

音響により励起された平面せん断組織構造火炎 (II)

—位相平均法を用いた発熱速度変動と発光の測定—

山口譽起, 石野洋二郎, 小島利昭, 大岩紀生
機械工学科

(1992年9月2日受理)

Acoustic Excitation of Organized Eddy Flames in a Plane Shear Layer (II)
—Phase-Locked-Averaging Measurements of Fluctuations
of Heat Release Rate and Light Emission—

Shigeki YAMAGUCHI, Yojiro ISHINO, Toshiaki KOJIMA, Norio OIWA

Department of Mechanical Engineering

(Received September 2, 1992)

In a previous paper, it has been reported that acoustic excitation enhances the periodicity of the organized eddy motion and the combustion process. In this study, therefore, in order to elucidate the behavior of hot gases and flames in organized eddy diffusion combustion, a computer aided phase-locked-averaging method is employed to obtain the graphical 2D contour maps of instantaneous temperature and CH light emission distributions in each phase, from the original data measured at a number of positions. Furthermore, provided that the enthalpy and density of the gases are similar to those of air, the variation of the heat release rate is calculated directly from temperature maps, and is compared with the phase averaged sound pressure variation near the flame region and over-all CH light emission. Finally Rayleigh's integration is calculated, and found to be positive in this experiment.

1. 緒 言

前報⁽¹⁾において著者らは、平面せん断流中に形成された明確な組織渦構造をもつ拡散火炎⁽²⁾に対する燃焼制御の実験を行なった。燃焼制御の手段として、実用周波数帯域が広く、制御が容易な、音響励起を採用し、アクチュエータには、測定部ダクト壁に面一に設置された平面スピーカを使用した。その結果、音響励起による火炎構造の明確な変化、燃焼強度の増加、燃焼現象の周期性の向上といった興味ある結果を得た。とくに燃焼現象の時間周期性の向上は、この燃焼現象に対して位相平均法を適用することが可能であることを示している。

本論文では、燃焼基礎研究に与える燃焼制御の貢献を明確に示すため、前報⁽¹⁾の音響励起火炎に対し、位相平均法を前提とした多測定点での点測定を行ない、変動する二次元燃焼現象の瞬間的な二次元挙動を小規模な点測定システムで捉えることを目的とした。また、この燃焼場は、乱流燃焼の重要な要素となる渦構造をもつ基本的な燃焼流れ場であり、この燃焼流れ場の詳細な制御研

究は能動的燃焼制御技術に関する多くの情報をもたらすものと期待できる。

2. 実験装置および方法

本実験装置の系統図を Fig. 1 に、測定部の詳細を Fig. 2 にそれぞれ示す。本実験で用いた装置は前報と同じであるので、実験装置の詳細な説明は前報⁽¹⁾を参照されたい。

測定対象とした3種類の火炎の設定条件を Table 1 に示す。本報では、①通常の火炎⁽²⁾、②音響励起火炎 [SPL_{max} = 120dB]、および③火炎①に対して上流 [(x, y) = (-64mm, 13mm)] に円柱 [直径 3mm] を設置し、擾乱により火炎長を短くした火炎の計3種類の火炎を対象とするが、位相平均法を用いた詳細な検討は、時間周期性の高い②音響励起火炎に対してのみ行なった。Table 1 において、U₁、U₂、Q_f および U_f はそれぞれ、高速側および低速側主流流速、燃料流量および平均燃料流出速度である。使用した燃料は家庭用 LPG [プロパン純度: 96.4%] であり、スプリッタプレート後端に取り付けら

れたスリットノズル [幅 1mm, 長さ 78mm] から供給される。SPL_{ex} は音響励起の強度であり, (x, y, z)=(30mm, 0mm, 0mm) において非燃焼時に測定される音圧レベルにより表される。励起用スピーカへの供給電圧は, 前報⁽¹⁾と同様に正弦波 [周波数 $f_{ex}=500$ Hz] とした。また, この供給電圧を位相平均処理のトリガ信号として用い, 電圧が負から正へ変化する時刻を位相 $\phi=0$ とした [1 周期は $\phi=2\pi$ に相当する]。また, 任意の位相 $\phi=0$ を基準とする位相の進行を位相時刻 Φ と定義した。

実験では, はじめに 3 種の火炎に対して, 瞬間影写真・直接写真による火炎の平均的・瞬間的構造の観察を行った。つぎに音響励起火炎②に対し位相平均法を適用し, 位相平均二次元温度分布および位相平均二次元 CH 発光 [431.2 nm \pm 0.7 nm] 強度分布の測定, および火炎全体からの CH 発光変動の測定を行った。

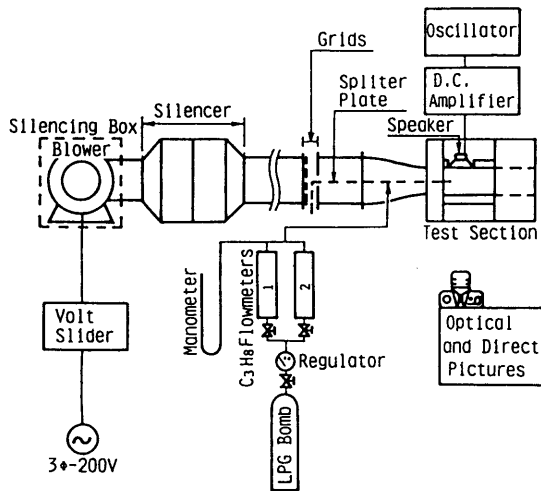


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 3 に測定装置の系統図を示す。位相平均二次元温度分布の測定 [Fig. 3 (a)] は, コンピュータ [日本電気: PC 9801 RX, GPIB 付き] により自動的に行われる。PR 13 裸熱電対 [100 μ m] からの熱起電力は, RC 形補償器により補償され [DC~4kHz], 励起用スピーカへの供給電圧信号とともに FFT アナライザ [小野測器: CF-350 A, コンピュータにより制御] に入力され, 位相平均処理が行われる。熱電対は三次元移動装置 [理化精機工業: F-204 C, 駆動装置およびインターフェイス [自作: 2 軸] 付き] に搭載されており, コンピュータにより駆動制御され, 1mm [x 軸方向] および 0.5mm [y 軸方向] ごとに設定された測定点 [全 3075 点] で測定が行われる。測定された各測定点における位相平均変動

Table 1 Flow conditions of objective flames; propane [C₃H₈] is used as fuel. Acoustic excitation strength SPL_{ex} is indicated by the sound pressure level which is measured at (x, y, z)=(30mm, 0mm, 0mm) under no-flame condition

U ₁ m/s	U ₂ m/s	U ₁ ' m/s	U ₂ ' m/s	R =U ₁ /U ₂	Q ₁ l/min	U _f m/s	SPL _{ex} dB	Flame No.	Reference
8	2	0.06	0.02	0.25	1.4	0.29	—	①	Normal Combustion
							120	②	Excited Combustion
							—	③	Disturbed Combustion

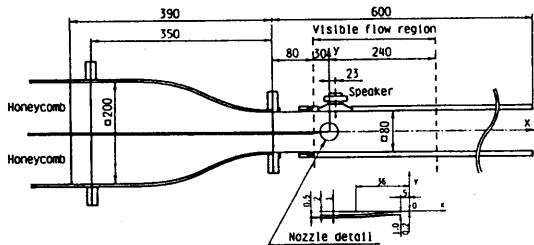


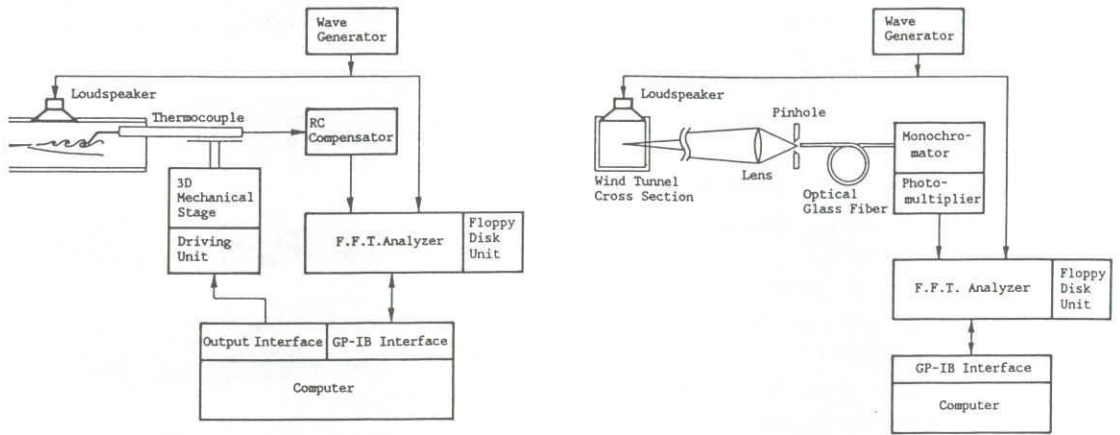
Fig.2 Construction and dimensions of test section; a planar loudspeaker flush-mounted on the wall of test section, is used to introduce the acoustic excitation at the flame region

温度データは, FFT アナライザによって一時フロッピーディスクに貯えられる。全測定終了後, このデータはコンピュータに読み出され各位相における二次元データに再構成され, ディスプレイ上に映し出される。画面のハードコピーは 35mm カメラで行った。

Fig. 3 (b) は, 位相平均二次元 CH 発光強度分布の測定装置の系統図である。火炎の発光分布は十分速くに設置された写真用レンズ [f 300mm, F 4.5] により焦点面に投影される。一方, 二次元精密移動装置 [中央精機: LD-921] により焦点面上を移動するピンホールにより, 測定位置 [1mm [x 方向] および 0.5mm [y 方向] ごとに設定。全 2320 点] に相当する投影像の一部の光束が石英ガラス製オプティカルファイバ [直径 1mm, 全長 2m] を経由して回折格子型分光器 [日本分光工業: CT-50C, 波長範囲 250~800nm, 波長精度 ± 0.1 nm] に取り込まれる。分光器により波長を制限された光信号 [431.2nm \pm 0.7nm] は, 光電子増倍管 [浜松ホトニクス: 1P28, 波長範囲 185~650nm, 最高感度波長 340nm] によって電気信号に変換される。この信号は, 励起用スピーカへ

の供給電圧信号とともに FFT アナライザに入力され、位相平均処理が行われる。任意の測定点における位相平均 CH 発光強度データは、FFT アナライザによって一時フロッピーディスクに貯えられる。全測定終了後、こ

のデータはコンピュータに読み出され各位相における二次元データに再構成される。なお、温度の場合と異なり、測定は手動で行われた。また、発光強度の情報は、奥行方向への視線に沿った積分情報である。



(a) Measurement system of 2D contour maps of phase averaged temperature

(b) Measurement system of 2D contour maps of phase averaged CH light emission intensity

Fig.3 Schematic diagram of measurement apparatus

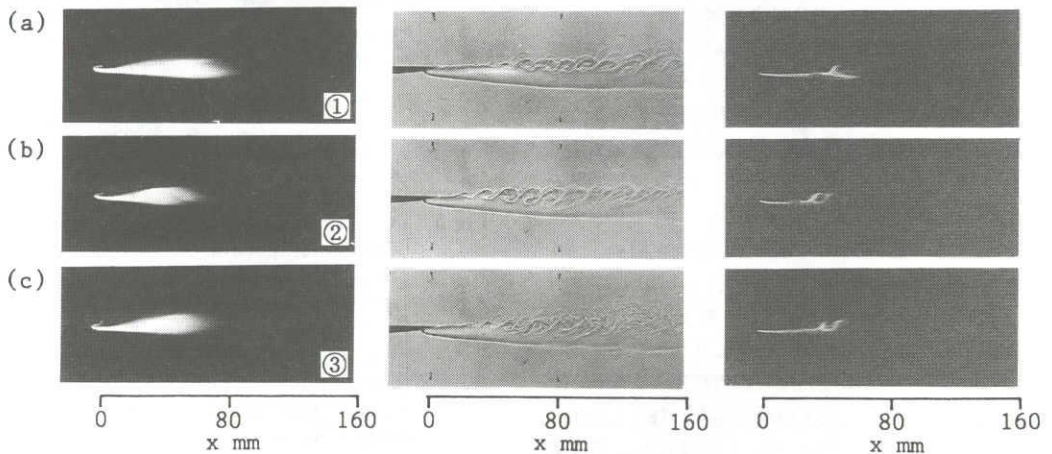


Fig.4 Direct and optical photographs of objective flames; (a) normal organized eddy diffusion combustion ①, (b) excited diffusion combustion ② [SPL_{xx} = 120dB], and (c) disturbed combustion with a cylinder ③. Left column: Long-time-exposure direct pictures (2sec), center column: flush shadowgraphs (10 μ sec exposure), and right column: instantaneous direct pictures (1/2000sec). These pictures show that the acoustic excitation enhances the combustion intensity and eddy motion.

3. 実験結果および考察

3.1 測定対象火炎の特性

Fig. 4に可視化写真を示す。長時間直接写真[左列]から、音響励起により火炎長が80mm [(a)]から60mm [(b)]まで短炎化されること、擾乱によっても短炎化が可能であること [(c)]がわかる。目視観察から、通常の組織構造火炎 [(a)]が低速側に輝炎をもつ⁽²⁾のに対し、励起火炎 [(b)]では、火炎附着部付近を除き青炎であり、燃料と空気の活発な混合が推察される。乱れにより混合が促進される(c)も青炎であった。

短時間直接写真[右列]から、励起火炎 [(b)]では、火炎が組織渦の輪郭に存在し、燃焼が組織構造に密接に関わっていることが示される。

瞬間影写真[中列]から、組織構造の存在 [(a), (b)], 乱れによる組織構造の崩壊 [(c)]が観察される。通常の燃焼 [(a)]では、組織渦のスケール・間隔が不均一であるが、励起火炎 [(b)]では、組織渦の発生位置が上流側に移行し、発生後すみやかに成長し、一定のスケールになっている。前報⁽¹⁾から、この火炎②が高い時間周期性を有していることがわかっているので、本報では以後、この火炎②のみ測定対象とし、位相平均測定および詳細な検討を行う。

3.2 位相平均二次元温度分析

Fig. 5 (a)~(h)に、位相平均処理によって得られた、音響励起火炎②の二次元温度分布の1/8周期 [0.25 msec] ごとの変化を示す。(a)~(h)により現象の1周期が捉えられている。図において、瞬間影写真 [Fig. 4 (b) 中列] の燃焼組織渦画像によく似た温度分布形状が確認される。この類似は、気体屈折率と気体温度との密接な関係から、影写真画像が気体温度の空間変化によって生じることに基づきされる。さて、燃焼反応が活発に起きていると考えられる領域についてみると、図 (a) [$\phi = (0/8)2\pi$] の $x = 25\text{mm}$ 付近で発生した燃焼組織渦 [図中矢印で示す] は、時間とともに成長し、図 (c) [$\phi = (2/8)2\pi$] の $x = 32\text{mm}$ 付近では、この燃焼組織渦の内部に、1500℃以上の高温領域が存在するようになる。同時に、燃焼組織渦の中心領域には低温の高速主流流体が存在し、燃焼組織渦はこの低温領域を巻き込むような形で成長する。位相 $\phi = (3/8)2\pi$ [(d)] になると、燃焼組織渦先端にも比較的高温 (1200℃以上) の領域が見られるようになる。これらの高温領域は、位相 $\phi = (7/8)2\pi$ [(h)] まで存在するが、これは周期の前半 [$(0/8)2\pi < \phi < (3/8)2\pi$] で起きる燃焼反応によって生成された既燃ガスの温度分布である。以上のことから、高速主流側の燃焼反応は、周期の前半において活発に起こっており、

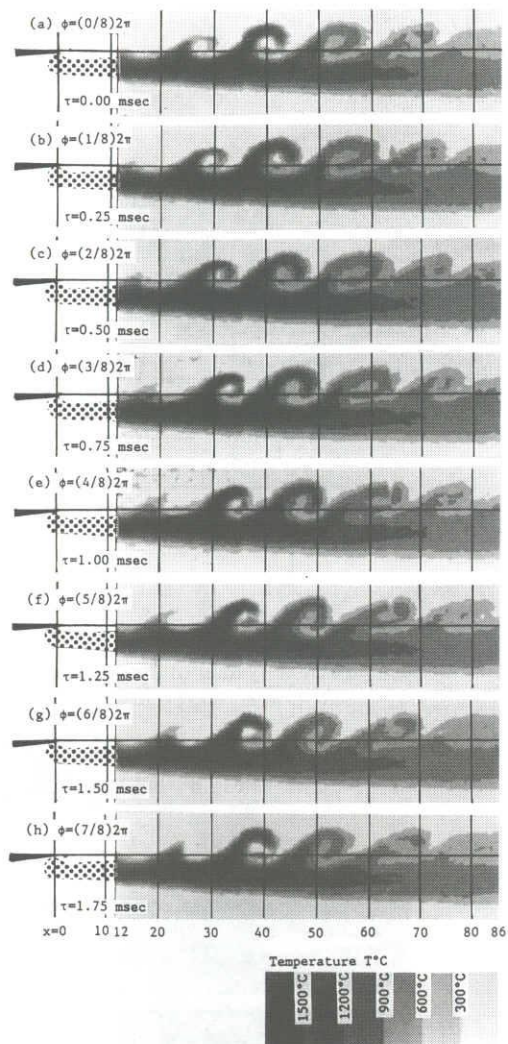


Fig. 5 Two-dimensional contour maps of instantaneous temperature distribution in each phase; this series of figures is reconstructed from the original P.L.A. data of fluctuating temperature measured at a number of positions by using a bare PR13 thermo-couple combined with RC compensator. This sequence represents the one cycle (the periodic time is 2msec) of the combustion process.

周期の後半ではあまり起こっていないと思われる。

Fig. 6に時間平均二次元温度分布を示す。低速主流側の広範な高温領域と、組織渦領域高速主流側にある狭い高温領域、およびそれらに形成される低温領域が

確認される。この低温領域を Fig. 5 からみると、組織渦の中心の軌跡に一致しており、組織渦内部に誘引された高速主流流体が原因であるといえる。

3.3 位相平均二次元 CH 発光分布

燃焼研究では局所的な発熱速度を OH, CH^(3, 4, 5), C₂^(3, 6)などの化学発光強度によって代表させることがしばしば行われる。本実験では、可視光であること、発光強度が大きいことから、CH 発光を測定対象とした。

Fig. 7 に、励起火炎②の位相平均 CH 発光強度の二次元分布を示す。各図において、位相は Fig. 5 に対応している。図から、燃焼反応の活発な高輝度領域が 25mm < x < 35mm の領域に現われること、高輝度領域が比較的薄い [3 mm 程度] ことがわかる。この高輝度領域はあたかも、伸縮しながらひらひらと舞うリボンの様な挙動を示す。この挙動を詳細に記述すると以下ようになる。組織渦の高速・上流側における高輝度領域 [(a)] は、(c) で太さを増し、(d) では組織渦低速側での火炎伝播によって上流方向に長く伸びる。その後 (f) では、上流端は組織渦に巻き上げられ渦の高速側の着火に関与し、長く伸びた高輝度領域は、(h) において分断される。ただし、燃焼の持続は、活発な挙動を示すリボン状の高輝度領域の上流端による上流方向への着火のみではなく、火炎付着部から伸びる静止した火炎シートおよびその高温既燃ガスによって主に行われているものと思われる。

Fig. 8 に、時間平均二次元 CH 発光強度分布を示す。この図は、燃焼組織渦の成長により輝度の高い領域の幅が急激に拡大する点、組織渦によって火炎片がかなり下流にまで流下している点で、長時間直接写真 [Fig. 4 (b) 左列] に非常によく一致している。

3.4 発熱速度変動・CH 発光・圧力変動の比較

振動燃焼の解析において重要なパラメータである発熱速度変動を、流体の運動とともに移動する計算領域内に含まれるエンタルピの時間変化として、二次元温度分布 [Fig. 5] から算出する。ただし、気体の物性値として空気の物性値を用いる。

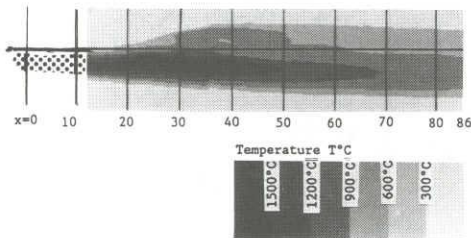


Fig. 6 Two-dimensional contour maps of time averaged temperature distribution.

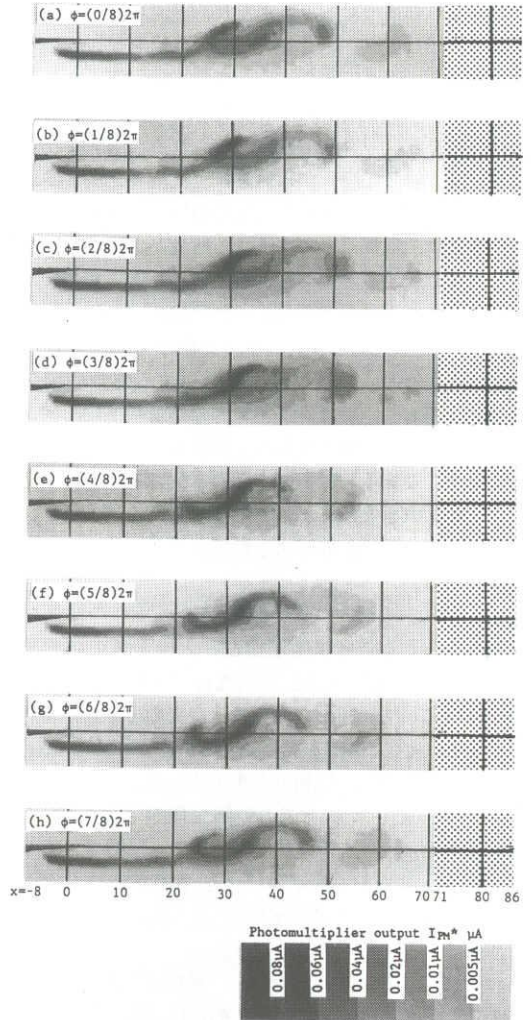


Fig. 7 Two-dimensional contour maps of instantaneous CH light emission intensity distribution in each phase; this series of figures is reconstructed from the original P.L.A. data of fluctuating CH light emission intensity measured at a number of positions. This sequence represents the one cycle (the periodic time is 2msec) of the combustion process. Each figures correspond to those of fig.5 in phase and time delay.

計算対象領域 [例として、Fig. 9 (a) に位相 $\phi = 0$, 位相時刻 $\Phi = 2\pi$ の場合を示す] は、測定範囲の上側境界 ① [$y = 8 \text{ mm}$]・下側境界 ③ [$y = -12 \text{ mm}$], ほぼ定常的に熱量が流入する上流側境界 ② [$x = 12 \text{ mm}$], および流体の

移動に対応して流下する下流境界④ [$x=g(\Phi)$] に囲まれた長方形の領域である。ただし、下流境界④は流体の移動に対応して流下させることで、境界を通して熱の授受が生じないようにした。Fig. 9 (a) は位相 $\phi = 0$ の場合であり、位相 $\phi = \pi$ 経過した図 (b) では、下流境界④は図のように、より下流に設定される。このように、計算領域に対して流入する熱量は上流境界②からの定常的な熱量のみであると考えられるので、計算領域で発生した熱量は、計算領域に含まれる熱量と上流境界②から定常的に流入する熱量の差として表される。

Fig.10に、計算対象領域内(奥行80mm)に含まれる熱量 [○印] の変化を示す。図中の実線の勾配はプロパン [$Q_L=1.4 \text{ l/min}$] の燃焼により発生する熱量の増加割合を示しており、計算対象領域内の熱量の平均的増加割合がこれにほぼ一致しており、物性値の仮定が比較的妥当であることを示している。図から、含有熱量の時間変動が比較的大きな値であることが示される。このことは、計算領域内における非定常な燃焼が活発であることを示唆している。

Fig.11に、領域内の熱量 [Fig.10, ○印] の時間微分として得られる発熱速度変動と、火炎全体の位相平均 CH 発光強度変動 I'_{PM} と、火炎近傍の位相平均音圧変動とを同時に示す。図から、発熱速度変動の挙動が位相時刻 $\phi = 4\pi$ 以降ではほぼ安定していることがわかる。したがって発熱領域は、位相時刻 $\phi = 4\pi$ のときの downstream 境界④ [Fig. 9 (a)] より上流の領域に限定される。また、正の発熱速度変動を示す位相期間は $(-1/8)2\pi < \phi < (3/8)2\pi$ 、すなわち周期のほぼ前半であることがわかり、位相平均二次元温度分布 [Fig. 5] による考察と一致する。

つぎに、この発熱速度変動を、発熱速度の指標である CH 発光強度と比較する。位相的には、発熱速度変動の変化 [○印] が僅かに遅れるが、ほぼ一致していると思わせる。また、変化波形は、両者ともに正弦波的というよりはむしろ三角波的である点でよい一致を示している。したがって熱発生速度の算出の方法として、従来までの

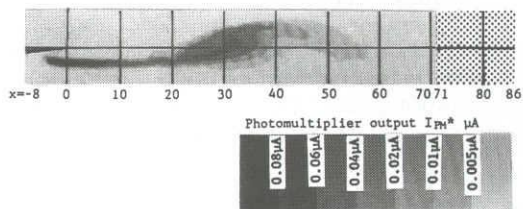


Fig.8 Two-dimensional contour maps of time averaged CH light emission intensity distribution.

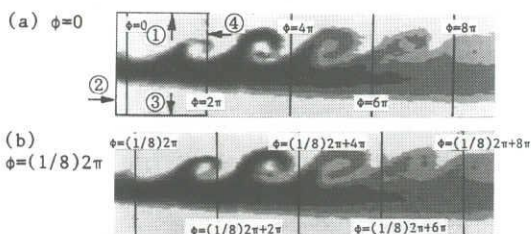


Fig.9 Examples of the calculation regions; the region is the domain bounded by upper ①, lower ③ and upstream ② limits and the downstream ④ limit line. This line ④ is moved down in accordance with fluid behavior

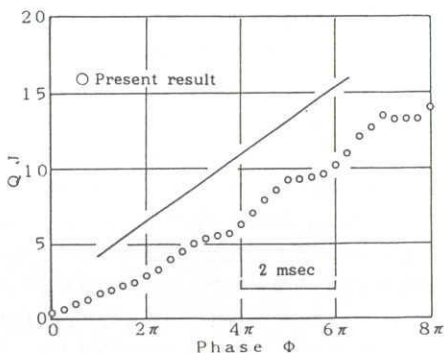


Fig.10 Development of quantity of heat involved in the calculation region is given in fig.9; the gradient of the solid line in this figure indicates the heat release rate evaluated by fuel flow rate [$Q_L=1.4 \text{ l/min}$] and lower heating value of fuel [C_3H_8]

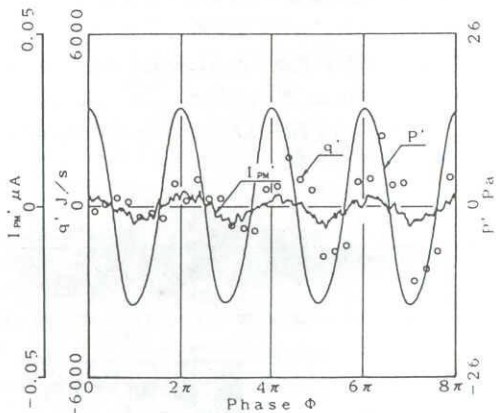


Fig.11 Variation of heat release rate q' , phase-averaged pressure P' , and phase-averaged over-all CH light emission intensity I'_{PM}

化学発光による方法に加えて、温度分布からの算出もまた可能であることが示された。

測定部内における音圧変動 p' と発熱速度変動 q' から、Rayleigh の判定に必要な積分値 $\int (p'q') dt/T$ [T: 振動周期] が $28 \text{ J} \cdot \text{Pa}$ と算出された。これは正の値であるので、燃焼現象が音響場にエネルギーを与えていること、発振条件が満たされることが示される。本研究では、Rayleigh 積分の算出において、化学発光強度による間接的な方法ではなく、発熱速度を直接用いたため、積分値の正負のみではなく、値の算出もまた可能となっている。

4. 結 言

本論文では、燃焼基礎研究に与える燃焼制御の貢献を明確に示すため、高い時間周期性をもつ音響励起火炎に対し、位相平均法を前提とした多測定点での点測定を行ない、小規模な点測定システムを用いて、変動する二次元燃焼現象の瞬間的な二次元温度分布および二次元 CH 発光強度分布の挙動を捉えることを目的とした。対象とした燃焼場は、乱流燃焼の重要な要素となる渦構造をもつ基本的な燃焼流れ場であり、この燃焼流れ場のより詳細な制御研究は能動的燃焼制御技術に関する多くの情報をもたらすものと期待される。

本論文で得られた結果は以下のように要約される。

- (1) 各位相における瞬間的な二次元温度分布が得られ、温度分布においても組織渦が確認された。組織渦は、輪郭をなす高温領域とそれに巻き込まれるように誘引された高速側主流流体の低温領域からなる。
- (2) 位相平均法により、各位相における CH 発光強度の二次元分布が得られた。燃焼反応の活発な高輝度領域が $25\text{mm} < x < 35\text{mm}$ の領域に現われること、高輝度領域が比較的薄く [3mm 程度]、伸縮するリボン状に現れることがわかった。組織渦低速側での火炎伝播によって上流方向に長く伸びた発光領域は、上流端が組織渦に巻き上げられることで渦の高速側の着火に関与する。
- (3) 発熱速度変動が、流体の運動とともに移動する計算領域内に含まれるエンタルピの時間変化として、二次元温度分布から算出された。発熱速度変動の挙動が位相 $\Phi = 4\pi$ 以降ではほぼ安定していることから、発熱領域は位相時刻 $\Phi = 4\pi$ における下流境界より上流の領域に限定される。正の発熱速度変動を示す位相期間は $(-1/8)2\pi < \phi < (3/8)2\pi$ であり、周期の前半である。これは、位相平均二次元温度分布による考察と一

致する。

- (4) 発熱速度変動と CH 発光強度との比較において、位相はほぼ一致し、波形は、正弦波というよりはむしろ三角波であるという点でよい一致が示された。したがって、従来までの化学発光による方法に加えて、温度分布からも発熱速度の算出が可能であることが示された。
- (5) Rayleigh の判定に必要な積分値 $\int (p'q') dt/T$ [T: 振動周期] が $28 \text{ J} \cdot \text{Pa}$ [正] と算出され、発振条件を満たすことがわかった。化学発光強度ではなく発熱速度を用いたため、積分値の正負のみではなく、値の算出がはじめて可能となった。

本研究の実施に対し、本学大学院生・家田恒君、本学学生、水野隆司君(当時)、小林修君、松本直樹君の協力を得た。記して謝意を表する。

文 献

- (1) 石野洋二郎・小島利昭・大岩紀生・山口馨起、音響により励起された平面せん断組織構造火炎 (I) - 音響による燃焼特性の変化 -, 名古屋工業大学紀要, 44, (1993), 掲載.
- (2) 石野洋二郎・山口馨起・大岩紀生、広がり流路内の火炎の安定性および保炎(平面せん断流中の拡散火炎の構造と挙動), 日本機械学会論文集(B編), 57巻 538号, (1991), 2132.
- (3) Samaniego, J. M., Yip, B., Poinso, T. and Candel, S., Combustion Instabilities in a Side-Dump Model Ramjet Combustor, Preprint of Int. Symp. on Pulsating Combustion, (1991), Paper No. D-8.
- (4) Hedge, U. G., Reuter, D. and Zinn, B. T., Sound Generation by Ducted Flames, AIAA Journal, Vol. 26, No. 5, (1988), 532.
- (5) Ishino, Y., Yamaguchi, S., Ohiwa, N. and Kojima, T., Acoustic Excitation of Plane Diffusion Flames, Abstracts of Symposium Papers and Abstracts of Poster Session Presentations, (1992), 192.
- (6) Huynh huu, C., Billoud, G., Galland, U. S. and Candel, S., Adaptive Strategies for Combustion Instability Control, Preprint of Int. Symp. on Pulsating Combustion, (1991), Paper No. G-4.