

## ま え が き

---

人類が他の動物と区別される最も大きな要素は火を使うことであるといえよう。人類は太古の昔から、火を生活の中で用い続けてきた。大昔にあっては、火を発生させることは容易なことではなく、火を維持し続けることが重要な仕事であり、火は貴いものであった。また、火は不浄なものを燃やし浄化してしまう作用もあることから、上述のことと相まって、信仰や宗教の中にとり入れられ、長い間科学の目から遠ざけられてきた。

燃焼、すなわち火に関する現象は、このように人類にとって最も身近で、かつ重要な現象である。その中では、きわめて急激な化学反応、発熱、流れ、伝熱などの物理過程が複雑に干渉し合いながら現象を支えている。燃焼はろうそくの火のように静かなものから、宇宙ロケットのように何千トンもの推力を発生させる巨大な火炎、あるいは1分間に何千回転もする自動車のエンジン内の燃焼のように、瞬時に燃焼を完結するようなものなど、その形態は数え上げればきりが無い。これらの例のように燃焼に際して急激な発熱を伴うものを熱炎というが、逆にほとんど発熱を伴わない冷炎と呼ばれるものもある。このように燃焼現象は千差万別で、一見まちまちのようにも見えるが、その根本は、燃料を急激に酸化することであり、冷炎を除けば、通常相当の発熱が同時に生じる。工業的には、この熱を利用し、熱機関を駆動させたり、物体を加熱したりする。すなわち、燃焼器内で、まず燃料のもっている化学エネルギーを熱エネルギーに変換することに燃焼が利用されている。現在我が国の1次エネルギーの95%以上が燃焼によりまかなわれており、現代工業活動がいかにも燃焼によって支えられ、従って燃焼の省エネルギー技術がいかに大切かを知ることができよう。

一方、このように大量のエネルギーが燃焼により生成されると、その排気ガスもばく大なものとなるので、その中に含まれる環境汚染物質の濃度などを低

減させ、環境との調和をはかることが必要である。環境汚染物質の中で、特に CO, NO<sub>x</sub>, すすなどは、燃焼における化学反応と深いかわりがあり、これらの濃度を低減させるために、火炎中での生成過程などを明らかにする努力がなされた。それは化学反応を伴う熱流体力学の場として火炎をとらえることになり、近年この方面の学問の発展にはめざましいものがある。このような考えに立脚して初めて燃焼をとらえたのは von Kármán であり、燃焼のように化学反応を伴う圧縮性流体を扱う力学を Aerothermochemistry (化学熱流体力学) と名づけ、基礎方程式を確立したときから、数理的理論解析をバックに系統的に燃焼の研究が行われるようになったといえる。これは 1953 年のことであり、現代の燃焼研究はきわめて若い学問である。

本書は、以上のような背景にある燃焼現象を、可能な限り基礎的に、かつ統一した観点から眺め、基礎と応用にありがちな隔りを、少しでも埋めるべく努力をしたつもりである。燃焼現象はきわめて複雑であるため、燃焼機器の開発に際しては理論的検討よりは、もっぱら実験に頼ってきたといっても、過言ではない。一方、近年他の多くの分野同様、電子計算機を導入した設計、あるいは運転性能の予測などが要求されるようになり、燃焼現象の理論解析法及び電子計算機シミュレーション手法の開発が広く行われるようになってきた。本書でも、このような背景にかんがみ、紙面の許す範囲でこれらの研究のいくつかをとり入れた。しかし、紙面の制約で思い切って割愛したり、あるいは説明を簡略にした部分なども多く、また著者らの理解の不十分さから、検討や表現に不備なところもあると思われるので、御叱正を賜れば、この上ない幸いである。

執筆に当たり、内外の多くの著書及び文献を参照させていただいた。これらの著者に対して、心から謝意を表す。また、本書の出版に当たり、一方ならぬ御協力・御理解をいただいた、コロナ社編集部の方々に厚く御礼申し上げる次第である。

昭和 59 年 12 月

著者しるす

# 目 次

---

## 1 燃 焼 現 象 概 説

---

1.1 燃 焼 の 開 始 .....	1
1.1.1 着 火 遅 れ 時 間 .....	3
1.1.2 自 発 着 火 .....	4
1.1.3 冷 炎 と 熱 炎 .....	10
1.1.4 強 制 着 火 .....	11
1.2 燃 焼 現 象 の 分 類 .....	17
1.3 燃 焼 現 象 を 支 配 す る 無 次 元 パ ラ メ ー タ .....	19
演 習 問 題 .....	21

## 2 予 混 合 燃 焼

---

2.1 混 合 度 .....	23
2.2 燃 焼 速 度 と 火 炎 構 造 .....	24
2.2.1 層 流 予 混 合 火 炎 .....	24
2.2.2 乱 流 予 混 合 火 炎 .....	37
2.3 火 炎 安 定 化 .....	55
2.3.1 火 炎 安 定 化 の 重 要 性 .....	55
2.3.2 火 炎 安 定 の 基 礎 .....	56
2.4 Rankin-Hugoniot 方 程 式 と そ の 解 .....	61
2.4.1 Rankin-Hugoniot 方 程 式 の 導 出 .....	62
2.4.2 解 の 性 質 と 燃 焼 速 度 .....	63
演 習 問 題 .....	67

# 3 拡散燃焼

3.1 層流拡散火炎 .....	70
3.1.1 火炎の特徴 .....	70
3.1.2 気体燃料の層流拡散火炎 .....	70
3.1.3 液体燃料の層流拡散火炎 .....	84
3.1.4 固体燃料の層流拡散火炎 .....	101
3.2 乱流拡散火炎 .....	122
3.2.1 火炎の特徴 .....	122
3.2.2 乱流火炎への遷移 .....	123
3.2.3 火炎の吹き飛び .....	125
3.2.4 火炎構造 .....	127
3.2.5 乱流拡散火炎のモデル計算 .....	133
3.2.6 火炎の安定化 .....	136
演習問題 .....	138

# 4 爆発とデトネーション

4.1 爆発現象の分類 .....	140
4.2 爆風解析 .....	142
4.2.1 理想爆風 .....	142
4.2.2 非理想爆風 .....	150
4.3 デトネーション .....	153
4.3.1 デトネーションの発生 .....	154
4.3.2 デトネーション波の構造 .....	156
演習問題 .....	159

# 5 燃焼ガスの性状

5.1 燃焼に関連した熱力学 .....	161
----------------------	-----



5.1.1 反応熱と生成熱 .....	161
5.1.2 混合気の熱力学的諸性質 .....	163
5.2 化学平衡 .....	165
5.2.1 平衡定数 .....	165
5.2.2 平衡組成の計算法 .....	168
5.2.3 平衡定数と反応速度定数 .....	171
5.2.4 断熱火炎温度 .....	172
5.3 環境汚染物質の生成と制御 .....	174
5.3.1 $\text{NO}_x$ の生成と制御 .....	174
5.3.2 $\text{SO}_x$ の生成と制御 .....	185
5.3.3 CO, すすなどの生成と制御 .....	185
5.3.4 灰・ばいじんの性状 .....	189
演習問題 .....	191

## 参 考 文 献

## 演習問題の解答

## 索 引

# 1

## 燃焼現象概説

### 1.1 燃焼の開始

燃焼 (combustion) が開始され、持続される場合、これに関係する現象はどのようなものであろうか。燃焼の中でも特に熱炎では、発熱を伴う燃料の急激な酸化反応が生じ、発生した熱により温度が上昇し、さらに伝導や対流、熱放射などの伝熱により、火炎部分から周囲へ熱損失が生じる。火炎が維持されるためには、熱的な観点から単位時間当りの発熱量と熱損失量とが釣り合うか、あるいは上回る必要がある。一方、反応論的に考えれば反応が進行するのは、燃料 (fuel) 分子と酸素 (oxygen) 分子の直接反応ではなく、反応基あるいは活性基と呼ばれる不安定化学種の介在によっているため、燃焼が維持されるためには、燃料分子を最終生成物まで酸化するのに十分な濃度の反応基が、たえず存在する必要がある、反応基の生成速度と消滅速度が重要な因子となる。

いま化学種 A と B が反応して、生成物 C と D が生成するような反応を考える。その反応式は



と書ける。ここに  $a, b, c, d$  は、上式の反応に関する各化学種の化学量論係数 (stoichiometric coefficient) であり、分子数比を表している。すなわち、A, B, C, D なる化学種の変化が一定の比で進行することになり、反応物 (A, B)

あるいは、生成物 (C, D) いずれか一つの時間的変化量がわかれば、他はすべてこれから求めることが可能となる。成分のモル濃度  $N_i$  [mol/cm<sup>3</sup>] の時間的変化  $dN_i/dt$  を反応速度 (reaction rate) という。

いま、式 (1.1) の反応が、 $a$  個の A 分子と  $b$  個の B 分子の衝突により進行すると考えると、その右向き反応速度は、衝突回数に比例することとなり

$$\omega_f = k_f N_A^a N_B^b \quad (1.2)$$

と表される。  $k_f$  は右向き反応の反応速度定数 (reaction rate constant) であり、温度のみの関数で与えられる。式 (1.2) を動力学的質量作用の法則あるいは単に質量作用の法則、 $(a + b)$  を反応次数 (reaction order) という。

次にその反応機構 (reaction mechanism) が最も良く解明されている、H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 反応系について燃焼の開始すなわち着火 (ignition) に関し考えてみよう。まず、H<sub>2</sub> は O<sub>2</sub> と次の化学量論で反応する。すなわち



しかし、これはあくまでも、H<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> が 2 : 1 の分子比で反応して H<sub>2</sub>O が 2 分子生成することを表しているにすぎず、実際の反応がこの反応式によっている訳ではない。反応が H<sub>2</sub> や O<sub>2</sub> のような安定分子同志で生じることがきわめてまれで、この場合にも表 1.1 のように、これ以上の基本的な反応には分割が不可能な素反応 (elementary reaction) と呼ばれる基本反応が、直列あるいは並列的に進行し、全体として式 (1.3) が完結する。表 1.1 にも見られるように、この反応では、H, OH, O などの反応基、あるいは、中間生成物 (intermediates) と呼ばれる化学種が、H<sub>2</sub> や O<sub>2</sub> などの安定化学種と反応し、別種の反応基を生成したり、あるいはその数を増加したりしており、この反応が連鎖的に進行するうえで重要な役割を果たしている。このような反応基を特に連鎖員 (chain carrier) といい、それが関与している素反応を連鎖反応 (chain reaction) という。表 1.1 中に示したように、連鎖反応にもその特徴に応じて名称が与えられている。

さて、以上のように、燃焼反応を起こさせるためには、反応基が重要な役割をもっていることが理解できたと思う。すなわち、燃焼を開始させるために

表 1.1 H<sub>2</sub>・O<sub>2</sub> 反応系における素反応

反応番号	反 応 式	名 称
I	H <sub>2</sub> + M = H + H + M	連鎖開始反応
II	O <sub>2</sub> + M = O + O + M	
III	H + O <sub>2</sub> = O + OH	連鎖分枝反応
IV	O + H <sub>2</sub> = H + OH	
V	O + H <sub>2</sub> O = OH + OH	
VI	H + HO <sub>2</sub> = OH + OH	
VII	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + M = OH + OH + M (= O + H <sub>2</sub> O + M)	
VIII	H + H <sub>2</sub> O = OH + H <sub>2</sub>	連鎖伝搬反応
IX	H + HO <sub>2</sub> = O + H <sub>2</sub> O	
X	O + HO <sub>2</sub> = OH + O <sub>2</sub>	
XI	H + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = OH + H <sub>2</sub> O	
XII	O + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = OH + HO <sub>2</sub>	
XIII	HO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> = H + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	連鎖消滅反応
XIV	H + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	
XV	OH + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>	
XVI	OH + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O + HO <sub>2</sub>	
XVII	H + OH + M = H <sub>2</sub> O + M	
XVIII	H + H + M = H <sub>2</sub> + M	
XIX	O + O + M = O <sub>2</sub> + M	
XX	H + O <sub>2</sub> + M = HO <sub>2</sub> + M	
XXI	HO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	
XXII	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> $\xrightarrow{\text{壁}}$ H <sub>2</sub> O + $\frac{1}{2}$ O <sub>2</sub>	

は、反応が自発的に進行するに必要な濃度の反応基が蓄積、または供給されなければならない。このために必要な混合気の最低温度を着火温度 (ignition temperature) という。

### 1.1.1 着火遅れ時間

密閉容器内に可燃性混合気 (combustible mixture) を満たし、その温度を上昇したり、ディーゼルエンジンのように断熱的に圧縮した高温の空気中に燃料を噴射して自発着火させる場合には、雰囲気がかなり高温で熱解離などにより反応基が生成していない限り、前もって反応基は存在していない。このような場合には、例えば、表 1.1 の反応式 (I) や (II) のような連鎖開始反応 (chain initiation reaction) により生じた連鎖員が、それに続く連鎖分枝反応 (chain

branching reaction)および連鎖伝搬反応(chain propagation reaction)により、その数を増加し、(一方で連鎖消滅反応(chain termination reaction)によりその濃度を減じたりもするが)、ある濃度に達すると、一気にその数を増加して、きわめて短時間のうちに燃料を酸化しつくしてしまう。このように、急激な反応が生じるまでには、連鎖員の生成と消滅の繰り返しの結果、連鎖員濃度が急激な反応を起こすのに必要な臨界値に達するまでの時間が必要である。これを着火遅れ(あるいは着火待ち)時間(ignition delay time)といい、連鎖反応に特有な現象量である。ガソリンエンジンでは、電気火花点火により、点火プラグの周辺に短時間に大きなエネルギーを注入し、燃焼反応を開始させるための初期の連鎖員を作る。このような着火を強制着火という。初期の連鎖員が増殖し、エンジン内に燃焼波が伝搬するに十分な連鎖員濃度を蓄積すると、エンジン内の燃料をはじめ燃焼することが可能となる。すなわち、火花点火後着火遅れ時間を経て燃焼が開始される。エンジン内の燃焼はピストンが上死点に達した直後に開始されることが望ましいので、ガソリンエンジンでは点火時期を、ディーゼルエンジンでは燃料の噴射時期を、燃料の蒸発や着火遅れなどの時間を考慮してピストンが上死点に到達する前に設定する。エンジンの回転数が遅い間は、ピストン位置が上死点近くで上述の操作を行えばよいが、エンジンが高速回転になると、それだけ前の位置で操作を行わなくてはならない。エンジンに装備されている自動進角装置は、燃焼の開始、すなわち着火遅れ現象があるために必要となっていることが理解できよう。

### 1.1.2 自 発 着 火

〔1〕 反応機構からみた自発着火限界 着火は上述のように連鎖員が、反応が急激に進行するに十分な臨界濃度まで蓄積できるか否かが大きな要因となっており、連鎖員を増殖する速度と、これを消滅する速度の競合によりきまる。例えば式(1.3)左辺の割合で、水素と酸素を混合して容器につめ、温度及び圧力を変化させ、自発着火(spontaneous ignition)後急激な燃焼が開始される限界を求めると、図1.1が得られる。圧力を一定にとれば、それぞれの圧力に対応して着火温度が存在していることがわかる。次に温度一定の条件の

もとに、例えば図中の点 A から点 D に圧力を変化してゆくと圧力により着火したりしなかったりする。点 A のある領域では、圧力が低いため、化学種粒子間の衝突頻度が少なく、連鎖員の生成と増殖速度が低いばかりでなく、いったん生成した連鎖員が、気相空間で他の粒子と十分な衝突をせずに器壁に達し、失活してしまい、混合気を着火・爆発 (explosion) に至らしめない。しかし、長期間にはいわゆる燃焼反応と呼ばれる急激な燃料の酸化・発熱ではなく、きわめて緩慢な酸化反応が進行し、容器内の成分が変化する。

すなわち、この領域での連鎖員の失活は容器壁が重要な役割をもっており、器壁材料や被覆剤 (図 1.1 では KCl) など表面状態を変化させると、この領域の限界が変化する。

圧力を増加してゆくと、やがてある圧力を限界として、点 B の存在する燃焼領域が現れる。この限界を第 1 燃焼限界 (combustion, or explosion limit) という。点 B のある領域では、圧力が高いため、化学種の気相での衝突が頻繁に生じ、生成した連鎖員が、気相中で表 1.1 に示した連鎖反応に寄与し、器壁で失活する割合が減少して、連鎖員の急速な増殖が実現し、加速的に燃焼反応が進行する。点 B のある領域は温度の低い方向に半島状の形をしており、よく爆発半島 (explosion peninsula) などと呼ばれている。

さらに圧力を上昇すると、再び急激な燃焼反応の生じない点 C のある領域に到達する。点 B と点 C のある領域の限界を第 2 燃焼限界という。点 C の領域では、圧力が高いために化学種同志の衝突頻度がさらに上昇し、点 B の領域ではさほど有効でなかった三体衝突反応の役割が増大し、連鎖員の失活速度が増殖速度を上回る。特に温度の低いところでは、表 1.1 の反応 (XX) が有効となり、生成した  $\text{HO}_2$  がさほど活性を示さないことから、これが器壁に拡

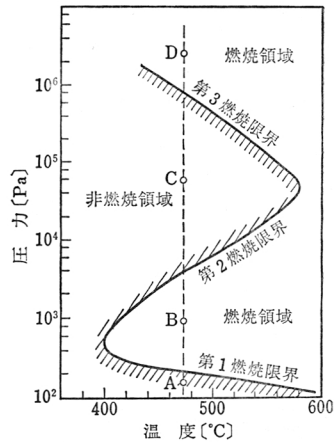


図 1.1  $\text{H}_2\text{-O}_2$  量論混合気の爆発限界<sup>2)</sup>

散して安定化学種になるため、反応 (XXI), (XXII) を通じて連鎖員を失活させる。HO<sub>2</sub> や H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> は、水素を含む燃料の燃焼において、低温の領域で重要な化学種であり、着火や燃焼ガスの冷却など、低温における化学動力学には欠かせないものである。

さらに圧力を上昇すると、第3燃焼限界を経て、再び点 D の存在する急激な燃焼反応の生じる領域に到達する。この領域では、圧力が高いため、化学種同志の衝突が頻繁に起こり、点 C の存在する領域では、連鎖員の増殖を阻害する働きをした HO<sub>2</sub> がこの領域では、燃料の H<sub>2</sub> と反応して、反応 (XIII) により、連鎖員 H と H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> を生じさせ、この H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> が反応 (VII) により分解して OH なる連鎖員を2個作るようになるため、再び反応が活性化して、急激な燃焼が生じるようになる。また、この領域では、混合気の密度が大きいため、単位体積当りの発熱量が大きく、反応を開始すると、温度が上昇し、その結果ますます反応が盛んになる。このことを熱的效果あるいは熱爆発 (thermal explosion) などと呼ぶ場合がある。しかし、燃焼は化学反応によっているのであり、その反応速度がいかにも速くても、燃焼現象を熱的な側面からのみでとらえるのは、誤った解釈に陥る危険があるので注意が必要である。

〔2〕 自発着火限界に影響する因子 図 1.1 は、水素・酸素の化学量論混合気に対するものであるが、 $W$  を質量濃度、添字  $F$  を燃料、 $O$  を酸化剤 (oxidant)、exp を設定条件、stoich を化学量論条件とするとき

$$\phi \equiv \frac{(W_F/W_O)_{\text{exp}}}{(W_F/W_O)_{\text{stoich}}} \quad (1.4)$$

で定義される当量比 (equivalence ratio)  $\{1/\phi = \lambda$  を空気比 (air ratio) あるいは空気過剰率 (excess air ratio) と呼び、実用的には  $\phi$  のかわりに、これで整理することが多い} や燃料・酸化剤の組合せ、容器形状や寸法を変化させれば、その値は変化する。以上の説明は、化学反応機構の立場から検討を加えたものであるが、燃焼現象を開始させるためには、連鎖員濃度の急激な増加とともに、その反応速度を増進させるための温度の上昇がなければならない。すなわち、着火開始条件として、発熱速度が、周囲への熱損失速度を少なくとも

# 索引

## 【A】

Arrhenius 式 82  
圧力波 140  
圧力べき数 27

## 【B】

微粉炭の燃焼 114, 115  
——プロセス 114  
爆発 140  
——半島 5  
爆風 141  
分散度 93  
分散形火災 43  
ブンゼン形火災 26

## 【C】

Chapman-Jouguet 点 65  
C-J 点 65, 66  
C-J デトネーション 66  
C-J 条件 66  
COM 101

## 【D】

第一 Damköhler 数 20, 58, 72, 84, 106  
第二 Damköhler 数 20  
断熱火炎温度 172  
断熱指数 163, 164  
デフラグレーション 64, 141  
デトネーション 64, 140~142, 153  
——の発生 154  
——波の構造 156

## 【E】

液面燃焼 96  
液体燃料 84  
——の燃焼法 85  
エネルギーパワースペクトル 130  
エンベロープ炎 86  
円筒収束形デトネーション 159  
エントロピ 165

## 【F】

Fabre 平均 53  
Fendell 曲線 84  
Froude 数 20  
fuel NO 179

## 【G】

Gibbs の自由エネルギー 165, 173  
Grashof 数 20  
ガスタービン燃焼器 136, 184  
限界速度こう配 57  
群燃焼 96  
——パラメータ 95  
逆火 56  
逆噴射ジェット 59

## 【H】

Helmholtz の自由エネルギー 165, 173  
Hugoniot 曲線 64  
排ガス再循環 184  
灰分 113  
発熱速度 32  
発熱反応 162

反応基 2  
反応機構 10, 74  
反応熱 78  
反応速度 2, 78  
反応速度定数 2, 7, 34, 76  
反応帯 33  
反応次数 2  
平均粒径 93  
平衡の条件 166  
平衡の定義 167, 168  
平衡組成 168  
変動成分の rms 39  
偏平度 130  
火花点火 11  
火格子燃焼 120  
ひん度因子 7  
比熱比 19, 164  
非理想爆風 150  
火移り速度 121  
標準反応熱 162  
標準生成エントロピ 165  
標準生成熱 162  
表面反応 105  
保炎器 60  
吹き出し強さ 82  
不均一燃焼 19  
吹き飛び 56, 81, 125  
噴霧燃焼 90  
噴霧火災 90  
フラグメント 185  
フライアッシュ 190

## 【I】

移動床 121, 122  
イオン探針 128  
引火点 17

## 【K】

Karlovitz 数 58



Kronecker のデルタ 47  
 火炎安定化 55, 56, 136  
 火炎構造 28, 33, 43, 71, 115, 127  
 火炎面モデル 78  
 火炎伸張 57  
 火炎速度 24  
 火炎前面 31  
 火炎による着火 14  
 化学分析 113  
 化学量論 2, 78  
 —係数 1  
 影写真 26  
 改質燃料 113  
 塊状炭の燃焼 120  
 拡大 Zeldovich 機構 174, 178  
 攪拌燃焼器 45  
 確率密度関数 43, 44, 130  
 拡散火炎 69  
 拡散係数 29  
 拡散燃焼 18, 23, 69  
 拡散質量流束 29  
 拡散速度 29  
 可燃限界 16  
 —測定装置 15  
 可燃成分 117  
 過濃(可燃)限界 16  
 環境汚染物質 174  
 貫通距離 93  
 過酸化物 11  
 活性化エネルギー 7, 9, 83, 106, 176  
 輝炎帯 72  
 希薄可燃限界 15  
 揮発分 113  
 既燃ガス 41  
 均一燃焼 19  
 気相反応 105  
 気体燃料 70, 84  
 工業分析 113  
 高負荷燃焼 55  
 混合度 23  
 混合長 50  
 —モデル 50  
 高温物体による着火 14  
 抗力係数 94  
 固体燃料 101

固体燃焼 101  
 固定炭素分 113  
 固有値 33  
 空気比 6  
 空気過剰率 6  
 強制着火 4, 11  
 強制対流 89  
 球面衝撃波 143  
 吸熱反応 162  
 球対称爆風 148

## 【L】

large eddy simulation 53  
 Lewis 数 20, 79, 82

## 【M】

Mach 数 20  
 Marble-Adamson の問題 59  
 マクロ時間スケール 130  
 乱れのエネルギー 41  
 乱れの Kolmogorov スケール 41, 134  
 乱れのエネルギー消散率 41, 51, 52  
 乱れの波数 41  
 乱れのマクロスケール 40  
 乱れのミクロスケール 40  
 乱れの積分スケール 40  
 乱れの相対強さ 39  
 乱れのスケール 50  
 乱れの運動エネルギー 50  
 乱れの絶対強さ 39  
 未燃カーボン 187  
 未燃ガス 41  
 未燃混合気 25  
 水噴射 183  
 モルエンタルピ 163

## 【N】

Nusselt 数 20  
 燃料比 113  
 燃焼限界 5, 6, 10  
 燃焼速度 24~27  
 熱爆発 6

熱炎 10, 11  
 熱解離反応 27, 163  
 2 段燃焼 184  
 2 方程式モデル 50, 51  
 2 点境界値問題 33  
 濃度変動 132  
 濃淡燃焼 184  
 抜山-棚沢の分布関数 92

## 【O】

温度変動 131

## 【P】

Peclet 数 20  
 Poisson 曲線 64  
 Prandtl 数 20  
 Prandtl の混合長仮説 50  
 prompt NO 174, 176, 177  
 パイロット火炎 59

## 【R】

Rankin-Hugoniot 方程式 62  
 Ranz-Marshall の式 95  
 Rayleigh 線 63  
 Reynolds 応力 48  
 Reynolds 流束 49  
 Reynolds 数 20, 124  
 Rosin-Rammlar 分布関数 92  
 乱流拡散火炎 122  
 乱流粘性係数 48  
 乱流燃焼 19  
 —速度 45, 46  
 乱流予混合火炎 37  
 冷炎 10, 11  
 冷却効果 25, 155  
 連鎖分枝反応 3  
 連鎖伝搬反応 3, 4  
 連鎖反応 2  
 連鎖員 2  
 連鎖開始反応 3  
 連鎖消滅反応 3, 4  
 レーザ Rayleigh 散乱法 43, 131  
 レーザ Doppler 流速計 129

理想爆風 142  
 律速 69  
 流動床燃焼 121  
 粒径分布 91  
 —関数 92  
 粒子軌跡写真 73  
 粒数累積分布 91  
 粒数メディアン直径 93

## 【S】

Schmidt 数 20  
 最大燃焼速度 28  
 再循環領域 60, 136  
 最小点火エネルギー 12  
 最小臨界直径 14  
 最終火炎温度 33  
 青炎 11  
 生成熱 162  
 石炭の性状 111  
 石炭燃焼 111  
 せん断流 58  
 遷移流 38  
 遷移点 123  
 振動展開法 150  
 シュリーレン写真 26  
 下込め燃焼 120  
 質量分布 91  
 質量分率 28, 29  
 質量加重平均 53  
 質量メディアン直径 93  
 質量累積分布 91  
 質量流束分率 28, 29, 174  
 質量作用の法則 2  
 しわ状層流火炎 42  
 自然対流 88  
 素反応 2  
 相関テンソル 39

総括化学反応式 30  
 速度変動 39  
 速度線形近似 152  
 層流燃焼 19  
 すずの生成 186  
 スピンドトネーション 157  
 スワール数 61, 137  
 消炎距離 12  
 消炎直径 13  
 衝撃波 140

## 【T】

thermal NO 174  
 対向流拡散火炎 71, 81  
 対数正規分布関数 92  
 単一液滴の燃焼 85  
 定圧比熱 163  
 低発熱量 86, 95, 98  
 抵抗係数 90  
 定容比熱 164  
 転換率 179~181  
 等方性 39  
 等方均一 39  
 当量比 6  
 灯心燃焼 100  
 トランスファーナンバー 95  
 着火 2  
 —待ち時間 4  
 —遅れ時間 4  
 —温度 4  
 チャー 117  
 直接写真 26  
 中間生成物 2

## 【U】

ウエータ炎 86

上込め燃焼 120  
 渦消散モデル 135  
 渦崩壊モデル 134

## 【V】

van der Waals 力 188  
 von Neumann スパイク 65

## 【Y】

予蒸発燃焼 100  
 予混合火炎 24  
 予混合燃焼 23  
 予熱帯 33  
 ゆがみ度 130

## 【Z】

Zeldovich 機構 174, 178  
 Zeldovich NO 174, 176  
 ZND モデル 65, 156  
 自発着火 4, 14  
 —限界 6, 9  
 —温度 8  
 時間平均流速 39  
 自己相関係数 129  
 蒸発潜熱 86, 95, 98  
 蒸発速度 89  
 蒸気噴射 183  
 準1次元的な解析 74  
 準相似解 153  
 準定常近似 175

—著者略歴—

おお たい かつ とも  
大 竹 一 友

1963年3月 東京工業大学大学院修士課程修了  
1971年10月 工学博士（東京工業大学）  
1972年4月 東京工業大学助教授  
1978年4月 豊橋技術科学大学教授，現在に至る  
専 門 燃焼工学

ふじ わら とし たか  
藤 原 俊 隆

1966年3月 東京大学工学系大学院博士課程修了  
工学博士（東京大学）  
1971年10月 名古屋大学助教授  
1981年7月 名古屋大学教授，現在に至る  
専 門 航空宇宙工学

燃 焼 工 学

Combustion Engineering

© Kazutomo Otake, Toshitaka Fujiwara 1985

1985年2月20日 初版第1刷発行

1997年1月10日 初版第6刷発行

著者承認  
検印省略

著 者 大 竹 一 友  
豊橋市北山町38-5  
藤 原 俊 隆  
名古屋市名東区平和ガ丘  
5-207-B105

発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛 来 辰 巳

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.  
Tokyo Japan

112 東京都文京区千石 4-46-10  
電話 (03) 3941-3131 (代) 振替 00140-8-14844

ISBN 4-339-04053-3

(清文社，愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします