



技術解説

超希薄燃料ガスの燃焼技術

水谷幸夫*

1. 緒言

化石燃料、特に石油と天然ガスの枯渇と供給不安が叫ばれている。一次エネルギー供給の90%近くを化石燃料が占め、その大部分を輸入に頼っているわが国としては、これは相当に深刻な問題である。これに対する対策としては、

- (1) 化石燃料の利用効率を高める。
 - (2) エネルギー源を石油や天然ガスに片寄ることなく、石炭や原子力にも分散させて、供給の安定化をはかる。
 - (3) 太陽光、地熱、風力、波力、核融合等の新しいエネルギー源の開発もしくは積極的な利用を図る。
 - (4) 都市ごみや産業廃棄物中に含まれる可燃成分からのエネルギー回収を図る。
 - (5) 省エネルギー化を推進する。
- 等が考えられる。

ところで、化石燃料の利用効率を高める対策としては、

- (a) 不純物を多量に含んだ低質石炭（オイルシェールやタールサンドを含む）や低質石油の清浄燃焼技術を開発する。
 - (b) ガス化、液化、合成技術によって上記低質燃料を清浄燃料に転換する。
 - (c) 熱機関等のエネルギー利用側で上記諸技術に合わせて燃料転換を図る。
 - (d) 燃焼効率、熱効率、機械効率の向上を図る。
- 等が考えられる。

低質燃料の清浄燃焼技術としては、石炭の流動層燃焼法、重質油のエマルジョン化燃焼法等が積極的に研究されているほか、バーナや炉の

改良、排煙脱硫／脱硝技術、燃料の前処理技術などの研究と開発が行われている。また、燃焼効率については、燃料経済の点よりも大気汚染の点から低い値は許されず、気体燃料や液体燃料を燃焼させる炉では100%に近い値となっている。

このように見てくると、燃焼研究者や燃焼技術者のエネルギー問題への主たる対応策は、廃棄物からのエネルギー回収と、低質燃料の清浄燃焼技術の開発ということになる。ところで、廃棄物は大別して、固体廃棄物、液体廃棄物、気体廃棄物に分けられる。この内、可燃性の液体廃棄物は廃油と呼ばれ、可燃固体廃棄物と共に、焼却過程で若干のエネルギー回収が試みられるようになってきている。しかし、可燃性気体廃棄物の内、可燃成分の希薄なものは、ほとんど利用されることなく、大気中に放出されるか、良質の燃料を用いて焼却されているのが現状である。

希薄な可燃成分を含んだ廃気の排出源としては石油精製プラント、炭坑、各種産業プロセス、醸酵プロセスなどがある。石油精製プラントからは炭化水素を多量に含む廃気が排出されるが、その内、量論混合比程度のもは揮発油の回収工程に回すことができる。しかし、回収は希薄可燃限界程度までしか進まず、残りはそのまま排出されるし、もともと希薄可燃限界濃度以下の廃気は利用されることなく排出される。また、炭坑廃気中にはすべての炭坑機械の所要動力をまかなえるだけのメタンが含まれていると言われている¹⁾。可燃成分を含んだ廃気がそのまま排出されることは大気汚染の原因ともなり、もしこのエネルギーを有効に回収できれば、エネルギー経済の点からだけでなく、大気保全の観点かも好ましいことである。

ここでは、通常の方法では燃焼させることの

* 水谷幸夫 Yukio MIZUTANI 大阪大学、工学部、機械工学科、教授、工学博士、燃焼工学、内燃機関

できない希薄な燃料ガスを何らかの手段を用いて燃焼させ、エネルギーを回収する方法について説明する。

2. 希薄可燃限界と希薄火炎吹消え限界

気体燃料と空気の混合気を直径50mm以上、長さ1.5~2 mの、上端を閉じたガラス管に詰め、下端から点火すると、火炎は上端に向けて伝ばしてゆく。ところが、燃料濃度を下げてゆくと、ある濃度において、火炎が途中で消滅して、上端に達しなくなる。この濃度をその燃料の希薄可燃限界濃度と呼び、水素で当量比0.10（反応後に燃料も酸素も残らない混合比の1/10燃料濃度）、湿った一酸化炭素で0.34、メタンで0.50である。

また、混合気を燃焼炉やバーナで燃焼させる場合には、それ以下の燃料濃度では火炎が吹消えてしまって、燃焼が維持できなくなる濃度があり、それを火炎吹消え限界濃度と呼ぶ。これは燃焼炉やバーナの設計、動作条件によっても異なるが、通常は希薄可燃限界濃度より数十%高いところにある。したがって、希薄可燃限界濃度より希薄な混合気は通常の燃焼炉やバーナでは燃焼させることはできない。

3. 超希薄燃料ガスの燃焼技術

それでは、この超希薄混合気はどのようにすれば燃焼させることができるかということであるが、それにはつぎの三つの方法が考えられる。(1)燃焼反応が活発化する火炎温度を維持する。(2)燃焼反応が活発化する活性化学種濃度を維持する。(3)触媒反応を利用する。

気体燃料には希薄可燃限界濃度があるのは前述のとおりであるが、これは温度、圧力、湿度の関数であり、混合気を予熱してゆくと、希薄可燃限界濃度が低下してくる。たとえば、メタン-空気混合気は常温・常圧において当量比0.5という希薄可燃限界濃度を示すが、予熱するにつれてこの濃度は低下してゆき、1,400Kあたりでは事実上、希薄可燃限界というものが存在しなくなる²⁾。これは火炎温度を1,400K以上に維持すれば、混合比に無関係に燃焼反応が自発的に継続されることを意味している。した

がって、混合気の予熱、燃焼用空気の酸素富化、混合気の断熱圧縮、もしくは後述する熱の再循環等の手段によって、火炎温度をこのレベル以上に維持してやれば、超希薄燃料ガスを燃焼させることができることになる。

また、火炎温度を上げる代わりに、火炎内に活性化学種を供給してやっても、燃焼反応を活発化させて、自発的に燃焼反応を継続させることができる。活性化学種を作り出す最も簡単な方法はアーク放電³⁾もしくはプラズマジェット⁴⁾を利用することであり、特に前者の方法によれば、高温で、活性度の高い活性化学種が得られると言われている。

触媒反応を利用する方法は、耐熱触媒で作ったハネカム状流路に混合気を流し、触媒壁での表面反応によって燃焼反応を持続させるものである。活性の高い触媒では、500°C前後で反応律速から拡散律速に移り、触媒表面温度が断熱火炎温度にほぼ等しくなる。したがって、非常に希薄な混合気（メタン-空気混合気で当量比0.2程度）や発熱量の低い燃料ガスでも安定に、高流速で燃焼可能である。

触媒燃焼法には、すべての燃料を触媒反応によって燃焼させる方法と、触媒反応は火炎の安定化のためだけに利用し、それを点火源として均質反応を起こさせる方法とがある。前者は予熱することなく希薄な混合気を燃焼させることができるが、単位触媒量あたりの燃焼率を高くとれない。それに対して、後者は燃焼率を高めながら燃焼効率を十分高くとれるが、混合気内で火炎伝ばが可能になる程度の予熱を必要とする。触媒としては、白金などの貴金属や特許触媒をハイアルミナ・ハネカムやジルコニア板（最高動作温度1,500°Cと1,700°C）に蒸着したものが有望であるが、触媒反応だけで燃焼させる場合にはペレット型や金網型の触媒を使用することもある。

超希薄燃料ガスを大型炉で大量に燃焼させてエネルギーを回収する場合には、上述の基本的な方法に、補助的な技術をいくつか組み合わせるのが普通である。そこで、超希薄燃料ガスの燃焼に利用できる燃焼技術を分類して列挙すると、つぎのようになる。

- A. 燃料添加による混合比の改善*
- B. 酸素富化燃焼法**
- C. 補助燃焼の利用
 - (1) 同種または他種燃料ガスの補助燃焼
 - (2) 液体燃料噴霧の補助燃焼
- D. 強力な点火源の利用
 - (1) パイロット火炎
 - (2) 繰返し電気火花
 - (3) 環流領域の混合比制御*
- E. 助燃物質の添加
 - (1) 水素添加による反応性の向上
 - (2) 噴霧添加による可燃範囲の拡大³⁾
- F. 外部熱源による燃料ガスの予熱
 - (1) 間接燃焼予熱方式
 - (2) 直接燃焼予熱方式**
 - (3) 電熱予熱方式
 - (4) アーク放電予熱方式**
- G. 圧縮機による燃料ガスの断熱圧縮
- H. 活性化学種の生成もしくは注入
 - (1) 燃料ガスか燃焼用空気中でのアーク放電**
 - (2) 反応領域でのアーク放電
 - (3) プラズマジェット
- I. 炉内流れの改善
 - (1) 旋回流や噴流による混合の促進
 - (2) 炉内滞留時間の延長
- J. 熱損失の低減
 - (1) 炉の保温性の向上
 - (2) 燃焼室と加熱室の分離
- K. 燃焼ガス再循環法
 - (1) 巨大循環ろずによる内部再循環法
 - (2) 外部再循環法
- L. 熱再循環法
 - (1) 熱交換器または熱交換壁方式
 - (2) スイスロール方式
 - (3) 流動層方式
 - (4) 放射伝熱や熱伝導による内部再循環
- M. 触媒燃焼法

ただし、*印をつけた項目は多量の空気に希釈された燃料ガス（超希薄混合気と呼ぶ）にのみ適用できる方法であり、**印をつけた項目は炭酸ガス、窒素、水蒸気などの不活性ガスを多量に含み、酸素をほとんど含まない燃料ガス

（低発熱量ガスと呼ぶ）にのみ適用できる方法である。また、AからHまでは系外からエネルギーまたは物質の補給を必用とし、この補給量が燃料ガスの発熱量と同程度、またはそれ以上であったり、補給物質や補給エネルギーのコストが高過ぎると、経済性に問題が生じる。それに対して、IからMまでは系外からの物質やエネルギーの補給を必要としないが、設備費の問題や技術的困難の生じる恐れがあり、また十分な効果を発揮するためには高度の技術を必要とすることが多い。

紙面の関係で、各燃焼技術についての説明は文献6に譲ることにし、重立った研究を以下に紹介する。

4. 熱再循環型燃焼炉

図1のような燃焼炉と熱交換器を組合せた系を考える。この系に入る未燃混合気のエンタルピを i_u 、温度を T_u 、系から出てゆく排ガスのエンタルピを i_b 、温度を T_b とすると、定圧断熱系のエネルギー保存則から $i_u = i_b$ である。ここで熱交換器を働かせて、 q_{rec} なる熱を炉排ガスから未燃混合気に還流させてやると、未燃混合気のエンタルピは i_u から $i_u' (= i_u + q_{rec})$ に上昇し、温度も T_u から $T_u' (= T_u + q_{rec}/c_p : c_p = \text{定圧比熱})$ に上昇する。エネルギー保存則から、炉の排ガスのエンタルピ i_b' は i_u' に等しいから、炉内のエンタルピレベルは q_{rec} だけ上昇し、火炎温度も T_b から $T_b' (= T_b + q_{rec}/c_p)$ まで上昇することになる。熱損失のない系で、理想的な熱交換器を使えば、 q_{rec} はいくらでも増えるから、原理的にはこの系で、いかに希薄な混合気でも燃焼させ得ることになる。

熱再循環法を実用する際に最も問題になるのは熱損失の低減対策と、熱交換器の温度効率の向上対策である。この問題を巧妙に解決したの

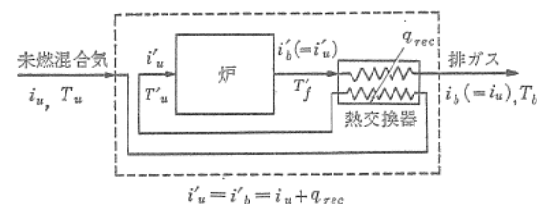


図1 熱再循環型燃焼炉の概念図⁶⁾

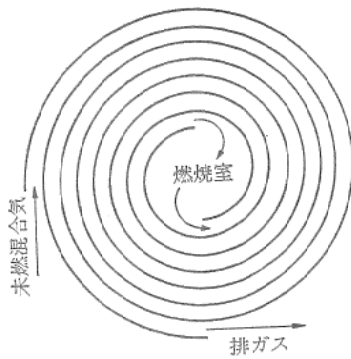


図2 スイスロール形燃焼炉¹²⁾

が Lloyd-Weinberg のスイスロール型燃焼炉である¹²⁾。その概念図を図2に示。かれらの試作燃焼炉は流路幅35mm、厚み4mmのもので、長さ1.45m (または2.29m) の Inconel 600 の2枚のストリップに4mmのスペーサをはさんで4.5回 (または8回) 巻いたものである。この燃焼炉は両側面を除いて熱損失がほとんどなく、また、熱交換器としての温度効率も非常に高い。しかがって、前記の必要条件を完全に満たしている。かれらの実験によると²⁾、巻き数を増し、両側面の保温性を向上させることにより、0.22%メタン-空気混合気 (当量比0.021) まで燃焼可能なことが確認された。しかも、この限界は材料破壊によってもたらされたものだという。

5. アーク放電かくはん反応器

かくはん反応器というのは、可燃混合気を多数の高速噴流の形で反応容器の中に吹込むことによって、かくはん作用を極限まで高め、未燃混合気と燃焼ガスとが瞬時に、かつ均質に混合するように設計された燃焼器である。木村ら³⁾は図3に示すような小型かくはん反応器内に放電々極を設けてアーク放電を起こさせ、顕著な燃焼促進作用を観測している。半径20mm、長さ24mmという小さな燃焼器ながら、300K、1 atm、当量比0.62のプロパン-空気混合気で、ブースト比 (電気入力/燃料の真発熱量) が6%のとき、80%の燃焼効率の得られる混合気送入口量が300%以上増大した。また、当量比0.43という超希薄混合気でも、ブースト比10%の電気入力を与えると、80%の燃焼効率の得られる

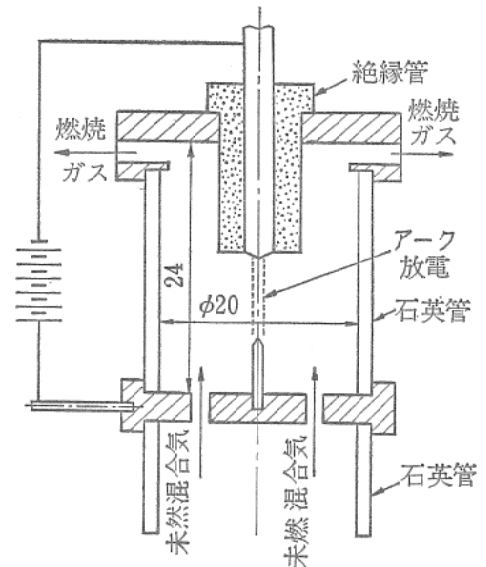


図3 アーク放電かくはん反応器³⁾

混合気送入口量が当量比0.62の混合気と同程度に達した。

混合気中でアーク放電を起こさせると、 $O_2 \rightarrow 2O$ 、 $O + H_2 \rightarrow OH + H$ などの反応によってO、OH、Hなどの活性化学種が多量に生成され、これが燃焼反応を促進するものと考えられる。木村らは、これらの活性化学種が高温状態に励起されていて、活性度が一層高まっていると考えないと、このような高い燃焼促進作用が説明できないと述べている。

6. プラズマジェット・バーナ

アーク放電によって反応領域に高温活性化学種を作り出す代わりに、未燃混合気中にプラズ

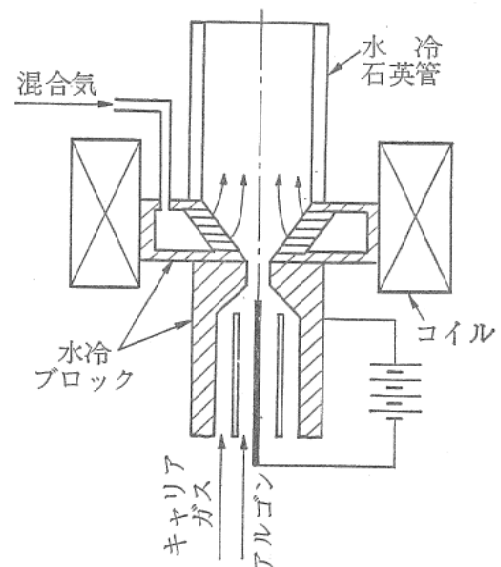


図4 プラズマジェットバーナ⁴⁾

マジェットを噴射する方法は Harrison ら⁴⁾によって試みられた。その実験装置の模型図を図4に示す。少量のアルゴンが陰極の保護ガスとして供給され、陰極と陽極の間を流れるキャリアガスがアーク放電によって電離して、プラズマとなる。水冷多孔壁からしみだしたメタン-空気混合気にこのプラズママジェットが流入し、コイルで作られた磁場によって旋回を与えられて混合気中に一様に拡散する。キャリアガスとしてはアルゴン、アルゴン+窒素、アルゴン+酸素（または水蒸気または燃料）の3種類が試みられたが、アルゴン+窒素が圧倒的に有効で、ブースト比10%のとき、吹消え限界流量が7倍に増加したという。この場合、プラズマ中に存在する長寿命の窒素原子が混合気中の酸素と $N + O_2 \rightarrow NO + O$ なる反応を起こして酸素原子を反応帯に作り出し、これが燃焼促進作用をもたらしたのであろうと考えられている。

7. サイクロン型燃焼炉

カーボンブラック・プラントの廃気（〔例〕組成： H_2 6.02, CO 6.3, CH_4 0.1, C_2H_2 0.16, N_2 36.26, A 0.4, CO_2 2.76, H_2O 48.00%, 真発熱量：375kcal/Nm³, 温度：190°C）を燃焼させる目的で、Syred らは図5のようなサイクロン燃焼炉を製作した⁷⁾。プラント廃ガスは空気と予混合された上で、炉の上下に对称に配置された16個の接線状吹込口から炉内に吹込まれる。接線方向速度分布は Rankine 型で、壁面で25~30m/s、半径183mmのところでは最大値50m/sをとる。また、半径183mmでの最大軸方向速度成分は11~16m/sである。

炉の上流部には耐火材壁面からのふく射と巨

大循環うずによる燃焼ガス再循環によって、円環状の火炎前縁が壁面近くに安定化される。特にふく射による熱の内部再循環作用は重要で、炉上流部の壁面温度を高く維持しなければならない。そのため、火炎はできるだけ壁面近くに形成されることが望ましい。また、燃料ガスを190°C~200°Cに予熱することも、火炎安定化にとって重要である。さらに炉出口を絞ることも巨大循環うずの形成を助けて、火炎の安定範囲を広げる効果がある。

このような対策をとることによって真発熱量320kcal/Nm³の低発熱量ガスでも安定に燃焼させることができたという。この炉は建造費が安価で、圧力損失（したがって動力損失）が低く、しかも電気エネルギーの投入を必要としない点で、経済的に有利である。

8. 環流領域混合比制御型燃焼炉

著者ら⁸⁾は環流領域混合比制御（3節の対策D-3）を中心に、対策F-3、I-1、I-2、J-1、K-1、L-4を組合せて、超希薄混合気の燃焼を試みた。試作燃焼炉を図6に示す。この炉においては、保炎器の下流端面に純燃料ガス（都市ガス）の吹出し穴を、また入口ステップ部に純燃料ガスの吹出しスリットを設けて、中央環流領域（CRZ）と環状環流領域（ARZ）の混合比を制御できるようになっている。これによって、両環流領域の温度を上昇させ、保炎能力を向上できる。都市ガス（組成： H_2 46, CO 5, CH_4 22, C_2H_6 5, N_2 10, O_2 2, CO_2 10%, 真発熱量：4000 kcal/Nm³）と空気の希薄混合気を20l/sの割合で旋回を掛けて（旋回羽根角60°）送入し、環流領域混合比制御

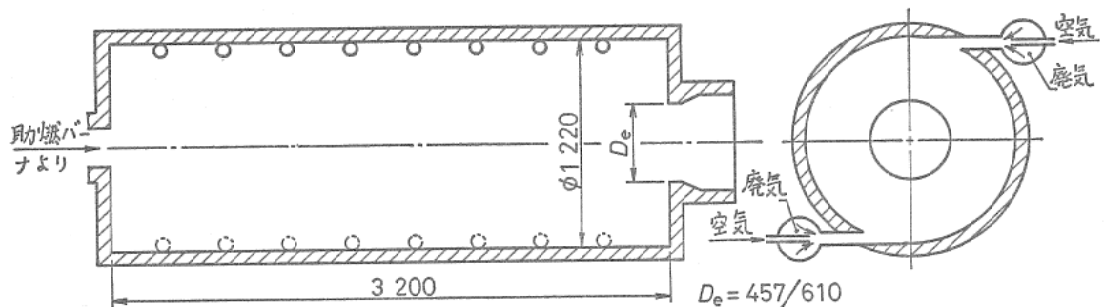


図5 サイクロン型燃焼炉⁷⁾

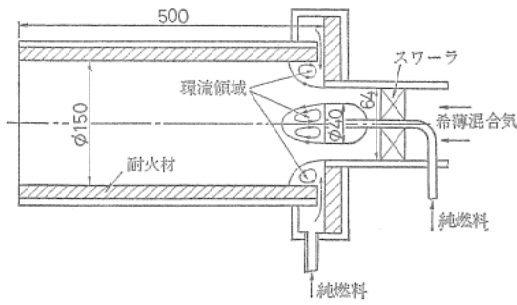


図6 環流領域混合比制御型燃焼炉⁸⁾

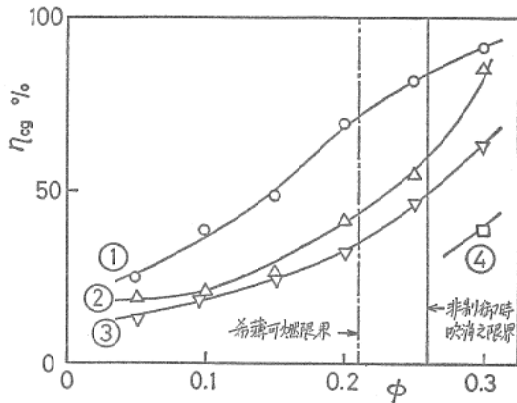


図7 環流領域混合比制御の効果⁸⁾

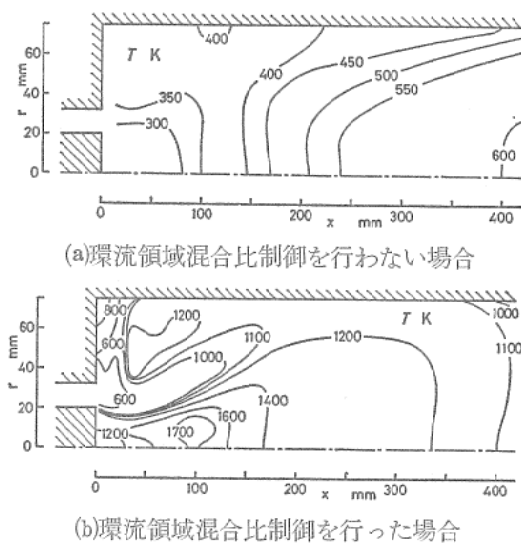


図8 環流領域混合比制御の効果 (当量比0.3)⁸⁾

によつて燃焼効率が向上する様子を調べた結果が図7である。環流領域混合比制御を行わない場合(曲線4)は燃焼効率 η_{cg} が40%程度と低く、当量比 $\phi=0.26$ で吹消えを起こすが、ARZのみ(曲線3)、CRZのみ(曲線2)、ARZとCRZ

の両方(曲線1)にそれぞれ0.2 l/sの割合で都市ガスを吹込むと吹消えを起こさなくなり、燃焼効率 η_{cg} が上昇してゆく。ここで、 η_{cg} は吹込み純燃料ガスを別にした送入希薄混合気だけの燃焼効率である。当量比0.3の場合に、曲線4と1に対応する燃焼状態を温度分布の形で比較したのが図8である。環流領域の混合比を制御することにより、炉の上流部から燃焼が活発化している様子がうかがえる。

9. 結 言

通常の方法では燃焼させることのできない希薄な燃焼ガスを燃焼させて、エネルギーを回収する方法について説明した。現在、未利用のまま大気中に放出されている可燃ガスは相当な量に上ると考えられ、エネルギーの有効利用と大気保全の両面から、その燃焼技術の完成が急がれる。また、可燃成分を含んだ有臭ガスを多量の燃料を投入して焼却処理しているケースも多いが、この処理工程において燃料投入量の節減とエネルギーの回収が図れれば、エネルギーの節約効果と経済効果は非常に大きいはずである。

このような重要性を持つにもかかわらず、超希薄燃料ガスの燃焼技術はまだ開発の緒にすぎないばかりである。一日も早く、実用性と経済性の高い燃焼技術の開発が望まれる。

文 献

- 1) Lloyd, S. A. and Weinberg, F. J., Nature, 251-5470 (1974-9), 47.
- 2) Lloyd, S. A. and Weinberg, F. J., Ibid., 257-5525 (1975-10), 367.
- 3) Kimura, I. and Imajo, M., Proc. 16th Symp (Int.) on Combust., (1977), 809, The Combustion Institute.
- 4) Harrison, A. J. and Weinberg, F. J., Proc. Roy. Soc. Lond., A321-1544 (1971-1), 95.
- 5) 水谷幸夫・中島 敦, 機械学会論文集, 39-325 (1973-9), 2872.
- 6) 水谷幸夫, 機械の研究, 31-1 (1979-1), 193.
- 7) Syred, N.・ほか3名, J. Inst. Fuel, 50-405 (1977-12), 195.
- 8) 上田正則・ほか2名, 機械学会講演論文集 No. 794-6 (1979-3), 18.