

燃 焼 と 大 気 汚 染

水 谷 幸 夫*

毎日われわれが消費する膨大なエネルギーの大部分は化石燃料の燃焼によって発生されている。人類の文明は火の使用をもって始まり、18世紀末の産業革命を経て、あと30年で石油を、200年で石炭を枯渇させかねない勢いであるが、燃焼に関するわれわれの知識は意外に貧弱である。読者は自動車エンジンの速度を毎分600回転から6000回転まで変えても、点火栓から伝ばし始めた火炎が、ほぼ一定のクランク角の間に燃焼室全体に広がることを不思議に思われたことはなかるうか。これは回転速度に比例した乱れが発生し、火炎の伝ば速度が乱れによって加速されるからであるが、この乱流中での燃焼というものが難問中の難問である。

われわれが日常、燃料として利用している炭化水素もしくは C-H-O-N-S 系燃料の燃焼反応は無数の素反応から構成されており、反応機構自体、まだ十分に解明されていないが、かりに



なる素反応の存在が見つかり、順反応の速度定数 k_f が次式の形で与えられたとしよう。

$$k_f = FT^N \exp(-T_a/T) \quad \dots\dots (2)$$

ただし、 F と N は定数、 T_a は活性化温度、 T は絶対温度である。すると、式(1)の反応の順反応速度は次式で与えられる¹⁾。

$$R_f = FT^{N-2} n_1 n_2 \left(\frac{p}{Rn_m} \right)^2 \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) \quad (3)$$

ここで、 n_1 、 n_2 は単位質量の混合気に含まれる A_1 、 A_2 のモル数、 p は圧力、 R は一般ガス定数、 n_m は混合気の平均分子量の逆数である。

* 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

乱流を固定点で観測すると、温度やモル濃度が平均値 ($\bar{\quad}$ で表示) を中心に脈動しているので、それらを平均値と変動成分 ($'$ で表示) の和として表現すると、

$$R_f = F(\bar{T} + T')^{N-2} (\bar{n}_1 + n_1') (\bar{n}_2 + n_2') \left(\frac{p}{Rn_m} \right)^2 \exp\left(-\frac{T_a}{\bar{T} + T'}\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって、反応速度の時間平均値 \bar{R}_f を計算するためには、 \bar{T}^2 、 \bar{T}^3 、 $\bar{n}_1' T'$ 、 $\bar{n}_2' T'$ 、 $\bar{n}_1' T'^2$ 、 $\bar{n}_2' T'^2$ 、 $\bar{n}_1' n_2'$ 、 $\bar{n}_1' n_2' T'$ など、多数の相関項を計算しなければならない。しかも、これらの相関項はうずの生成・消滅・合体・分裂、うず内部での流動・混合・拡散・熱伝導、それに式(1)以外の素反応の知識がなければ計算不可能である。素反応の数がきわめて多い上に、うずの運動を数量的に表現する方法も知られていない現状では、すべての相関項を数学的に厳密に表現することは不可能で、若干の仮説に基づいてモデル化を行うことになる。

モデル化の方法としては、現在、つぎの4種類が試みられている。

(1) \bar{R}_f が \bar{T} 、 \bar{n}_1 、 \bar{n}_2 だけで表現できると仮定して、やや複雑な有限速度反応系を考える方法²⁾³⁾。

(2) 反応速度を無限大(常に化学平衡が成立)と仮定して、乱流混合や濃度脈動のモデル化を行う方法⁴⁾。

(3) 有限速度の化学反応と乱流混合を同時に考慮する方法^{5~7)}。

(4) 燃焼器をある混合特性を持った反応器、またはそれらの組合せと考える方法⁸⁾。一見、(3)の方法が最も正確なように見えるが、使用する仮説やモデル化の制約から、かならずしもそうはならない。

このようにして作成された乱流反応モデルは燃焼器や炉内の流れの数学モデルと組合されることになる。流れは一般に質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則を考慮してモデル化されるが、前述のように、乱流では流速、密度、ガス組成、温度などが時間的に脈動するので、基礎式の時間平均値をとると多数の相関項が出現し、それらをモデル化する段階で経験項が入ってくるクロージャの問題が生じる。また、これら相関項のモデル、反応モデル、放射モデルを作成する際に人為的に導入された変数も数学モデル化して、偏微分方程式で表現されるのが普通である(乱れの多方程式モデル)¹⁰⁾。

よく知られているように、数学モデルが偏微分方程式群で表現される場合、方程式が放物形であると前進法でストレートに数値解が得られるが、だ円形であると緩和法など、試行錯誤的な方法によらないと解が得られなくなり、発散の危険が増す。残念なことに、燃焼器は燃焼ガスを上流に環流させることによって火炎の安定をはかることが多いので、ほとんどの場合、方程式はだ円形になる。しかも、場所による密度、温度、輸送係数の変化が大きいので、数値解を収束させるのに相等の工夫が必要になる。

最近、大気汚染が社会問題化してきたが、燃焼に起因する大気汚染の低減対策としては、燃料の前処理を行う方法、燃焼過程で有害物質の生成を抑制する方法、燃焼排ガスから吸収もしくは反応によって有害物質を除去する方法、の3つがある。この内第2の方法をとる場合、燃焼反応と流れの数学モデルに有害物質の生成モデルを組合せて、総合モデルを作っておくことが望ましい。燃焼に起因する有害物質としては、一酸化炭素、未燃炭化水素、窒素酸化物、いおう酸化物、ばいじんなどがあるが、いおう酸化物を除いては、その生成機構も十分に理解されていないのが現状である。

たとえば、窒素酸化物(N_2O , NO , NO_2 など)は一酸化炭素などに比べると生成反応が単純だと言われているが、それでも低温か高温か、酸素の過不足、窒素が燃料に含まれたものが空気中のものか、炭素が共存するかどうか、などの条件によって、いちいち反応機構が異な

っており、十分解明されていない。しかも、乱流中では温度や酸素濃度が脈動するので、何種類もの反応機構が共存することになる。

以上のようなことを考え合わせると、炉や燃焼器の中での燃焼現象や有害物質の発生量を予測しようとする努力は全く無駄なことに思えるであろう。事実、製品や技術が先にあって、研究の方は後を追いかけているのが現状である。しかし、最近ではレーザ流速計、レーザラマン散乱法、質量分析計、分光分析法、遅れ補償回路付熱電対など、燃焼に適した測定方法が開発されており、一方では乱流理論の急速な発展も見られるので、希望がないわけではない。現在、この分野では大勢の研究者が集中的に努力を傾けているので、1つ2つは実用に供しうる数学モデルの出現も期待される。

少し悲観的なことを書きすぎたきらいがあるので、筆者の研究室で成功した事例を1つ紹介しておきたい。それはディーゼルエンジンなどで重要な噴霧の着火遅れに関するものである。

従来、噴霧の着火遅れは高温に加熱した空気流または容器中にノズルから燃料を噴射するという方法で測定されてきた¹⁰⁾¹¹⁾。この場合、図1に示すように、高温の空気が噴霧に誘引さ

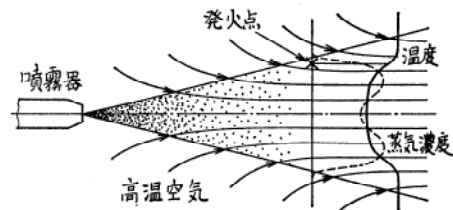


図1 噴霧の着火模型

れ、境界近くの油滴から順に加熱されて蒸発する。当然、空気の温度は低下するが、温度と蒸気濃度の組合せが最適になったところで発火が起こる。ところが、通常、流れは乱流であるので、温度や蒸気濃度の脈動が生じる上に、発火現象がガス塊の反応履歴に関係するので、この方法で測定される着火遅れの解釈に困難があった。事実、研究者や使用装置によって、データに1桁の差があることもまれではない。

このような難点を克服し、噴霧の着火遅れのデータに気体燃料なみの信頼度を与えるため

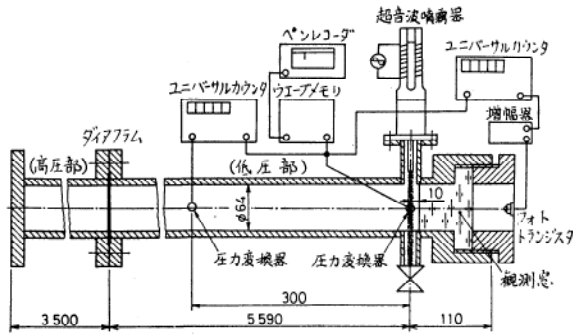


図2 衝撃波管を用いた噴霧の着火遅れ測定装置

に、筆者らは図2に示すように、衝撃波管と超音波噴霧器とを組合せた着火遅れ測定装置を製作した¹²⁾。これは、数十 kHz で振動する振動面に液を供給すると、衝撃波管内の低圧条件下でも柱状の噴霧を発生できるという事実と¹³⁾、衝撃波管端板近傍では、ほぼ静止状態で急激な断熱圧縮が生じるという事実を利用したものである。この装置の作動は良好で、従来の方法よりはるかに短かい、しかも圧力依存性の低い着火遅れが測定された。そして、在来法によるデータとの差から噴霧の着火機構や影響因子もある程度まで明らかにできた。

参考文献

1) 水谷, 乱流燃焼の理論, 燃焼研究, 46号(昭52-12), 1.
 2) Kennedy, L. A. and Scaccia, C., Modeling of Combustion Chambers for Predicting Pollutant Concentrations, Trans. ASME, Vol. 96, Ser. C, No. 3 (1974-8), 405.

3) Katsuki, M. and Mizutani, Y., A Mechanistic Model of Gas Turbine Combustors for Predicting CO and NO Emissions, Proc. 1977 Tokyo Joint Gas Turbine Congress, (1977), p. 168, GTS of Japan/JSME/ASME.
 4) Bilger, R. W., Turbulent Jet Diffusion Flames, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 1, No. 2/3 (1976), 87.
 5) Bray, K. N. C. and Moss, J. B., A Unified Statistical Model of the Premixed Turbulent Flame, Acta Astron., Vol. 4, No. 3/4 (1977), 291.
 6) Spalding, D. B., Mathematical Models of Turbulent Flames; A Review, Combust. Sci. Technol., Vol. 13, No. 1/6 (1976), 3.
 7) Chung, P. M., A Kinetic-Theory Approach to Turbulent Chemically Reacting Flows, *ibid.*, 123.
 8) Pratt, D. T., Mixing and Chemical Reaction in Continuous Combustion, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 1, No. 2/3 (1976), 73.
 9) Launder, B. E. and Spalding, D. B., Lectures in Mathematical Models of Turbulence, (1972), Academic Press.
 10) Mullins, B. P., Studies on the Spontaneous Ignition of Fuel Injected into a Hot Air Stream, Fuel, Vol. 32, No. 2 (1953-4), 211, 234; No. 3 (1953-7), 343, 363; No. 4 (1953-10), 451, 467, 481.
 11) 居倉・ほか2名, 定容燃焼器における燃料噴霧の着火遅れ, 機械学会論文集, 41巻, 345号(昭50-5), 1559.
 12) 水谷・宮阪, 衝撃波管による噴霧の着火遅れの測定, 内燃機関, 16巻, 200号(昭52-9), 9.
 13) 水谷・ほか2名, 超音波微粒化の研究, 機械学会論文集, 37巻, 301号(昭46-9), 1746.