比べて十分小さな直径 d の穴を互いに平行に明け、この中を可燃性混合気を流して反応させる方法である。この方法ではまず下流の高温の気体から固体に熱が伝えられ、熱伝導率の高い固体部分を通じて上流に向かって熱が流れ、次に上流の低温の気体に固体から熱が伝えられることになる。これによって上流の気体は反応によって化学エンタルピを消費することなく熱を得て、この領域に超過エンタルピがもたらされ、反応帯では断熱火炎温度よりも高い温度ピークが現われることになる。

本研究では、この方法の超希薄混合気の燃焼に対する有効性を実際に確かめるために、特別な燃焼器を設計製作して実験を行ったので報告する。

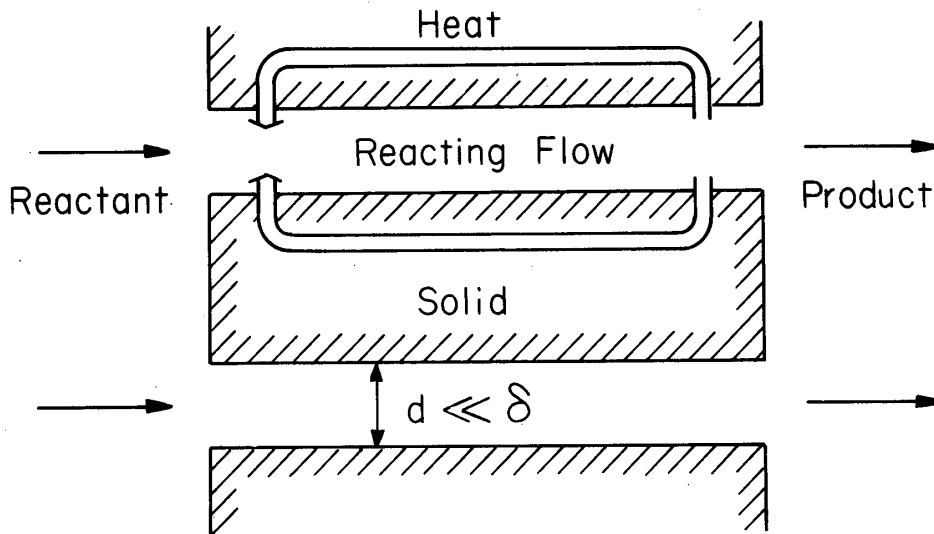


図1 熱循環の具体例

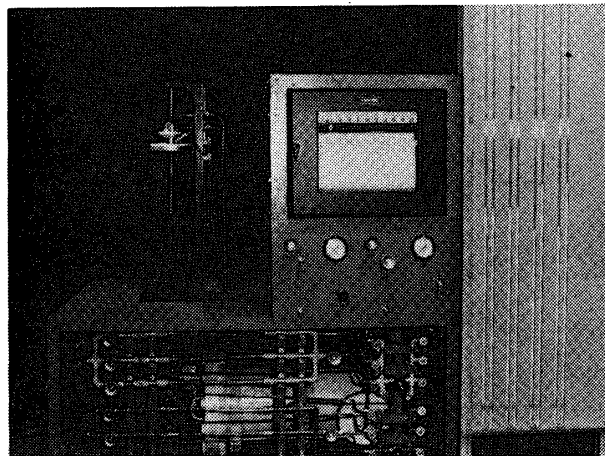


図2 実験装置全体外観

2. 実験装置

実験装置の外観を図2の写真に示す。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。燃料としてはメタン（純度99.0%以上）を用いた。

2.1 空気および燃料供給系

空気および燃料のメタンの供給系の系統図を図3に示す。空気は小型空気圧縮機によって供給され、一次、二次の減圧弁、サージタンク、オリフィスおよび流量制御弁を経て燃焼器に送られる。メタンはボンベより供給され、ボンベ出口の一次減圧弁、二次減圧弁、サージタンク、オリフィスおよび流量制御弁を経て燃焼器に送られる。広い範囲の流量が測定できるように、オリフィスは空気系統および燃料系統にそれぞれ3個並列に取り付けられており、流量に応じて切り換えて使用し、オリフィス差圧はフルスケール1200 mmAqの水柱マンオメータで読みとる。オリフィスの上流圧は1 kg/cm² Gとし、差圧と流量との関係は湿式ガス

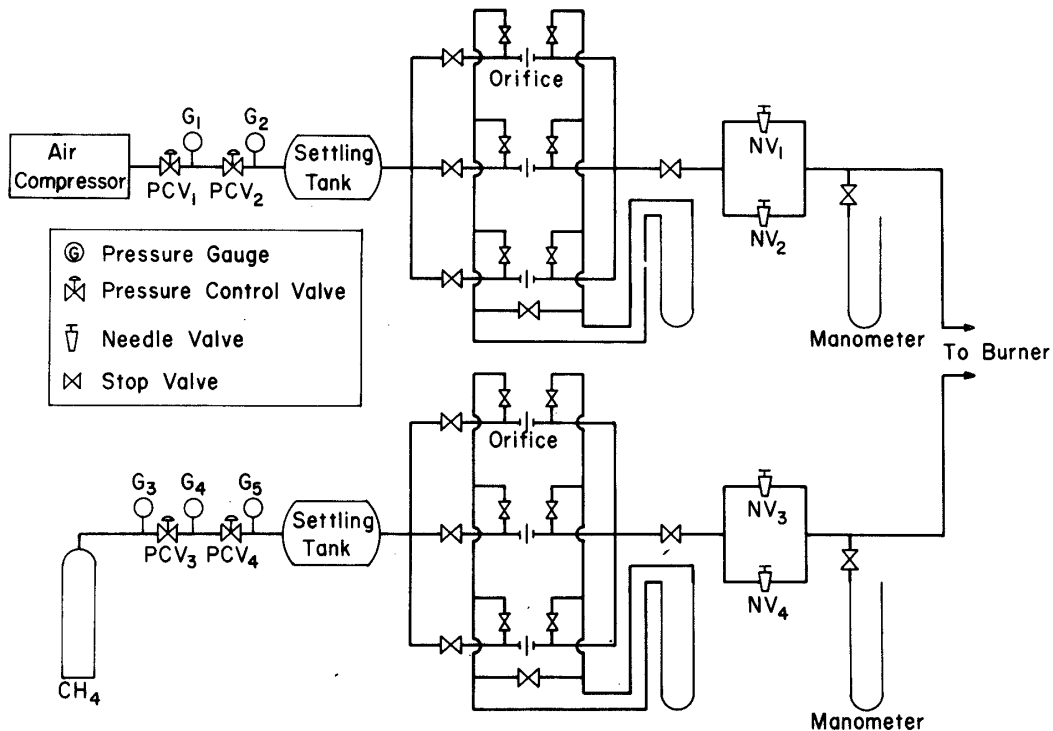


図3 空気および燃料供給系

メータによって検定した。また、流量制御弁も空気系統および燃料系統にそれぞれ2個並列に取り付けられており、広い流量範囲で精度良く制御ができるようになっている。流量制御弁の下流から静圧を取り出して他端を大気開放としたマノメータにつないで、燃焼器内の圧力の計測に用いた。

2.2 燃焼器

超希薄混合気では発熱量が小さいので、安定な火炎を維持するためには燃焼器からの熱損失をできるだけ少なくする必要がある。そこで燃焼器の設計にあたっては、特に熱損失が少なくなるように工夫した。図4に燃焼器断面図を、図5にその外観を示す。まず、燃焼器の概略と気体の流れについて述べる。

燃焼器は内筒と外筒で構成され、内筒主要部と外筒は熱伝導率の小さな石英でできている。内筒の内部には上から、多孔質発泡金属、メタルブロック、ヒータ、さらに多孔質発泡金属がおかれている。空気とメタンは内筒内部の上方で混合された後、多孔質発泡金属で整流され、ノズルを通過してメタルブロックに導かれる。メタルブロックは通気性固体の役割をはたす最も重要な部分で、流路全体に流れ方向に平行な多数の細い穴があいており、混合気はこの中を反応をしながら通過するように意図されている。メタルブロックの穴を出た燃焼ガスは、下流の多孔質発泡金属を通過した後、内筒と外筒との間の流路を通過して上方へ流れ出る。

a) 内筒

内筒の外観の写真を図6に示す。内筒はつり下げ式で、三個の部分に分割できる。つり下

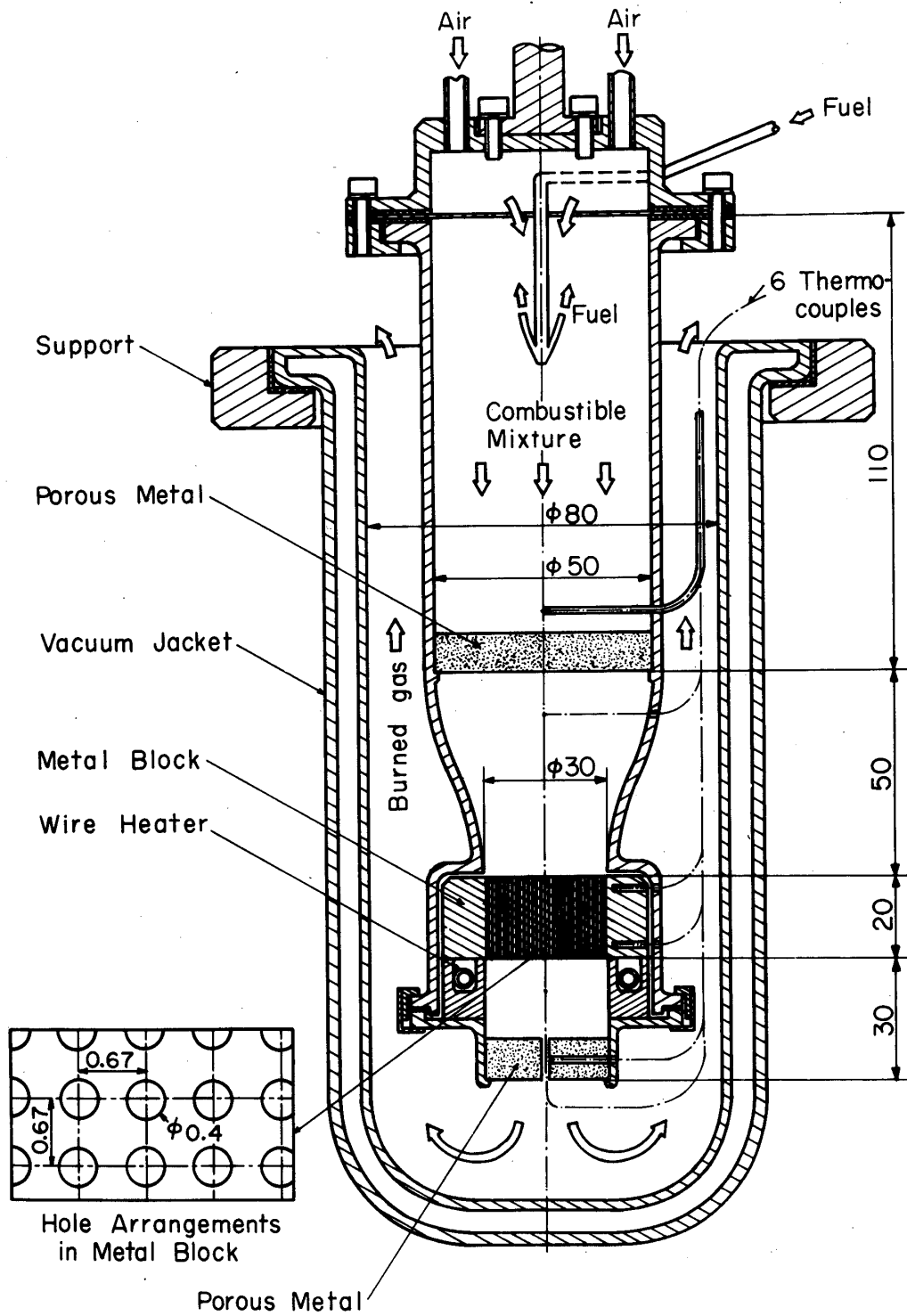


図4 燃焼器断面図

げ用の棒および供給系に接続される最上部はステンレスで作られている。この部分の上端には2個の空気吹出口があり、また側面からは燃料噴射管が入る。燃料噴射管は中心軸上に

あって四個の噴射孔に分かれており、メタンはこの噴射孔から上方に向かって噴出され空気と混合する。内筒中央部との接続部には混合をよくするためのステンレスのじやま板がおかれている。内筒中央部と下部は厚さ2.5~3mmの石英でできており、その内部表面にはメタルブロックからのふく射を反射するためにクロムメッキが施されている。

b) メタルブロック

前述したようにメタルブロックは通気性固体の役割をはたす部分で、この燃焼器で最も重要な部分である。メタルブロックの幾可学的形状および材質の決定にあたっては、通気性固体として要求される以下の条件を考慮した。

まず、幾可学的形状については次の三つである。第一に、穴の内径 d が火炎帯の厚さ δ に比べて十分小さいことが必要である。これは d が δ にくらべて大きいと上流部分で火炎が高温の壁付近に形成されて固体から気体への熱の循環が行われなくなると考えられるからで、これを防ぎ固体と気体との間のスムーズな熱交換を生じさせ、流れ方向に一次元的な火炎構造をつくるためである。第二に、穴の径 d およびそのピッチは気体と固体との間の適切な熱伝達係数が得られるように決定する必要がある。これまでの解析によって、熱伝達係数が大きすぎると気体の最高温度があまり高くなり、逆に小さすぎると気体が固体を通

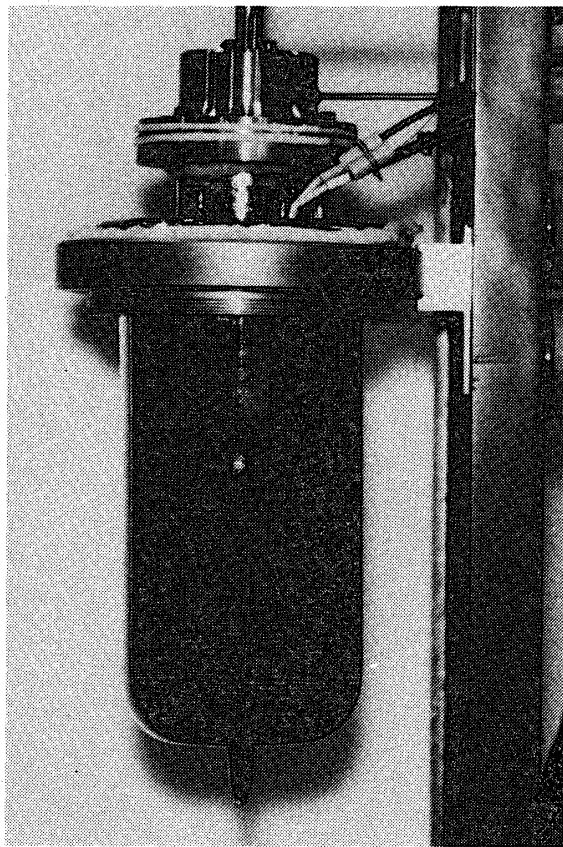


図5 燃焼器外観

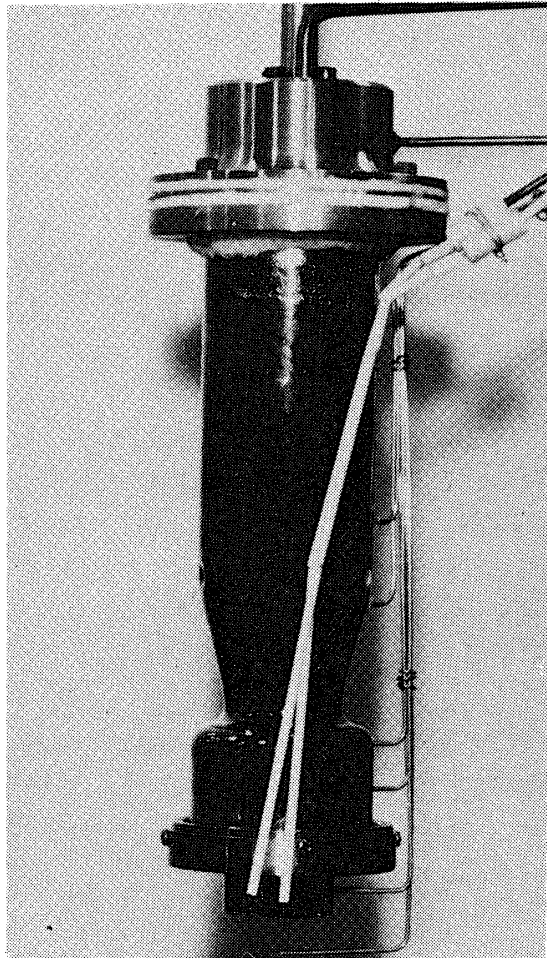


図6 内筒外観

過する間に両者の間で十分な熱交換を行うのに必要な長さが長くなりすぎることが示されている。このために、解析で得られた適切な無次元熱伝達係数が実現するように d およびピッチを決めることにした。無次元熱伝達係数はヌッセルト数 Nu と通気性固体の単位体積あたりの流路表面積との積によって決まる量で、 Nu はレイノルズ数の関数として層流円管流れに対する値を用いた。第三にブロックの有効径が十分大きいことである。これは、ブロックにおける単位時間の発熱量はその有効断面積に比例し、一方ブロック表面からの熱損失は温度が同じとすれば周囲の長さ按比例すると考えられるので、熱損失の影響を相対的に減らすためには有効断面積と周囲の長さの比を大きくする方が有利なためである。

また材質に関しては、熱伝導率が大いことにくわえ耐熱性のあることが要求される。これは、解析によって理想的なときには固体温度が断熱火炎温度に近い高温になることが示されているためである。

これらの条件に製作上の制約を加味して検討した結果、図7に示す形状のメタルブロックを通気性固体として用いることにした。これは鉄製の焼結ベント（東京焼結金属KK製）で、長さが20 mm、有効直径30 mmの断面積に内径0.4 mmの穴が0.67 mmピッチの四角形配

置で互いに平行に約1600個あいている。なお、ブロックには温度測定のための二個の熱電対用の穴があいている。

c) ヒータ

ヒータの概略を図8に示す。ヒータは、実験開始時にメタルブロックを電氣的に加熱するためのもので、発熱体として耐熱性のすぐれたカンタル線を用い、それをセラミックのケースに入れたものである。カンタル線は線径0.6mmのものをらせん状にまいてある。出力はスライダックスによって制御され、その最大出力は160Wである。セラミックケースの内側の壁はそのまま流路の側壁にもなっている。

d) 多孔質発泡金属

二個の多孔質発泡金属(住友電工KK製、商品名セルメット)は、整流作用のほかに高温のメタルブロックからのふく射熱を吸収して気体にもどし、外部への熱損失を少なくする作用を期待しておいたものである。上流側にはNi-Cr系の平均孔径2.0mm、厚さ10mmのものを、下流側にはより耐熱性のすぐれたNi-Cr-Al系の平均孔径2.5mm、厚さ10mmのものを、この多孔質発泡金属は、比表面積が大きいのでふく射熱を吸収する能力がすぐれており、さらに空隙率が1に近いために圧力損失は非常に小さい。

e) 外筒

外筒は肉厚3mmの石英でできており、熱伝導による外部への熱損失を少なくするために真空の中空部を持ち、内面にはクロムメッキが施されている。この外筒は内筒とは独立にスタンドに取り付けられており、容易に着脱できる。外筒の周囲には、石英製の燃焼器を保護するためのアルミ製カバーが取り付けられている。

f) 温度測定用熱電対

燃焼器内には、気体の温度測定用の4個、メタルブロックの固体部分の温度測定用に2個

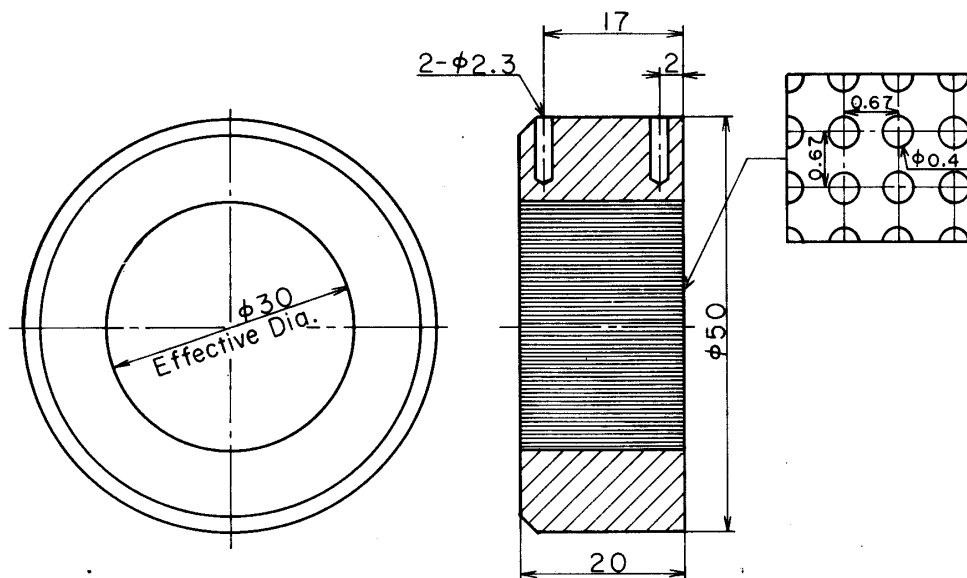


図7 メタルブロック

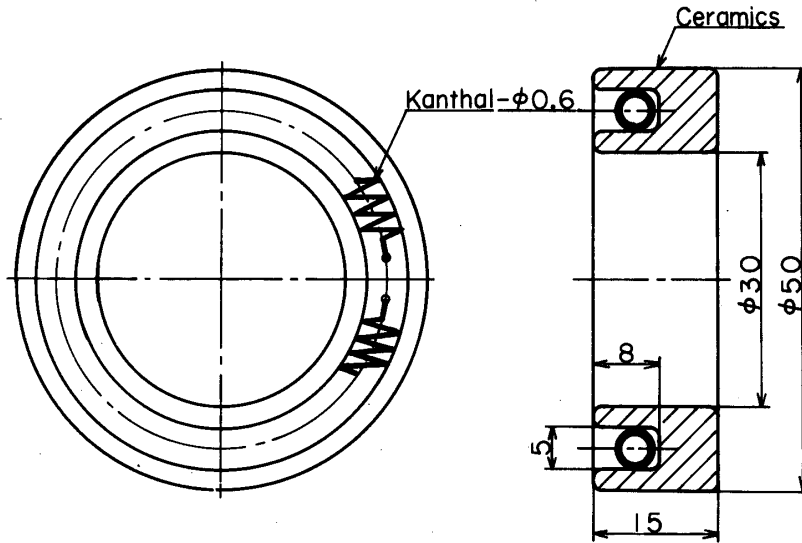


図8 ヒータ

の計6個のPt/Pt-Rh13%シース熱電対が取り付けられており、その出力は打点式記録計(Brown Yamatake Potentiometer N153×72V12)に記録される。シース熱電対は分解能および応答性を良くするため、入手可能な最小の素線径のもの(0.32mm, シース外径1.6mm)を使用し、接点は露出型とした。触媒反応を防ぐためにSiO₂被覆を施した気体用のものは接点が中心軸上にくるようにおかれ、そのうちメタルブロック下流側の一個は微動装置に取り付けられて流れ方向に移動できるようになっており、流れ方向温度分布の測定に用いる。

3. 実験方法

実験では、流量と当量比を変えたときの火炎の安定範囲および燃焼器内部の温度分布の変化を調べることにし、以下の方法で実験を行った。実験は、少量の空気を供給しながらヒータでメタルブロックを加熱することによって開始した。メタルブロックの温度が約1100 Kに達したところで空気流量を増加して同時にメタンの供給を開始し着火させる。続いて当量比 ϕ をほぼ希薄可燃限界付近の値に保ちながら流量を増加させて所定の流量と当量比とし、一方ヒータの出力を徐々に下げて零とした状態で定常状態に到達するのを待つ。

火炎の安定範囲を測定する場合は空気流量を一定とし、メタンの流量を少し減らし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ができるかどうかを確認する。この操作を消炎が生じる当量比に到達するまで繰り返す。定常状態の判断は、温度記録計で6個の熱電対の出力すべてが時間的に変動がなくなったとみなせる時点から30分間その状態が持続することを基準とした。

流れ方向の温度分布の測定は二つの場合について行った。一つは当量比の影響を、他の一つは流量の影響を調べる場合である。測定は、定常状態を確認した後に微動装置に取りつけ

た熱電対を移動させて行った。

鉄製のメタルブロックを長時間使用すると、固体表面上に酸化膜が形成される。この酸化膜は現象にいろいろな影響を与えることになるので、ある限界の厚さ以上に酸化膜が形成されたメタルブロックは新しいものと交換することにした。このため、毎回実験前に500 cm³/secの空気流量に対するメタルブロックでの圧力損失を調べ、40 mmAq以上に達するときには新しいものと交換した。

4. 実験結果

4.1 火炎安定範囲

図9に測定した火炎安定範囲を示す。横軸は当量比 ϕ を、たて軸はメタン・空気混合気の流量を表わす。比較のため図にはメタン・空気混合気に対する普通の希薄可燃限界の ϕ の値(=0.533)も示してある。希薄可燃限界の ϕ の値は測定者および測定方法によって若干異なるが、この図では代表的な値として[8]のものを用いた。太い実線が安定限界で、その右側が火炎が安定に存在する範囲を、また左側が火炎が存在できない範囲を示している。火炎安定範囲は希薄可燃限界よりも希薄側に広がっており、測定した流量が大きいほどその広がりは大きくなっている。

火炎安定範囲を求める実験では、前述したように空気流量を一定とし可燃限界付近から少

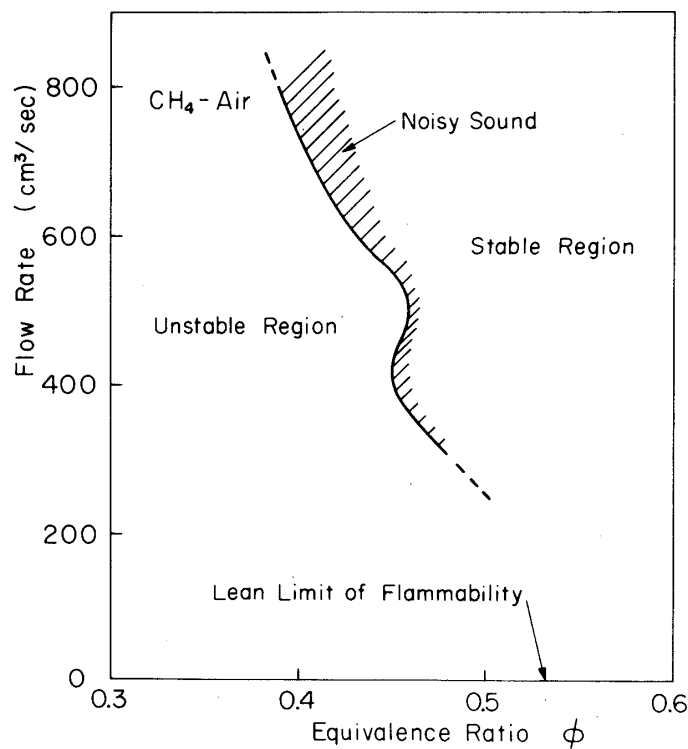


図9 火炎安定範囲

しずつメタンの流量を少なくしていったが、このとき図の斜線で示した部分に達すると、燃焼器内部で間欠的な音が発生し始めメタルブロック出口と下流の多孔質発泡金属との間では温度の時間的変動が観察された。この音は ϕ を小さくすると周波数が高くなるとともに大きくなっていく。さらに ϕ を小さくし限界値に達すると、定常状態に到達することなく系全体の温度が下がり続け、下流の多孔質発泡金属内中心での気体の温度が1100 K 程度に下るとこの部分およびメタルブロック下流の気体の温度が急激に降下し消炎にいたる。流量が大きいときには、メタルブロック下流の温度が急激に降下した直後に内筒出口の下流の領域に火炎が安定化される場合も観察された。しかし、この研究ではメタルブロック付近での火炎を対象としているので、これは消炎として取り扱った。以上のようにして求めた安定限界の再現性は良好であった。

4.2 流れ方向温度分布

内筒内の流れ方向の温度分布を図10, 11に示す。横軸は流れ方向の位置を、たて軸は温度

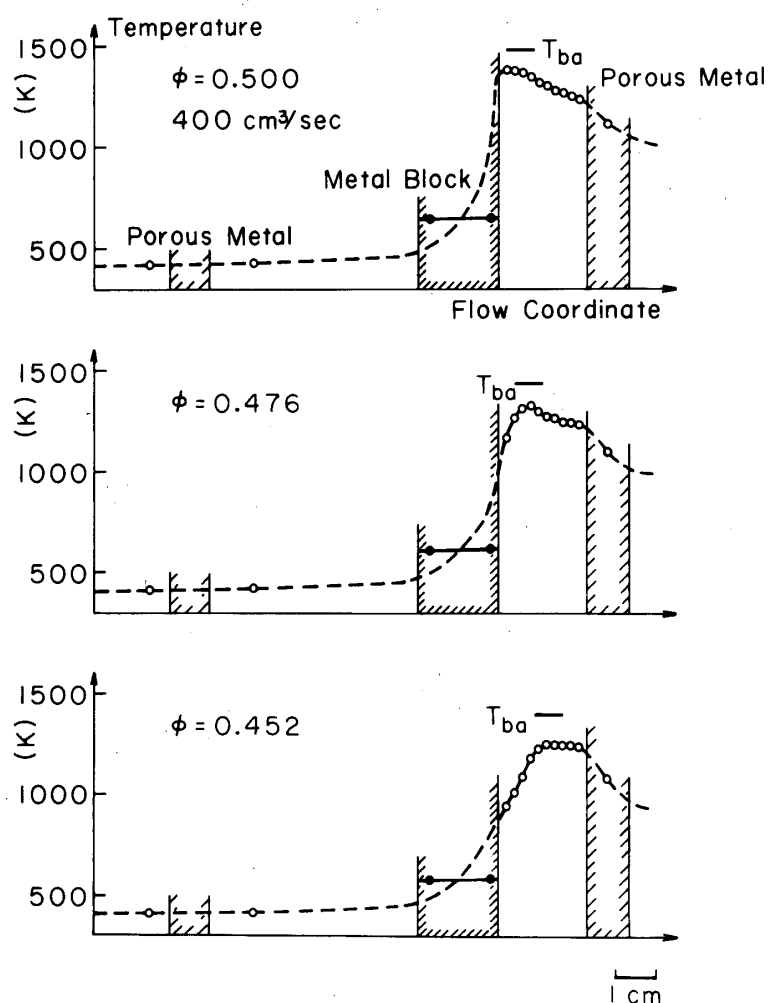


図10 流れ方向温度分布

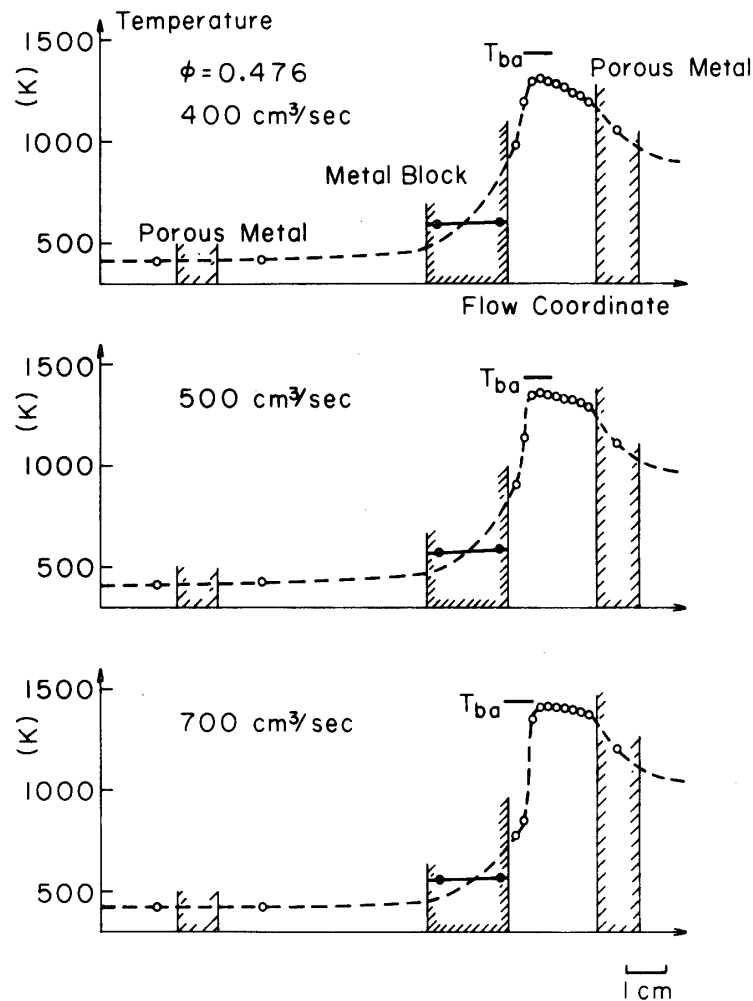


図11 流れ方向温度分布

を表わす。メタルブロックおよび2個の多孔質発泡金属は斜線で示した。白丸は気体の測定温度を、黒丸はメタルブロックの固体部分の測定温度を示す。破線および実線はそれぞれ気体および固体の温度分布を測定点をもとに推定して記入したものである。また、 T_{ba} は化学平衡計算によって求めたその ϕ に対する断熱火炎温度を表わす。メタルブロック出口と下流の多孔質発泡金属との間の気体の温度についてはふく射に対する補正を行っている。図10は流量を一定とし ϕ を変化させたときの温度分布の変化の様子を示したものである。空気と燃料はともに常温で燃焼器に流入する。上流の多孔質発泡金属付近の気体の温度は常温と比較すると幾分高くなっている。メタルブロックの固体部分の温度は断熱火炎温度と比較するとかなり低く約 600 K 程度であり、 ϕ が小さくなるとともに小さくなる。固体内の流れ方向の温度勾配は小さく、固体温度は流れ方向に変化せずほぼ一定とみなすことができる。気体の温度はメタルブロックを通過するとともに上昇し、出口より下流で最高温度に達する。 ϕ が小さくなるとともに最高温度は低下しその位置は下流方向に移動する。いずれの場合も最高温

度の値は断熱火炎温度より低い。

図11は、 ϕ を一定とし混合気の流量を変化させたときの温度分布の変化の様子を示す。いずれの場合も気体温度はメタルブロックの下流で最高に達する。図に示した流量範囲では流量が大きいほどメタルブロックの固体部分の温度は低くなるが、一方気体の最高温度は流量が大きいほど高くなり断熱火炎温度に近づく。

5. 考 察

測定によって求めた火炎の安定範囲は通常の希薄可燃限界よりも希薄側に広がっている。また、本実験の流量範囲では、流量が大きいほど希薄側への広がりが大きい。このような系での安定範囲は主として系外への熱損失によって決まるものと考えられる。この熱損失は系全体の平均の温度によって決まるはずであるが、この温度は流量によってほとんど変化しない。一方、系全体の発熱量は流量に比例して増加する。このため、流量を増すほど熱損失の効果は相対的に小さくなり、その結果安定範囲が希薄側に広がることになるものと考えられる。メタルブロック下流における最高温度が流量の増加とともに増加するものこのことによるものと考えられる。

しかし、得られた安定範囲は予期していたほど希薄側に広がっていない。また、温度分布の測定によればメタルブロック固体部分の温度は断熱火炎温度に比べてはるかに低く、しかも気体温度が最高になるのはメタルブロックの下流である。一般に反応帯は最高温度位置付近に集中していると考えられるので、この燃焼器では主要な反応帯はメタルブロックの内部ではなく、その出口下流に形成されていることになる。このことは、我々が期待していたメタルブロック内部での熱循環が十分に行われていないことを示している。すなわち、メタルブロックは熱の内部循環の機能を十分に発揮できず、むしろ保炎器としての働きをしているものと考えられる。この原因として次の二つが考えられる。第一は高温の燃焼ガスによって石英表面のクロムメッキがはがれ、メタルブロックからのふく射による熱損失が増加し、そのためメタルブロック温度が低下したことである。第二は、メタルブロック固体表面に形成された酸化膜の効果である。この酸化膜は予想以上に固体と気体との間の熱伝達を阻害し、このため混合気がメタルブロックを通過する間に固体との十分な熱交換が実現されなかったものと考えられる。

しかし、これらの問題点は本質的なものではなく、燃焼器の適切な設計やメタルブロック材料の選択によって克服できるものであり、今後このような問題点を検討してさらに研究を進めていく予定である。

最後に、実験装置の製作に協力していただいた鈴木雅幸君、実験に協力していただいた奥村正一君に感謝します。また、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、多孔質発泡金属を提供していただいた住友電工KKの上條栄治氏に謝意を表します。

1979年12月25日 原動機部

参 考 文 献

- [1] 辻 広, 燃烧研究 51 (1979), 1.
- [2] Weinberg, F.J., Nature 233 (1971), 239.
- [3] Jones, A.R., Lloyd, S.A. and Weinberg, F.J., Proc. Roy. Soc. A 360 (1978), 97.
- [4] 竹野忠夫, 佐藤研二, 第10回流体力学講演会講演集 (1978), 244.
- [5] 竹野忠夫, 佐藤研二, 第16回燃烧シンポジウム前刷集 (1978), 16.
- [6] Takeno, T. and Sato, K., Comb. Sci. and Tech. 20 (1979), 73.
- [7] 竹野忠夫, 佐藤研二, 燃烧研究 51 (1979), 41.
- [8] Lewis, B. and von Elbe. G., Combustion, Flames and Explosion of Gases (Second Edition), Academic Press, (1961).