局所接触型マイクロ波加熱による
エタノール噴出におよぼす噴出口直径の影響*榎 本 啓 士^{*1}, 今井 有希子^{*2}, 石 田 裕 也^{*3}
山 下 雅 也^{*3}, 原 人 志^{*4}Effects of Exit Diameter on Ethanol Jet
with Local Contact Microwave HeatingHiroshi ENOMOTO^{*5}, Yukiko IMAI, Yuya ISHIDA,
Masaya YAMASHITA and Hitoshi HARA^{*5} Department of Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University,
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa, 920-8667 Japan

Ethanol jet phenomena were observed with local contact microwave heating. The ethanol jet heights (velocities) and the shapes were measured by the high speed video camera (Redlake Motionmeter, 1000 fps, black & white CCD, 292 pix×110 pix, 0.2 mm special resolution) and the effects of the exit diameter on the velocity were considered. The microwave output power was from 20 W to 60 W. The microwave generator was MATSUSHITA TO-465 A with N-type connector. The coaxial cable was FUJIKURA 3.5 D-QEFV (5.6 mm of outer diameter). The exit diameter was from 1 mm to 6 mm. The test section was covered by aluminum plates of 2 mm thickness and the microwave shaver (Nisshinbo Engineering MP 135 R-20). The fuel chamber was brass. The jet shapes had many variations as fir tree type, umbrella type, mushroom type, and so on. As the results, the jet velocity was increased with the microwave output power and showed a maximum at an exit diameter in this research.

Key Words: Liquid Fuel, Atomization, Fuel Injection, Local Contact Microwave Heating

1. 結 論

液体燃料の燃焼は、液体から気体への相転移を伴う現象である。この反応は吸熱反応であり、ほとんどの場合、この熱量は熱伝達によって供給されている。榎本らは、この相転移に必要な熱量をマイクロ波を利用した局所接触型誘電加熱によって供給する方法を提案している^{1,2}。この方法は熱量添加だけではなく、燃料噴出現象を伴うことがわかった。この燃料噴出現象はインジェクタや噴霧器としての応用を見込むことができる。本稿では、この噴出現象に注目し、高速度ビデオカメラを利用した噴出高さの計測結果とその特徴について論じる。噴出口直径(d_e)およびマイクロ波発振強度(I_{mw})を変数とした。用いた燃料は扱いやすい極性分子であるエタノールとした。

図1に、本研究で計測された噴出形状の典型的時間履歴を示す。横軸はエタノールが噴出されてからの時間を示す。噴出口直径によってその形状と噴出され

たエタノールの噴出高さ(head distance)が異なっていることがわかる。

Fig. 1 Typical jet shapes.
($I_{mw} = 60\text{W}$.)

* 原稿受付 2004年9月9日。

^{*1} 正員、金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-8667 金沢市小立町2-40-20)。

^{*2} 学生員、金沢大学大学院自然科学研究科。

^{*3} 学生員、金沢大学工学部。

^{*4} 正員、(株)ノーリツ(〒674-0082 明石市魚住町中尾337)。

E-mail: eno@t.kanazawa-u.ac.jp

2. 実験装置

実験装置の概要を図 2 に示す。実験装置は試験容器、マイクロ波発振器、燃料容器、高速度撮像装置からなる。試験容器は一辺 30mm のアルミアングル支柱、厚さ 2mm のアルミ板、光学計測用マイクロ波遮蔽板からなる。大きさは 300mm×400mm×600mm とした。マイクロ波遮蔽板は、ニッシンボウエンジニアリング製デンジーシート(MP135R20)を用いた。MP135R20 はデンジメッシュ(MT3-135R)と厚さ 2mm のポリカーボネートからなっている。MT3-135R は線径 42 μ m の銅+黒色ニッケルを素材として用いており、光透過率 55%、周波数 100MHz~1000MHz の電磁波を 99%遮蔽する。

マイクロ波発振器は、N 型レセプタクル出力端を持った、松下電子部品製出力可変型インバータ式マグネトロン発振器(TO465A)を用いた。アジレント製スペクトルアナライザ E4407B を用いてその発振週波数を調べた。その結果、最大値の 1%以上を出力している発振周波数は 2414GHz から 2460GHz 程度であった。ただし、発振強度によって、その幅は 0.1GHz ほど変動した。マイクロ波出力は 20W から 120W まで変化

Fig. 3 Details of Microwave generator and fuel chamber.

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus.

させることができる。出力されたマイクロ波は、東洋コネクタ製 N 型プラグ(NP3X)、長さ 60mm のフジクラ製同軸ケーブル(35DQEFV)によって燃料容器に導かれる(図 3)。インピーダンスは 50Ω とした。

燃料容器は図 4 に示すような構造になっており、内側容器(inner socket)を交換することにより噴出口直径を変数として用いることができる。内側容器と外側容器(outer socket)の材質は黄銅とした。現物あわせですりあわせを行い、燃料の漏れがないように工夫した。燃料容器の寸法は、入手することが最も容易であった同軸ケーブルの寸法を元に、噴出現象がもっとも計測しやすい条件に基づいて決定した。

噴出現象はフレームレート 30fps の一般のビデオカメラでの撮像が出来なかったので、高速度撮像装置を

Fig. 4 Details of fuel chamber.
The material is brass.
Unit: mm

用いた。高速度撮像装置は高速度ビデオカメラと光学レンズからなる。高速度ビデオカメラは Redlake 製 Motionmeter を用いた。Motionmeter は CCD を撮像素子として用いており、モノクロ撮影専用である。フレームレート 1000fps、露光時間 0.05ms、解像度 292×110 ピクセルの設定で用いた。当初、高速度ビデオカメラは試験容器の中に組み込んでいた。しかしながら、撮像素子である CCD がマイクロ波の影響を受け、マイクロ波発振直後の数コマが撮像できなかった。よって、マイクロ波遮蔽版を利用し、撮像装置を隔離した。カメラレンズはタムロン製 C マウントレンズ(20HC)を用い、絞りは 1.6 とした。バックライトは DC12V で点灯する大自工業製ルックス専用蛍光管(F60A)を 2 本用いた。F60A の消費電力は 4W、全長 135mm、直径 15mm であった。

計測変数は燃料噴出高さ(head distance)とし、図5のように、燃料容器出口から計測された噴出燃料の影の先端と中心線が交差する点を結んだ距離、と定義した。分解能は0.2mmであった。

Fig. 5 Definition of the head distance.

3. 結果と考察

図 6 に燃料噴出高さの典型的時間履歴を示す。噴出口直径 1mm、マイクロ波発振強度 40W とし、同じ条件で 10 回の実験を行った。OMRON 製ソリッドステートリレー(C3SDZ01P)を利用し、マイクロ波発振器起動時刻と高速度撮像装置起動時刻が 1ms 以内に同じになるように設定した。本実験では、最初の蛍光管点灯が観測されるまでの時間は、8ms から 13ms の間でばらついていた。このように、本実験で用いたマイクロ波発振器は、起動スイッチを入れて実際にマイクロ波が発振されるまで、上記のような間があった。そこで、マイクロ波の影響でバックライトにある蛍光物質が光る現象を利用して、バックライトとして用いている蛍光管の発光強度が最初に強くなる瞬間を時刻 0 とした。

このとき、マイクロ波発振とバックライト点灯との時間遅れが問題になる。本実験で用いた高速撮像装置の時間分解能が 1ms であること、60Hz の商用電源を用いているため、マイクロ波は 120Hz(約 8.33ms)の周期で間歇的に発振されること、この間歇的発振時の立ち上がり時間は 1ms 以下であること、などから、本実験で定義される範囲では、この問題は無視しようとした。

この発光強度変動は、インバータ式電源を用いたマグネトロン起動時の不安定性に依存していると考えられる。アジレント製パワーメーターE4418B を利用して検証しました。デジタル表示された出力を目視で読み、出力変動の大きさを検証した結果、設定発振強度の数%であった。しかしながら、この不安定性は十分に解析できていないので、今後さらに詳細に調査する必要がある。発光強度の周期はマイクロ波強度や噴出口直径に依存しておらず、常に観測された。以下、この蛍光管発光強度が極大値を示す状態を、蛍光管点灯と定義する。この蛍光管点灯は、その強度が一定しておらず、撮像装置の識別階調の不十分さもあり、十分な半影が出来ないものもあった。そういった不十分なものは、今回は結果として加味しなかった。

図 6 の条件の場合、1 回目の蛍光管点灯で噴射した場合 (Type I) と、2 回目の蛍光管点灯で噴射した場合 (Type II) の二通りがあり、すべての実験で噴出現象が確認された。破線は Type I と Type II に分類された実験結果を各々平均したものである。この平均された破線から、Type I は、Type II と比較して噴出速度=勾配が若干大きいことがわかる。噴出形態は、Type I および Type II いずれの場合もほぼ同じで、図 1 最上部に

Table 1 Probabilities of jet.
(○: 10/10, △: more than 3/10,
×: less than 2/10.)

	$I_{mw} = 20W$	40W	60W
$d_e = 1mm$	△	○	○
4mm	×	△	△
6mm	×	×	△

Fig 6 Typical time histories of head distance.
($d_e = 1mm$, $I_{mw} = 40W$.)

示されるような木状の噴出形態であった。噴出現象が見られた場合、実験後、内側容器内にエタノールは残っていなかった。エタノールの初期温度は 305K であった。噴出現象が見られた場合のエタノールの温度履歴は、電磁場でも十分な時間分解能と精度を持つ計測装置がなかったため、今回は計測しなかった。

エタノールの噴出現象は、条件によって観測される場合とされない場合があった。表 1 に、各々の条件で 10 回の実験を行った結果を示す。×の場合、3 回目の蛍光管点灯以下 Type III とする以降も噴出現象は確認されず、エタノールの温度上昇のみ確認された。このときの温度上昇は、マイクロ波発振停止後 10 秒以内に、シース外径 10mm の K 型熱電対をエタノールに直接接触させて確認した。△の場合、3 回目の蛍光管点灯で噴出が開始された場合もあったが、噴出開始時間が Type I や Type II のように明確に分離されなかったため、考察の対象としなかった。このような、明らかな噴出現象の他に、Type III 以降に、エタノール表

面が少しだけ盛り上がり湧き出るような現象も観察された。

表 1 から、内側容器の燃料容積が大きい場合、マイクロ波発振強度が小さいと、噴出現象は観測されないことがわかる。

この噴出現象が発現する原因として、以下の二つが考えられる。

- ・ 極性分子がマイクロ波の影響で分子内の電氣的不平衡が増大し、その分子間反発力によって噴出する。
- ・ エタノールがマイクロ波を吸収し、局部的温度上昇によって沸騰が起こり、噴出する。

温度上昇によって噴出が起こったとする。本実験でエタノールがマイクロ波にさらされている時間は、短い場合、数十 ms であったが、それでも噴出現象が確認される場合があった。このとき、発振されたマイクロ波熱量を、すべて、エタノールが、均一に吸収したとすると、温度上昇は 10K 以下となる。噴出前の温度を考えても、均一に加熱されたとすれば、やはり沸騰などの力が発生する相転移はないと考えた方が適切と思われる。均一でないとした場合、本実験の範囲では計測装置能力の限界があり、考察できないので、今後の実験結果が待たれる。

沸騰現象ではなく、極性分子の持つ特徴であると

Fig. 7 Time histories of head distance.
($d_e = 1\text{mm}$.)

Fig. 9 Time histories of head distance.
($d_e = 6\text{mm}$.)

Fig. 8 Time histories of head distance.
($d_e = 4\text{mm}$.)

Fig. 10 Time histories of head distance.
($I_{mw} = 60\text{W}$.)

考え、エタノールの代わりに水を用いた実験を行った。しかしながら、表1の実験条件では明確な噴出現象は観測されなかった。このことから、エタノールの熱容量がこの噴出現象の主な原因の一つと考えることができる。

内側容器に生じる電磁界の影響を見るために、内側容器をテフロンにして実験した。このとき、表1の条件では噴出現象が確認されなかった。マイクロ波はテフロン中を伝播し、外側容器との間に電磁界を形成する。よって、エタノール中に発生する電磁界の強度は低下し、エタノールにおよぼす電氣的影響が小さくなると考えられる。このことから、この噴出現象は単純な熱量収支によって記述するべきではなく、分子内の電氣的不平衡を考慮した考察が必要であることを示唆した結果といえる。

電磁波密度は誘電体形状に強く影響される。この実験の場合、内側容器形状や同軸ケーブル心線端形状にあたる。この噴出現象の電磁波密度依存性や液体の熱容量依存性の考察は、他の形状の容器や、同軸ケーブル解放端の心線形状を変数とした実験を行い、確認する必要がある。

図7に噴出口直径1mmの場合の噴出高さ時間履歴を示す。高さが40mmまでしかないのは、高速度ビデオカメラの撮像範囲が限定されているためである。いずれの条件でも、噴出現象はType IとType IIの両方が観測された。マイクロ波発振強度20Wの場合、ほとんどがType Iであったので、Type Iのみ示す。マイクロ波発振強度40Wおよび60Wの場合、他の条件との比較を容易にするため、Type IIのみ示す。この図から、マイクロ波発振強度が強いほど噴出速度が大きいことがわかる。

図8に噴出口直径4mmの場合の噴出高さ時間履歴を示す。この条件では、Type IIのみが観測された。マイクロ波発振強度が20Wの場合、明確な噴出現象は観測されなかった。噴出口直径1mmの場合と同様に、マイクロ波発振強度が強いほど噴出速度が大きいことがわかる。

図9に噴出口直径6mmの場合の噴出高さ時間履歴を示す。噴出現象はマイクロ波発振強度60Wの場合のみ観測された。Type IIおよびType IIIが観測されたが、Type IIのみ示す。

図10に、マイクロ波発振強度60Wの場合の噴出高さ時間履歴を示す。噴出口直径4mmの場合、もっとも大きな噴出速度を示していることがわかる。このこ

とから、噴出速度はある噴射口直径で極大値をとる可能性があることがわかる。

本実験で用いた燃料容器の容量であれば、適当な場所で圧力が発生して噴出現象が起こると仮定した場合、出口直径が小さいほど噴出速度が大きくなると考えられる。しかしながら、そのような結果が得られなかった原因として、内側容器形状に凹凸があると、そこで電磁界が変形し、エタノールの噴出速度に対して、速度を抑える効果を示した、と思われる。このことから、単純な温度上昇(熱量授受)だけではなく、電磁界の影響を加味した考察が必要と思われる。

4. 結 論

エタノールを燃料とした局所接触型マイクロ波加熱による噴出実験を行った。その結果、本実験で実施された条件の範囲で、以下の知見を得た。

- 1) マイクロ波発振強度が大きいほど、噴出速度は大きくなる。
- 2) 噴出速度はある噴出口直径で極大値をとる可能性がある。

計測手法および実験装置の都合上、本稿では詳細に言及することはできなかったが、この噴出現象は、マイクロ波によるエタノールの不均一加熱が原因の一つである可能性がある。今後その可能性に対するデータが必要と思われる。

今回の実験では、噴出現象自体が観測される場合とされない場合があった。これがマイクロ波発振装置の始動時不安定性によるものなのか、点火現象と同様の確率的現象であるのか、その詳細な機構解明および特性値データベース化のためにも、発振装置の検証と平行して、今後さらに実験回数を蓄積する必要がある。

謝辞

本研究を進めるに当たり、本学稗田登助手にも大変助けて頂いた。石川県工業試験所電子情報部専門研究員吉村慶之様、松下電子応用機器マグネトロン事業部佐藤康夫様には、実験実施および各種情報提供において多大な尽力を頂いた。紙面を借りて感謝します。

参考文献

- 1) 榎本他, 特願2004-160252, 2004.
- 2) 原他, 特願2004-160253, 2004.