

He-Air 混合ガスジェットの濃度分布に及ぼす音波の影響

中園 与一

Effect of Acoustic Wave on Concentration Distribution in the He-Air Mixing Jets

by

Yoichi NAKAZONO

(Received: 19 OCTOBER 2009, Accepted: 22 FEBRUARY 2010)

The effect of acoustic wave on the concentration distribution in the He-Air mixing jet has been studied. A conventional concentration probe, which measures a gas concentration, has been improved with a hot-wire probe used for the measurement of velocity in the jet. The concentration probe measures the He concentration in the jet with accuracy. As the results, the He concentration profiles in the jet are influenced greatly by an acoustic excitation of Strouhal number of 0.26 based on the velocity of air. The acoustic excitation gives rise to the bifurcation of the concentration in the jet.

Key Words: Helium, Mixing jets, Concentration, Sound wave, Bifurcation

1. まえがき

燃焼室内において空気とガスの混合状態を制御できれば、燃焼効率を高めることができる。そこで、多くの研究者はノズル形状の変化や旋回流を与えてパッシブな研究を行ってきた。音波を用いてジェットの剪断層を制御するアクティブな方法は主に空気もちいて多く行われてきたが、軽いガスと空気の混合ガスを音波で制御した研究は殆ど見られない。

円形および環状ジェット等の空気噴流への音波の励起実験によると、適切な周波数で拡散が著しくなり、混合が促進されること²⁾が知られている。燃焼という観点から見ると、ガスの混合を促進して燃焼効率を高めるという意味で歓迎される。混合ガスからみると、個々のガスは独立して制御される可能性がある³⁾。そのときの濃度分布はどのようになるのかが関心がある。それ故、混合ガスを用いて研究することが望まれる。一方最近水素燃焼によるエンジンが話題となっているが、水素のような軽いガスと空気が混合したときの燃焼を促進させるには、どのようにするか一つの課題である。

こうした背景をもとに軽いガスと空気との混合ガスジェットの濃度分布が音波によってどのような影響を受けるか検討することとした。

水素は扱いが大変なため、水素の代わりにヘリウム He を用いることとした。ヘリウムガスは不燃性であるため、火による危険性も無く、人間に無害である。

また、市販の熱線プローブを用いて従来の熱線濃度計を改良した結果、濃度計の製作が容易になった。

2. 実験装置

Fig.1に実験装置を示す。空気はドライヤ (800W) を用い、この流量は電圧計とスライダックを用いて調整される。ヘリウムはヘリウムボンベからヘリウム安定用タンク及び流量計を通じて送られる。これらの空気とヘリウムはプレナム室前の管内で混合されて、プレナム室で均一になるようになっている。この混合ガスは直径 8mm のノズルより大気に噴出される。

ノズル出口から噴出された混合ガスの濃度は移動台上に設けられた濃度測定用プローブ (熱線濃度計) にて計測する。濃度プローブの移動制御と計測値もパソコンにより自動的に処理されるシステムとなっている。

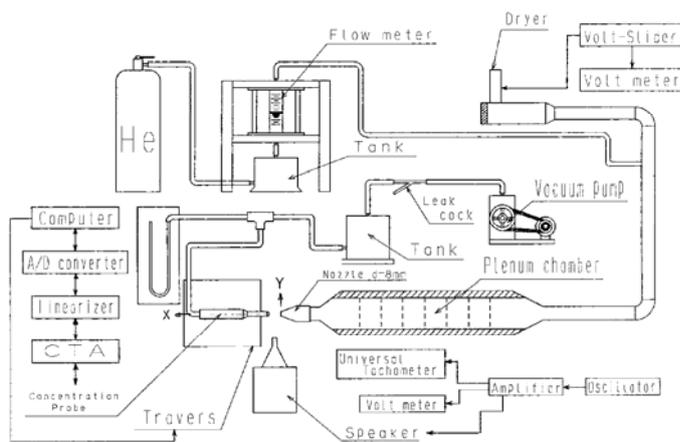


Fig.1 Experimental apparatus.

音波は発振器によって発生された後、アンプで増幅されてスピーカから放射される。放射音波の出力電圧は電

* 産業工学部機械システム工学科教授

圧計にて、その周波数はユニバーサルタコメータにて計測される。スピーカ（直径 15cm）の先には円錐型の筒が取り付けられ、これは 2 インチ直径の短い管（長さ 100mm）に接続されている。この短い管の先端部の中心はノズル出口から下流側に 30mm、ジェット中心軸から半径方向 50mmの位置に設置し、ジェット中心軸方向に向けた。

3. 熱線濃度計

熱線濃度計は Brown 等³⁾によって開発された。飯田等⁴⁾はこの熱線濃度形を用いて混合ガスが平板に衝突したときの濃度分布を計測している。著者のグループ⁵⁾も 1994 年に He-Air 噴流の濃度分布を計測し、混合ガスの濃度計測をするのに熱線濃度計は有効な結果を得た。本論文はそのときのレビューも含まれている。レーザーによって計測も可能である⁶⁾が、それよりも熱線濃度計はより簡単に、かつ安価な方法で計測できる利点がある。

3.1 原理

熱線濃度測定用プローブ(図は改良プローブ)の原理図を Fig.2 に示す。熱線における電気抵抗の変化を及ぼす要因には、熱線周囲の気体の流速・熱伝導率・密度・粘性・熱線と周囲の温度差がある。この熱線に測定気体が音速で衝突すると、すなわち、測定気体の流速が一定となると、密度・粘性・温度は、ほぼ一定となる。したがって、濃度測定用プローブによって得られた電圧は濃度のみに関係する。ガラス管の先端部を熱で溶かして、先端部を丸め、その先端部をペーパーにて摩擦していくと、図に示されるような微小な穴があげられる。このガラス管内の圧力を真空ポンプで真空にして、外部から混合ガスを吸い込む。吸い込まれたガスは音速で微小直径 (5 μm) の熱線に達するので、濃度プローブは混合ガスの濃度を計測できる。

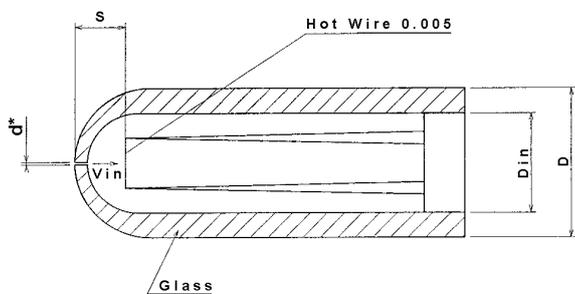


Fig.2 Theorem of concentration probe.

3.2 動的感度

熱線濃度計の時定数は、

- 1) プローブ先端に使われるガラス管の幾何学的形状及び気体の速度
- 2) プローブ内部の真空度及びガラス管内部の幾何学的形状
- 3) 増幅器を含めた熱線の電氣的応答感度

の三つの要因に支配されると考えられる。1)については、プローブのガラス管直径を小さなものを使用し、ガラス管先端部を流線型にすることにより時定数を小さくすることができる。2)と 3)については、時定数 τ を次式により推定することができる³⁾。

$$\tau = \frac{S}{a} \left(\frac{D_{in}}{d^*} \right) \left(\frac{p_{in}}{p_{\infty}} \right)^{1/\kappa} \left(\frac{\kappa+1}{2} \right)^{1/(\kappa-1)} \quad (1)$$

但し、 a は混合気体の音速、 κ は比熱比、 S は熱線の位置、 D_{in} はガラス管の内径、 d^* は混合ガスがガラス管に入るノズル部の直径、 p_{in} は濃度計内部の圧力、 p_{∞} は大気圧である。今回使用した濃度計と混合ガス(濃度 40%)の値は $a = 560\text{m/s}$ 、 $\kappa = 1.5$ 、 $D_{in} = 4.0\text{mm}$ 、 $d = 0.012\text{mm}$ 、 $S = 2\text{mm}$ 、 $p_{in} = 25\text{mmHg}$ 、 $p_{\infty} = 760\text{mmHg}$ であるので、これらの数値を(1)式に代入すると、 $\tau = 163 \mu\text{sec}$ となる。この値は小さいので、プローブの応答感度は優れている。剪断層での速度変動スペクトルにおいて 1000Hz 以下が主であった(濃度と速度変動は対応している⁵⁾)ので、濃度プローブによる濃度の時間的な変動値は実際の濃度変動に十分に追従している。

3.3 改良型熱線濃度計

従来の濃度プローブの製作方法は熱線が 5 μm と細いため、試作中ワイヤが切れやすく、製作が面倒な面があった^{3,4)}。これはガラス管の外側の上部と下部に細長い銅箔を貼り、これら銅箔に直角に熱線を張る方法のため、熱線が緩やかに張られたり、切れたりする場合が多い。

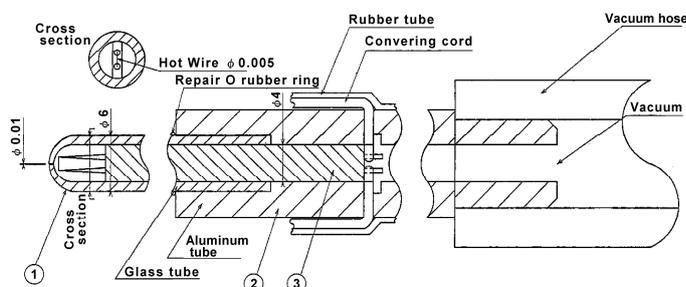


Fig.3 Schematic of concentration probe

(①:Glass tube, ②:Aluminum, ③: Hot-wire probe).

したがって良好な濃度計を作るには熟練した作業が必要であった。そこで、著者は誰にでも製作できるように市販の熱線プローブを利用して濃度計の改良をした。このことにより、確実に容易に製作でき、また失敗が少ない分安価に製作が可能となった。噴流中の濃度計測でも、ワイヤが切れるということはほとんど見られなかった。Fig.3 に試作した熱線濃度プローブを示す。

4. 実験方法

4.1 濃度値の決定と噴流での濃度計測

試料採取器 (200CC) にて空気とヘリウムのヘリウム濃度 50, 40, 30, 20, 10%の混合ガスをそれぞれつくり、得られた混合ガスをガスバッグにそれぞれ溜めた。まず50%濃度の混合ガスが入ったガスバッグの先端部に熱線濃度計を接続した。事前に濃度計の先端には真空用グリースを塗って、ガスバッグと濃度計の間で漏れが無いようにした。接続した後に50%濃度での熱線風速計(濃度計の計測は熱線風速計と同じ要領)の電圧値を0.5Voltにあわせた。次に、濃度40・30・20・10%にてそれぞれつくった混合ガスのガスバッグを濃度計に接続して得られた電圧値を記録した。これらの作業を3回繰り返して平均を取るが、得られた結果は各濃度で8%以内のバラつきで、実際の計測にはほとんど支障はないと判断された。これらの結果を図に表わし、濃度と電圧の関係式を作成し、電圧がわかれば、濃度が即わかるようにした。

噴流での実験はヘリウム体積濃度40%，流量0.00503m³/sで行われ。そのときの混合ガスの噴出速度は10m/s、周囲空気に対する混合ガスの密度比は0.66である。実際の計測に当たっては、プレナム室が大きいいため、プレナム室でのHe-Airの混合濃度が一定(40%)になるまで時間を要す。それ故濃度が安定するまで時間をおき、ノズル(直径8mm)出口でのヘリウム濃度が40%の電圧になった後、実験を開始した。ステッピングモータに接続された移動台の濃度計移動はコンピュータ制御により行われ、また得られた電圧も自動的にコンピュータにインプットされて、プログラムを用いて濃度がそのまま出力されるようにした。

実際に出力される濃度はかなり変動しているの、濃度分布はプログラム上で平均化処理してスムーズな分布とした。濃度の測定範囲は、ジェット軸方向X=4~84mm、ジェット半径方向Y=-30~30mmである。噴流中の濃度計測における濃度計の検定は一つの実験項目ごとに最初と最後で行った。最後と最初における濃度の電圧値が異なる場合、その実験項目については、再びキャリブレーションを行い、噴流中の濃度実験をやり直した。

4.2 放射音波の選択

音波によって混合ガスジェットの濃度分布を効率的に制御するには、音波の周波数の選択が重要である。そこで、その選択方法として、混合ガスをノズルから噴出して、ジェット剪断層における速度変動スペクトルを熱線にて計測した。そのスペクトルの中で鋭いピークを示した周波数を中心に放射音の周波数を選択した。各軸位置での結果をもとに、68,135,165,198,395,600,800Hzの周波数を選択した。

5. 実験結果

Fig.4に噴流中の濃度の半径方向分布を示す。縦軸は体積濃度C(%) (以後、濃度と称す)、横軸は半径方向の無次元距離(Y/D)である。この分布を中心軸上の濃度分布とジェット軸方向の無次元距離(Y/D)で整理した図をFig.5に示す。ノズル直径5倍後の下流域では、濃度分布は一般的な速度分布と同様に距離の1乗で減衰している。これは従来の結果と一致する⁸⁾。次に濃度分布を等値線図で整理した結果をFig.6に示す。図から濃度分布は一般的な速度の等値線図⁴⁾と類似している。濃度分布が上下で対称性を示さないのは浮力の影響である。

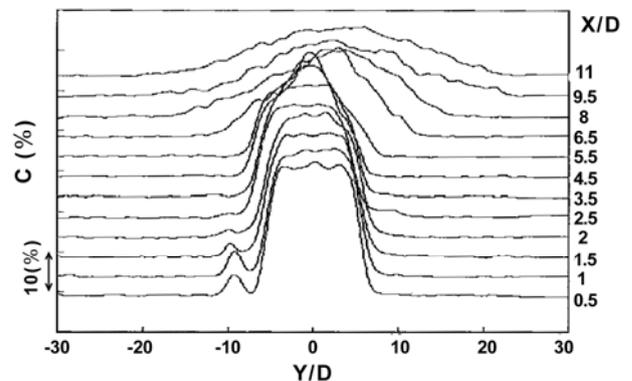


Fig.4 Radial profile of He concentration in the jet.

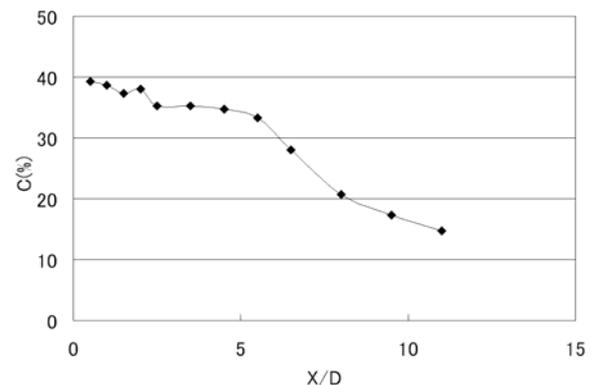


Fig.5 Concentration distribution on the jet center axis.

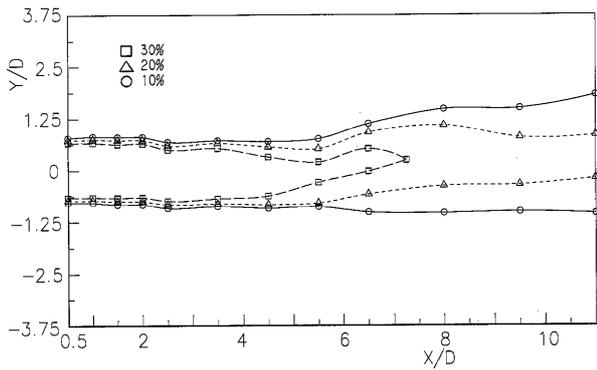
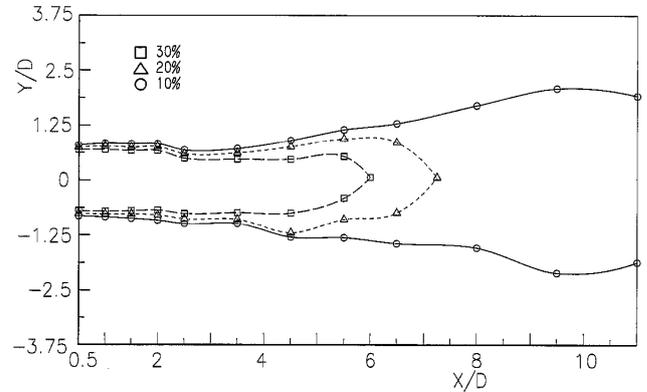


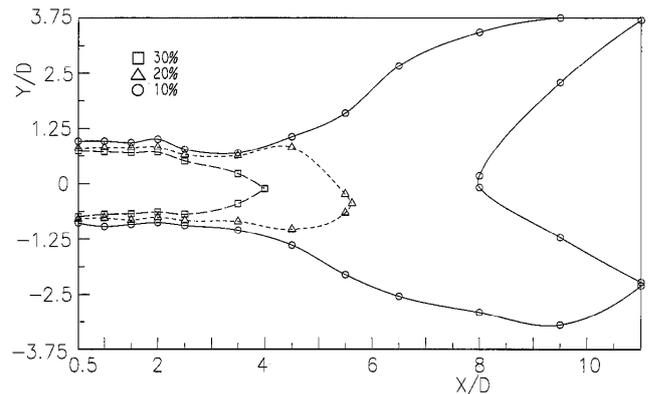
Fig.6 Iso-contours of He concentration.

Fig.7 はスピーカから放射された音圧レベルがジェット中心軸上で一定 (80dB) のときのジェットの等濃度線図を示す。放射周波数 68Hz から周波数が高くなると、等濃度の幅も広がることがわかる。198Hz では濃度値 10%は分岐した分布を示している。この周波数より周波数を高くすると、濃度の分岐はなくなる。更に周波数を高くすると、濃度分布の幅も狭くなる。そこで、濃度分布の幅を調べるために、 $X/D = 8$ における濃度 10%値での噴流幅(b)を、周波数の関数として整理した図を Fig.8 に示す。 D はノズル直径である。Fig.7 から、198Hz での音波の励起が等濃度値の幅を広げることがわかる。ヘリウム濃度 40%における混合ガスの噴出速度は 10m/s である。ノズル出口からの流量 Q はヘリウムの流量と空気の流量である。中園¹⁾はプレナム室の入口端にスピーカを設けて音波をプレナム室に照射した結果、周波数によりノズル出口から噴出する混合ガスの濃度が異なる結果を得た。特に低周波の音波ではヘリウムはノズルからまったく噴出されず、空気のみがノズルから噴出されるという結果を得た。その後音波の照射をストップすると、濃度の濃い混合ガスが噴出されることが判った。このことから、混合ガスは音波により分離されることが判った。今回のように混合ガスがノズル出口で音波により励起される場合も、空気とヘリウムは単独に音波に作用されることが考えられる。そこで、空気流量は混合ガスの 60% であるので、ヘリウムがない状態で、空気が単独に噴出されたとすると、空気速度は 6m/s となる。この空気速度とノズル直径を代表長さとしたストローハル数 (fD/U) で表わすと、0.26 に相当する。Matta 等⁹⁾は空気に煙を 10%挿入して噴流を噴出させ、かつ本研究と同様に噴流の横方向から音波を挿入した結果、噴流の速度分布はストローハル数 $St = 0.2 \sim 0.3$ の励起で最も影響を受けると述べている。また、噴流は分岐されると述べている。しかし、空気のみ噴流に上流から励起した場合、 $St = 0.3 \sim 0.5$ 励起が効果のある報告^{10) 11)}もある。ヘリウム 100%

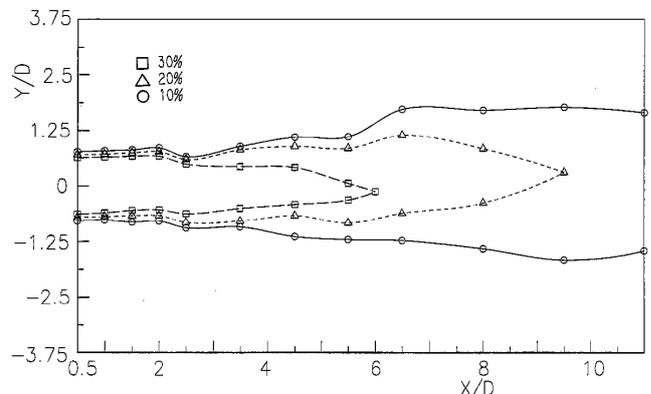
の噴流が流量 0.002m³/s で噴出したとすると、ストローハル数は 0.4 となる。すなわちこの場合も、噴流は音波によって著しく拡散される可能性がある。



(a) Excitation frequency 68Hz



(b) Excitation frequency 198Hz



(c) Excitation frequency 800Hz

Fig.7 Iso-contours of He concentration at the excitation of 80dB.

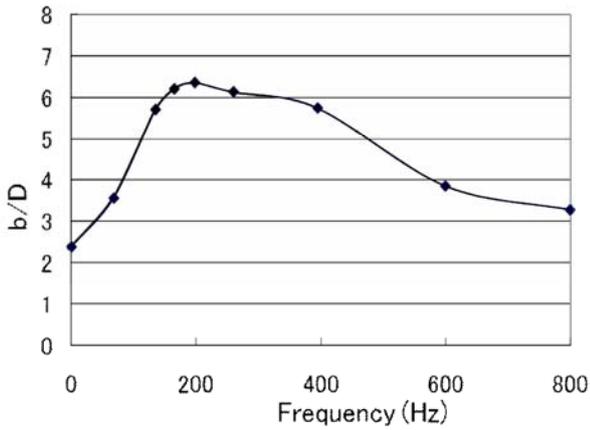
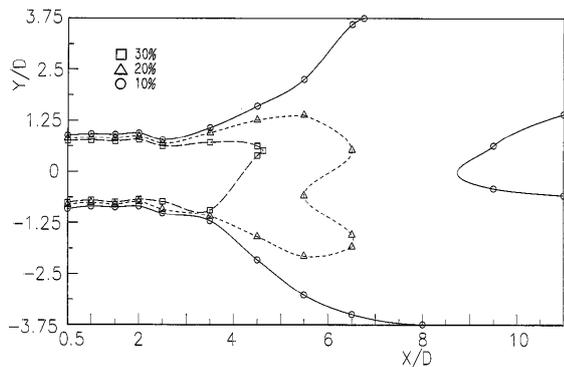
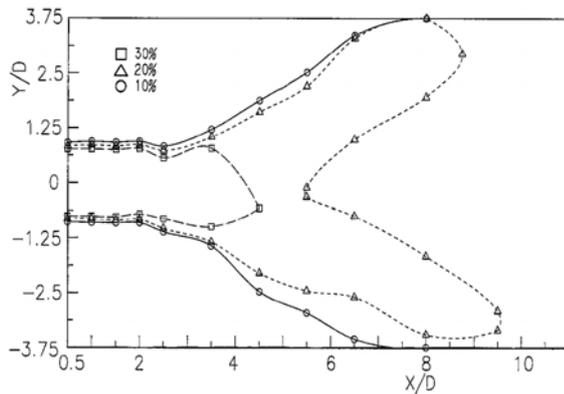


Fig.8 Jet width at 10% He concentration, SPL=80dB.



(a) Excitation SPL 85dB

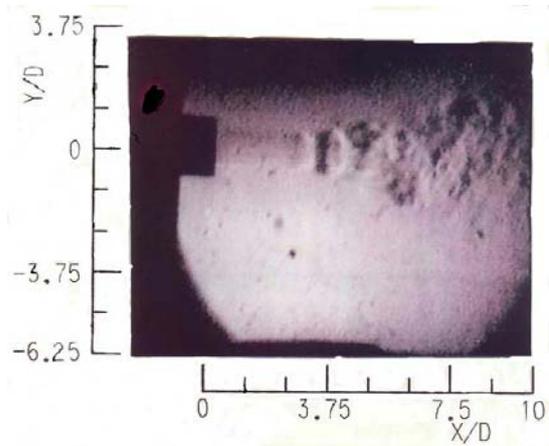


(b) Excitation SPL 88dB

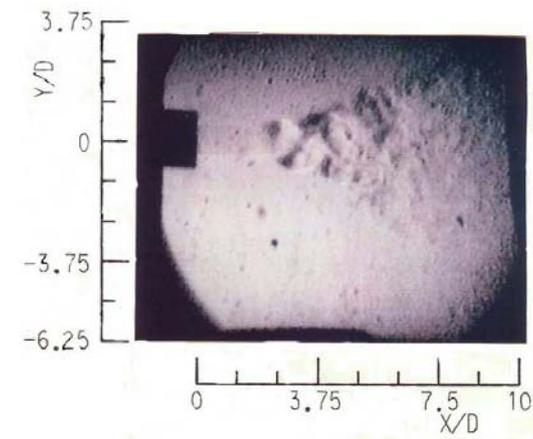
Fig.9 Iso-contours of He concentration at a frequency of 198Hz.

次に音波の強さによって濃度分布がどのように変化するか調べてみた。Fig. 9 は 85dB と 88dB の音で周波数 198Hz によって励起されたときの等濃度線を示す。図から、80dB のときは濃度 20% では濃度の分岐は見られなかった (Fig.7(b) 参照) が、Fig.8(a) の 85dB では、濃度値が分岐している。更に放射音圧が強くなると、濃度 20% での分岐もさらに大きくなっている。これはヘリウムが音波によって大きく分岐されるためと思える。分岐は空気噴流に強い音波が照射されたときの速度分布でも生じるが¹²⁾、それよりも軽いガスのヘリウムは分岐が大きいと考えられる。音波の強さが強いほど混合ガス濃度の分岐が著しいことがわかる。

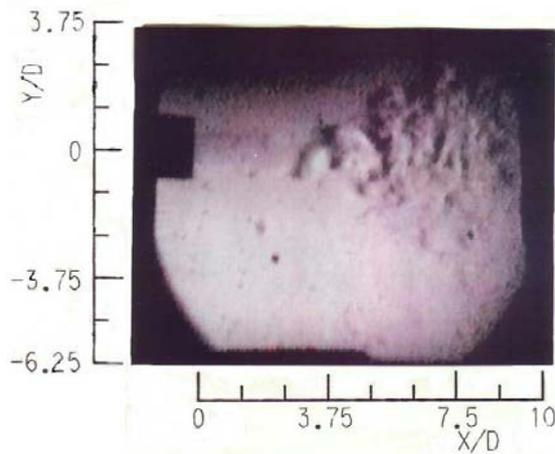
Fig.10 は He-Air 混合ジェットのスチリーレン写真を示す。各写真は 400 コマの高速度ビデオカメラで撮影したものである。写真の $X/D=0\sim5$, $Y/D=6.25$ の位置に見られる黒い箇所はスピーカに接続された 2 インチ管の出口である。音圧レベルはジェット中心軸上で音圧レベルを示す。励起が行われない場合、 $X/D=2.5$ の位置付近でリング状の渦が発生され、それが下流側に移流する。ノズル径の約 5 倍の軸位置になると、この渦は崩壊して不規則な渦となる。音波を放射すると、渦は音波に左右されて、渦塊が下流側にも続くようになる。198Hz では渦塊がより明瞭になっている。この渦は音波の周波数サイクルに応じて放出されてジェット軸を境に分岐される。そして下流側に移流する。渦塊の間隔も音波の周波数に対応する。本論では示していないが、この流れを平均化して各 X 軸の断面を見た場合、断面は Y 軸を長軸 (音波の伝播方向) として楕円形になる。励起音が強くなると、Fig.10(d) に示すように、渦塊の分岐はさらに著しくなり、噴流の拡散も著しく大きくなる。励起周波数が高くなると (Fig.10(e) 参照)、塊は周波数に応じて小さくなり、また噴流の広がりも小さくなるのがわかる。



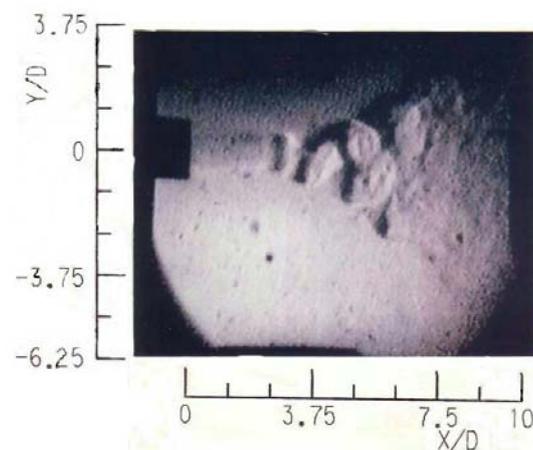
(a) No sound



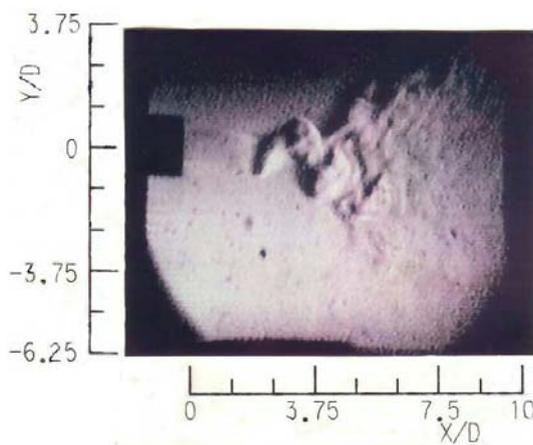
(b) Freq.=68Hz, SPL=80dB



(e) Freq.=260Hz, SPL=80dB



(c) Freq.=198Hz, SPL=80dB



(d) Freq.=198Hz, SPL=88dB

Fig.10 Schlieren photographs of He-air gas jet, 40% concentration.

6. 結論

本研究では 40%ヘリウム濃度の混合ガスジェットに音波を照射して、励起周波数が濃度分布に及ぼす影響を調べ、次の結論が得られた。

- (1) 市販の熱線プローブを用いて従来の熱線濃度計を改良した熱線濃度計を試作して、濃度計測が可能なが分かった。
- (2) 混合ガスジェットの濃度分布は音波の強さと周波数に影響されて、空気速度に基づかれたストローハル数 0.26 のときが最も噴流の拡散が大きいことがわかった。
- (3) 濃度の濃い箇所は音波によってジェットの両側に分岐される。また、その渦塊は音波の周波数に依存し、ジェット軸を境に交互に形成されて下流側に移流される。

本論文は、1994年に研究されたものである。したがって研究として古い。最近水素エンジンの燃焼がエネルギー問題よりクローズアップされ、音波によりその効果があると思われたので、再整理してまとめたものである。これまで空気ジェットに音波を照射して流れを励起した研究は多いが、混合ガスジェットの濃度と音波との関係については、研究例は見られないので、結果としては新しさがある。

本研究にご協力頂いた 1994 年度当時の卒業生、太田智久・小川浩之の両氏に心から感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 中園与一・清本公二：音波によるHe-Air混合ガスのガス分離について，日本音響学会誌，48-10（1992）pp. 733-735.
- 2) Nakazono, Y. & Kiyomoto, K. : Structure of an acoustically excited annular jet, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 40 (1991) pp. 191-195.
- 3) Brown, G. L. & Rebollo, M. R. : A Small, Fast-response Probe to Measure Composition of a Binary Gas Mixture, 10(5) (1972), pp. 649-652.
- 4) 刈田誠一郎・田辺秀明・飯田訓正・佐藤豪：壁面に衝突する非定常噴流に関する研究（壁面に垂直に衝突させた場合），日本機械学会論文集，51(471) (1985)pp. 3648-3654.
- 5) 太田智久・小川浩之：He-Air混合ガスジェットの濃度分布に及ぼす音波の影響，1994年度九州東海大学工学部卒業論文.
- 6) Era, Y & Saima, A. : Turbulent mixing of gases with different densities, *Bull. JSME*, 20(139) (1977) pp. 63-70.
- 7) 江良嘉信：熱線による気体の濃度・速度の同時測定（第1報：測定原理，第2報：測定例），日本機械学会論文集(B編)，56(528) (1990) pp. 214-227.
- 8) 田辺秀明・反橋智英・鈴木直美・藤本元・佐藤豪：非定常噴流に関する実験的研究，日本機械学会論文集 (B編)，48(434) (1982) pp. 2088-2095.
- 9) Matta, L.M., Wuersig, A. h., Choung, J. I., Jagoda, J. I. & Zinn, B. T. : Excitation of a round jet transverse standing acoustic oscillations, *AIAA Paper 96-0642* (1996).
- 10) Crow, S. C. & Champagne, F. H. : Orderly atructure in jet turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 48 (1971) pp. 547-592.
- 11) Lepicovsky, P. J. , Ahuja, K. K. , Brown, W. H. & Morris, P. J. : Acoustic control of free jet mixing, *AIAA Paper 85-0569* (1985).
- 12) 中園与一, Ahuja, K. K. & Mendoza, J. M. : キャビティによるジェットの混合促進, 日本機械学会論文集, 63(608) (1997) pp. 101-108.

