

# 反応性乱流における輸送現象



研究ノート

高城 敏 美\*

## 1. はじめに

ガス燃料を比較的高速で空気中に噴出して火をつけると、どのような火炎が形成されるかを想像してみよう。ろうそくの炎を大きくしたようなものであろうとか、ブンゼン火炎で空気不足にしたような火炎であろうとか、通常の工学的センスと経験があれば当たらずと言えども遠からずの予想がつく。

では次に、そのような火炎からの熱をつかって暖房したり、銅塊を加熱したり、蒸気を発生させたり、動力を発生するにはどのようなアレンジが必要だろうかとの問いかけをしよう。機械工学を修得した学生であればその間に対してかなり妥当な各種提案ができることを期待したい。しかし、その提案をそのまま具体化したときの性能や信頼性については保証できるとは言い難い。現実には、多くの専門的経験の蓄積によって実用の域に達し、見方によっては芸術的とさえ見える域に達しているものもあるかも知れない。

しかしさらに、次のような問いかけをしよう。①火炎内の流速、温度、各種化学種濃度はどのようになっているだろうか、②それらの数値的な予測ができるだろうか、また、その精度はいか程か、③火炎形状を機器の境界条件に適合するようにコントロールするにはどうすればよいか、④高効率、高負荷化（コンパクト化）と低 $\text{NO}_x$ 、低すす排出を両立させる方策はどのようなものか、等々。この種の設問に答えることは容易ではない。たとえ、答えがあつ

たとしても、では、その根拠はどうか、現象の過程はどうか、普遍性はどうか、といった質問を矢継ぎ早にたたみかければ、答えは段々とあいまいになってくるのである。

では一体、何を研究すれば、明解な答えができるであろうかという事がこの分野の研究の動機となっている。必要な研究はかなりの広がりを持っているが、そのうちの一つがここでとりあげる反応を伴う乱流場での輸送現象の過程を明確にし、数値予測手法を確立しようとする事であろう。

## 2. 反応性乱流の中の現象

反応性乱流では、乱流場で運動量、熱および物質の移動（乱流輸送現象）が生じ、さらに反応過程を含む。その特徴は、①流速、温度および各種化学種濃度が時間的にも場所的にも変化する事、②温度や濃度の変化により、流体の密度や粘性係数等の物性値が著しく変化すること、③反応の熱発生による熱膨張等が流動に影響を与え、また、逆に流動が反応に影響を与えるという相互干渉があること、等である。

筆者らは十年程前から燃焼に関連して反応性乱流に興味を持ち、水素の乱流噴流が周囲空気流と混合しながら燃焼する乱流拡散火炎の構造に関する研究を始めた。このような乱流拡散火炎はせん断乱流場での乱れの生成や上記の反応性乱流の基本的現象を一通り含んだものである。

図1は乱流拡散火炎のシュリーレン写真の例である。このような火炎内の状態を規定するのは、流速、温度、および化学種濃度である。それらは各場所で時間的に変動するので、時間平均量とともに変動量の特長も知る必要がある。

\*高城敏美(Toshimi TAKAGI), 大阪大学工学部, 産業機械工学科, 教授, 工学博士, 熱工学

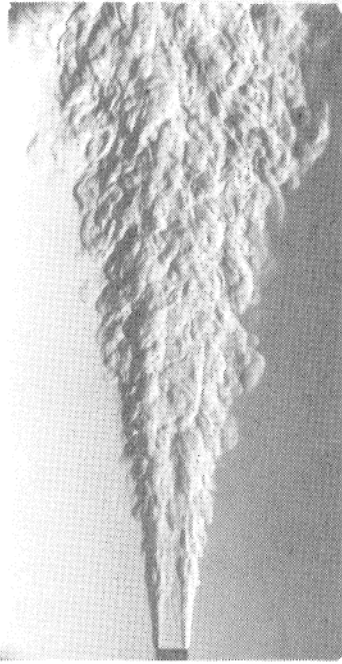


図1 乱流拡散火炎のシュリーレン写真

### 3. 計測と数値予測

乱流火炎内の現象を理解するにはまず計測から始める必要があった。数値予測による方法は必ずしも検証されたものではなかったからである。

火炎内の流速やその変動量の測定はレーザ・ドップラ流速計(LDV)によって可能となった。

当時、少なくとも国内では火炎計画にLDVを適用した例はなかったと思う。温度測定には線径 $25\mu\text{m}$ の熱電対を用い応答遅れを補償することによって数kHzまでの温度変動も測定した。さらに、静電探針によるイオン濃度の検出、ガスクロマトグラフによる各種化学種濃度の検出等も並行して行った。

これらにより、火炎内の時間平均的な構造や変動特性が理解できた<sup>2)</sup> また、シュリーレン写真やLDVによる乱れ強さの測定から火炎が存在することにより生ずる特異な現象である“局所層流化現象”を指摘した<sup>2)</sup> また、これらの実測結果は数値シミュレーションのためのデータベースとしても利用された<sup>3), 4), 5)</sup>

数値シミュレーションでは質量、運動量、エネルギーおよび各化学種の保存則に基づく微分方程式を連立して数値計算することにより、乱流火炎内の流速、温度、化学種濃度、乱れエネルギー等の分布を求める。これらの方程式の中には乱れによる変動を時間平均することに起因する乱流輸送モデルと乱流場での反応モデルが組み込まれ、それらのモデルは実験結果と対比して検証する必要がある。

数値シミュレーションにより実測値をよく予測できることを示し、乱流輸送モデルと反応モ

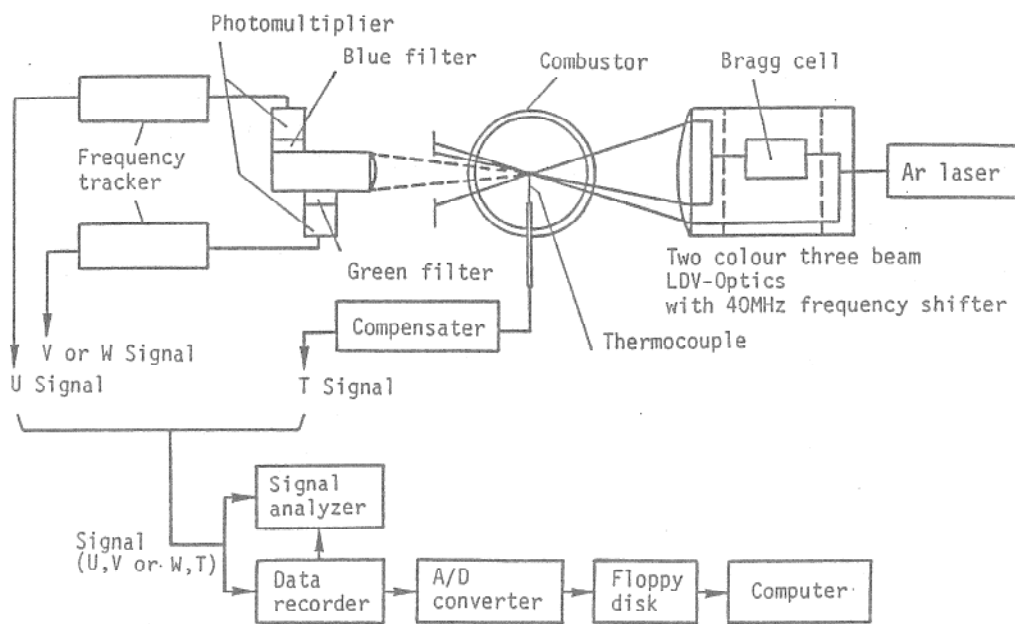


図2 計測とデータ処理装置

デルについては比較的簡単な勾配拡散モデルと渦消散モデルによって表現してよいことがわかった<sup>3)</sup>

次に旋回を伴う乱流拡散火炎の研究にとりかかった。当初、速度成分が一つ余分に加わるだけであるから、前述の基本的な乱流拡散火炎と大差はないだろうと予想していた。しかし、予想に反して不可解な事象が生じることがわかつ

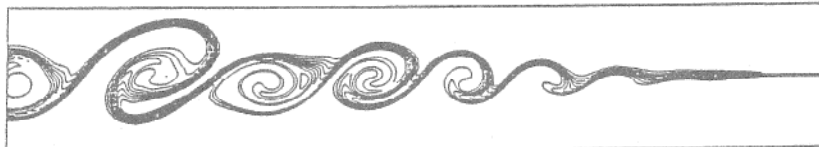


図3 2次元せん断流におけるうず形成の直接数値シミュレーション

た。その第一は、旋回をかけることによって混合が抑制され、火炎が細長く伸びることである。これは一般に信じられてきた、“旋回による混合の促進”と相反するものであった。第二は、得られた現象は前記の乱流輸送モデルを用いたシミュレーションでは予測できないことである。

不可解と思われる事象でも合理的な理由があるはずであるので、それを追求することにした。図2に示す装置で、2方向速度成分と温度の変動を同時測定し、それらの変動の相関をとることにより、密度変動を考慮して運動量および熱の乱流輸送を直接測定した。これにより、旋回があれば、運動量および熱の乱流輸送が抑制されること、場合によっては“逆勾配拡散”が生じることを示した<sup>4)</sup>。また、この原因を乱流輸送量に関する輸送方程式を導出し、その各項の大きさを評価することによって明確にした<sup>5)</sup>。

これらの結果は、とくに密度の不均質がある旋回流場での輸送現象のモデル化の指針を与えており、その数値シミュレーションには不可欠の因子となっている<sup>6)</sup>。

#### 4. 今後の関連分野の広がり

輸送現象に関する研究を進めるとき、まず、計測と数値シミュレーション手法が問題となる。

計測としては時間、空間分解能をもつ各種レーザを用いた非接触測定が多用されよう。また、一点での測定から線上<sup>7)</sup>または面上の空間分布の瞬時測定へと拡張されよう。測定項目もレーザ誘起蛍光や各種光散乱を用いた微量活性化学

種の濃度や温度の瞬時同時測定等も行われ、ミクロな火炎構造解明に進むと考えられる。

数値シミュレーション手法としては乱流モデルの高度化と並行して、モデルを用いることなく、素反応過程を組み込んだ原方程式を直接数値計算<sup>8)</sup>する方向へと進むと考えられる。(図3に例を示す)ただし、これには計算機性能の拡大に負う面も大きい。

反応性乱流における輸送現象の応用として、機械工学の分野では燃焼を用いる各種熱機器があるが、エネルギー分野さらには反応または非平衡分子・原子状態を利用した材料生成の分野にも目が向けられるかも知れない。

#### 参考文献

- 1) Takagi, T., H.D. Shin, and A. Ishio, *Combustion and Flame*, 40, 121 (1981).
- 2) T. Takagi, H.D. Shin, and A. Ishio, *ibid*, 37, 163 (1980).
- 3) T. Takagi, and S. Kotoh, 3rd Symp. on Turbulent Shear Flows, 3, 21 (1981).
- 4) Janicka, J. Proc. 21st Symp. (Int.) on Combustion, 1409 (1986).
- 5) G.M. Faeth, and G.S. Samuelsen, *Progress in Energy and Combustion Science*, 12, 305 (1986).
- 6) T. Takagi, T. Okamoto, M. Taji, and Y. Nakasuji, 20th Symp. (Int.) on Combustion, 25 251 (1984).
- 7) S. Hirai, T. Takagi, and T. Higashiya, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 掲載予定.
- 8) 小宮山, 高城, 松成, 日本機械学会論文集, B編 54, 1962 (1988).
- 9) T. Takagi, M. Kamoda, and M. Komiyama, *Joint Conf. WS. JS/CI*, 145 (1987).