

# 乱流燃焼における強い剪断流中の火炎

(I-確率解析と温度変動の測定)

岸本 健\* 中北隆行\*\* 高畑 敏\*\*  
柳原孝雄\*\* 若林祐市\*\*

## Turbulent Combustion-Flames in Strong Shear Layer

(I Probability Analysis and Measurements of Temperature fluctuation)

By *K. Kishimoto\**, *T. Nakakita\*\**, *S. Takahata\*\**,  
*T. Yanagihara\*\** and *Y. Wakabayashi\*\**

**Synopsis:** This paper is positioned as the first one of our studies on turbulent flames. On views of statistical points, a number of experimental results are to appear more meaningfully physically.

In this, the probability density function, which is the most fundamental values in a stochastic processes, is used for interpretation of turbulent combustions.

On experiments, the compensator of thermal inertia of thermo-couple and probability analyzer are home-made with electric circuits and checked up its characteristics. And then, the directional characteristics of momentum and heat diffusions were estimated by using p.d.f. .

**要旨:** 本論文は一連の乱流燃焼についての研究の最初として位置するものであり、乱流燃焼を統計学的に扱えば、統計の考え方が物理的に具体化される事を示したものである。

まず、統計の最も基本的な量である確率密度分布を用いて乱流の特性を説明することにした。そのため、熱電対温度計の応答性を改善するための電気回路と確率密度演算を行う確率解析器を自作しその特性を調べた。この確率解析器の概念はアナログ演算で行うため新しく開発した論理を用いた。

乱流の解析では、密度関数を用いることで拡散と変動量の方向特性と程度を知ることができることを示した。

### 1. はじめに

乱流予混合火炎の保炎機構については数多くの研究が現在もなされている。しかしその多くは火炎の吹消え限界についての議論が多い。いうまでもなく吹消え限界は保炎機構の限界であり、乱流火炎伝播の必要条件の研究としては吹き消えに対しての説明を行うことが重要な方法ではあるが、安定な保炎の機構を説明するための十分条件であるとは断言し難たい。

そこで、現在までの定説となされている考え方を掲げると層流予混合火炎の吹消え限界説とのアナログとして

- (1) 燃焼速度と流速の釣合の破れ
- (2) 火炎伸長現象による熱損失の増大

### (3) 着火おくれによる限界

などがあり、Karlowitz 数、Dämköhler 数などの無次元数で整理される。

また乱流火炎独自の考え方としては、乱流混合の速度と燃焼速度の釣合という考え方があり、乱れの強さと乱流中での乱れ Reynolds 数、乱流 Prandtl 数、乱流 Schmitt 数などの無次元数で示される。乱流での現象も層流での考え方を拡張して考えることが可能であるのなら次のように考えることができる。つまり局所燃焼速度と変動流速の関係と、それに伴う熱の拡散速度と反応帯に気体が存在する滞留時間を用いた着火遅れという考え方であろう。いずれにしても、乱流火炎の保炎機構は乱流中における化学反応の過程という複雑なプロセスから解明すべき重要な課題であると考えられる。

この問題は工業的には詳細すぎる考え方かもしれないが、現在、工業的燃焼装置はほとんど乱流燃焼であることと、燃焼装置を設計する手法が定形化されておらず、

\* 機械工学科 専任講師  
Lecturer, Mech. Engng. Division.

\*\* 機械工学科 学生  
Graduate, Mech. Engng. Division

その特性もプロトタイプの燃焼装置から推論することが困難であるという試行錯誤の開発過程を避けて通ることのできない分野であるため、乱流燃焼の本質を把握することの重要性は直接、工業的価値に結ぶつく。

本論文では、この乱流の機構を保炎の機構から解明するため、強い剪断応力の存在する領域であり、かつ熱の入出があり着火点という反応開始点でもある再循環領域の周縁に着目し、まずこの領域での非燃焼状態における混合を考えてみることにした。そして燃焼させたときの状態を推論し、燃焼実験結果と比較することで、乱れの中の化学反応過程を解明しようという方法をとることにした。

乱れの測定というのは、測定装置の開発から始めなくてはならない非常に困難な課題である。本論文では主として自作の測定装置とその結果について述べることにし変動測定は流速と温度の2つに限ることにした。

## 2. 測定

本論文で対象としている強い shear stress の存在する流れの領域においては、等方性乱流の仮定が成立しなくなる。このことは温度、濃度が乱流混合するとき方向性をもつことを意味する。つまり単純な乱流を表現する量である平均量と R.M.S のみでは現象を把握し得ない。その他に確率密度関数の形やスペクトル分析、および相関関数が必要となる。また、温度と流速との相互干渉の度合を知るためには相互相関関数やクロススペクトル分析等が必要となる。

位置的にもこれらの分析量の変化の過程を追わなければならない非常に多くのデータ量から判断されなければならない現象となる。

本報告では、温度と流速の変動成分をそれぞれ非燃焼時と燃焼時に測定し、関連性を調べることを当初の課題として行なったものである。

### 2-1 測定装置

本研究のために自作した測定装置とその処理回路を示す。まず、時系列データの確率分布・密度関数をアナログ回路により求める方法をとった。最近ではマイクロコンピュータが発達して来ているのでマイクロコンピュータ

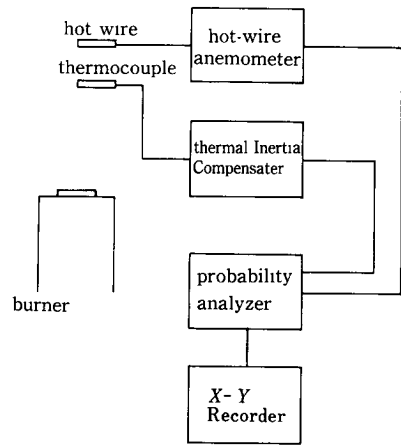


図1 測定系統

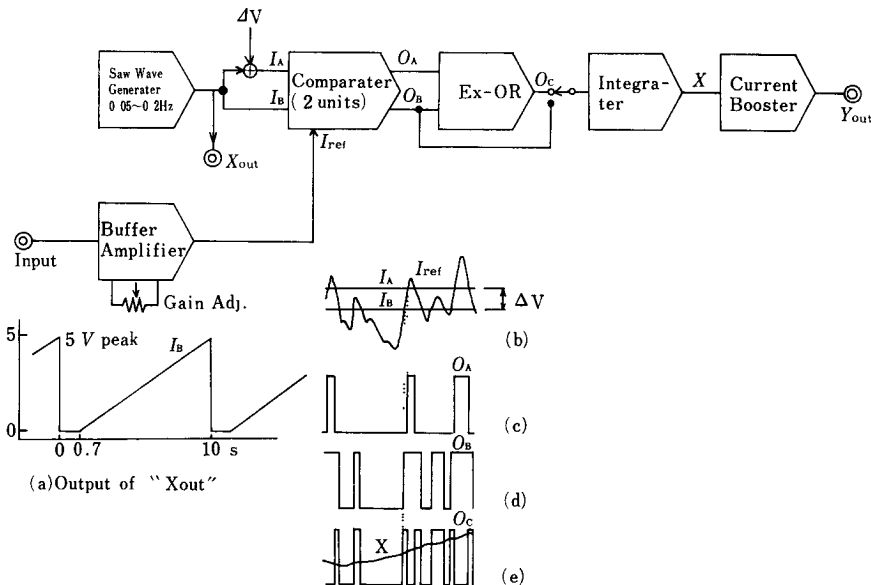


図2 確率解析器のブロックフロー

タのソフトプログラムで処理する方法もあるが、極めて安価で簡単な論理でアナログ処理し得たので、回路ブロックを図示した。測定装置全体を図1に、確率解析器の回路ブロック図を図2に示した。

また、後述のように温度を測定するために用いる熱電対には、熱容量のための応答性の悪さがある。この応答性を改善するためよく用いられる微分補償回路を自作したので、その回路も示した。

2-2 解率密度解析器

図2に示すように、アナログ的に処理される信号は非常に低い周波数の鋸歯状波と、その鋸歯状波より4Vだけ高い電圧の鋸歯状波の2つの基準鋸歯状波と比較される。入力した信号が、2つの鋸歯状波の間にあるかどうかは、2つの比較回路と排他的論理和演算器(EX-OR)で判断される。2つの鋸歯状波の間にある時間を鋸歯状波の周波数の約100倍の周波数に相当する時定数をもつ積分回路を使用することで積分すると、結果は確率密度となる。鋸歯状波と出力をX-Y記録計で記録することによりリアルタイムに定常確率過程における確率密度関数を求めることができる。

この回路に正弦波を入力した場合と三角波を入力した場合の測定回路と結果を図3と図4に示した。理論的な値と極めて良い一致を示すことより、適当なΔVを選ぶことで十分実用に供せると考えられる。

2-3 熱電対の熱慣性補償器

熱慣性による熱電対の応答性の劣化は熱電対を乱流計

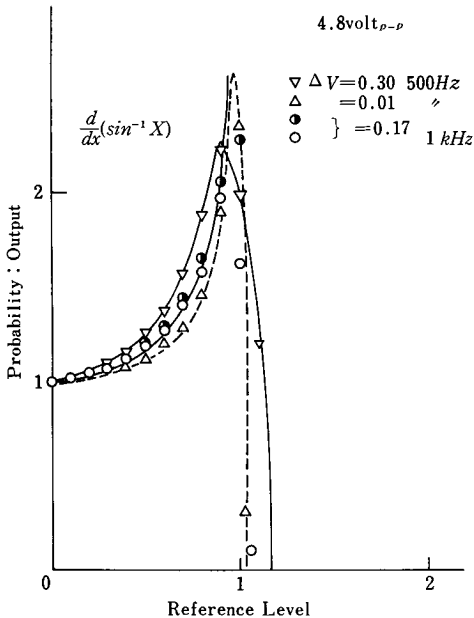


図3 確率解析器の正弦波入力による検定

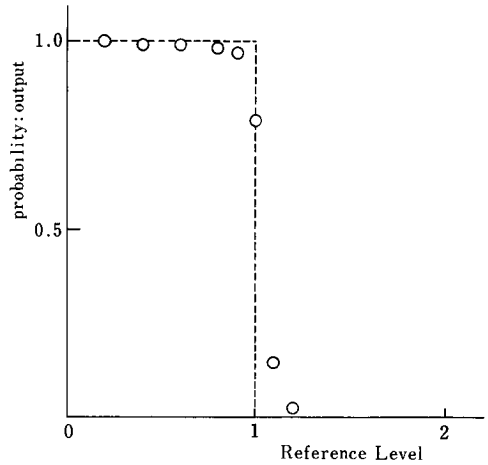


図4 確率解析器の三角波入力による検定

測に使用する場合の短所となっていた。この方法は1952年に Shepard & Warshawsky<sup>1)</sup>によって報告されているのが最も古いと思われ、国内では1959年功力・神野<sup>2)</sup>が用いている。

これらの方法は前述のように微分補償を行なうものでその回路は、応答方程式(1)に基づいている。

$$V_{c_o\rho\omega} \frac{d\theta_o}{dt} = Ah(\theta_o - \theta_a) + A\sigma\epsilon \left\{ \left( \frac{\theta_o}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_a}{100} \right)^4 \right\} + H_h(t) \quad (1)$$

ここで、V, A はそれぞれ熱電対温接点における等価体積、等価表面積である。添字 ω は熱電対を構成する金属の平均物値を示し、c, ρ は比熱・密度、h は熱伝達率、σ, ε はそれぞれ Stefan-Boltzmann 定数と放射率である。θ は温度であり、θ<sub>o</sub>, θ<sub>a</sub> はガス、周囲の温度である。H<sub>h</sub>(t) は熱電対温接点から熱伝導によって奪われる熱量と加熱のため温接点に加わる熱量である。

この式を変形すると式(2)となる

$$\theta_o = \theta_a + \tau \frac{d\theta_o}{dt} + H_r(\theta_o) + H_h'(t) \quad (2)$$

式(2)中で

$$\tau = \frac{V_{c_o\rho\omega}}{Ah}$$

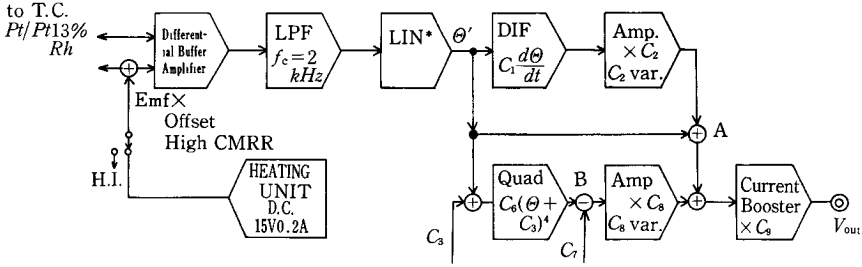
$$H_r(\theta) = \frac{\sigma\epsilon}{h} \left\{ \left( \frac{\theta_o}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_a}{100} \right)^4 \right\}$$

$$H_h'(t) = \frac{H_h(t)}{A_h}$$

である。この式(2)を電気回路になおすため、熱起電力を増幅したものをθとすると、各回路のゲインを用いて

$$V_{out} = C_5 \left[ \theta + c_3 c_1 \frac{d\theta}{dt} + c_4 \{ (\theta + c_3)^4 - c_3^4 \} \right] \quad (3)$$

と表わされる。この回路のブロック図を図5に示す。こ



$$V_{out} = 100 C_9 \left\{ \theta + C_1 C_2 \frac{d\theta}{dt} + C_8 [C_6(\theta + C_3) - C_7] \right\}$$

図5 熱電対の熱慣性補償回路

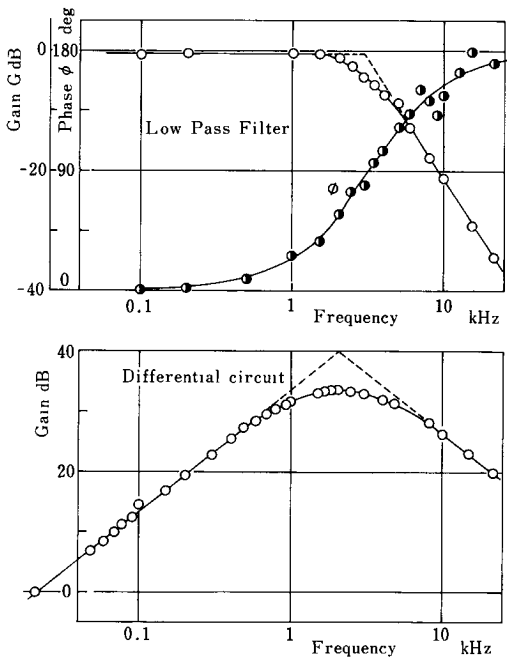


図6 LPF 及び微分回路の特性

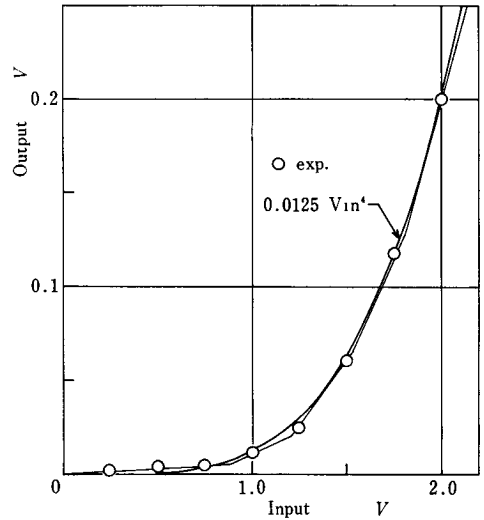


図7 4乗器(折線近似による回路)の特性

の回路の定数は

$$c_1 = 314 \text{ ms} \quad c_2 = 0 \sim 2 \quad c_3 = 0 \sim 0.4 \text{ volt}$$

$$c_4 = 0 \sim 0.008 \quad c_5 = 80 \sim 140$$

であり、 $\mu A 741$  と  $301 A$  の安価なオペアンプを使用し、前段のバッファと増幅回路には  $LM 302$  と  $LM 318$  を使用した。回路図中の A 点と B 点の特性を図 6、図 7 に示す。

### 3. 測定器に対する検討

式 (1) を用いて測定を行うとき、電気的な処理を式 (2) である時には、次の点が問題となる。

(i) 変動する温度、流速に対して、物性値である  $c_w$ 、

- (ii) 有限の太さを有する熱電対で、熱電対素線の軸方向及び半径方向の温度分布による誤差
- (iii) 円筒型熱電対の温接点と、平均流速、変動流速の方向のなす角度が直角からずれることの誤差
- (iv) 表面触媒作用による誤差。コーティングしてあるならば、コーティング層の温度伝達率は白金の  $1/10 \sim 1/60$  程度であるので (ii) と同じ誤差を生じる。

(i) に対しては、 $c_w$ 、 $\rho_w$ 、 $\epsilon$  は  $\theta_w$  の関数として与えられる。 $\theta_w$  は (ii) に示した誤差が小さいときは熱電対温接点の平均温度で表わされ、また温度依存性も小さいため誤差の程度としては小さい事が予想される。放射係数との温度依存性に対しては、大竹ら<sup>3)</sup> が調べているように温度依存性は無視し得ないが、式 (2) 中での  $H_r$  の補正分は小さいため、 $h$  の極めて小なる流速の小さいと

ころを除いては無視し得る。

熱伝達率  $h$  については変動流速の影響を極めて大きく受ける、熱電対は直径 0.1 mm のものと 0.05 mm のものと用意したが、細線の熱電対に対する熱伝達の式は文献 [4] に数多くあり、King, Ahmad, Collis & Williams そして Scardron & Warshawsky のものがあるが、嶋本、田中<sup>8)</sup> の報告によると Ahmad の式 (4) が良好な一致をするようであるのでこれを使用した。

$$Nu(\nu/\mu m)^{0.15} = 0.2068 + 0.4966 Re^{0.45} \quad (4)$$

$\nu$  は動粘性係数であり、添字  $m$  は流体と細線温度の平均値を表わす。

この式は定常熱伝達を表わす式であるが、一応非定常熱伝達にも適用し得ると考えた。しかし確める方法をもたないが、熱線流速計の応答性に同様の King の式を用いることが多いことから考えると妥当と考える。この変動する熱伝達率  $h$  を時定数  $\tau$  に入れることになると、熱伝達率を別に測定しなくてはならない。本実験においては平均の  $\tau$  を用いて測定することにした。将来は、流速の測定もしくは加熱線の測定をすることで瞬間の熱伝達率を求め、その熱伝達率を式 (2) に代入して、時々刻々の補償をする方法を取る必要がある。この誤差の検討は後報で行う。

(ii) については、軸方向の温度分布は測定点での温度分布と熱電対の温度伝導率によって決定される。十分な精度でこの影響による誤差を見つめることはできないが、程度を概算することは可能である。太さの異なる熱電対を用いて実験的にこの誤差を見積る方法が良く使用される。本実験においては、測定点の温度分布 (温度の勾配) をあまり受けないように軸方向に支持棒をもってきて、熱電対素線の太さを十分細くしたためあまり影響されなと思われる。正確な誤差は文献 [5] に示してある。

(iii) の影響は、現時点で乱れの方向が全くランダムであるため、平均流速に直角に熱電対を向けることで避け得る。

(iv) による影響は極めて大きく、還元性ガスの領域内においては、ガス温度 1200°C で指示温度と 140~200°C もの差が表面触媒性によると考えられる原因で生じた。そのため、塩化リットリウムと酸化ベリリウムのコーティングを施した。このコーティング層の厚みは 1~6  $\mu m$  程度と非常に薄い、熱伝導率が極めて悪く熱電対の等価直径が 100~400  $\mu m$  も増すことになる。この等価直径は簡略化した熱伝導計算をもとにしてはいるが、熱容量の計算においても、約 0.8~1.2 倍増加するため、変動に対する応答性が極めて悪化する原因となる。

応答性は、 $\tau$  を測定することで求められるので少々の劣化は回復し得る。

#### 4. 時定数の算出方法と実験

熱電対の応答性の悪さを電気信号をアナログ演算処理することで改善するためには時定数  $\tau$  を求めなければならない。そこで式 (1) での加熱項を交流加熱することでその応答性を知る方法 (1) および、加熱項をステップ変化させることで時定数  $\tau$  を求める方法 (2) がある。この方法はすべて測定点で行なわれるので、測定点における  $\tau$  を与えることが可能となる。

交流で加熱すると、式 (2) の  $H_r$  を一定と仮定し  $H_h(t)$  の直流成分との和を  $\bar{H}$  と表わすと、簡単に解けて、

$$\theta_{\omega} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1-j\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2} A(\omega) e^{j\omega t} d\omega - \bar{H} + \bar{\theta}_g \quad (5)$$

ただし  $\omega$ : 加熱周波数

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \theta_g'(t) e^{-j\omega t} dt$$

$\theta_g'(t)$ : ガス温度の変動成分

となる。式 (5) でガス温度の変動成分中  $\omega$  の角速度をもつ変動量  $A(\omega)$  は熱電対の温度としては  $1/\sqrt{1+(\omega\tau)^2}$  倍となっている。

また、加熱電流を  $I = I_0 \cos \omega_n t$  とすると式 (5) の  $A(\omega)$  を求める式で

$$A^*(\omega) = A(\omega) + H(\omega) = A(\omega) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{\omega} I_0^2 \tau}{V c_{\omega} \rho_{\omega}} \cos^2 \omega_n t e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

とできる。 $R_{\omega}$  は熱電対の電気的抵抗である。このため式 (5) の  $\theta_{\omega}$  の変動成分  $\Delta\theta_{\omega}$  は

$$\Delta\theta_{\omega} = \frac{R_{\omega} I_0^2 \tau}{V c_{\omega} \rho_{\omega}} \cdot \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\cos 2\omega_n t + (2\omega_n \tau) \sin \omega_n t}{1 + (2\omega_n \tau)^2} \right] \quad (7)$$

で表わされる。この変動成分のゲインは  $\omega_n$  によって変化せず、直流加熱でも適用し得て

$$|\Delta\theta_{\omega}| = \frac{R_{\omega} I_0^2}{V c_{\omega} \rho_{\omega}} \tau \quad (8)$$

であり、位相差から

$$\tan \phi = \frac{1}{2\omega_n \tau} \quad (9)$$

と求められる。以上 2 通りの方法に加えて、ステップ変化は、1 次応答であるので、減衰曲線より時定数を求め

$$\Delta\theta_{\omega} = \frac{R_{\omega} I_0^2}{V c_{\omega} \rho_{\omega}} \cdot \tau \exp\left(-\frac{t_n}{\tau}\right) \quad (10)$$

ることができる。

これらを適用するため、直流加熱を行い、計測した例に示す。式 (8) と式 (10) の  $\tau$  の値はほぼ一致した。しかし、ガス温度の変動巾がきわめて大であり、かつガス温度が、熱電対の使用上限温度付近にあるときは加熱によって熱電対が溶融してしまうため使用範囲が限られてくる。

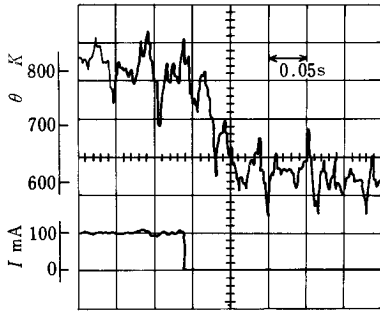


図8 τ の測定

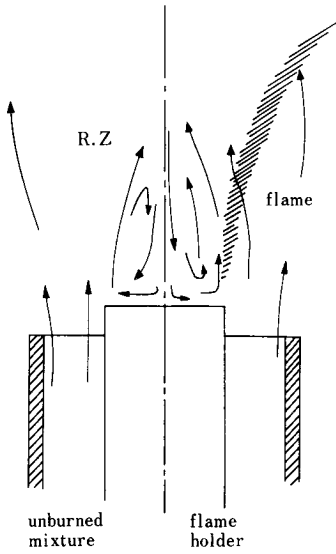


図9 測定部分の詳細

5. 実験結果

実験は、長さ 500 mm の黄銅管（外径 16, 内径 14 mm）に同軸に黄銅棒（外径 8）をもつ環状予混合噴流火炎を用いて行った。測定の場合から内側の丸棒は外の管より 2 mm だけ外に出ている。（図 9）

図 10 に定温度型熱線風速計を用いて出口付近の流速を測定した結果を示す。出口の内側棒上部は逆流を伴っているため、その部分の平均流速は流線から判断して負

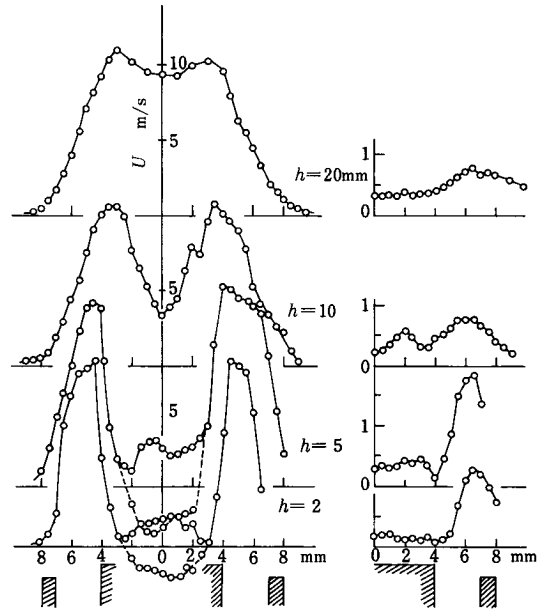


図10 u および  $\sqrt{u'^2}$  の分布

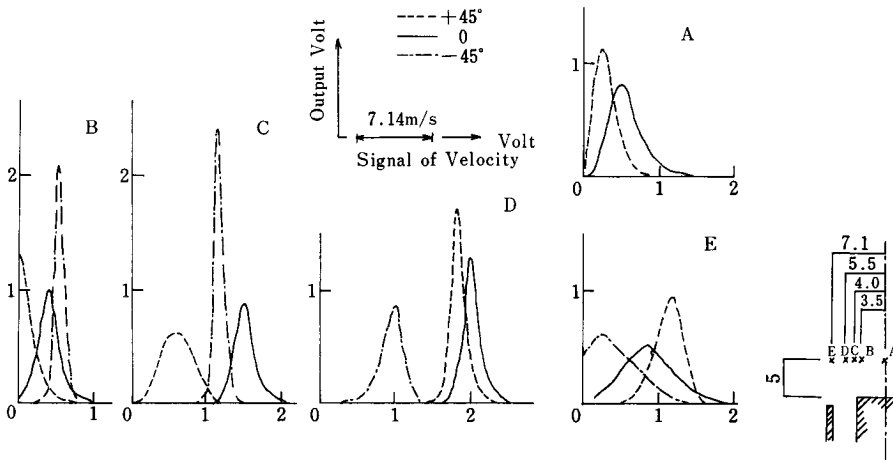


図11 流速の確率密度 (a)

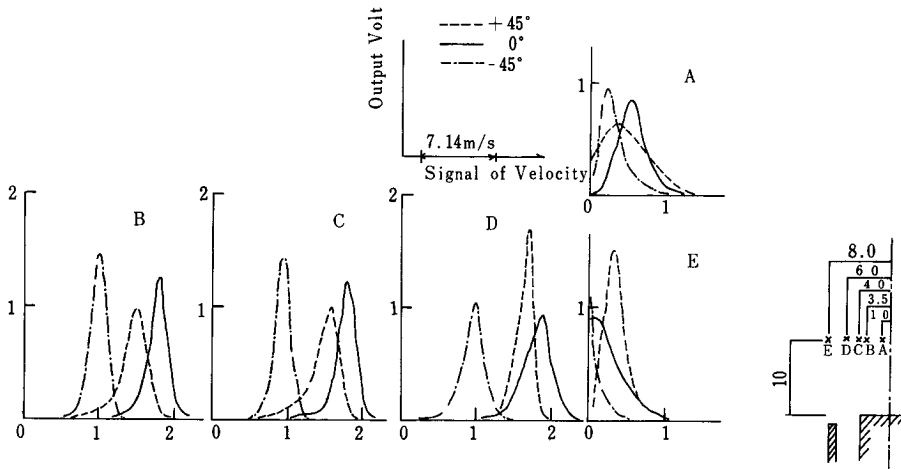


図12 流速の確率密度 (b)

と考えるため破線で示した。非燃焼のため、滞留領域上部は vortex shedding があると思われる様子が観察でき、 $h=10\text{mm}$  での変動流速  $\sqrt{u'^2}$  の分布に異状が見られる。

高さ  $h=5\text{mm}$  と  $h=10\text{mm}$  のときの熱線出力を確率解析器によって求めたものを図11と図12に示す。どの分布も中心軸に近いと低流速側に広がった確率密度分布となり運動量拡散の相互干渉が見られ、正規分布からはずれた分布となっている。

図10と同じ体積流量を混合比(当量比0.86)で燃焼させたときの温度分布を図13に示す。火炎は朝顔形で中心の棒(保炎器)に付着しており、温度勾配と速度勾配の大きいところで変動巾も大であり、剪断層における乱れの生成が火炎面の変動を誘起している事を示している。図中のプロットで●は平均温度より大きな変動巾をもつ温度の乱れが存在することを示している。この変動は正弦波的な変動ではなく、矩形波に近い on-off 変動成分が強いことを示している。確率密度分布で、2つの大きなピークをもつことから、この波形での変動成分が平均量を越すことが確かめられる。この確率密度関数を図14に示す。測定点を火炎帯付近にとると未燃の乱流塊がかなりの割合存在することがわかる。未燃と既燃の混合もある程度進んでいることがわかる。火炎帯の未燃側では、(D)に示すように未燃混合気の到達する割合が増し、D点より外側では、未燃と燃焼中の温度の2つのピークを示す分布となり、平均温度より変動温度が大きくなる。 $h=5\text{mm}$  のところで  $\Delta\theta$  を求める方法と、一次応答による時定数を求めてみたが、4~10回の測定の平均値をとり、図15に示す形となった。平均をとったため傾向は式(4)による熱電達率を用いた時定数の分

布に近くなったが、各測定値は平均値の最大で60%~80%の偏差をもっている。

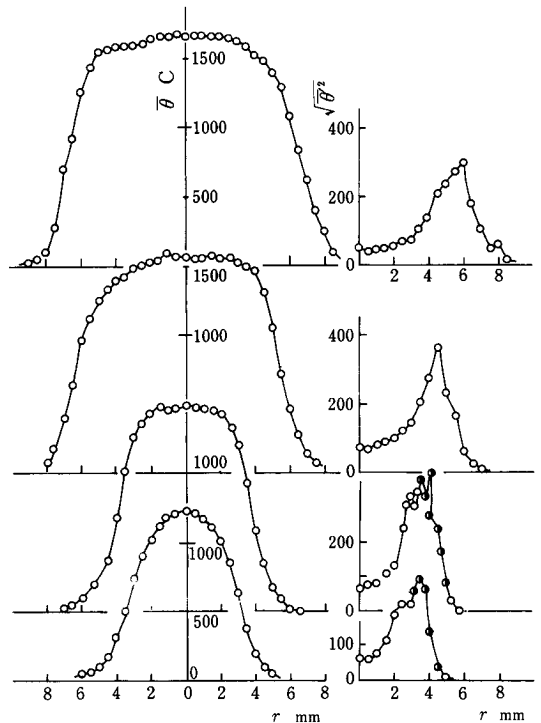


図13 平均及び変動温度

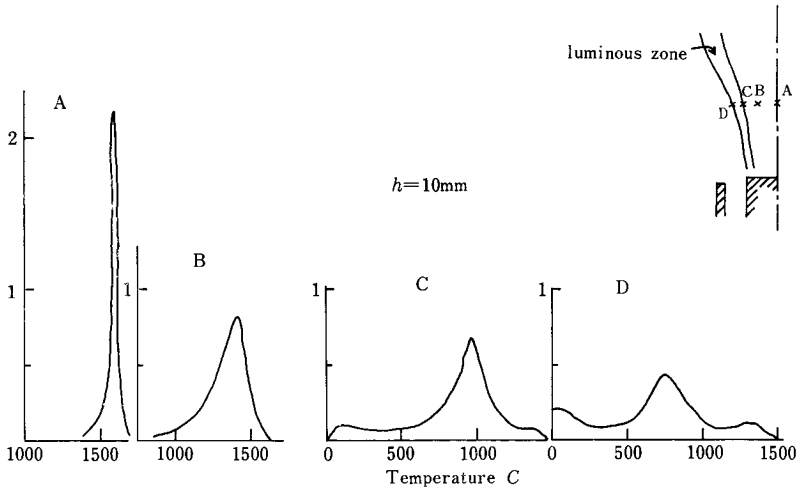


図 14 温度の確率密度

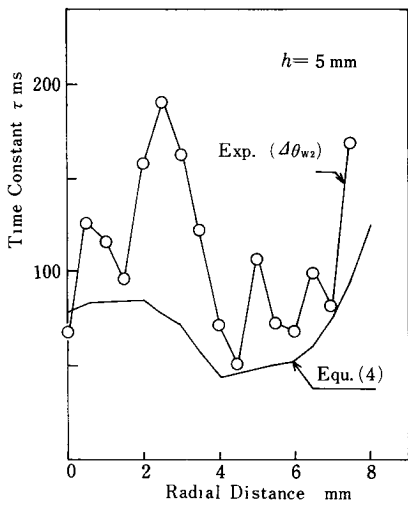


図 15 時定数の分布

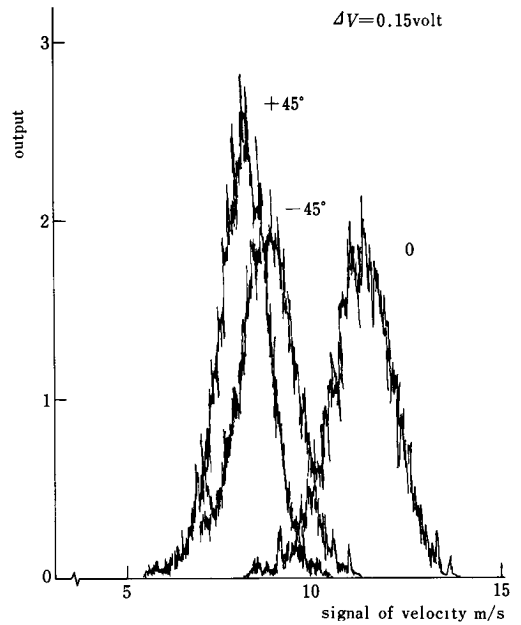


図 16 流速の確率密度の出力例



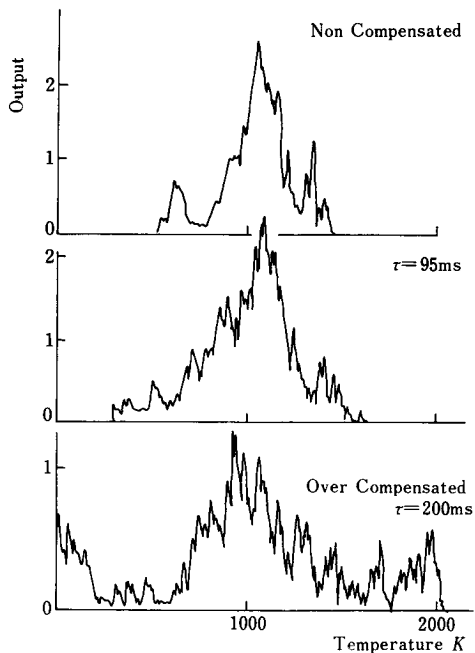


図17 時定数の依存性

## 6. 考察とまとめ

本論文では、まず第1報として乱流火炎の変動成分の統計的計測から導びき出せる可能性のある物理的意味をもった推論と結果が豊富な事を示した。そのために計測方法を確立しておく必要がある。

確率密度は、変動と拡散の関係を示すことがわかったが、本論文では定量的に求める事はせず、定性的に把握する事にとめた。特に温度の確率密度は火炎帯の存在確率を示すことを示した。

本論文で以上のことをまとめると、

- (2) 熱線風速計の出力を確率密度分布の形でまとめるとその変動の伝わる方向や、変動の特性に関する知見を得ることができる。
- (2) 変動温度の測定では時定数を算出したり測定したりする時十分な注意が必要であり、時定数の値で変動の r. m. s. 値のみならず確率密度分布に大きく影響してくる。
- (3) 着火点での温度変動巾は、その場所での平均温度の勾配と流速の勾配の関数として示せる。

## 7. おわりに

本論文の実験と研究は昭和53年度卒業研究としてなされたものである。

(原稿受付 昭和54年10月5日)

## 参 照 文 献

- 1) Shepard, C. E & Warshawsky, I. NACA 2703 (1952).
- 2) 切刀, 神野 7th Sympo. (Intern.) on Comb. (1959), 942.
- 3) 大竹, 他 機論 42-357 (昭51-5), 1511.
- 4) Andrew 他 Int. J. Heat & Mass Transfer 15-10 (1972-10), 1765.
- 5) 菱田, 他 機論 43-365 (昭52-1), 225
- 6) 嶋本, 田中 機論 44-383 (昭53-7), 2467