

乱流燃焼制御用アクチュエータの性能評価 - 燃料流量が脈動する層流拡散火炎の音響特性 -

環境・エネルギー研究領域 次世代動力研究グループ *春海 一佳、岸 武行
大気環境保全研究グループ 井亀 優
環境影響評価研究グループ 平岡 克英
海上安全研究領域 危険物輸送・防災研究グループ 岡 秀行

1. まえがき

近年、地球環境保護を目的として NO_x 等の大気汚染物質の削減、あるいは二酸化炭素に代表される温室効果ガスの削減が広く求められている。物流部門も例外ではなく、輸送効率の向上、あるいはエネルギー利用効率の向上あるいはエネルギー発生技術の低環境負荷化への要求が高まっている。そのため、船舶輸送分野においてもガスタービンエンジンの低 NO_x 性、運用性、小形高出力の特長を生かしたスーパーエコシップや T S L の開発計画が進められている。ガスタービンエンジンは、ディーゼルエンジンと比較すると低 NO_x 排出型エンジンであるが、さらなる低 NO_x 化のためには希薄予混合燃焼法の採用が技術的課題となる。

希薄予混合燃焼は逆火、吹き消え、燃焼騒音・振動といった燃焼不安定を生じやすく、運転範囲が限られてしまう。特に燃焼騒音・振動は機器の損傷にまで至る可能性があるため、その抑制が望まれる。最近、燃焼騒音・振動抑制を制御により実現しようという複数の試みが見られる[1]。この中で燃焼器内に主火炎とは別途設けた 2 次火炎を変動させ制御する手法がある。しかし、同手法は、主火炎と 2 次火炎の流体力学的干渉や他の物理プロセスにおける干渉による燃焼騒音・振動の抑制なのか、あるいは能動騒音制御 (Active Noise Control : ANC) で行われているような騒音発生源とは別に設けた 2 次音源 (スピーカーや 2 次火炎から発生する圧力変動) の音響的な干渉による音の低減なのか必ずしも明確ではない。これらの現象理解、あるいは制御における現象のモデル化を目的として、火炎とそのダイナミクスに関する研究が広く行われている[2]。

本研究では、ANC の手法による燃焼騒音低減を想

定し、微小拡散火炎において燃料流量を変動させることで発熱変動を発生させ、それにより生じる圧力変動を騒音抑制のための 2 次音源とすることを考えた。そのための火炎変動を発生するデバイスとして、 piezoceramics 素子を用いたバルブを選択し、その性能を評価することを目的として実験を行った。実験では、同バルブによりほぼ正弦波状の燃料流量変動を生じさせ、その拡散火炎からの発熱変動により発生する音を計測し、燃料による音発生の違い等の基礎的知見を得た。

2. 実験装置および計測方法

2. 1. ピエゾバルブ

流量変動を発生させるためのデバイスとして、 piezoceramics 素子を用いたバルブ (Maxtek Inc. 製、MV-112、以下では piezobalve と称する) を選択した。図 1 に piezobalve の構造を示す。

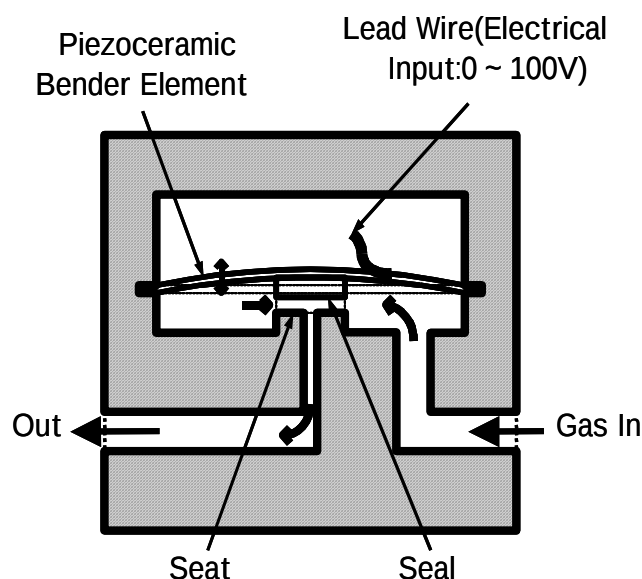


図 1 ピエゾバルブの構造

図中のダイヤフラム (Bender Element) に電圧を加えることで、変形し Seat と Seal の間の空隙の開度が変化する。この開度は、外部に設けられた駆動電源 (エヌエフ回路設計ブロック製、HSA4011 バイポーラ電源) に任意波形発生装置 (エヌエフ回路設計ブロック製、WF1945) から制御信号を入力することにより制御され、入力に対し線形に近い応答を示す。すなわち、ほぼ正弦波状の燃料流量変動を発生させることが可能である。この流量変動は音の発生をもたらし、さらに燃料を燃焼させた場合には発熱変動を生じることによる音の増大が予想され、2 次音源としての利用が期待される。

2. 2. 計測方法

ほぼ線形な応答性を有するデバイスを制御システムに組み込んだ場合、モデル化が比較的容易、あるいはモデル化に伴う誤差が相対的に少なくなることが期待できる。ひいては、制御システム全体の性能向上をもたらすものと期待できる。そこで、ピエゾバルブの入力信号への応答を確認するため、同バルブから発生する音を計測した。実験系概要を図 2 に示す。ピエゾバルブ入口に燃料を供給し、バルブ出口に取り付けられた細管 (内径 2mm、バルブ取り付け位置から孔までの長さ約 120mm) に燃料噴出孔 (直径 1mm) から燃料を噴出する。燃料噴出口直径およびそこでの平均流速に基づく Re 数は 1 0 0 ~ 1 0 0 0 である。バルブ出口から細管を経て噴出した燃料は開放大気中で拡散火炎として燃焼する。燃料は一定圧力 (0.2MPa) でバルブ入口に供給されバルブ位置でチョークしており、ほぼ開度に比例した燃料流量が得られるため、開度を変動させることにより流量変動が発生し、それに伴って発熱変動を生じる。

実験では、燃料流量変動のみから発生する音と燃焼変動に起因する発熱変動から発生する音を開放空間において騒音計 (リオン製、NL-14) のマイクにより測定した。音の測定は燃料噴出孔と同一水平面上、噴出孔から 10cm の位置に設置されたマイクによる。また、得られた信号は、スペクトルアナライザ (アドバンテスト製、R9211B) により FFT 解析された。

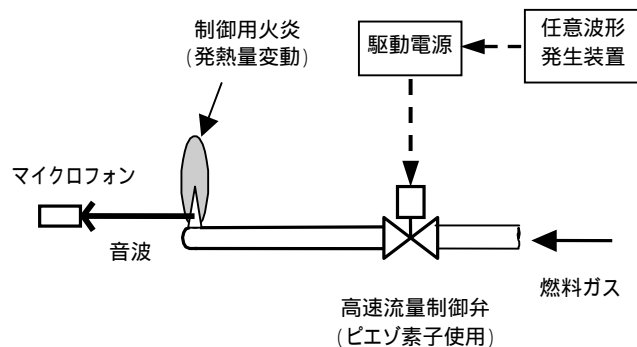


図 2 実験系概要図

図 3 に、予備実験として、燃料を燃焼させた場合の音を、燃料噴出孔を中心とする半径 10cm の円周上の複数の位置で測定した結果を示す。測定位置による音圧レベルにほとんど差がなく、本実験で対象としている微小火炎はほぼ指向性を持たない単極子音源として近似できることを確認した。そこで、燃料噴出方向を 0 度とした場合の 90 度の方向、噴出孔から 10cm の位置にマイクを固定し測定を行った。また、計測時、騒音計の特性はフラットであり、さらに以下に示す実験データはバックグラウンドノイズ補正後のものである。

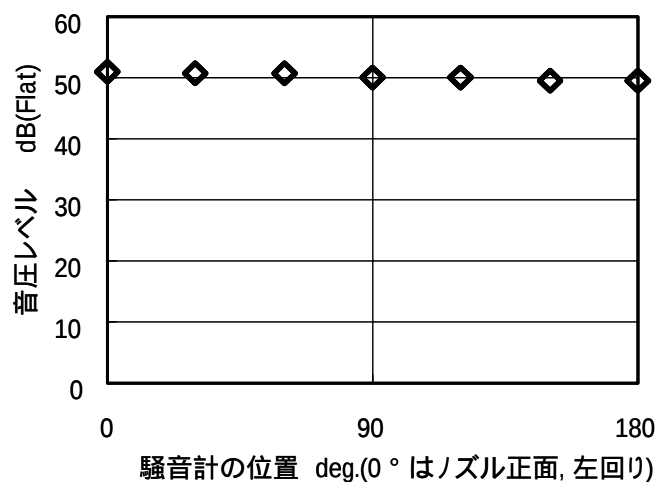


図 3 火炎からの音の指向性(水素、200Hz, φ 1X1)

3. 実験結果および考察

3. 1. ピエゾバルブの流量特性

図 4 にピエゾバルブへの印加電圧の変化による流量変化を示す。ピエゾ素子の特徴として、ある一定電圧をかけた後、対応した変位に達するまでに時間

がかかるという現象が見られる（クリープ現象）。そのため、電圧印加後、流量の時間変化が無くなった時点で値を測定値とした。流量の測定は膜式流量計（エステック製、SF-101）と乾式ガスメータ（シナガワ製、DC-2）によった。図から、低電圧側で線形性が失われていることがわかる。

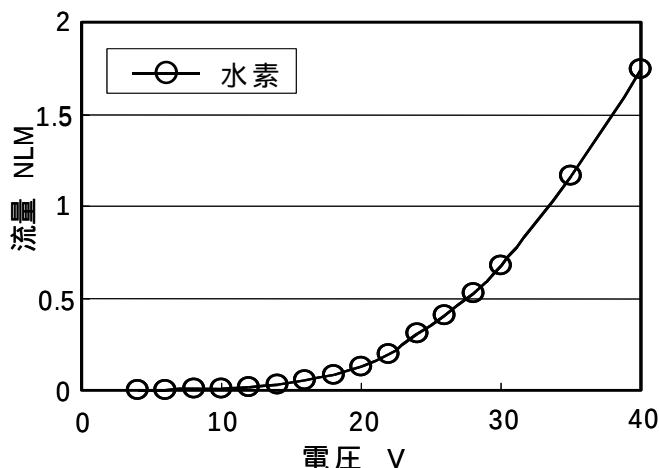


図4 ピエゾバルブの流量特性

次に、実際に流動変動が得られているかを見るため、特定周波数の電圧をかけた場合の流量変動を計測した。図5に示すように、噴出孔を閉空間で囲み、その内部圧力の時間変化をマイクロフォン（Brüel & Kjaer 社製 1/8 インチコンデンサーマイクロホン、型番 4138）により測定した。ほぼ正弦波状の圧力変動が見られることから、流量変動も正弦波状であると考え、質量保存条件、理想気体の状態方程式を用いて圧力変動の時間微分から流量変動を算出した。

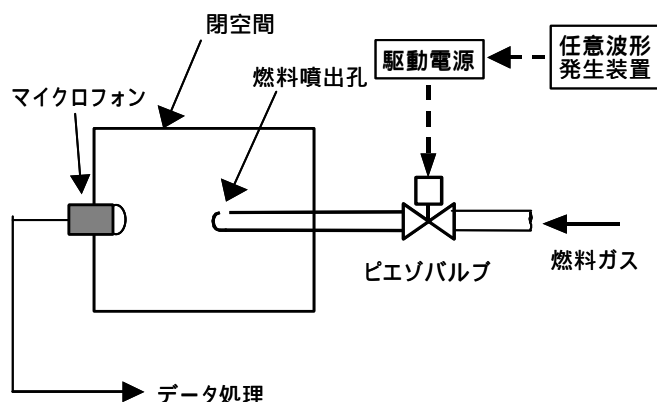


図5 流量変動測定系

図6に基準電圧を30Vとし、±12Vの範囲で振っ

た計測結果と±8Vの範囲で振った流量変動の計測結果を示す。縦軸が流量振幅、横軸が印加電圧の周波数である。印加電圧の振幅が大きいほど流量変動が大きいことがわかる。一方、同一印加電圧であっても周波数の違いにより、得られる流量振幅が異なることがわかる。制御用デバイスとしての利用を考えた場合、より単純な応答特性を示す方がシステム全体の単純化・安定化のためには好ましい。しかし、この計測結果に示された特性からは、実際の制御への適用においては、適切な制御則の選択あるいは応答特性のデータベース化等が必要となるであろうと考えられる。

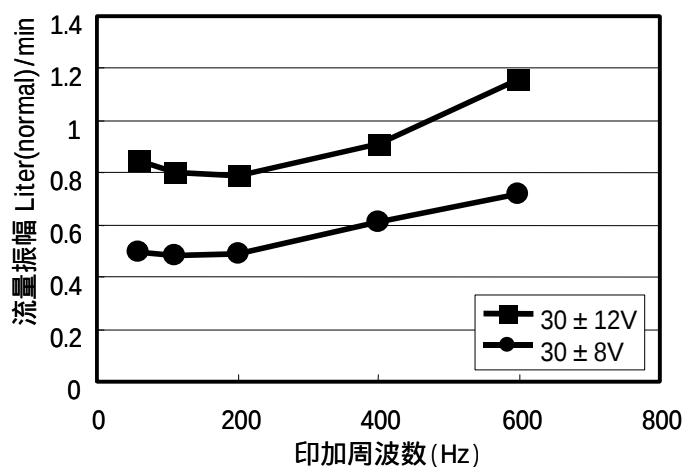


図6 流量変動の測定値

流量変動は閉空間における圧力変動を測定することで間接的に求めている。そこで、データの妥当性を検討するため、得られた流量変動から理論的に求められる音圧レベル（非燃焼条件）と、実際に得られる音圧レベルとを比較した。音圧レベルは図5の閉空間を取り外し開放空間で計測された。音源が単極子の場合、流量振幅と音圧レベルの関係は理論から以下の式で表される[3]。

$$SPL - 20 \log_{10} f = 20 \log_{10} \left[\frac{\rho_0 Q_0}{2\sqrt{2}r} \sqrt{2 \times 10^{-5}} \right]$$

ここで、 Q_0 は流量変動の振幅（ m^3/sec ）、 f は周波数(Hz)、 r は単極音源からマイクまでの距離（ m ）、 ρ_0 は密度（ kg/m^3 ）、 2×10^{-5} は基準圧力値(Pa)である。すなわち、計測された音圧レベル SPL(Sound

Pressure Level: dB)から $20\log_{10} f$ を引くとその値は音の周波数 f に依存せず、 r 、 ρ_0 が一定の場合、流量振幅 Q_0 のみに依存する。なお、上式の左辺第2項を右辺に移項すると通常の dB 値を表す式となる。図7に示すように、前述の方法で算出された流量変動の振幅から理論的に予想される音圧レベルと実験で得られた音圧レベルはほぼ一致することが確認され、定量的には不十分ではあるが流量変動が周波数、振幅ともに制御可能であることが示された。

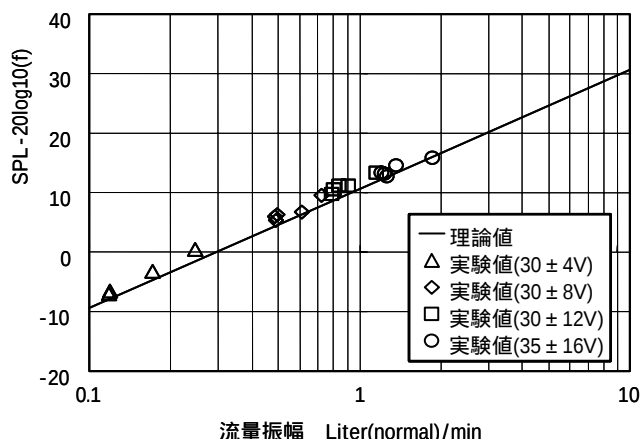


図7 流量変動の振幅と音圧レベル
(非燃焼、実験値と理論値の比較)

3.2. 燃焼の有無による音響特性の違い

まず、燃焼が音圧上昇にどの程度寄与しているかを確認するため、非燃焼時と燃焼時の音の違いを測定した。なお、以降の実験においては、制御信号として、周波数によらず 30V を中心とし $\pm 8V$ の正弦波電圧を印加した。音の計測は 2.2 に示す方法により開放空間で行った。

図8(a)、(b)にピエゾバルブを周波数 150Hz で制御したときに発生した音のスペクトル分布を示す。(a)が非燃焼時、(b)が燃焼時のスペクトル分布である。なお、騒音計の特性はフラットすなわち聴感補正は行っておらず、またバックグラウンドノイズの補正も行っていない。いずれの図からも制御用周波数で卓越したピークが現れており、さらにその高調波もピークとして現れている。また、この制御周波数とその高調波のピークは燃焼時の方が非燃焼時より高く、燃焼により音圧が増加していることがわかる。またピーク以外の音は背景音であり、これらについ

て燃焼による音圧上昇は見られない。印加した制御用周波数の音とその倍音のみに燃焼による増音が見られることから、流量変動による発熱変動により音圧が上昇したと見なせる。

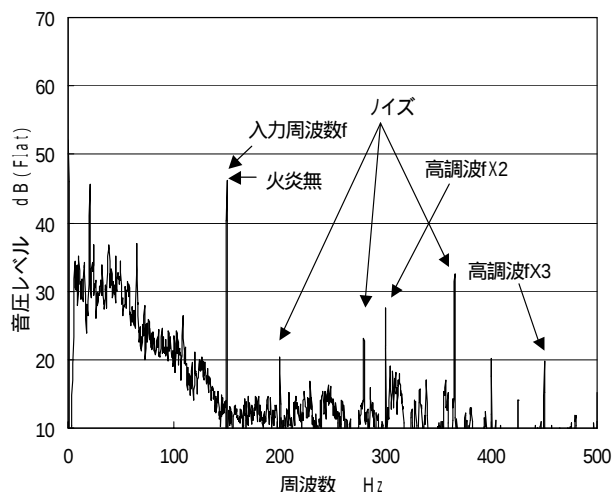


図8(a) バルブ加振時のスペクトル分布(非燃焼時)

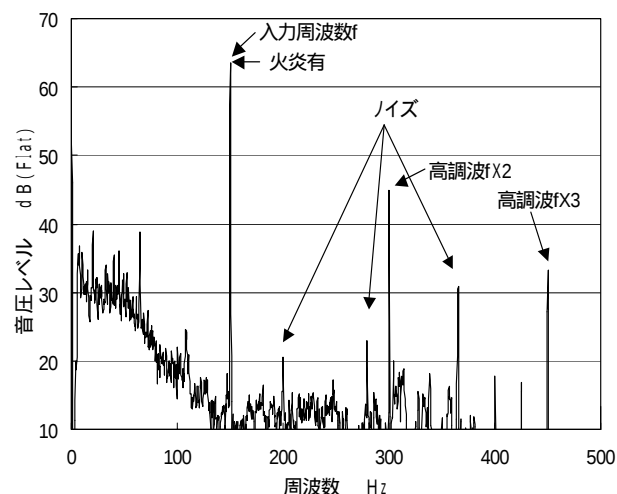


図8(b) バルブ加振時のスペクトル分布(燃焼時)

図9にピエゾバルブの制御周波数の変化による燃焼・非燃焼時の音圧レベルの変化を示す。燃料は水素である。なお、図中 印は流量 0 の場合 (ダイヤフラムのみを加振) の音圧レベルであり、バルブそのものの音を示しており、バルブ自体による音発生は、流動変動あるいは発熱変動による音の発生と比較して無視し得ることがわかる。非燃焼時、周波数の上昇に伴い直線的に音圧レベルが上昇しているのがわかる。これは呼吸球による音の発生と同一であり、単極子音源とみなせるといふ予備実験からの結果と合致する。一方、燃焼に伴い低い制御周波数側

で音圧レベルが 20dB 程度上昇していることがわかる。流量変動のみから発生する非燃焼時の音発生に発熱変動による音発生の寄与が加わったものと考えられる。

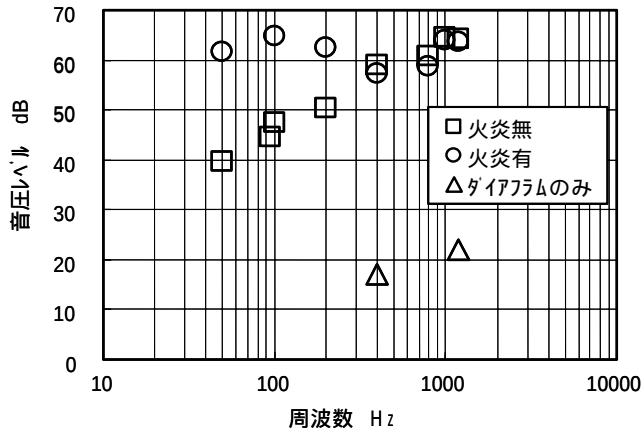


図9 非燃焼・燃焼音の比較（水素、30 ± 8V）

図10に非燃焼時と燃焼時の音圧レベルの差を示す。燃焼による音圧レベルの上昇効果は制御周波数が高くなるに伴って低下し、ある周波数帯ではかえって減音していることがわかる。燃焼時の音発生は、燃料の流量変動のみから発生する非燃焼時の音発生、その燃料が燃焼し発熱変動を生じることによる音発生、の2つが重ね合わさったものと考えられる。この燃焼による音圧レベル上昇効果の低減、あるいは火炎を形成することでかえって音が小さくなるという現象は、両者の波形の位相がずれたことが一因と考えられる。

燃料の流量変動による発生する圧力変動は、燃焼により増大することが確認されたが、ある周波数以上でその効果が小さくなっているがわかった。

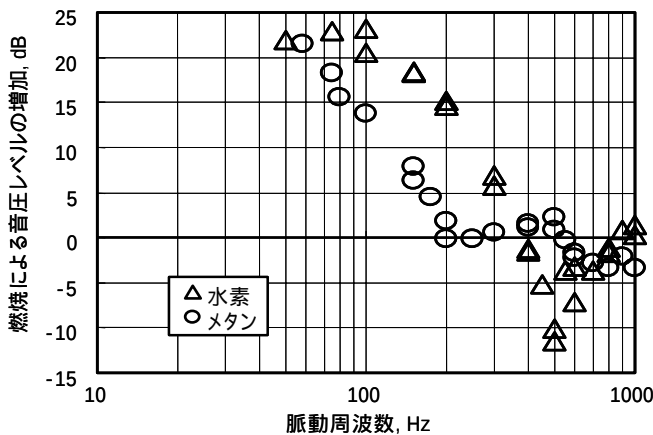


図10 燃焼による音圧レベルの増加

3.3. 燃料による音響特性の違い

燃焼による音圧レベル上昇効果の低減・減音の原因と考えられる、の波形間の位相のずれは、主として燃焼過程が原因と考えられる。すなわち、燃料の着火性・反応速度等が因子となり燃焼反応が流量変動に追従できず、その結果として発熱変動による音波が流量変動による音波に対し遅れる可能性がある。この燃焼による発熱変動発生が遅延効果を確認するため、着火性等の燃焼特性に大きな差があるメタンを用いた実験を行った。

図10に非燃焼時の音圧と燃焼時の音圧の差を示す。水素と比較し、メタンによる音の発生効果はより低い周波数帯のみに限られることがわかる。メタン燃焼による発熱変動は水素のそれに比し流量変動に対する応答性が悪く、流量変動による音と発熱変動による音の位相のずれが大きいことによると考えられる。この応答性の悪さは、メタンの着火性が水素に比し悪いためと考えた。そこで、メタンの燃焼音の位相のずれを低減することを目的として、メタンの着火がより容易になるメタン - 水素の混合燃料による実験を行った。

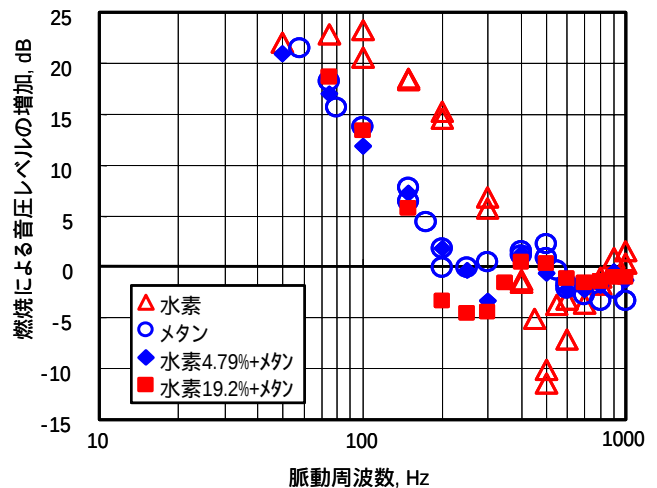


図11 音圧レベルの増加（水素添加の影響）

図11に非燃焼時の音圧と燃焼時の音圧の差を示す。純メタンによる音圧上昇と水素を添加した燃料による上昇との間にはほとんど差が見られない。純粋メタンの場合、火炎は燃料噴出孔からわずかに浮き上がって保持されていたが、水素を添加することにより着火性が高まり、浮き上がりはほとんど見られなくなった。しかし、燃料変動に対応した発熱

変動にはほとんど影響を及ぼさなかったことがわかる。これは、形成されている火炎が拡散火炎であり、現象が拡散の時間スケールで支配されたことによると思われる。すなわち、水素添加によって着火性は向上しても、燃焼を支配するメタンの拡散（水素に比し悪い）の向上には全く寄与しなかったため影響をほとんど受けなかったものと考えられる。

3.4. 燃料噴出孔の配置による音響特性の違い

上述の実験から得られた音圧レベルでは、単体で燃焼騒音抑制用デバイスとして用いることは困難と予想される。そのため、多数の微小変動火炎をアクチュエータとして燃焼器内に配置し、消音する事を考えた。その際、微小火炎同士の干渉等が予想される。そのため、図12に示すように、軸対称の位置に開けた場合（上）と、燃料噴出孔を間隔をあけ並置した場合（下）について実験を行った。燃料は水素である。

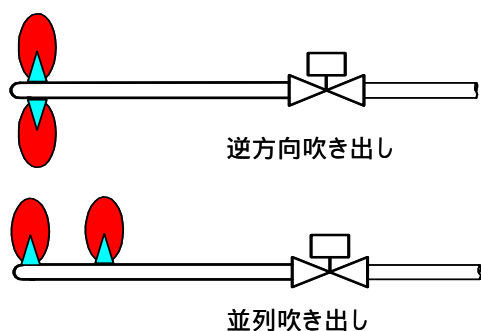


図12 燃料噴出口の配置

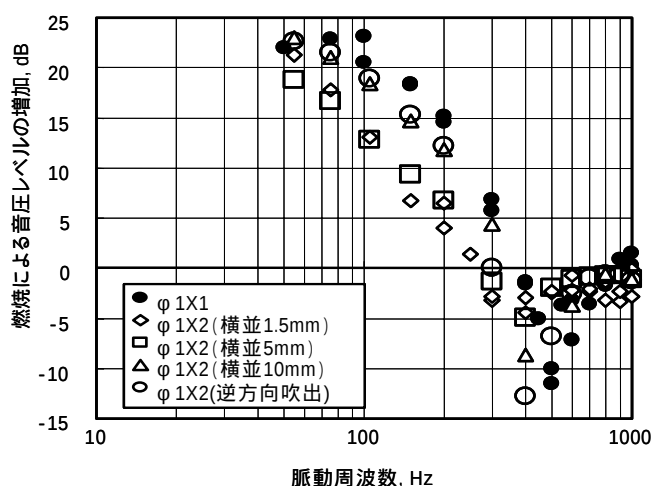


図13 音圧レベルの増加（水素、噴出口の影響）

図13に燃料噴出孔の配置の違いによる音圧レベルの向上の違いを示す。図からわかるように、間隔1.5mm、5mmで並置した場合、音圧の上昇が単孔の場合と比べ、小さくなっている。一方、10mmの間隔で並置した場合と軸対称位置に配置した場合は、ほぼ単孔の場合と同レベルの上昇が見られる。これは、火炎間の距離が近い場合に、酸素濃度が局所的に低下して、燃焼遅れが増大したものと考えられる。

4. 結論

- 1) 燃焼による音圧レベルの上昇が見られたが、燃料流量変動の周波数が低い側で顕著であり、周波数の上昇とともにその効果は低下しはじめる。またある周波数帯では減音効果をもたらす場合がある。
- 2) 燃焼による音圧レベルの上昇効果が低減し始める周波数は燃料に依存する。
- 3) 複数の微小火炎を音源として配置する場合、配置により音圧レベルの上昇の様子は異なり、特に非常に近接して配置した場合、音圧レベルの上昇効果は低減する。最適配置の検討が必要である。
- 4) 燃焼による音発生においては、振幅以外に位相に関する情報も重要である。

なお、本研究は文部科学省開放的融合研究「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」に基づき、知的乱流制御研究センターの研究活動の一環として行われた。

参考文献

- 1) Boe-Shong Hong, Vigor Yang, and Asok Ray, "Robust Feedback Control of Combustion Instability with Model Uncertainty", Combustion and Flame, 120, pp.91-106 (2000)
- 2) Sébastien Candel, "Combustion Dynamics and Control: Progress and Challenges", Hottel Lecture, 29th International Symposium on Combustion, July 20-26 (2002)
- 3) 吉川茂、藤田肇著、「基礎音響学」、講談社、2002
- 4) 春海一佳、平岡克英、井亀優、岸武行、岡秀行、「燃料流量が脈動する層流拡散火炎の音響特性」、日本ガスタービン学会誌、投稿中