



燃 焼 の 基 礎 技 術 (I)

© 1984 ISIJ

水 谷 幸 夫*

Fundamentals of Combustion Technique (I)

Yukio MIZUTANI

1. ま え が き

燃焼工学の立場から 20 世紀を区分すると、1960 年までは石炭中心の安定成長期、1960 年から 1973 年までは石油中心の急速成長期、1974 年以降は多種燃料混在の成長抑制期と見なし得る。急速成長期にはエネルギー消費が急激に伸びて、環境への影響が深刻になったために、大気汚染防除技術が重要視されるに至った。そこへ 1973 年に第一次オイルショックが起これ、省エネルギーと一次エネルギー源の分散が要請された。このとき、石炭、石油、天然ガスのシェアは、石油が他を圧していたとは言え、たがいに接近していたので、政策的な配慮もあつて、かつてない多種燃料混在の時代が出現するに至った。ただ、日本では一次エネルギーの大部分を石油に切り換えて、石炭は忘れ去られた状態になつていたので、他国に比べて燃料転換による混乱は大きかつたと言える。

このような事情から、燃焼工学に課せられた課題は「環境保全と省エネルギーという拘束条件下で多種多様な燃料を経済的に燃焼させる技術を確立すること」ということになる。「経済的に」という言葉を挿入したのは、燃料間の競争が経済性を中心に行われる状態になつてゐるためである。

ところで、燃焼技術の基礎となる燃焼学も 1960 年以降、急速に進歩し、最近ではレーザーによる火炎診断技術と大型コンピュータによる数値解析技術という有力な武器を得て、加速的な進歩をとげている。さらに 10 年ほど前から漸近解法という数学解析手法が発達し、特に基礎的な分野で有力な研究手法として注目され始めている。

このような時期に燃焼の基礎技術を整理し直し、最新の知識をもつてそれぞれの項目を検討し直すことは、有意義なことであろう。ただ、限られた紙面で、浅学の筆者がそれをよくなし得るかどうかは疑問で、問題提起に終わる可能性が高い。あらかじめご了承をお願いする。

2. 基礎技術の項目

燃焼の基礎技術とその関連技術を列挙すると、(1)エ

ネルギー情勢と燃料事情の予測技術、(2)燃料の輸送・貯蔵・取り扱い技術、(3)燃料の加工・変換技術、(4)燃料試験技術、(5)燃焼管理技術、(6)燃焼特性の測定法と予測技術、(7)気体燃料の燃焼技術、(8)液体燃料の燃焼技術、(9)固体燃料の燃焼技術、(10)特殊燃焼技術、(11)火炎診断技術、(12)炉の計装と制御技術、(13)伝熱促進技術、(14)省エネルギー技術、(15)大気汚染防除技術、(16)燃焼騒音防止技術、(17)振動燃焼防止技術、(18)事故と災害防止技術、(19)燃焼のシミュレーション技術、(20)内燃機関の燃焼・計測・大気汚染防除技術、となる。

この内、(1)～(4)は燃焼の基礎技術に含めるべきものでないかもしれないが、燃焼技術者が常時注意を払い、技術開発に反映させるべきものである。また、(20)は燃焼の巨大な特殊分野である。これらすべての項目にわたつて詳論することは紙面の都合で不可能なので、本節でごく簡単に解説もしくは問題の指摘を行い、次節以降を重要項目についてのやや詳細な解説に当てることにする。

2-1 エネルギー情勢と燃料事情の予測技術

燃焼技術の開発がエネルギー情勢と燃料事情の予測に基づいて計画・立案されるのは当然のことである。たとえば、合成燃料油やエタノールが近い将来に進出する見込みがなければ、それに対する燃焼技術を開発することは無意味なことであるし、小型炉の微粉炭燃焼が採用されるという見通しもなしに、対応技術に資金を投入することは無駄というものであろう。適切な予測技術が存在しないのが悩みではあるが、経済性が競争原理になつてゐる以上、燃焼技術者も予測の重要な一翼を担つてゐるはずである。

2-2 燃料の輸送・貯蔵・取り扱い技術

これも燃焼技術とは直接の関係はないが、間接的にかんがりの影響力を持つている。たとえば、微粉炭燃焼、COM 燃焼、水スラリー燃焼のいずれが石炭燃焼の主流になるかは、輸送・貯蔵・取り扱い技術によつて決まるし、メタノールが将来重要になるかどうか、この技術に左右される。超重質油の燃焼技術もこの技術に左右さ

昭和 58 年 12 月 29 日受付 (Received Dec. 29, 1983) (依頼技術資料)

* 大阪大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

れるところが大きい。

2.3 燃料の加工・変換技術

この技術は燃焼技術には直接関係はないものの、燃焼技術者には非常に気になる技術である。木炭、コークス、練炭、石炭乾留ガス、発生炉ガス、水性ガスといった二次燃料は古くから知られていたが、近年重要視されているのは、オイルシェールやタールサンドからの抽出合成油、石炭の液化と高・中・低カロリーガス化、天然ガスや石炭から作られるメタノール、合成天然ガス、水素である。もし石炭の液化が大規模に行われれば、芳香族炭化水素よりはるかに C/H 比の高い液体燃料を燃焼させる技術が必要となるし、石炭の低カロリーガス化に成功すれば、低カロリーガスの高負荷二段燃焼の技術が要求される。水素はエネルギーの貯蔵媒体として存在意義を有するが、航空用ガスタービンでは燃料として使われる可能性が高い。

2.4 燃料試験技術

これについては日本工業規格や若干の参考書がある。しかし、合成燃料油、超重質油、石油コークス、アルコール、バイオマス、各種低カロリーガスなどの出現により、新しい試験技術が必要になつてくると思われる。そのためか、古い参考書には絶版になつたものが多いようである。

2.5 燃焼管理技術

熱管理の一部門としての燃焼管理技術で、主として熱収支と物質収支を扱う技術である。熱力学を基礎としており、省エネルギー技術の基本となるものである。これに関しては多くの参考書^{2)~4)}があるが、熱力学の第一法則が中心で、第二法則はほとんど考慮されていない点が問題である。

2.6 燃焼特性の測定技術と予測技術

燃焼速度、消炎距離、最小点火エネルギー、可燃限界、自発着火温度と着火遅れ、爆発限界、油滴の蒸発速度と燃焼速度、固体粒子の熱分解速度と表面反応速度、ばい煙生成性等はバーナや各種燃焼機器の設計・開発に必要であり、種々の測定法が考案されている。最近では低カロリーガスや合成燃料油等、燃焼機器の計画段階では入手困難で、燃焼特性の知られていない燃料が増加しており、既知燃料の燃焼データからそれらの燃焼特性を予測する必要に迫られることが多い。また、予熱・加圧・希釈時の燃焼特性もデータが乏しく、予測に頼ることが多いようである。

2.7 気体燃料の燃焼技術

気体燃料の燃焼方法には予混合燃焼、部分予混合燃焼、拡散燃焼の3種類があるが[†]、そのいずれにも重要なのが点火技術、保炎技術、混合制御技術、火炎長さ制御技術である。ところが、点火エネルギー、燃焼速度、混合速度はすべて乱れ、せん断、スワール等の流れ条件に関係しており、保炎のメカニズムが明確でないことと

あいまつて、問題を複雑にしている。また最近では流動層燃焼、触媒燃焼、パルス燃焼、サイクロン燃焼、LPGの噴霧燃焼、気液混焼等の新しい燃焼技術も開発されている。

2.8 液体燃料の燃焼技術

液体燃料の燃焼方法にはポット燃焼、燈しん燃焼、蒸発燃焼、噴霧燃焼の4種類があるが、最近では流動層燃焼や予蒸発・予混合触媒燃焼といった新しい燃焼技術も開発されている。また、噴霧燃焼にもガス燃料噴霧式オイルバーナやエマルジョン燃焼法といったバリエーションが出現した。工業的には噴霧燃焼が多用されるが、その基本となる微粒化方法には多くの種類があり、粒度分布、平均粒径、分散度、推力、混合特性、火炎形態の異なる噴霧が得られる。噴霧は燃焼速度、燃焼機構、保炎機構、着火遅れなどがよく知られておらず、火炎長さ、伝熱特性、有害物質排出特性等の予測が困難である。

2.9 固体燃料の燃焼技術

固体燃料の燃焼方法には火格子燃焼、微粉炭燃焼、湿式燃焼(サイクロン燃焼)、COM燃焼、スラリ燃焼がある。また、都市ごみに対しては揺動火格子燃焼が、汚ていに対しては移動層燃焼や多段炉燃焼が採用されることもある。いずれの燃焼法でも蒸発燃焼、分解燃焼、表面反応が順次に、もしくは平行して生じている。石炭の燃焼に最もよく利用されるのは微粉炭燃焼であるが、噴霧燃焼以上に燃焼機構、保炎機構、燃焼速度、着火遅れが知られておらず、強い放射伝熱場を形成する大型炉の中で、経験に頼つて燃焼させているようである。小型炉ではガス燃料との混焼によつて、保炎性能や火炎長さを改善し得るといふ報告がある。固体燃料を燃焼させる燃焼機器では、排煙処理システムや燃料貯蔵・供給システムの方が炉本体より大きくなることが多い。

2.10 特殊燃焼技術

原理的に全く新しい燃焼法というものは考えられないが、最近、種々の新しい燃焼技術が研究されている。気体燃料に対しては触媒燃焼、サイクロン炉、放射熱還流炉、伝導熱還流炉、貫流熱還流炉、パルス燃焼、アーク放電かくはん反応器、プラズマジェット・バーナ等、液体燃料に対しては予蒸発・予混合触媒燃焼、流動層燃焼、エマルジョン燃焼等、固体燃料に対しては流動層燃焼、ガス化燃焼、COM燃焼、スラリ燃焼、スパウティ

† 予混合燃焼とは燃料と空気(または酸素)をあらかじめ可燃濃度の均一組成に混合し、バーナ口から噴出させて燃焼させる方式で、単位空間体積あたりの発熱率(燃焼負荷率と呼ぶ)を高くとれるから、炉の体積と長さが小さくてすむという利点がある。しかし、この火炎は伝ば性を持つので、バーナ口から上流の混合気へ逆火を起こす危険が大きい。

拡散燃焼とは燃料と空気を別々のバーナ口から噴出させるか、空気流中に燃料を噴出させて、拡散作用によつて徐々に燃焼させる方式で燃焼負荷率は小さいが、火炎の安定性がよく、操作が容易で、逆火の危険もない。多くの場合に輝炎が発生して、ふく射加熱に適する。

部分予混合燃焼は両者の中間的な性質を持つもので、燃焼に必要な空気の一部を燃料に予混合して拡散燃焼させ、火炎の安定性と操作の容易さを維持したまま、燃焼負荷率を向上させようというものである。

ドベッド燃焼, また燃料形態に無関係に異種燃料混焼, 酸素富化膜燃焼等が開発され, 注目されている. これらのいくつかに関しては別に解説してあるので, 参照していただきたい⁸⁾⁹⁾.

2.11 火炎診断技術

燃焼の研究や燃焼技術の開発を行うためには, 火炎の構造, 性質, 状態を観測しなければならない. そのための技術を火炎診断技術と呼ぶ. 観測項目には, 温度測定, 密度測定, 流速測定, ガス組成測定, 噴霧の粒度分布, 油滴流束, 油滴速度等の測定, 微粉炭に対する同様の測定, 流動層や固定層の状態や運動の測定, すずや粒状物質の測定, 流れの可視化技術, 燃焼騒音と振動燃焼の測定, 圧力波やデトネーション波の観測, 火炎ふく射の測定, 炉内熱流束の測定, 内燃機関の計測等がある. いずれも高温, 場合によつては高圧, 多相流, 超音速, 間欠または過渡現象という厳しい条件下で, 時間的, 場所的に高い解像度を要求されるので, 高度の測定技術が動員される. 火炎診断においては, 火炎や流れ場を乱さずに局所瞬間値が得られる非接触測定法が望ましく, 新しいレーザ応用計測法が開発・応用されるすう勢にある. これに関しては, やや古い筆者の解説⁷⁾や他の解説があるので, 参照されたい.

2.12 炉の計装と制御技術

炉は発熱装置と熱交換装置の組み合わせたものである. 入力燃料, 燃焼用空気, 被加熱物であるが, 出力は様々である. したがって, これらの供給率を計測し, 制御することになるが, 制御目標となる測定量は炉内温度, 温度分布(ヒートパターン), 排ガス組成(酸素や有害排出物濃度), 被加熱物温度(炉内および出口), 炉内圧力等となる. また, 内燃機関や蒸気プラントでは出力や回転数が制御目標となることもある. 被加熱物の品質, 排気清浄性, 省エネルギーの3項目を同時に満足させる制御はかなり困難である. これに関しては工業炉, 計測・制御, 省エネルギー関係の雑誌に多くの解説や論文があるので, 参照されたい⁸⁾⁹⁾.

2.13 伝熱促進技術

炉が熱交換器の一種である以上, 伝熱促進技術が重要であることは当然である. 炉は対流とふく射のいずれか, あるいは両方によつて被加熱物を加熱するので, いずれかを活発化させるか, 双方の配分を変えることが伝熱促進につながる. 低空気比燃焼をさせて炉内温度を上げる, 換言すれば炉内燃焼ガスのエクセルギーを上げることが基本となるが, ガス流速を上げることにより熱伝達率が向上する. また火炎の射出率, 温度, 形状の組み合わせを適当にすることにより, 火炎からの放射伝熱が促進される. セラミックの発達により, いつたん対流伝熱でセラミック管(かもしくは半割り管の上半分)を加熱し, セラミック管から被加熱物への放射伝熱を利用する O. R. T. (Open Radiant Tube) 法が開発された¹⁰⁾.

多孔板を高温ガスが通過するときには, 多孔板とガスとの間の熱伝達係数が非常に高いので, 多孔板の厚みが薄く(10 mm 程度)ても, ガスの温度降下は数百 °C にも達する. しかも多孔板上流端面の温度が高くなるので, 放射熱流束の性質(絶対温度の4乗に比例する)から, 上流へ向けて, 多量の熱が放射される. すなわち, 多孔板は燃焼ガスの顕熱を放射熱流束に変換して, 上流側へ還流させる変換媒体の働きをする. この原理を利用して, 炉内を金属またはセラミックの多孔板で仕切り, ここで燃焼ガスの顕熱を放射熱流束に変換することによつて, 伝熱促進を達成する技術も考察されている¹¹⁾.

2.14 省エネルギー技術

省エネルギー技術に関しては多数の参考書や解説があるが, 燃焼工学の立場からは, 省エネルギーは炉の燃焼効率と熱効率を高めることに尽きる. 燃焼効率は液体燃料や気体燃料では 100% に近くなるのが普通であるから, 熱効率を上げることが省エネルギー達成の基本となる. 炉の放熱損失と廃ガス損失を減少させることが熱効率の向上につながることはよく知られているが, 燃焼そのものがエクセルギーの大きな損失を伴う過程であつて, 空気比が増大すると, 急激にエクセルギー損失が増大することは, あまり知られていない¹²⁾. エクセルギーは環境との間の非平衡の尺度であるから, エクセルギー損失が大きいことは伝熱能力の低下が大きいことでもある.

2.15 大気汚染防除技術

燃焼により発生する有害物質には一酸化炭素, 未燃炭化水素, 窒素酸化物(NO_x), ばいじん, 各種重金属類がある. また, プラスチックなどの燃焼では塩素化合物その他の有害物質が発生する. 工業炉やボイラで問題になるのは NO_x , SO_x , ばいじんであるが, SO_x は低いおう燃料を使うか, 排煙脱硫を行うほかに低減対策はない. それに対して, NO_x とばいじんは燃焼技術によつて, かなりの程度まで低減できるので, 石炭や超重質油を燃焼させる機会の多くなつた現在, 燃焼技術者の努力が要請されている. NO_x は段階燃焼や火炎温度の抑制で, 可燃性ばいじんは高温滞留時間の延長やエマルジョン燃焼等で低減できるが, 詳細については後述する.

2.16 燃焼騒音防止技術¹³⁾¹⁴⁾

燃焼騒音は燃焼ごう音と振動音とに分けられる. 前者は燃焼反応が時間的, 空間的に不均一に生じるために発生する圧力振動で, 乱流火炎や噴霧火炎で発生する. 後者は流れ系の共鳴や種々のフィードバック現象(圧力と反応率, 圧力と燃料や空気の供給率の間のフィードバック等)に起因する可聴周波数振動燃焼により発生する騒音である. それぞれ発生原因が異なるので, 防止対策も違つたものになる. 燃焼ごう音の低下のためには, 流速を下げる, 乱れを減少させる, 拡散燃焼方式をとる, 予

混合燃焼では混合比を量論比からずらせる, といった対策がとられ, 振動音の低減対策としては, 保炎を確実にする. 共鳴周波数をずらせる, 炉の出入口に消音器や音響フィルタを設ける, フィードバック・ループに減衰要素を入れる, といった対策がとられる.

2.17 振動燃焼防止技術^{13)~15)}

原因と対策は振動音に対するものと同様であるが, 振幅が大きい場合, 高度の非線形性を持つ場合が多い. 振動燃焼の防止対策は根本的なものと, 対症療法的なものがあるが, 保炎を確実にして起振力を絶つか, 正のフィードバック・ループを破壊して, 振幅の増幅を防止する根本的対策が望ましい.

2.18 事故と災害防止技術

安全対策は燃料設備, 炉や燃焼機器, 燃焼機器周辺のものに対して行われる. 燃料設備に対する対策としては, 漏洩防止, 可燃混合気の形成防止, 点火源追放による発火防止, 事故局限化対策, 取り扱い作業の安全化, 防災体制の完備等がある. 炉や燃焼機器では可燃性ガスが内部に滞留している間に, 熱面や電気火花等がそう入されると爆発を起こすので, 吹き消えを防止もしくは監視する, 起動・停止時にパージを行う, 燃料しや断装置, ラプチャディスク, 爆発扉を設置する, といった対策をとる. 燃焼機器周辺では換気やガス検知器の設置などの対策がとられる. 炉や燃焼装置では上記安全対策を自動的に行わせるために, 火災検知器とシーケンス制御を組み込むのが普通である.

2.19 燃焼のシミュレーション技術

ある現象をそれと類似の物理法則または論理法則に従う事象に置き換えることをシミュレーションと呼ぶ. 物理法則の共通性を利用する物理モデルには, 非燃焼模型, 水流模型, ガス混合・拡散模型, 可視化模型などがあるが, 高度の発熱反応を伴う流動現象を完全にシミュレートできる物理モデルは存在しない. 一方, 論理法則の共通性を利用する論理モデルの内, 重要なものは数学模型で, 数式群で近似表現された物理法則, 化学法則, 境界条件, 初期条件等から成る. この模型を動作させる方法には数学解析法と数値解析法とがある. これに関しては後述する.

2.20 内燃機関の燃焼・計測・大気汚染防除技術

これに関しては紙面の関係で説明を省略するが, 興味のある向きは文献 16) を参照されたい.

3. 燃焼管理技術

3.1 燃料と空気の供給割合ならびに混合気濃度

燃料 1 kg (または 1 Nm³) が完全燃焼するのに要する酸素量 O_0 kg (または Nm³) のことを理論酸素量, 必要な乾き空気量 A_0 kg (または Nm³) のことを理論空気量と呼ぶ. また, このような割合に混合された燃料と空気または酸素の混合気のことを量論混合気 (または

理論混合気) と呼び, さらに, このような混合割合のことを量論混合比 (または理論混合比) と呼ぶ.

炉やバーナへの燃料と空気の供給割合や可燃混合気の濃度の表示によく使われるものに燃空比 (F/A) があるが, これは燃料と空気の供給割合, もしくは混合気中の燃料と空気の割合を質量比 (kg/kg) または体積比 (m³/m³) で表示したものである. この逆数である空燃比 (A/F) もよく使われる. 量論混合比を燃空比もしくは空燃比で表現すると量論燃空比 (F/A)_{st} と量論空燃比 (A/F)_{st} となり, 前者は $1/A_0$ に, 後者は A_0 に等しい.

燃空比と量論燃空比の比 $\phi = (F/A)/(F/A)_{st}$ のことを当量比と呼び, 過濃混合気 (量論混合気より燃料過剰の混合気) では 1 より大, 希薄混合気では 1 より小, また量論混合気で 1 となる. さらに, 空燃比と量論空燃比の比 $\alpha = (A/F)/(A/F)_{st}$ のことを空気比 (または空気過剰率) と呼び, 当量比 ϕ の逆数に等しい. 空気比 α が 2 であれば, 燃料の完全燃焼に必要なとされる空気量 A_0 の 2 倍の空気が供給されていることになる.

燃料組成から発熱量, 理論酸素量と理論空気量, 燃焼ガスの組成と発生量, 最大炭酸ガス濃度等を計算したり, 煙道ガスの分析結果を用いて空気比や燃焼ガスの発生量を計算することは燃焼管理技術の中核をなすものであるが, 紙面の関係で省略する. 方法の詳細については文献 1)~3), 17), 18) に解説されているので, 興味のある向きは, そのいずれかを参照されたい.

3.2 燃焼ガスの温度と組成

燃焼過程で炉壁への熱伝達やふく射による熱損失がないときの燃焼ガスの最終温度を断熱燃焼ガス温度と呼ぶ. この場合, どのような燃焼反応が起こるかによつて最終温度が変わってくるが, 完全燃焼によつて CO₂, H₂O (g), SO₂ が生成されるとき最終温度を断熱理論燃焼ガス温度と呼ぶ. 実際には完全燃焼は起こらず, せいぜい化学平衡状態までしか反応が進まないが, そのときの最終温度を断熱平衡燃焼ガス温度と呼ぶ.

完全燃焼ガスは O₂, N₂, CO₂, H₂O (g), SO₂ の 5 成分より成るが, C, H, O, N, S の 5 元素の保存則から各成分濃度は簡単に計算できるので, 断熱理論燃焼ガス温度はエンタルピー・バランス法, もしくは平均定圧比熱法によつて容易に計算できる¹⁷⁾¹⁸⁾. しかし, 化学平衡においては, C-H-O-N 系においてさえ, 最低 CO, CO₂, O₂, H₂, H₂O, OH, H, O, NO, N₂ の 10 成分が共存し, C, H, O, N の 4 元素の保存則以外に, 最低 6 個の化学平衡を考慮しないと, 燃焼ガスの組成が決まらない. 平衡点は燃焼ガス温度によつて移動するので, 試行錯誤法で燃焼ガスの温度と組成を計算しなければならないが, 文献 17) にはフォートラン・プログラムが与えられている.

一例として, メタン-空気混合気 (空気比 α , 未燃混合気温度 $T_u = 298$ K, 圧力 $p = 1$ atm) の断熱理論燃焼

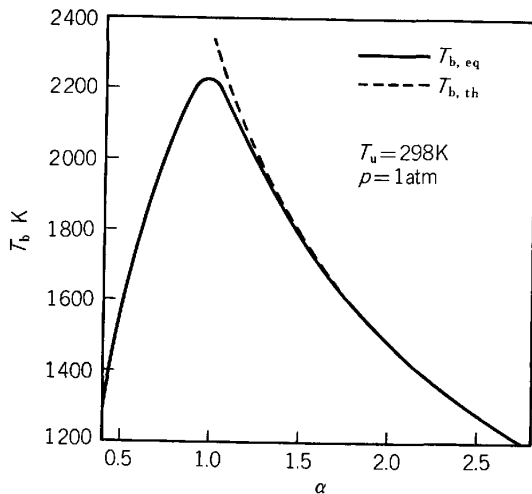


Fig. 1. $T_{b,th}$ and $T_{b,eq}$ for methane-air mixtures.

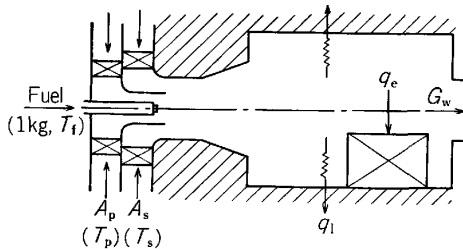


Fig. 2. Heat balance in a furnace.

ガス温度 $T_{b,th}$ と断熱平衡燃焼ガス温度 $T_{b,eq}$ の計算値を図 1 に示しておく。2000 K までは熱解離の影響は小さく、 $T_{b,th}$ と $T_{b,eq}$ の差は 20 K 止まりである。したがって、ガス組成を問題にしないのならば、化学平衡計算は不要である。

3.3 炉の熱勘定、燃焼効率ならびに熱効率

簡単のために、水蒸気の吹き込み、被加熱物の反応や蒸発のない図 2 のような場合を考える。炉内に燃料 (低発熱量 H_1) 1 kg または 1 Nm^3 が温度 T_f で供給される間に、一次空気 A_p と二次空気 A_s が温度 T_p と T_s で供給され、燃焼効率 η_c で燃焼したとする。この熱量は被加熱物の加熱に使われる有効熱 q_e 、炉からの放熱損失 q_1 (燃渣損失を含む)、廃ガスの持ち出し顕熱 $G_w \bar{c}_p (T_{ex} - T_o)$ に振り分けられる。したがって、つぎの熱バランスが成立する。

$$\eta_c H_1 + G_w \Delta h_u = q_e + q_1 + G_w \bar{c}_p (T_{ex} - T_o) \dots (1)$$

ただし、 G_w は燃料 1 kg (Nm^3) あたりの湿り燃焼ガス量、 $G_w \Delta h_u$ は燃料、一次・二次空気の持ち込み顕熱、 \bar{c}_p と T_{ex} は廃ガスの平均定圧比熱と炉出口温度、 T_o は基準温度である。燃料、一次・二次空気の平均定圧比熱を \bar{c}_{pf} , \bar{c}_{pp} , \bar{c}_{ps} 、吹き込み温度を T_f , T_p , T_s とすると、 $G_w \Delta h_u$ は

$$G_w \Delta h_u = \bar{c}_{pf} (T_f - T_o) + \bar{c}_{pp} (T_p - T_o) A_p + \bar{c}_{ps} (T_s - T_o) A_s \dots (2)$$

式 (1) を書き直すと

$$H_1 + G_w \Delta h_u = (1 - \eta_c) H_1 + q_e + q_1 + G_w \bar{c}_p (T_{ex} - T_o) \dots (3)$$

すなわち、炉に供給された保有熱 (左辺) は不完全燃焼損失、有効熱、放熱損失、廃ガスの持ち出し顕熱 (右辺) に振り分けられる。ただし、廃熱回収を行う炉では、廃ガスの持ち出し顕熱の一部は $G_w \Delta h_u$ の一部として回収される。

炉の熱効率 η_t は炉の伝熱能力の指標であつて、

$$\eta_t = \frac{q_e}{\eta_c H_1 + G_w \Delta h_u} = 1 - \frac{q_1 + G_w \bar{c}_p (T_{ex} - T_o)}{\eta_c H_1 + G_w \Delta h_u} \dots (4)$$

と定義される。炉の総合効率 η_T を q_e/H_1 と定義すると、

$$\eta_T = q_e/H_1 = \eta_t (\eta_c + G_w \Delta h_u/H_1) \dots (5)$$

すなわち、 η_T はほぼ $\eta_c \cdot \eta_t$ に比例して増加する。

燃焼効率 η_c は燃焼過程で実際に発生した熱量と、完全燃焼によつて発生するはずの熱量の比と定義される。乾き燃焼ガスの発生量を $V_d \text{ Nm}^3/\text{kg fuel}$ 、乾き燃焼ガス中の各成分の体積分率を (CO_2) , (CO) , (H_2) , (C_2H_4) 、また炭素 (すすと残炭) の含有量を $(\text{C}) \text{ kg}/\text{Nm}^3$ 、燃渣中の炭素を $\Delta c \text{ kg}/\text{kg fuel}$ とすると、

$$\eta_c = 1 - \Delta H_1/H_1 \dots (6)$$

ここで、低級炭化水素をエチレン (C_2H_4) で代表させると、

$$\Delta H_1 = V_d [12.64 (\text{CO}) + 10.80 (\text{H}_2) + 59.08 (\text{C}_2\text{H}_4) + 34.1 (\text{C})] + 34.1 \Delta c \text{ MJ}/\text{kg fuel} \dots (7)$$

$$V_d = 1.866 (c - \Delta c) / [(\text{CO}_2) + (\text{CO}) + 2 (\text{C}_2\text{H}_4)] \text{ Nm}^3/\text{kg fuel} \dots (8)$$

ただし、 c は燃料中の炭素の質量分率である。

炉の熱勘定は式 (3) で表現されているが、熱勘定表や熱勘定図を用いる通常の方法は文献 2)~4), 12), 17), 18) に解説されている。その場合、熱勘定の基本は流動系に対する熱力学の第一法則にあることを心得て、不注意な誤りを犯さないように注意しなければならない。

3.4 炉のエクセルギー勘定

熱勘定が熱力学の第一法則に基づいて熱の損失量を追求したのに対し、エクセルギー勘定は熱力学の第二法則に基づいて仕事能力の損失量を追求する。エクセルギーは「熱力学的系が環境と平衡するまでに発生し得る最大仕事量」と定義される。したがって、動力発生用のボイラや熱機関で有効なことは当然であるが、エクセルギーが環境との非平衡度を表す尺度であり、非平衡度が大きい系 (この場合、燃焼ガス) ほど加熱能力も高いことを考えると、エクセルギー勘定はすべての燃焼機器に対して有効であることが分かる。

たとえば、室内暖房をするのに、熱効率 45% のディーゼルエンジンで駆動される成績係数 400% のヒートポンプを用い、さらにエンジンの排気熱や冷却水熱もす

べて暖房に利用したとすると、総合熱効率は $0.45 \times 400 + (100 - 45) = 245\%$ となる。それに対し、直接燃焼式暖房機の熱効率は 100% 止まりである。このようなことが起こるのは低温加熱に燃焼を利用する際のエクセルギー効率がディーゼルエンジンとヒートポンプのエクセルギー効率の積よりはるかに低いためである。また、低空気比燃焼の有利なことも、エクセルギー勘定を行つてみれば明りようである。

エクセルギーの計算方法やエクセルギー勘定の詳細については文献 12) や 19) に記述されているので、概略を述べるにとどめる。圧力 p 、比体積 v 、温度 T 、比エンタルピ h 、比エントロピ s なる状態にある熱力学的流動系が環境と平衡したときの状態を p_0, v_0, T_0, h_0, s_0 とすると、比エクセルギー e は次式で与えられる。

$$e = h - h_0 - T_0(s - s_0) \dots\dots\dots (9)$$

等温・等圧下で完全燃焼が行われた場合、未燃混合気と燃焼ガスのエンタルピ差は単位燃料量あたり H_1 であるから、燃焼によつて失われるエクセルギー Δe_r は

$$\Delta e_r = H_1 + T_0 \Delta s_r \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 Δs_r は単位燃料量あたりの燃焼ガスと未燃混合気のエンタルピ差で、反応エンタルピと呼ばれる。一般に $H_1 \gg T_0 \Delta s_r$ なので、 $\Delta e_r \approx H_1$ 。燃料と酸素の混合エクセルギーや燃焼ガスの大気への拡散エクセルギーを無視すると、燃料の比エクセルギー e_f は近似的に $\Delta e_r (\approx H_1)$ と見なしてよい。すなわち、等温燃焼では燃料のエクセルギーはすべて失われ、エクセルギー効率は零となる。

一方、断熱燃焼過程ではエンタルピは保存されるから、単位燃料量あたりのエクセルギー損失 Δe_c は

$$\Delta e_c = T_0 \Delta s_c \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 Δs_c は単位燃料量あたりの燃焼ガスと未燃混合気のエンタルピ差で、混合ガスのエンタルピの式と熱化学的性質表²⁰⁾を用いて計算できる。たとえば常温・常圧のメタン-空気量論混合気の断熱燃焼では $\Delta e_c = 298 \times 0.03392 = 10.11 \text{ MJ/Nm}^3 \text{ CH}_4$ となる。メタンの低発熱量 H_1 は 35.83 MJ/Nm^3 であるから、量論断熱燃焼でさえ $100\Delta e_c/e_f \approx 100\Delta e_c/H_1 = 100 \times 10.11/35.83 = 28.2\%$

のエクセルギー損失が生じることが分かる。空気比が増加するにつれてエクセルギー損失は増加し、ストーブによる室内空気の加熱では、エクセルギー損失が 100% に近づく。

4. 燃焼特性の測定技術と予測技術

4.1 燃焼速度の測定法と予測法

燃焼速度は火炎の単位面積に単位時間あたり流入する未燃混合気の体積と定義される。この定義は火炎と未燃混合気の相対速度の火炎面法線方向分速度という、いま一つの定義と等価である。これに対して、静止空間に相対的な火炎の移動速度を火炎(伝ば)速度と呼ぶが、これは火炎形状やガスの流動状態によつて種々に変化する。

層流予混合火炎は燃料の種類と混合気の組成、温度、圧力に応じた固有の燃焼速度を持ち、これを層流燃焼速度と呼ぶ。それに対して乱流予混合火炎は層流火炎よりもはるかに高い燃焼速度を持ち、これを乱流燃焼速度と呼ぶ。乱流燃焼速度は燃料の種類や混合気の組成、温度、圧力だけではなく、流れ場の状態、特に乱れ状態の関数でもある。

層流燃焼速度の測定法は種々考案されているが、これに関しては辻の解説²¹⁾や多くの参考書¹⁷⁾があるので、概要と注意事項を述べるにとどめる。よく利用される測定法としては、(a) スロットバーナ法、(b) 平面火炎バーナ法、(c) ブンゼンバーナ法、(d) シャボン玉法、(e) 双火炎核法、(f) 球形容器法がある(図 3)。(a) は縦横比 3 以上の長方形ノズルから混合気を吹き出させてテント状の火炎を作るもので、精度が高い割に手軽で、一般的な方法である。(b) は多孔質板の表面から混合気を吹き出させて、表面と平行に平面火炎を作り、流速と燃焼速度をバランスさせて燃焼速度を決定するので、ごく低い燃焼速度以外は測定が困難である。(c) は手軽で、いかなる燃焼速度の混合気にも応用できるが、 $15 \sim 20\%$ の誤差は覚悟しなければならない。(d) は混合気でふくらませたシャボン玉の中心で点火し、流し写真で火炎の広がり速度を観測して燃焼速度を決定す

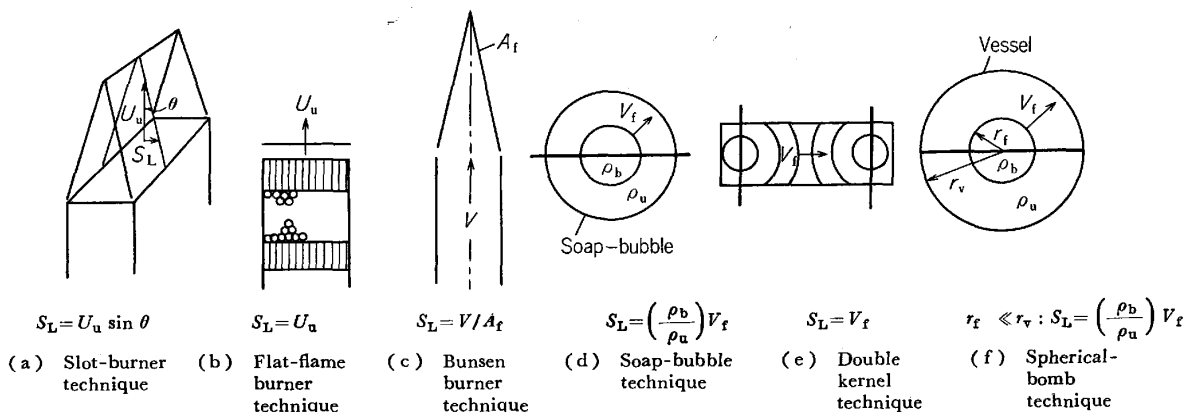


Fig. 3. Techniques for determining laminar burning velocity.

るもので、少量の混合気ですむ利点がある。(e)は2点で混合気に点火し、両方の火炎が衝突する寸前の相対速度から燃焼速度を決定する方法である。(f)は球形容器の中心で点火し、火炎球の成長速度から燃焼速度を決定するもので、種々の温度、圧力下での燃焼速度を決定するのに適している。これら以外にも種々の方法があるが、省略する。

層流火炎の熱理論¹⁷⁾によると、一つの燃料に対する層流燃焼速度は次式に従って変化する。

$$S_L = \sqrt{\lambda / c_p M} p^{n/2-1} \exp(-E/2RT_b) \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 λ , c_p , M は未燃混合気の熱伝導率、定圧比熱、平均分子量、 p は圧力、 n と E は総括燃焼反応の次数と活性化エネルギー、 R は一般ガス定数、 T_b は断熱燃焼ガス温度である。炭化水素火炎では $n=2$, $E/R=(1\sim3)\times 10^4$ K であるから、式(12)から p や T_b の影響が予測可能なように見える。しかし、 n や E は空気比等によつて変化するので、問題はそれほど簡単ではない。また、CO 炎や H_2 炎のように拡散支配の火炎には、式(12)は当てはまらない。ただ、式(12)から p の影響は小さく、 T_b の影響が大きいことは予想でき、これは経験と一致する。

混合気の温度 T_b と圧力 p が S_L に及ぼす影響に関しては飯島と竹野の研究²²⁾や辻の解説²¹⁾がある。それによると、

$$S_L \propto (A + BT_b^\alpha) p^\beta \dots\dots\dots (13)$$

で、 $\alpha=1.5\sim 3$, $\beta=-0.5\sim 0.25$, β は当量比の関数である。

低カロリー燃料ガスのように、数種類の可燃成分と不活性成分から成る燃料ガスの燃焼速度に関しては、燃焼機器メーカーで測定や経験式の作成が行われている²³⁾。しかし、一般性のある経験式の作成には成功していない。

乱流燃焼速度 S_T の測定は (a) プンゼンバーナ法、(b) 筒内逆円すい火炎法、(c) 移動火炎球法、のいずれかの方法で行われる。しかし、乱流火炎は有限距離では緩和せず、下流にゆくに従つて S_T が変化するため、 S_T の普遍的データが存在すること自体に疑問が持たれている。測定例に関しては辻の解説²⁴⁾や筆者の記述¹⁷⁾があるので、参照されたい。

ANDREWS らは広範囲の混合気と流れ条件に対して、つぎの経験式が当てはまると言っている(筆者¹⁷⁾が変更)。

$$S_T/S_L = 0.048 R_T \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 R_T はマイクロスケール l_T に対する乱流レイノルズ数で、

$$R_T = l_T \sqrt{u^2} / \nu \dots\dots\dots (15)$$

で与えられる。 $\sqrt{u^2}$ は乱れの絶対強さ、 ν は運動粘性係数である。式(14)と実測データとの比較を図4に示す。これ以外に BOLLINGER と WILLIAMS の経験式や BALLAL と LEFEBVRE の経験式があるが、文献 24) や 17) を参照していただきたい。

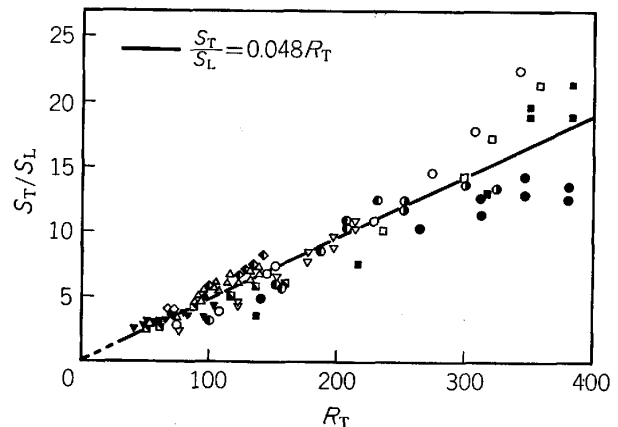


Fig. 4. Turbulent burning velocity.

4.2 可燃限界の測定法と予測法

燃料ガスの可燃限界濃度は、上端閉鎖の内径 50 mm、長さ 1500 mm の鉛直管に混合気を詰め、下端から点火することにより測定される²⁵⁾。その際、火炎が上端に達する確率が 50% のときの濃度をもつて、可燃限界濃度とする。可燃限界濃度は混合気の温度と圧力の関数であつて、パラフィン系炭化水素と空気混合気は約 1300 °C で希薄可燃限界濃度が零となる。工業上重要なのは、混合気の温度、圧力を変化させた場合、空気中の酸素分率を変えた場合、2 種以上の燃料ガスを混合した場合、燃料ガスを不活性ガスで希釈した場合、ミストや微粒子が混在する場合の可燃限界であろう。このような場合の可燃限界に関しては、合衆国鉱山局で古くから詳細な研究が行われている²⁶⁾²⁷⁾。大まかには、可燃限界における断熱燃焼ガス温度が一定との仮定を用いて、条件を変化させた場合の可燃限界が推定できるが、あまり正確ではない。入手しやすい文献では、LEWIS と von ELBE の参考書²⁸⁾の付録 B にデータが記載されている。

可燃限界とは別に、最近、火炎が存続し得る最低温度と定義される燃焼限界温度が注目され、スイスロール燃焼器や対向流拡散火炎を用いて測定が行われている²⁹⁾³⁰⁾。それによると、メタン-空気火炎は拡散火炎たと予混合火炎たとを問わず、火炎温度が 1400 K ~ 1480 K を切ると、層流火炎が存続し得なくなる。しかも、空気中の窒素を CO_2 や Ar で置き換えたり、燃料を窒素以外の不活性ガスで希釈すると、その限界温度が若干変化する。これは希薄混合気や低カロリー燃料ガスを燃焼させるときのよい目安となり、燃焼限界温度と呼ばれる。

注意すべきことは、サイクロン炉や放射熱還元炉等の特殊な炉では、希薄可燃限界濃度以下の超希薄混合気や燃焼限界温度以下の低温火炎でも、安定に燃焼が行われるので、これらが絶対的な火炎吹き消え限界を与えるものではないことである。

4.3 自発着火温度と着火遅れの測定法

自発着火温度と着火遅れとは密接な関係がある。完全に断熱された混合気や固体・液体燃料では、十分な着火

遅れさえ見込めば、いかなる初期温度からでも自発着火を起すことが知られており、石炭の自然発火がその一例である。断熱が不十分であると、それ以下では絶対に自発着火を起こさない限界温度が出現し、それが厳密な意味で自発着火温度と呼べるものである。しかし、その温度は系の放熱損失によつて変化するし、許される着火遅れによつても変化する¹⁷⁾³²⁾。したがつて、普通はある系に対する初期温度と着火遅れの関係が観測され、着火遅れの許容値が与えられると、それに対する自発着火温度が決まる。

一般に、着火遅れデータの整理には、

$$\tau = A \exp(E/RT_0) \dots\dots\dots (16)$$

なる経験式が使われることが多い、ただし、 T_0 は初期温度で、 A と E の値は温度、圧力、測定方法によつて大きく変化する。着火遅れの測定法としては、(1)予熱した容器に混合気を急速に導入する方法、(2)急速圧縮燃焼装置を利用する方法、(3)衝撃波管を利用する方法、(4)電気炉中に燃料を噴射する方法、(5)高温空気流もしくは燃焼ガス流中に燃料を噴射する方法、等があるが³¹⁾³²⁾、測定方法によつて結果が大きく異なるので、適用対象に類似した測定方法を採用すべきである。

油滴の着火遅れの測定には、電気炉に懸垂滴をすばやくそう入する方法³³⁾、電気炉中に油滴を落下させる方法、衝撃波管を利用する方法があるが、最初の方法が多用され、信頼できるデータが得られるようである。特に温度と圧力を広範囲に変え得る点が良い。

噴霧の着火遅れの測定には前述の(2)~(5)の方法が用いられるが、微粒化や周囲ガスの誘引・混合等の現象が関係して、複雑である。(4)の電気炉中に噴射する方法³⁴⁾が温度や圧力を広範囲に変えられ、データの信頼性も高く、炉やバーナへの応用という点では(5)の高温気流中に噴射する方法³⁵⁾も有用であろう。

固体燃料の着火温度測定には示差熱分析式着火温度測定装置等が、着火遅れ測定にはふく射着火遅れ測定装置等が用いられるが²⁾、多分に便宜的な方法であり、データの解釈が困難である。微粉炭の着火遅れの測定には、電気炉で加熱された鉛直石英管の中に微粉炭を落下させるという方法が採用される²⁾。固体燃料の着火には放射伝熱が大きな影響を持つので、その影響を考慮した着火遅れデータが望まれる。

4.4 その他の燃焼特性の測定法

消炎距離 d は平板消炎距離 $d_{||}$ と円管消炎距離 d_{ϕ} に分けられ、前者はフランジ付き点火電極法²⁸⁾で、後者は細管バーナ逆火法、または細管火炎通過法で測定される。それに対して、最小点火エネルギー E_{min} はその条件で点火できる最小の火花エネルギーと定義され、コンデンサからの自発放電火花を用いて測定される³²⁾。しかし、電極の間隙と形状、流速、乱れ、火花の容量成分と

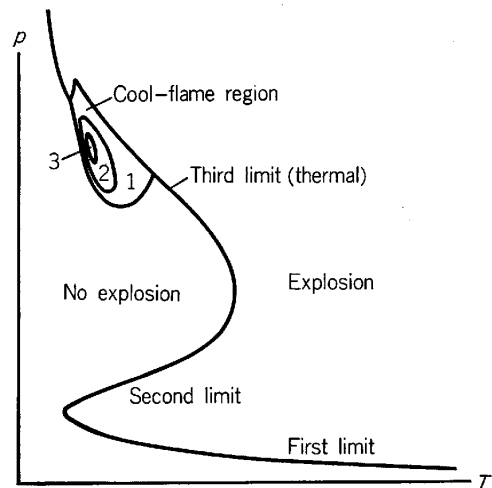


Fig. 5. Explosion limits for hydrocarbons.

誘導成分との割合によつて変化するので、注意を要する。圧力 p との間には、

$$E_{min} \propto d_{||}^2 \propto d_{\phi}^2 \propto p^{-2} \dots\dots\dots (17)$$

なる関係がある。通常は E_{min} より 2 桁高いエネルギーを与えるか、断続火花を用いないと、点火が不確実になる。

爆発限界は 3.3 節で述べた自発着火温度と着火遅れの測定法の内、(1)~(3)の方法で測定される³²⁾。炭火水素-酸素-窒素系の爆発限界の一例を図 5 に示す。第一・第二限界は連鎖分枝爆発に対応し、通常燃焼とは異なるものである。第三限界は熱爆発に対応し、常圧以上ではこの限界のみが観察される。冷炎はその名の通り、温度上昇のほとんどない火炎で、図中の数字は混合気中を冷炎が走る回数である。

油滴の蒸発速度と燃焼速度は着火遅れと同様、懸垂滴もしくは自由落下滴を電気炉に入れて、高速度顕微鏡撮影法で観測される。強制対流や自然対流の影響が大きい、対流のない場合のデータは無重力実験によらなければならない。また、2個以上の油滴を適当に配列して、隣接油滴の影響を調べた実験もある。これに関しては HEDLEY ら³⁶⁾や WILLIAMS³⁷⁾の展望を参照されたい。油滴の蒸発や燃焼においては、直径 d の 2 乗が時間とともに直線的に減少する。そこで、蒸発中もしくは燃焼中の $-d(d^2)/dt$ の値を C_e 、 C_b とおいて、油滴の蒸発速度定数、燃焼速度定数と呼ぶ。 C_e や C_b の値はかなり正確に予測でき¹⁷⁾、むしろ種々の因子の影響を見積る方が困難なことが多い³⁶⁾³⁷⁾。なお、重質油はアミーバのような運動をしながら燃焼し、途中で爆発・飛散したり、最後に残炭を残したりするので、実験、予測ともに困難である。

固体粒子の熱分解速度と表面反応速度は油滴と同様の方法で測定されるようであるが、これに関しては FIELD らの著書³⁸⁾を参照されたい。微粉炭燃焼においては、粒子の温度上昇率が $100^\circ\text{C}/\text{ms}$ 程度、強いふく射伝熱を

伴う高温場で燃焼が行われるが¹⁹⁾、これに対応するデータをとることは極度に困難である。

ばい煙生成性は、気体燃料では拡散火炎において、ばい煙の生成なく燃焼する最大流速か最大火炎長さによつて、また、液体燃料では燈しん火炎でばい煙の生成なく燃焼する最大火炎長さによつて比較される。

文 献

- 1) 新版燃料便覧(増補)(燃料協会編)(1977)[コロナ社]
- 2) 燃料と燃焼(田中楠弥太編)(1962)[昭晃堂]
- 3) 燃焼工学(吉田高年編)(1971)[共立出版]
- 4) 設楽正雄: エネルギー概論(増補改訂版)(1980)[オーム社]
- 5) 水谷幸夫: 機械の研究, 31(1979), p. 193
- 6) 水谷幸夫: 機械の研究, 33(1981), p. 13
- 7) 水谷幸夫: 機械の研究, 30(1978), p. 1261
- 8) 徳永勝沼: 工業加熱, 19(1982)4, p. 75; 19(1982)5, p. 48
- 9) デジタルシステムによるアドバンスコントロール実例, 第2巻: 計装, 26(1983)3
- 10) 大槻直樹, 笹治 峻, 松元義文, 松川敏昭, 藤岡政人, 井上展夫, 保科安男, 後藤耕一郎: JFRC 昭和 58 年度年次大会前刷(昭和 58 年 11 月)
- 11) 陳内秀信, 佐藤健二郎, 中村雅知, 金藤紘一郎: 同上
- 12) 熱管理士教本(石谷清幹編)(1977), [共立出版]
- 13) 日本機械学会: RC-51 燃焼装置の合理的設計手法研究分科会研究成果報告書(1982), p. 280
- 14) 日本機械学会: RC-SC40 燃焼装置の騒音・振動研究分科会研究成果報告書(1979)
- 15) A. A. PUTNUM: Combustion-Driven Oscillations in Industry(1971)[Elsevier]
- 16) 自動車エンジンの排気浄化—燃料・燃焼・触媒—文部省特定研究「自動車の排気浄化に関する研究」(成果編集委員会編)(1980)
- 17) 水谷幸夫: 燃焼工学(1977), [森北出版]
- 18) エネルギー管理技術(熱管理編)(省エネルギーセンター編)(1980)[省エネルギーセンター]
- 19) 水谷幸夫: 日本機械学会関西支部第 37 回特別講義会テキスト(1980), p. 13
- 20) 水谷幸夫: 文献 17) の付録 B, p. 215
- 21) 辻 廣: 機械の研究, 28(1976), p. 1019, p. 1143
- 22) 飯島敏雄, 竹野忠夫: 第 21 回燃焼シンポジウム前刷集(1983), p. 143
- 23) 福田脩三, 杉山峻一, 阿部正広: JFRC 昭和 58 年度年次大会前刷集(昭和 58 年 11 月)
- 24) 辻 廣: 機械の研究, 29(1977), p. 430, p. 563
- 25) 辻 廣: 機械の研究, 28(1976), p. 907
- 26) H. F. COWARD and G. W. JONES: Bureau of Mines, Bulletin 503(1952)
- 27) M. G. ZABETAKIS: Bureau of Mines, Bulletin 627(1965)
- 28) B. LEWIS and G. von ELBE: Combustion, Flames and Explosions of Gases, 2nd Ed. (1961), p. 691[Academic Press]
- 29) S. A. LLOYD and F. J. WEINBERG: Nature, 257(1975), p. 367
- 30) H. TSUJI: Prog. Energy Combust. Sci., 8(1982), p. 93
- 31) 機械工学便覧(改訂第 6 版)(日本機械学会編)(1976), p. 12-29 [日本機械学会]
- 32) R. A. ストリーロ: 基礎燃焼学(1973), p. 160 [森北出版]
- 33) 角田敏一, 廣安博之, 大矢秀夫: 日本機械学会論文集, 41(1975), p. 1746
- 34) 居倉伸次, 角田敏一, 廣安博之: 日本機械学会論文集, 41(1975), p. 1559
- 35) B. P. MULLINS: Fuel, 32(1953), p. 211~p. 481(7編)
- 36) A. B. HEDLEY, A. S. M. NURUZZAMAN, and G. F. MARTIN: J. Inst. Fuel, 44(1971), p. 38
- 37) A. WILLIAMS: Combust. Flame, 21(1973), p. 1
- 38) M. A. FIELD, D. W. GILL, B. B. MORGAN, and P. G. W. HAWKSLEY: Combustion of Pulverised Coal(1967)[The British Coal Utilisation Research Association]

「燃焼の基礎技術(II)」は、「鉄と鋼」第70年第8号(1984年6月号)に掲載予定、目次は以下のとおりです。

5. 気体燃料の燃焼技術
6. 液体燃料の燃焼技術
7. 固体燃料の燃焼技術
8. 大気汚染防除技術
9. 燃焼のシミュレーション技術