ないかはいまのところ筆者には不明である。現在の国連では、原子力動力源搭載人工衛星の安全に関する討議が始まったばかりで、安全技術に関する国際的なガイドラインを設定するための討議を開始するまでも至っていない。国連宇宙平和利用委員会参加各国の大多数は、このような安全のための技術討議を続けてゆくことが宇宙における原子力動力源利用の安全確保のための合意点を得る、現状での最大のなしうることであると考えているのが現実の姿である。

本解説では紙数のため割愛したが、ICRP 勧告を宇宙用原子力動力源の放射線防護基準として適用するにはまだ解決されなければならない多くの問題があること、および人工衛星の軌道寿命と自然落下する原子力動力源を搭載する人工衛星の再突入軌道を精度良く予測するためには多くの問題が解決されねばならないこと等について、国連に提出されている文献 6), 8) ~ 17) は世界各国の研究成果として興味深いものであることを付記して文献リストのみを記載した。以下に掲げる文献は、著者が所有しており、閲覧に供することができる。

参考文献

- 1) United States of America: Uses of Radio Active (Nuclear) Materials by the United States of America for Space Power Generation, United Nations, A/AC. 105/L. 102 (1979).
- 2) Retombée du satellite «Cosmos 954» AIR ET COSMOS, No. 704 (4 fév. 1978), pp. 30-33.
- 3) Report of the Working Group on the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space, United Nations, A/AC. 105/238 (1979. 2. 16).
- 4) Annals of the ICRP, ICRP Publication 26, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press (Jan. 17, 1977).
- 5) United States of America: Criteria for the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 8 (23 Jan. 1980).
- 6) Union of Soviet Socialist Republics: Solution of the Problem of Radiation Safety, Application of ICRP Recommendations, Assessment of the Present Methods of Orbital Mechanics, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 10 (25 Jan. 1980).
- 7) Report of the Working Group on the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space on the Work of Its Second Session, United Nations, A/AC. 105/C. 1/L. 120 (12, Feb. 1980).
- 8) Canada: Summary of "Operation Morning Light" Search and Rescue Operation, United Nations, A/AC. 105/C. 1/L. 106 (25 Jan. 1979).
- 9) United Kingdom: Predicting Satellite Re-entry, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 4 (22 Feb. 1979).
- 10) Japan: List of Safety Problems, Effect of Radiation from Nuclear Power Systems Built in the Spacecraft on Populations and the Standards of ICRP, Note on Satellite's Orbit and Re-entry, Format of Notification, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 5 (28 Dec. 1979).
- 11) Sweden: On Technical Aspects and Safety Measures of Nuclear Power Sources in Outer Space, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 6 (10 Jan. 1980).
- 12) Canada: Radiological Hazards and the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space, Recent Canadian Progress on the Prediction of Satellite Orbit Lifetimes, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 7 (11 Jan. 1980).
- 13) United States of America: Potential Improvements in Predicting Re-entry Phenomena, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 9 (23 Jan. 1980).
- 14) United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland: Safety of Nuclear Devices in Satellites, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 11 & Add. 1 (28 Jan. 1980).
- 15) India: On Technical Considerations Related to a Format for Notification of the Launch/Re-entry of Space Objects Containing Nuclear Power Sources, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 12 (28 Jan. 1980).
- 16) France: On the Application of ICRP Recommendations in the Case of the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 13 (29 Jan. 1980).
- 17) Canada: Format of Notification for Space Operation of Nuclear Power Sources, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 14 (30 Jan. 1980).

乱流予混合火炎*

吉 田 亮**

1. ま え が き

航空機あるいはロケットから自動車にいたるまで、そのほとんどが動力を得るために、さまざまな形態の

燃焼現象を利用している。代表的な例として、ガスタービン燃焼器内の燃焼のような連続的なものと、往復動内燃機関のような間欠的な燃焼をあげることができる。しかし現象論的にこれらを分類するともっと複雑になる。予混合火炎であるか拡散火炎であるか、あるいは層流火炎であるか乱流火炎であるかの組み合わせにより4通りの燃焼現象が存在するわけで¹⁾、それぞれ

* 昭和55年7月8日原稿受理 Turbulent Premixed Flames

** 東京電機大学工学部 Akira YOSHIDA

が実際に広く利用されており、また種々の角度から多くの研究がなされている。さらに最近では、流れが超音速であるような特殊な場での燃焼現象も注目を浴びるようになった。これは極超音速飛行体の開発計画の中で生まれたもので、このような高速飛行体の推進機関として超音速燃焼ラム ジェット (Supersonic Combustion Ramjet) が有望視されたためである²³⁻²⁵⁾。

しかしながら、エネルギー危機、大気汚染あるいは燃焼騒音というような最近の公害問題が社会的に注目されるに至り、燃焼研究の動向も様変りをしたようである。将来性のある夢多き研究は徐々に影をひそめ、現実の問題をどう処理するかという考えが研究の主流を占めるようになった。工業的な応用という立場から見ると、連続燃焼であれ、間欠燃焼であれ、そのほとんどが亜音速乱流燃焼を利用している。したがって、省エネルギーあるいは公害低減の目的で、この 10 年来乱流燃焼の研究が活発化し、多くの基礎的、実際研究が発表されてきた。1978 年 8 月イギリスで開催された第 17 回国際燃焼シンポジウム、あるいは 1980 年 1 月のアメリカにおける第 18 回 AIAA Aerospace Sciences Meeting でも主要なテーマの一つとして、乱流燃焼がとりあげられ、また国内においても 1979 年 12 月名古屋で開催された第 17 回燃焼シンポジウムで乱流燃焼に関する公開討論会が開かれた。しかしながら乱流燃焼の基礎的な研究については、それから得られた知識の実際面への応用となると、研究の量の膨大さの割には質的には 10 年前と比較してそれほど進歩がみられない。これは基礎研究が、確固たる現象論的基盤の上に立った物理的に矛盾のない乱流燃焼のモデルを提供できるまでに至っていないためである。もちろん理論解析ではこれまでに多くの物理的考察に基づいたモデルが提案されていることは事実であるが、モデルそのものの実験的な検証はなされておらず、あるモデルを使った解析結果がある特定の現象と一致するという間接的証拠によって、そのモデルの正当性を普遍化する傾向が強いのが現状である。したがって現在の乱流燃焼の研究は、そのほとんどが実際には役に立たないといわれる⁶⁾のも、基礎となるべき物理的構造が実験的に明らかにされていない以上当然といえよう。

このように乱流燃焼の理論解析には多くの本質的な問題点があるにもかかわらず、強まる社会的要求に対応するために、それらの問題点を無視して、複雑な燃焼器内の現象の予測というような実際的な研究が行われてきたのが実情である。また一方では、解析結果との対応を調べるために、高温の燃焼器内で種々の測定が、大まかではあるが行われてきた。したがって見方を変えればこのような実際的な研究によって、そ

れに伴う解析手法や計測技術が相当進歩したことも事実である。いいかえれば従来までは不可能であった変動量に関する定量的な研究がようやく可能になり始めたわけである。したがって理論解析で証明なしに用いられてきた種々のモデルの実験的検証がある程度可能となったと思われる。もちろん理論解析によって乱流予混合火炎のもつすべての特性を明らかにできないことはいまでもない。したがって純粋に現象論的な立場から進められている研究のもつ意義は非常に大きい。本稿ではまず現象論的に乱流予混合火炎の性質を論じ、次いで理論解析の最近の動向と成果および問題点について解説したい。

2. 乱流燃焼速度

乱流予混合火炎のもつ最も大きな特徴はその自己伝播性である。この火炎伝播の速さを普遍的に表現するために、層流予混合火炎の場合と同様に、燃焼速度を導入する。すなわち乱流燃焼速度とは、乱流予混合気中を時間平均的に平面状の一次元乱流火炎が火炎帯に垂直方向に伝播する場合の未燃混合気に対する時間平均伝播速度である。

乱流燃焼速度は乱流予混合火炎の最も基本的な特性のひとつであると同時に、工業的にも燃焼器を設計する際の重要な条件のひとつであるため、これまでに数多くの測定が行われてきた。また後述する乱流火炎理論によって、乱流燃焼速度を乱流火炎方程式の固有値として求めようとする試みもなされているが^{7), 8)}、理論では多くの仮定を用いる必要があり、それらのなかには多少非現実的と思われるものも含まざるをえない。したがって理論から求められた値と実験値の定量的な比較はいまのところできない。しかし実験においても乱流燃焼速度を正確に測定することはそれほど簡単なものではない。

乱流燃焼速度の測定には、層流燃焼速度の場合⁹⁾と同じように、研究者によって種々の流れが利用されている。平面状火炎バーナーを利用して測定した例があるが^{10), 11)}、層流の場合と同じように火炎はごく狭い流量範囲でしか安定化されないため、強い乱れを発生させることはできず、また火炎が完全な乱流中に形成されているのか、あるいは乱流格子によって安定化されているのかははっきりしない欠点がある。一方、非定常球状火炎を用いても測定が行なわれている。初期のものでは乱流格子を用いて弱い乱れを作り、その流れの中で着火して火炎の発達の様子から乱流燃焼速度を測定しているが¹²⁾、それがほぼ層流燃焼速度と同じ程度の範囲に限られる。最近になって、非定常球状火炎を用いる方法は改良され、容器内でファンを駆動する

ことによってかなり強い乱れを与えて実験が行なわれている¹³⁾⁻¹⁵⁾。しかしこのような実験では、強い乱れは得られるが、乱れのスケールが通常の管内乱流に比較してかなり大きく、極端な場合には火炎半径と同じオーダーになってしまう。これに対して、大気開放型のブンゼンバーナーを用いた研究はかなり古くから行なわれている¹⁶⁾⁻²¹⁾。このブンゼンバーナー法で問題となるのは、乱流燃焼速度を決定するのに用いる基準面の位置のとり方である。この基準面の傾きあるいは面積を用いて乱流燃焼速度を求めるのである。しかし乱流ブンゼン火炎では火炎帯の厚さと位置が流れ方向に連続的に変化するため、基準面を定めることはそれほど簡単ではない。多くの研究では¹⁶⁾⁻¹⁹⁾火炎帯の平均位置が基準面にとられるが、これは燃焼速度の厳密な定義、すなわち定在火炎では火炎帯に流入する未燃混合気の火炎帯に垂直方向の速度成分が燃焼速度であるという条件を満たしていないことになる。したがって火炎帯の未燃混合気側の縁を基準面にとろうとする試みもあるが²⁰⁾、この縁を写真によって正確に定めることは困難で、任意性が入らざるをえない。さらに未燃混合気の乱れが乱流燃焼速度におよぼす影響を議論する場合には、火炎帯に沿って乱れの強さもスケールも変化し、かつバーナー管の中で生ずるレイノルズ応力も無視できないということに注意する必要がある²²⁾。さらに燃焼ガスと外部の静止大気との混合の影響も考慮しなければならない²³⁾⁻²⁵⁾。一方、大気開放型のバーナーで保炎器を用いて倒立火炎を形成させる例もあるが²⁶⁾、前述した問題点のほかにも、流れの中に保炎器をそう入することにより付加的な一様でない乱れが発生する上に、一部の未燃混合気が火炎帯を通過しないで下流へ流されるため未燃混合気流量を火炎面積で割って(いわゆる面積法で)平均乱流燃焼速度を求めると大きな誤差を生じる。対向流を用いた方法でも同様のことがいえる²⁷⁾。またダクトを用いることにより外部の静止大気との混合の影響を除くことができるため、ダクト内に保炎器をそう入して乱流火炎を形成した例もある²⁸⁾⁻³³⁾。しかしダクト内の流れでは、乱流を特徴づけるパラメーターが流路断面にわたって一定でないという欠点がある。そのため流れの中心付近だけを利用した例もあるが^{32), 33)}、保炎器あるいはパイロット火炎による付加的な乱れは避けることができない。またダクト内の実験では乱流格子によって乱れを発生している場合が多いが、この方法では前述のように強い乱れを得ることはできない。このように種々の乱流を用いて乱流燃焼速度の測定が行なわれているが、それぞれが固有の欠点をもっており、測定されたデータも第1図に示すように大きな差異が生じてい

第1図 乱流運動エネルギーと乱流燃焼速度¹¹⁾
○¹¹⁾, ●²⁴⁾

る⁸⁾。ここで S_T は乱流燃焼速度、 S_L は層流燃焼速度、 k_0 は未燃混合気の乱流運動エネルギーを表す。もちろん $k_0^{1/2}/S_L$ が相似パラメータであるとは断定できないことに注意する必要がある。

乱流燃焼速度を乱れのどの特性と結びつけて表現するかは個々の研究者によって異なっているが、乱れ強さと層流燃焼速度の比、 u'/S_L を用いた例が多い。しかし乱れのスケールが乱流燃焼速度に影響をおよぼすことは容易に想像できる。よく知られるように、等方性乱流では乱流レイノルズ数 R_λ が乱れの特性を決定する重要なパラメータである。ここで $R_\lambda = u'\lambda/\nu$ 、 u' は乱れ強さ、 λ はテイラーのマイクロスケール、 ν は動粘性係数である。この乱流レイノルズ数を用いて、従来から得られている乱流燃焼速度を統一的に比較した例もあるが^{13), 34)}、前述の測定法がもつ不確かさを考慮したとしてもばらつきが大きすぎ、必ずしもすべての乱流燃焼速度を関連づけることのできるパラメータとはいえない。一般に乱流格子によって生ずる乱れでは u' と λ の間に格子によって決まるある関係があり、乱流レイノルズ数 R_λ は $u'\lambda(u')/\nu$ で表わされることになる。ここで $\lambda(u')$ は格子によって決まる関数である。 u' は平均流速 $\bar{U}$ によって変化するから、結局 $\bar{U}$ で整理して(あるいは u' で)、格子の種類によって異なる傾向をもつ乱流燃焼速度を R_λ で整理しても同じような差が出るはずであるという指摘もなされている³⁵⁾。したがって乱流燃焼速度を支配するパラメータは、乱流予混合火炎の構造を明らかにしたうえで、その構造に影響をおよぼすと考えられる乱れの特性を見いだすことによって決定しなければならないと思われる^{32), 33)}。

3. 乱流予混合火炎の構造

層流火炎では、運動量、化学種およびエンタルピのすべての混合と輸送は分子過程によって支配される

が、乱流火炎では分子過程以外に乱流というもっと巨視的な渦運動によっても支配される。この乱流による輸送過程を議論するためには、まず乱流予混合火炎の構造を知らなければならない。

乱流予混合火炎の構造としては、古くから皺状層流火炎が提案されている³⁶⁾。この構造の存在はシュリーレン写真によって比較的容易に確認されてきたが³⁷⁾、その特性が定量的に解明されたのは最近のことである^{24), 25), 38)}。一方、乱流火炎帯は反応の種々の段階の気体の非常に小さなかたまりで構成され、それらがランダムに運動しているという、いわゆる Distributed Reaction Zone モデルも提案され、その存在も確認されている^{39), 40)}。しかしながら Distributed Reaction Zone モデルの特性は定量的にはいまだに明らかにされていない。多くの実際の乱流予混合火炎ではおそらくこの二つの構造が混在しているものと思われる^{23), 25)}。このような構造の差異が何によって決まるかは燃焼学的に非常に興味深い問題であり、これまでにいくつかの基準が提案されている。しかしこれに関してはすでに詳細な解説が発表されているので⁴¹⁾、ここでは簡単に記すことにする。ひとつの考え方として化学反応の特性時間 δ_L/S_L と乱流運動の特性時間 λ/u' の比を用いる方法がある。すなわち $\Gamma = (u'/\lambda)(\delta_L/S_L)$ を基準にする⁴²⁾。ここで u' は乱れ強さ、 λ はテイラーのマイクロスケール、 δ_L は層流火炎厚さ、 S_L は層流燃焼速度である。皺状層流火炎では化学反応の特性時間が乱流運動の特性時間に比較して短い。いいかえると乱れが火炎帯を乱すよりも速やかに火炎帯で反応が進み、火炎帯での反応過程は乱れによって影響を受けないわけであるから $\Gamma \ll 1$ が皺状層流火炎の存在する条件になる。一方、乱流レイノルズ数 R_λ を用い実験事実から $R_\lambda < 100$ を基準とする提案もあるが³⁴⁾、乱れのスケールとしてもっと本質的なコルモゴロフのマイクロスケール η を使ってレイノルズ数を定義すべきであるという反論も発表されている⁴³⁾。乱流において、コルモゴロフのマイクロスケール以下の渦は粘性の効果のために存在しえないという物理的意味があるため、このスケールの重要性が最近認識されつつある。この意味を考慮して次元解析的に乱流燃焼速度を支配するパラメータを議論した例もある⁴⁴⁾。しかしここで提案されたパラメータの妥当性は、乱れの局所的な微細構造の測定によって実験的に確かめなければならない。

実験の面でも最近になって、乱れの局所的な特性を詳細に測定したり、あるいは乱流燃焼速度 S_T におよぼすコルモゴロフのマイクロスケール η の影響を調べるといような本質的な研究も徐々に発表されるよ

うになった^{25), 33), 45)~50)}。このような精密な測定から、 u'/S_L と η/δ_L の大小によって、乱流予混合火炎はその物理的構造、したがって伝播機構の異なる3種類に分類できることが明らかにされ、いわゆる“乱流火炎の三領域モデル”の提案がなされている³³⁾。このモデルについての詳細はすでに解説されている⁵¹⁾のでここでは省略するが、その後レーザー流速計を用いた火炎帯中での流速測定の結果が発表され⁴⁵⁾、それぞれの領域を支配している物理現象も明らかにされた。すなわち、領域1 ($u' < 2S_L$, $\eta > \delta_L$) では層流火炎の不安定性が⁴⁷⁾、領域2 ($u' \simeq 2S_L$, $\eta \simeq \delta_L$) では乱流拡散が⁴⁶⁾、また領域3 ($u' > 2S_L$, $\eta < \delta_L$) では火炎帯の厚さよりも微小な渦の影響が⁴⁷⁾流れ場を決定する重要な因子である。また乱流火炎の伝播機構は領域1の皺状層流火炎モデルと領域3の微小渦の反応モデルによって定量的に説明できることが示されている⁴⁷⁾。さらに三つの領域すべてにわたって、火炎帯中での流体力学的な特性(レイノルズ応力、乱流エネルギー散逸率など)が明らかにされた^{48)~50)}。その結果、レイノルズ応力はほぼ乱流運動エネルギーに比例し、また乱流エネルギー散逸率はほぼ $\varepsilon = ak^{3/2}l$ で与えられ、反応を伴わない乱流に対する近似が成立する⁵²⁾ことがわかった。ここで a は定数、 k は乱流運動エネルギー、 l は乱れの積分スケールである。このような情報は後述する乱流火炎理論を確立するうえでぜひとも必要であるが、これらの特性に関するデータはまだ限られているうえに、基礎となるべき乱流運動エネルギー式には密度一定のものを使用しているなど問題がないわけではなく、今後さらに検討が必要であろう。またブンゼンバーナー上に形成された皺状層流火炎中では、レイノルズ応力は無視できるという結果も報告されている²⁵⁾。さらにスカラー量についての情報も不足しており、これらの問題の解決はこれからの研究に期待したい。

4. 乱流火炎理論

4.1 基礎方程式とモデル 層流予混合火炎ではすでに確立された層流火炎理論によって、火炎構造あるいは層流燃焼速度を理論的に求めることができる。しかしながら乱流予混合火炎については、それに対応するような乱流火炎理論はいまのところ完成されていない。乱流火炎理論は層流火炎理論に乱流理論を組み入れれば完成するはずである。言い換えれば、古典的な乱流理論に化学反応の影響を導入すればよいわけである。しかし実際にはこれは相当難しい問題である。

層流火炎理論では、基礎方程式は質量、運動量、化学種およびエンタルピの保存方程式より構成される。乱流火炎理論でも同様であり、層流火炎方程式で表わ

されるそれぞれの変数を平均量と変動量に分け平均流の方程式を作る。層流火炎方程式との相違は変動量の高次の相関を含む点であり、これをモデル化しなければ方程式系を閉じた形にすることはできない。乱流理論では一般には密度一定が仮定され、また化学反応を伴わないため特殊な混合の問題を除いて化学種およびエンタルピの保存方程式を用いる必要はない。したがって乱流による運動量の輸送のみを考慮すれば十分であり、どのようにこれをモデル化（いわゆる乱流モデル）して運動量の保存方程式を解くかが議論の中心になる。しかし乱流火炎では発熱反応によって必ず温度変化が生じる。この温度変化は火炎の場合は非常に大きく、これによって生ずる密度変化を無視することはできない。この密度変化の影響はすべての保存方程式に含まれるのである。乱流火炎理論でも運動量の保存方程式を解くためには乱流モデルを用いなければならないことはいままでの間もない。また化学種の乱流による輸送は、化学反応を伴う乱流火炎では当然問題となる。さらに化学種の保存方程式では平均乱流反応速度を既知の関数として与えなければならない。この平均乱流反応速度は化学種およびエンタルピの輸送過程と複雑に関係していることは明らかである。これらの輸送過程をモデル化するためには乱流火炎の構造を知る必要があろう。層流火炎理論ではルイス数を1と仮定することによってエンタルピの保存方程式は化学種の保存方程式と相似形として取り扱われる。これと同様に乱流火炎理論でも乱流ルイス数が1であると仮定され、エンタルピの保存方程式は一般には解かれない。

4.1.1 平均流の方程式 化学反応を伴わない乱流理論では、一般には密度一定が仮定され、時間平均量に対する基礎方程式系が導き出される⁵³⁾が、化学反応を伴う場合はこの影響を考慮する必要がある。最近、純粋に流体力学的な研究でも密度差のある2種類の流体の乱流混合の問題が取扱われるようになり、その結果、coherent structure というような乱流の新しい構造も明らかにされたのである⁵⁴⁾。化学反応を伴う場合には必ず密度変化が生じ、平均流の方程式には密度変動と速度変動あるいは濃度変動との高次の相関が含まれることになり、これらをモデル化しなければ方程式系を閉じた形にすることはできない。このためには実験的に証明されていないモデル（たとえば、密度変動と速度変動の相関として BOUSSINESQ 近似を用いる⁵⁵⁾）を導入する必要がある。一方密度変動を伴う場合の数学的な取扱い方法として、時間平均量のかわりに FAVRE 平均量を用いて方程式を記述することも提案されている^{7), 56)}。FAVRE 平均では、ある変動量 s の平均は $\bar{s} = \overline{\rho s} / \bar{\rho}$ で表わされる。ここで ρ は密度、一

は時間平均を意味する。このような平均を用いることにより平均流の方程式系は密度変化のない場合とまったく相似になる。しかし後述するように時間平均量に対する乱流モデルがそのまま FAVRE 平均量に適用できるわけではなく⁵⁷⁾、もし適用すればかなり大きな誤差をまねくことが指摘されている⁵⁸⁾。密度変動と他の変動量の相関項をひとつひとつモデル化するか、あるいは FAVRE 平均量を用いるかは簡単には断定しがたいが、最近の傾向としては、モデル化すべき高次の相関項が少ない上に、方程式系がコンパクトになるため FAVRE 平均を用いることが多いようである。

4.1.2 乱流モデル 純粋に流体力学的な乱流の問題では、運動量の保存方程式を解く際に高次モーメント方程式の有限化、いわゆる closure problem があり、これを解決するために昔からいくつかのモデルが提案されてきた^{59)~61)}。これらはすべて近似法であり、このような方法によって厳密な理論を導出することはできないのはいうまでもないが、適用範囲を限ればかなりの精度で流れを予測することができる。これまでに提案されてきたモデルは二つに大別することができる。すなわち、渦粘性係数を導入してレイノルズ応力が平均流の速度勾配に比例するという考え方^{55), 59)~61)}と、レイノルズ応力の厳密な輸送方程式を解いてレイノルズ応力を求める方法である⁶²⁾。乱流燃焼の理論解析で広く用いられている k - ϵ 二方程式モデルは前者に属する。この k - ϵ 二方程式モデルでは、乱流運動エネルギー k の保存式と乱流エネルギー散逸率 ϵ の輸送方程式を連立させて k および ϵ を求め、プラントル-コールモゴロフの関係式 $\nu_T = C_\mu k^2 / \epsilon$ から渦粘性係数を求めるものである。ここで ν_T は渦粘性係数、 C_μ は定数である。時間平均を用いる場合には、 k および ϵ の支配方程式に密度変動と速度変動の高次の相関が含まれるため、何らかの近似によって方程式系を閉じた形にしなければならない⁵⁵⁾。とくに乱流エネルギー散逸率 ϵ に関する輸送方程式には密度変動のない場合の式を使用せざるをえない⁵⁵⁾。さらに式中ではいくつかの実験定数を使用しなければならないが、それらには密度変化を伴わない乱流についての値を用いるという矛盾がある^{55), 57)}。一方 FAVRE 平均量を用いれば、表面的には密度変動と他の変動量の相関は出てこないため、 k および ϵ に対する支配方程式は密度変化のない乱流の場合と形式的には同じになるが、平均の物理的意味が異なるため、実験定数の決定方法はいつものところ存在しない⁶³⁾。したがってここでもやはり密度変化を伴わない乱流で求められた値を使わざるをえない⁶⁴⁾。近似の程度を考慮して、 ϵ の輸送方程式を用いないで、直接実験式を用いる方法（ ϵ についての方程

式を解く必要がないので一方程式モデルになる)⁶⁵⁾やプラントル-コルモゴロフの関係式に密度変化の補正を加えた例もある⁵⁸⁾。このように k - ε 二方程式モデル自体にもいくつかの問題がある。もちろんモデルで使用する実験定数は、実験に合うように変化させてよいわけであるが、乱流火災理論では乱流モデルが後述する乱流拡散モデルあるいは燃焼反応モデルと複雑に関係しているため、解析結果と実験結果との比較だけでは乱流モデルの妥当性は議論できず、火災帯内での変動量の詳細な直接測定によって検証しなければならない。第3節で述べたように、最近ようやくこのような研究が行なわれるようになり、乱流予混合火災でも、一方程式モデルで十分であるという提案もあるが⁴⁸⁾⁻⁵⁰⁾、結論を出すにはまだまだデータ不足である。

第二の方法、すなわちレイノルズ応力の輸送方程式を用いて解く方法では、乱流運動エネルギー k および乱流エネルギー散逸率 ε を求める方程式のほかに、レイノルズ応力を求める第三の方程式を使用するため、最初の方法で用いた、レイノルズ応力が平均流の速度勾配に比例するという仮定が不必要になる反面、レイノルズ応力の支配方程式は未知量の高次の相関を含んでおり、方程式系を閉じた形にするために必要な実験定数の数がかなり増加し、反応を伴わない乱流でも検証は不十分である⁶⁶⁾。したがって反応を伴う乱流に適用することは現段階では不可能であろう。

4.1.3 スカラー量の乱流拡散モデル 乱流燃焼の基礎方程式には化学種の保存方程式が含まれ、乱流による化学種の輸送をモデル化しなければならない。従来までは乱流予混合火災に対しても乱流拡散火災に対しても、レイノルズ応力のアナロジーとして勾配モデル、すなわち乱流による拡散流束が化学種の時間平均量の勾配に比例するという仮定が用いられてきた^{7), 55), 63)-65)}。またこの比例定数は、乱流シュミット数を用いれば、渦粘性係数で表わせる。しかしこのモデルは、密度変化を伴わない乱流についてある程度成立するレイノルズ応力のたんなるアナロジーであり、その妥当性について現在多くの議論を呼んでいる(4.2を参照)。

一方濃度変動の保存方程式には、乱流エネルギーの保存方程式と同じように、スカラー散逸率が含まれ、これをモデル化しなければならないがこれにも一般には密度変化を伴わない場合のモデルがそのまま適用される^{65), 67)}。しかしこの点も実験的検証が必要であろう。

4.1.4 燃焼反応モデル 層流火災については有名なアレニウス式によって、化学反応速度は温度の指数関数として与えられる。しかし乱流火災では化学種の保存方程式に含まれる発生項を記述するために平均乱

流反応速度を与えなければならない。この平均乱流反応速度はいわゆる化学反応速度だけではなく、乱流火災の構造とも密接に関係している。従来までは乱流火災の構造があまり明確にされていなかったため、平均乱流反応速度を表すには燃焼反応をモデル化せざるをえなかった。燃焼反応モデルはこれまでにいくつか提案されている。層流火災の素反応式をそのまま利用するものもあるが⁶⁸⁾、他のモデルとの精度のかね合いを考慮すれば、全体の反応を 燃料+酸素→反応生成物 という一段非可逆反応で仮定してよいだろう。これによって燃料の消費される速度あるいは反応生成物が生成される速度をモデル化する。層流火災の最も直接的なアナロジーとして、反応速度がアレニウス式で与えられるとする方法もあるが⁶⁹⁾、実験との一致はあまりよくない。この例では燃料および酸素が乱流火災帯内に十分存在し、温度も相当高いにもかかわらず、実際にはアレニウス式で予測されるよりもはるかに遅い速度で反応が進んでいることが明らかにされた。この原因を知るためには、もう少し詳細に火災構造を考慮しなければならない。皺状層流火災のように火災帯が未燃混合気と燃焼ガスおよびその間に存在する薄い反応帯によって構成されており、この構造が時間的にも空間的にも変動しているとすれば、平均乱流反応速度はこれらの未燃混合気塊および燃焼ガス塊の存在確率によって大きく影響され、極端な場合には、反応帯内での反応速度は問題にならなくなる。この場合には未燃混合気あるいは燃焼ガス塊の存在確率を定める必要がでてくる。このために新しい変数、すなわち燃料がどの位消費されたかを示す“reactedness”^{69), 70)}、温度がどの程度上昇したかを示す“progress variable”^{71), 72)}を導入したり、あるいは反応生成物の濃度を用い⁶⁵⁾、これらの変数に対するモデルを現象論的に、または半理論的に考察しなければならない。一段非可逆反応を仮定すれば、これらの変数はすべて同じ意味をもつので、本稿では代表として“reactedness”を用いることにする。この“reactedness”は未燃混合気中では0、燃焼ガス中では1になり、反応帯の厚さが非常に薄い場合には、その時間平均値が燃焼ガス塊の存在確率を表わすことになる。“reactedness”に対するモデルは二つに大別できる。ひとつは SPALDING によって提案された Eddy-Break-Up モデルで⁶⁹⁾、反応速度は未燃混合気塊が崩壊してゆく速度に比例し、崩壊速度は乱流エネルギーの減衰速度に比例すると仮定して平均乱流反応速度を求めるものである。これまでにいくつか改良がほどこされているが⁷³⁾⁻⁷⁶⁾、密度変動を考慮しないという点のほかに、数学的に矛盾があることが指摘されている⁷⁷⁾。もうひとつは、

“reactedness”に関する確率密度関数 (Probability Density Function, 略して PDF) を物理的考察によって仮定するか, または半理論的に求める方法である。

“reactedness”は化学反応と密接に結びついているため, 厳密に確率密度関数を決めることはむずかしく, 半理論的方法においても実験にたよるざるをえない。しかし皺状層流火炎モデルが成立するような, 化学反応の特性時間が乱流の特性時間に比較して非常に短い場合には, “reactedness”の確率密度関数は0と1に中心をもつ二つの δ 関数で近似できることは容易に想像できる^{57), 65)}。この考え方を二段反応に拡張し, 結合確率密度関数を考慮した例もある⁷¹⁾。一方, 反応を伴わない乱流理論では確率密度関数を数理統計学上の手法を使って関数方程式の形で求める方法がある⁷⁸⁾。半理論的方法では, これを反応を伴う乱流に適用し, 確率密度関数を求めるのであるが, 関数方程式を解ける形にするためにはやはり現象論にもとづいたいくつかの仮定やモデルが必要となる^{77), 79)~81)}。

以上のように反応帯の厚さが非常に薄い場合には, 層流化学反応速度そのものはあまり問題にならないが, 未燃混合気あるいは燃焼ガスの塊の大きさが層流火炎の厚さと同程度になれば, 化学反応自体が乱流の影響を受けることは想像できる。しかし現在のところこのような特殊な場合に対する平均乱流反応速度の信頼できるデータは入手できない。一方分子運動論を用いて, 温度変動を導入することによりアレニウス式に補正を加えた例もあるが^{82), 83)}, 乱流火炎理論はまだそれほど精密な段階まで発達しておらず, 理論には組み入れられていない。

4.2 最近の研究の動向 前述のように, 乱流火炎理論はすべて反応を伴わない乱流理論のアナロジーとして出発している。しかしながらそのアナロジーの正当性は実験的に証明されていないものが多い。最近はおもに, 乱流火炎理論の中に導入されているいくつかの大きな仮定についてその正当性が議論されている。このことは新たな理論的發展のために是非とも必要であろう。

まず第一の問題は, 乱流によるスカラー量の輸送がその平均値の勾配に比例するという, いわゆる勾配モデル (Gradient Transport Approximation) の正当性である。比例定数は乱流シュミット数を用いて渦粘性係数で表わすが, 一般には乱流シュミット数は一定と仮定される。しかし乱流拡散流束に対するモデル化した輸送方程式を作り, 乱流拡散流束を求めて乱流シュミット数を逆算すると, 強い剪断流中に形成された乱流予混合火炎についてはこの仮定が成立しないことが報告されている⁸⁴⁾。第2図に結果の一部を示す。こ

第2図 乱流拡散流束におよぼす燃焼の影響
—●— $S_{ct} = S_{ct}^* = 0.83$, —x—計算値⁸⁴⁾

第3図 燃焼生成物の乱流拡散流束⁸⁵⁾

で x および y はそれぞれ流れ方向および流れに垂直方向の距離を示し, S_{ct} および S_{ct}^* はそれぞれ実際の乱流シュミット数と反応を伴わない場合の乱流シュミット数を表わす。また図中の破線は, 火炎の間欠領域のために乱流拡散流束の輸送方程式が成立しないことを示している。一方, 燃焼生成物と軸方向速度との結合確率密度関数を考慮することにより勾配モデルを用いなくても基礎方程式系を閉じた形にできることに着目し, これを用いて乱流拡散流束を計算すると第3図のようになる⁸⁵⁾。ここで $\tilde{c}$ はFAVRE平均で表わした燃焼生成物の無次元濃度, また $F = \overline{\rho u'' c''} / \rho_0 u_0$ であり u'' および c'' はFAVRE平均を用いたときの軸方向速度および無次元濃度の変動量で添字0は未燃状態を表わす。したがって F は無次元化された乱流拡散流束を示すことになる。また $\tau = T_- / T_0 - 1$ で T_- は燃焼ガス温度, T_0 は未燃混合気温度である。図中の実線はこの研究の結果であり, 破線は勾配モデルを用いた結果を表わす。この図から明らか

第4図 温度変動の確率密度関数⁸¹⁾

なように乱流拡散流束の方向は、燃焼ガス温度が極端に低い場合を除いて、勾配モデルで予測されるものとは反対である。またこの事実は最近実験によっても確かめられている^{86), 87)}。このように、乱流予混合火炎中では勾配モデルが適用できない可能性がでてきたわけであるが、理論⁸⁵⁾においては多くの仮定が使用されており、また実験^{86), 87)}も限られた条件でしか行なわれておらず、結論は今後の研究を待たねばならない。

第二の問題は確率密度関数の形状である。Eddy-Break-Up モデル⁶⁹⁾を用いない場合あるいは確率密度関数を理論的に⁷⁸⁾求めない場合には燃焼反応モデルとして確率密度関数を仮定する必要がある。乱流予混合火炎、とくに皺状層流火炎の場合には“reactedness”に関して未燃混合気状態および燃焼ガス状態にピークをもつ二つの δ 関数で表わされることは想像できる⁷⁰⁾。反応帯の厚さを考慮して、反応帯を表わすために中間の“reactedness”に対してヘビサイド関数を用いる場合もある⁶⁵⁾。しかしこれらで用いられた確率密度関数の形状は物理的洞察によるもので、変動量の測定がむずかしいため実験による検証は従来まで行なわれていなかった。ようやく最近になって、確率密度関数の形状が乱れの弱い乱流予混合火炎について求められるようになった^{23), 72)}。第4図および第5図に初期の結果を示す。 ΔT は測定された温度と未燃混合気温度の差、 T' は温度変動の rms 値、 $\overline{\Delta T}$ は ΔT の時間平均値および $\overline{\Delta T}_{max}$ は $\overline{\Delta T}$ の最大値を示す。第4図より $X/D=15$ (ただし X は流れ方向距離、 D はバーナー直径) 以外では理論で仮定されたような bi-modal (二つの δ 関数で表わされる) の確率密度関数は得られていないことがわかる。第5図はより一般的な整理の結果を示すが、測定値は図中に示されている3種類の確率密度関数に対して計算された値とあまりよく一致して

第5図 平均温度と変動温度の関係
 $\circ, \square, \triangle$ $\bar{u}=20$ m/s, $\square$ 30 m/s, $\triangle$ 45 m/s, (1), (2), (3) は計算に用いた確率密度関数の形状を示す⁷¹⁾

いない。このことは乱流予混合火炎が皺状層流火炎以外の構造をもつことを意味している。一方、未燃混合気のもつ乱れの性質を精密に制御することによって、乱れ強さの弱い、スケールの大きな乱れを発生し、完全な皺状層流火炎を形成して確率密度関数を測定すると第6図のようになる²⁴⁾。ここで r は半径方向距離である。この図より明らかなように、確率密度関数は明確な bi-modal 形状をとっている。第7図は平均温度と変動温度の無次元化表示である³⁸⁾。図中の白ぬき記号は乱流火炎帯で得られたデータを、またこの実験では大気開放型のバーナーを使用しているため燃焼ガスと静止大気との乱流混合がおきるが、その混合領域中

第6図 温度変動の確率密度関数⁴¹⁾

第7図 平均温度と変動温度の関係

白記号は火炎帯のデータを、また黒記号は燃焼ガスと周囲大気との混合領域のデータを示す³⁹⁾

で得られたデータを黒印で示す。第7図より明らかなように、乱流予混合火炎は乱流混合領域と明確に区別され、その構造は bi-modal の確率密度関数で特徴づけられる。このように皺状層流火炎に対しては確率密度関数の形状が実験的に明らかにされたわけであるが、確率密度関数の研究からも、前述した乱流予混合火炎の構造の研究と同じように、皺状層流火炎では表わせない構造の存在が確かめられた。しかしその構造はいまだに定量的には明らかにされていない。

第三の問題は燃焼反応のモデル化であろう。皺状層流火炎モデルが成立する場合には、スカラー散逸率をモデル化することにより化学反応とは無関係に平均乱流反応速度を導くことができる⁶⁹⁾。一方では Eddy-Break-Up モデルのように直接乱流反応速度をモデル

第8図 平均温度と平均イオン電流の関係³⁹⁾

化する方法もある^{69), 70)}。後者では実験的検証が必要なのは明らかであるが、前者においてもいくつかの仮定とモデルを用いているため平均乱流反応速度と実験との比較は必要であろう。これには実際に濃度測定を行なう方法²⁸⁾とイオン探針を用いる方法³⁸⁾がある。乱流予混合火炎ではイオン電流がほぼ燃焼生成物の生成速度に比例することが示されているが⁸⁸⁾、その場合には第8図に示すように平均イオン電流 $\bar{I}/\bar{I}_{max}$ すなわち平均乱流反応速度が Eddy-Break-Up モデルで予測されるもの⁷³⁾とほぼ一致することが明らかになった³⁹⁾。しかし現在のところ信頼できるデータが少なく、とくに皺状層流火炎以外の構造に対してはほとんどないといってよい。これからの研究が待たれるところである。理論においては有限の反応速度をダムケラー数の形で導入し、乱流燃焼速度を予測した例もあるが、実験との一致は見られていない⁸⁾。

さらに、前述のスカラー散逸率あるいは乱流エネルギー

分散率に関しても、反応を伴わない乱流のモデルがそのまま乱流火炎に適用できるかはいまのところ明らかではない。最近、この方面の実験的研究もようやく本格的に進められるようになり^{22), 25), 89), 90)}、今後の研究成果が期待される。

5. あ と が き

乱流理論は現在では数理統計学や確率論というように高度の数学的知識を必要とするが、この理論を歴史的に見ればすべて現象の説明のため生まれてきたものである。したがってまず第一に現象を正確に知ることが必要なわけで、乱流に関する今日の知識は測定技術の進歩なしにはありえない。これと同じように、乱流火炎の研究の歴史は測定技術の歴史といっても過言ではない。乱流火炎では定量的な研究がようやく可能になり始めたばかりなのである。レーザー流速計の進歩により、かなりの精度で高温流中での流速測定が可能になり⁹¹⁾、また温度測定に関しても、使用条件を限定すれば、従来から用いられている熱電対によって信頼できるデータが得られるようになった^{23), 24), 92)}。さらに種々の変動量として、火炎の発光量⁹³⁾、シュリーレン像⁹⁴⁾あるいはイオン電流⁹⁵⁾を測定した例もあり、現在比較的手に入りやすい計測装置でも使用方法に注意を払えば、いままで知りえなかった事実を明らかにすることができる。さらに新しい測定技術としてラマン発光を利用する方法も急速に進歩しており^{96), 97)}、近い将来、温度あるいは濃度に関する有用なデータを提供してくれるものと期待される。

乱流火炎理論を完成させるためにも、また乱流火炎の構造を明らかにするためにも、信頼できる実験結果が必要であり、さらに多くの人々がこのような研究に興味をもたれることを望んでやまない。

最後に、本稿をまとめるに当たり懇篤なるご配慮を賜った東京大学宇宙航空研究所 竹野忠夫助教授に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 辻 廣：燃焼現象論(2)，機械の研究，第28巻(1976)，pp. 801-804.
- 2) YOSHIDA, A. and TSUJI, H.: Supersonic Combustion of Hydrogen in a Vitiated Airstream Using Transverse Injection, AIAA J., Vol. 15 (1977), pp. 463-464.
- 3) 木村逸郎：放電により生成した活性種による燃焼の促進，燃焼研究，第53号(1980)，pp. 6-14.
- 4) ROGERS, R. C.: Model of Transverse Fuel Injection in Supersonic Combustion, AIAA J., Vol. 18 (1980)，pp. 294-301.
- 5) EVANS, J. S. and SCHEXNAYDER, Jr., C. J.: Influence of Chemical Kinetics and Unmixedness on

- Burning in Supersonic Hydrogen Flames, AIAA J., Vol. 18 (1980)，pp. 188-193.
- 6) 公開討論会：乱流燃焼，第17回燃焼シンポジウム，名古屋(1979).
- 7) BRAY, K. N. C. and LIBBY, P. A.: Interaction Effects in Turbulent Premixed Flames, Phys. Fluids, Vol. 19 (1976)，pp. 1687-1701.
- 8) LIBBY, P. A., BRAY, K. N. C. and MOSS, J. B.: Effect of Finite Reaction Rate and Molecular Transport in Premixed Turbulent Combustion, Combust. Flame, Vol. 34 (1979)，pp. 285-301.
- 9) 辻 廣：燃焼現象論(4)，機械の研究，第28巻(1976)，pp. 1019-1023.
- 10) POVINELLI, L. A. and FUCHS, A. E.: The Spectral Theory of Turbulent-Flame Propagation, Eighth Intern. Symp. on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore (1962)，pp. 554-566.
- 11) SNYDER, W. T.: Preliminary Observations of a One-Dimensional Turbulent Propane-Air Flame, *ibid.* (1962)，pp. 573-581.
- 12) MICKELSEN, W. R. and ERNSTEIN, N. E.: Growth Rates of Turbulent Free Flames, Sixth Intern. Symp. on Combustion, Reinhold, New York (1957)，pp. 325-333.
- 13) ANDREWS, G. E., BRADLEY, D. and LWAKABAMBA, S. B.: Measurement of Turbulent Burning Velocity for Large Turbulent REYNOLDS Numbers, Fifteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1975)，pp. 655-664.
- 14) ABDEL-GAYED, R. G. and BRADLEY, D.: Dependence of Turbulent Burning Velocity on Turbulent REYNOLDS Number and Ratio of Laminar Burning Velocity to R. M. S. Turbulent Velocity, Sixteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1977)，pp. 1725-1735.
- 15) ABDEL-GAYED, R. G., BRADLEY, D. and McMAHON, M.: Turbulent Flame Propagation in Premixed Gases: Theory and Experiment, Seventeenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1979)，pp. 245-254.
- 16) WILLIAMS, D. T. and BOLLINGER, L. M.: The Effect of Turbulence on Flame Speeds of Bunsen-Type Flames, Third Intern. Symp. on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore (1949)，pp. 176-185.
- 17) KARLOVITZ, B.: Open Turbulent Flames, Fourth Intern. Symp. on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore (1953)，pp. 60-67.
- 18) GROVER, J. H., FALES, E. N. and Scurlock, A. C.: Turbulent Flame Studies in Two-Dimensional Open Burners, Ninth Intern. Symp. on Combustion, Academic, New York (1963)，pp. 21-35.
- 19) MIZUTANI, Y., NAKAYAMA, T. and YUMINAKA, T.: A Study on the Structure of Premixed Turbulent Flames by the Microphone-Probe Technique, Combust. Flame, Vol. 25 (1975)，pp. 5-14.
- 20) BOWDITCH, F. W.: Some Effects of Turbulence on Combustion, Fourth Intern. Symp. on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore (1953)，pp. 674-682.
- 21) KOZACHENKO, L. S. and KUZNETSOV, I. L.: Burning Velocity in a Turbulent Stream of a Homogeneous Mixture, Comb. Expl. Shock Waves, Vol. 1 (1965)，pp. 22-30.
- 22) DURST, F. and KLEINE, R.: Geschwindigkeits-

- messungen in Turbulenten Vormischflammen, Gas Wärme Inter., Bd. 22 (1973), pp. 484-492.
- 23) YOSHIDA, A. and TSUJI, H.: Measurements of Fluctuating Temperature and Velocity in a Turbulent Premixed Flame, Seventeenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1979), pp. 945-956.
 - 24) YOSHIDA, A. and GÜNTHER, R.: Experimental Investigation of Thermal Structure of Turbulent Premixed Flames, Combust. Flame, Vol. 38 (1980) pp. 249-258.
 - 25) YOSHIDA, A.: An Experimental Study of Wrinkled Laminar Flame, Eighteenth Intern. Symp. on Combustion, Waterloo, Canada (1980).
 - 26) PETROV, E. A. and TALANTOV, A. V.: Investigation of Basic Characteristics of Combustion of a Homogeneous Mixture of an Open Turbulent System, ARS J., Vol. 31 (1961), pp. 408-413.
 - 27) VINCKIER, J. and Van TIGGELEN, A.: Structure and Burning Velocity of Turbulent Premixed Flames, Combust. Flame, Vol. 12 (1968), pp. 561-568.
 - 28) HOWE, N. M., SHIPMAN, C. W. and VRANOS, A.: Turbulent Mass Transfer Rates of Combustion in Confined Turbulent Flames, Ninth Intern. Symp. on Combustion, Academic, New York (1963), pp. 36-47.
 - 29) WRIGHT, F. H. and ZUKOSKI, E. E.: Flame Spreading from Bluff-Body Flameholders, Eighth Intern. Symp. on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore (1962), pp. 933-943.
 - 30) CUSHING, B. S., FAUCHER, J. E., GANDBHIR, S. and SHIPMAN, C. W.: Turbulent Mass Transfer and Rates of Combustion in Confined, Turbulent Flames, II, Eleventh Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1967), pp. 817-824.
 - 31) LEFEBVRE, A. H. and REID, R.: The Influence of Turbulence on the Structure and Propagation of Enclosed Flames, Combust. Flame, Vol. 10 (1966), pp. 355-366.
 - 32) BALLAL, D. R. and LEFEBVRE, A. H.: Turbulence Effects on Enclosed Flames, Acta Astronautica, Vol. 1 (1974), pp. 471-483.
 - 33) BALLAL, D. R. and LEFEBVRE, A. H.: The Structure and Propagation of Turbulent Flames, Proc. Roy. Soc. London, A 344 (1975), pp. 217-234.
 - 34) ANDREWS, G. E., BRADLEY, D. and LWAKABAMBA, S. B.: Turbulence and Turbulent Flame Propagation—A Critical Appraisal, Combust. Flame, Vol. 24 (1975), pp. 285-304.
 - 35) SRIRAMULU, V., PADIYAR, K. S. and SHET, U. S. P.: Correlation of Turbulent Burning Velocity Data for Enclosed Flames, Comb. Sci. Tech., Vol. 19 (1979), pp. 71-72.
 - 36) DAMKÖHLER, G.: Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammgeschwindigkeit in Gasgemischen, Z. Electroche., Bd. 46 (1940), pp. 601-626.
 - 37) YAMAZAKI, K. and TSUJI, H.: An Experimental Investigation on the Stability of Turbulent Burner Flames, Eighth Intern. Symp. on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore (1962), pp. 543-553.
 - 38) YOSHIDA, A. and GÜNTHER, R.: Temperature and Ionization Measurements in Turbulent Premixed Flames, AIAA-80-0207 (1980).
 - 39) SUMMERFIELD, M., REITER, S. H., KEBELY, V. and MASCOLO, R. W.: The Physical Structure of Turbulent Flames, Jet Propulsion, Vol. 24 (1954), pp. 254-255.
 - 40) SUMMERFIELD, M., REITER, S. H., KEBELY, V. and MASCOLO, R. W.: The Structure and Propagation Mechanism of Turbulent Flames, *ibid.*, Vol. 25 (1955), pp. 377-384.
 - 41) 辻 廣: 燃焼現象論(10), 機械の研究, 第29巻(1977), pp. 337-340.
 - 42) KOVASZNYI, K. S. G.: A Comment of Turbulent Combustion, Jet Propulsion, Vol. 24 (1956), p. 485.
 - 43) WILLIAMS, F. A.: Criteria for Existence of Wrinkled Laminar Flame Structure of Turbulent Premixed Flames, Combust. Flames, Vol. 26(1976), pp. 269-270.
 - 44) CHOMIAK, J.: Dissipation Fluctuations and the Structure and Propagation of Turbulent Flames in Premixed Gases at High REYNOLDS Numbers, Sixteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1977), pp. 1665-1673.
 - 45) BALLAL, D. R.: An Experimental Study of Flame Turbulence, Acta Astronautica, Vol. 5 (1978), pp. 1095-1112.
 - 46) BALLAL, D. R.: The Structure of a Premixed Turbulent Flame, Proc. Roy. Soc. London, A 367 (1979), pp. 353-380.
 - 47) BALLAL, D. R.: The Influence of Laminar Burning Velocity on the Structure and Propagation of Turbulent Flames, *ibid.* (1979), pp. 485-502.
 - 48) BALLAL, D. R.: Further Development of the Three-Region Model of a Premixed Turbulent Flame, I. Turbulent Diffusion Dominated Region 2, *ibid.*, A 368 (1979), pp. 267-282.
 - 49) BALLAL, D. R.: Further Development of the Three-Region Model of a Premixed Turbulent Flame, II. Instability Dominated Region 1, *ibid.* (1979), pp. 283-293.
 - 50) BALLAL, D. R.: Further Development of the Three-Region Model of a Premixed Turbulent Flame, III. Eddy Entrainment, Combustion in Depth Process of Region 3, *ibid.* (1979), pp. 295-304.
 - 51) 辻 廣: 燃焼現象論(12), 機械の研究, 第29巻(1979), pp. 563-566.
 - 52) TOWNSEND, A. A.: The Structure of Turbulent Shear Flow, Cambridge University, Cambridge (1979).
 - 53) HINZE, J. O.: Turbulence, McGraw-Hill, New York (1959).
 - 54) BROWN, G. L. and ROSHKO, A. J.: On Density Effects and Large Structure in Turbulent Mixing Layers, J. Fluid Mech., Vol. 64 (1974), pp. 775-816.
 - 55) GOSMAN, A. D., LOCKWOOD, F. C. and SYED, S. A.: Prediction of a Horizontal Free Turbulent Diffusion Flame, Sixteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1977), pp. 1543-1555.
 - 56) BILGER, R. W.: Turbulent Jet Diffusion Flame, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 1 (1976), pp. 87-109.
 - 57) LOCKWOOD, F. C. and SYED, S. A.: Consideration of the Problem of Combustion Modelling for

- Engineering Application, Comb. Sci. Tech., Vol. 19 (1979), pp. 129-140.
- 58) LIBBY, P. A. and BRAY, K. N. C.: Variable Density Effects in Premixed Turbulent Flames, AIAA J., Vol. 15 (1977), pp. 1186-1193.
- 59) REICHARDT, H.: Über eine neue Theorie der freien Turbulenz, Z. angew. Math. Mech., Bd. 21 (1941), pp. 257-264.
- 60) TAYLOR, G. I.: The Transport of Vorticity and Heat through Fluids in Turbulent Motion, Proc. Roy. Soc. London, A 135 (1932), pp. 685-705.
- 61) PRANDTL, L.: Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz, Z. angew. Math., Mech., Bd. 5 (1925), pp. 136-139.
- 62) HAJAKIĆ, K. and LAUNDER, B. E.: A REYNOLDS Stress Model of Turbulence and Its Application to Thin Shear Flows, J. Fluid Mech., Vol. 52 (1972), pp. 609-638.
- 63) BRAY, K. N. C.: The Interaction between Turbulence and Combustion, Seventeenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1979), pp. 223-233.
- 64) KENT, J. H. and BILGER, R. W.: The Prediction of Turbulent Diffusion Flame Fields and Nitric Oxide Formation, Sixteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1977), pp. 1643-1656.
- 65) BRAY, K. N. C. and MOSS, J. B.: A Unified Statistical Model of the Premixed Turbulent Flame, Acta Astronautica, Vol. 4 (1977), pp. 291-319.
- 66) POPE, S. B. and WHITELAW, J. H.: The Calculation of Near-Wake Flows, J. Fluid Mech., Vol. 73 (1976), pp. 9-32.
- 67) SPALDING, D. B.: Concentration Fluctuations in a Round Turbulent Jet, Chem. Eng. Sci., Vol. 26 (1971), pp. 95-107.
- 68) SOMMER, H. T. and STOJANOFF, C. G.: Numerical Prediction and Experimental Investigation of a Premixed Methane-Air-Flame, 2nd Intern. Symp. on Turbulent Shear Flows, London (1979).
- 69) SPALDING, D. B.: Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames, Thirteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1971), pp. 649-657.
- 70) LOCKWOOD, F. C.: The Modelling of Turbulent Premixed and Diffusion Combustion in the Computation of Engineering Flows, Combust. Flame, Vol. 29 (1977), pp. 111-122.
- 71) BRAY, K. N. C. and MOSS, J. B.: A Closure Model for the Turbulent Premixed Flame with Sequential Chemistry, Combust. Flame, Vol. 30 (1977), pp. 125-131.
- 72) LEWIS, K. J. and MOSS, J. B.: Time-Resolved Scalar Measurements in a Confined Turbulent Premixed Flame, Seventeenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1979), pp. 267-277.
- 73) SPALDING, D. B.: Development of the Eddy-Break-Up Model of Turbulent Combustion, Sixteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1977), pp. 1657-1663.
- 74) SPALDING, D. B.: A General Theory of Turbulent Combustion, the Lagrangian Aspects, AIAA Paper No. 77-141 (1977).
- 75) SPALDING, D. B.: The Influence of Laminar Transport and Chemical Kinetics on the Time-Mean Reaction Rate in a Turbulent Flame, Seventeenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1979), pp. 431-440.
- 76) MA, A. S. C., NOSEIR, M. A. and SPALDING, D. B.: An Application of the ESCIMO Theory of Turbulent Combustion, AIAA-80-0014 (1980).
- 77) POPE, S. B.: The Implications of the Probability Equations for Turbulent Combustion Models, Combust. Flame, Vol. 29 (1977), pp. 235-246.
- 78) モーニン, ヤグロム (山田訳): 統計流体力学 1, 総合図書 (1975).
- 79) POPE, S. B.: The Probability Approach to the Modelling of Turbulent Reacting Flows, Combust. Flame, Vol. 27 (1976), pp. 299-312.
- 80) DOPAZO, C. and O'BRIEN, E. E.: Functional Formulation of Nonisothermal Turbulent Reactive Flows, Phys. Fluids, Vol. 17 (1974), pp. 1968-1975.
- 81) O'BRIEN, E. E.: Statistical Methods in Reacting Turbulent Flows, AIAA-80-0137 (1980).
- 82) TSUGE, S. and SAGARA, K.: ARRHENIUS Law in Turbulent Media and an Equivalent Tunnel Effect, Comb. Sci. Tech., Vol. 18 (1978), pp. 179-189.
- 83) SAGARA, K.: Exact Turbulence Correction to ARRHENIUS' Law in the Asymptotic Limit of High Activation Energy, Comb. Sci. Tech., Vol. 21 (1980), pp. 191-197.
- 84) BORCHI, R. and DUROYA, D.: On the Scale of the Fluctuations in Turbulent Combustion, Seventeenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1979), pp. 235-244.
- 85) LIBBY, P. A. and BRAY, K. N. C.: Counter-Gradient Diffusion in Premixed Turbulent Flames, AIAA-80-0013 (1980).
- 86) MOSS, J. B.: Private Communication.
- 87) YANAGI, T. and MIMURA, Y.: Velocity-Temperature Correlation in Premixed Flame, Eighteenth Intern. Symp. on Combustion, Waterloo, Canada (1980).
- 88) YOSHIDA, A. and GÜNTHER, R.: An Experimental Study of Structure and Reaction Rate in Turbulent Premixed Flames, Comb. Sci. Tech., in press (1981).
- 89) BOGHI, R. and MOREAU, P.: Turbulent Combustion in a Premixed Flow, Acta Astronautica, Vol. 4 (1977), pp. 321-341.
- 90) MOREAU, P. and BOUTIER, A.: Laser Velocimeter Measurements in a Turbulent Flame, Sixteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1977), pp. 1747-1756.
- 91) KLEINE, R.: Geschwindigkeitsmessungen in Verbrennungssystem mit Laser-Doppler-Anemometern, VDI-Berichte Nr. 346 (1979).
- 92) BALLANTYNE, A. and MOSS, J. B.: Fine Wire Thermocouple Measurements of Fluctuating Temperature, Comb. Sci. Tech., Vol. 17 (1977), pp. 63-72.
- 93) GÜNTHER, R. and SIMON, H.: Turbulence Intensity and Eulerian Scales of Emission in Turbulent Diffusion Flames, Twelfth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1969), pp. 1069-1079.
- 94) KALGHATGI, G. T. and MOSS, J. B.: Quantitative

Schlieren Measurements in a Confined Turbulent Premixed Flame, 2nd Intern. Symp. on Turbulent Shear Flows, London (1979).

- 95) SUZUKI, T., HIRANO, T. and TSUJI, H.: Flame Front Movements of a Turbulent Premixed Flame, Seventeenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1979), pp. 289-297.

- 96) BIRCH, A. D., BROWN, D. R., DOBSON, M. G. and THOMAS, J. R.: Studies of Flammability in Turbulent Flows Using Laser Raman Spectroscopy, *ibid.* (1979), pp. 307-314.

- 97) SETCHELL, R. E.: Local Turbulence Properties in Flames from Time-Averaged Raman Spectroscopy Measurements, AIAA J., Vol. 18 (1980), pp. 181-187.

＝ 会 告 ＝

第25回材料研究連合講演会講演募集

共 催: 日本学術会議材料研究連絡委員会、日本航空宇宙学会ほか関連23学協会

幹事学会: 土木学会、※日本機械学会、日本金属学会、日本建築学会、日本材料学会、日本材料強度学会 (※印事務担当学会)

開催日: 昭和56年10月5日(月)、6日(火)

会場: 日本学術会議 (東京都港区六本木7-22-34)

開催要領: 講演内容はすでに発表されたものでもさしつかえないが、最近の研究に属するものが望ましい。なお、研究内容は材料の諸物性、諸性質の測定および試験ならびに材料の適切な使用に関する応用研究を包含する。

- 講演部門:** I. 微視的構造 (Micro Structure of Materials)
II. 材料の力学的性質と挙動 (Mechanical Properties and Behavior of Materials)
III. 材料の物理的性質 (Physical Properties of Materials)
IV. 材料の化学的性質 (Chemical Properties of Materials)
V. 構造物強度 (Strength of Structure)
VI. 材料の製造・加工と処理 (Design, Working and Processing of Materials)
VII. その他 (Miscellaneous)

申込期限: 昭和56年6月30日(火)

申込要領: 講演申込者はB5判用紙にa) 講演題目、b) 概要200字(邦文)、c) 講演発表希望部門(上記部門参照)、d) 講演者ならびに連名者の氏名・勤務先(住所、電話番号)所属学協会ならびに会員資格・年齢・(連名の場合は講演者に必ず○印をつけて下さい)、e) スライド使用の有無(大きさ35mm)、f) 欧文論文集(下記参照)への投稿希望の有無、以上を明記の上、下記日本機械学会宛お申込下さい。

なお、講演題目、氏名、勤務先には英文を付記することとし、また講演申込時と前刷集原稿提出時における発表題目、氏名(連名の場合)の変更等がないよう、充分に留

意してお申込み下さい。

講演前刷: 講演前刷集は聴講者に内容を徹底させ、あわせて講演時間の短縮、図面の節約を計るとともに、聴講できない方にも講演内容を速報するために印刷するもので、講演者は前刷原稿を必ず期日までに日本機械学会へ提出して下さい。

a) 講演前刷原稿提出締切日 昭和56年8月6日(木)

b) 前刷原稿は所定の原稿用紙2枚以内に(図、表、写真を含めて邦文で2,960字) 明りょうに墨またはインク(タイプの場合も黒字)で書いて、なるべく余白をさけるように留意して下さい。

c) 所定原稿用紙は講演申込者に日本機械学会からお送りします。所定用紙以外に書いた原稿は受理致しません。

詳細問合せおよび講演申込、前刷原稿提出先

〒151 東京都渋谷区代々木2-4-9

三信北星ビル5階

日本機械学会材料研究連合講演会係

TEL (03) 379-6781

欧文論文集について

a) 発表論文は Proceedings of the 25th Japan Congress on Materials Research に掲載し諸外国に頒布の予定です。

b) 本論文集に掲載される論文は今回発表されたもので、欧文の未発表のものに限ります。

c) 投稿希望者は別に送られる所定原稿用紙に執筆し、講演会当日までに次に提出して下さい。

〒606 京都市左京区吉田泉殿町1-101

日本材料学会気付材料研究連合講演会 欧文論文集刊行会

TEL (075) 761-5321

d) 締切日以降の原稿は受理しません。また不備な原稿は返却することがあります。