

日時： 2011年2月5日(土) 13:30-16:50

場所： 名古屋国際センター 第3研究室

出席者： 22名

小島晋爾(主査,名城大学), 調尚孝[追:河野正顕](講師,日本自動車部品総合研究所)[追:駒田佳介,長崎大学], 鈴木孝司(講師,豊橋技術科学大), 高橋周平(幹事,岐阜大学), 野田進,[追:伊藤高啓](豊橋技術科学大), 加藤正明,[追:佐々木覚](デンソー), 井原禎貴(岐阜大学), 鬼頭俊介(豊田高専), 金子誠(富士重工), 若井和憲(岐阜大学), 竹内秀隆[代:中村俊秋](豊田自動織機), 小池誠(豊田中央研究所), 中島邦彦(ユニバンス), 鷲尾修司[代:佐古孝弘](大阪ガス), 田村守淑(東邦ガス), 太田安彦(元名古屋工業大学), 高野孝義(豊田工業大学), 大平哲也(スズキ自動車)

議事

1. 連絡事項(13:30-13:40)

次回研究会に関する連絡を行った。

2. 話題提供

(1) 日本自動車部品総合研究所 調尚孝委員 (13:40-15:10)

「高数密度燃料噴霧の影画像処理による粒径計測」

要旨：

噴霧の数密度はガソリン機関で 1mm^3 あたりに 100~1000 個, ディーゼル機関で 1000~100000 個程度であるが, 数密度が増加すると粒径計測は非常に困難となる. 本講演では, 影画像処理法を用いて, 粒子数密度 100~1000 個/ mm^3 の環境下において, 個々の粒子の直径と位置 (x,y,z) , および球か非球形かを判別して非接触で計測するという, 非常に挑戦的な計測手法が紹介された. 近年の CCD カメラは解像度がよく, かなり多くの小液滴をとらえることができるため, 比較的高数密度の環境でも計測可能であることが期待される. そこで, 高解像度の CCD カメラと発光時間の短く(7ns)高出力な YAG レーザ光源を用い撮影を行うことで, 直噴噴霧のような高密度かつ高速の噴霧(粒子密度: 500 個/ mm^3 , 流速: 50m/s) の撮影を試みる. レーザを直接用いると, コヒーレント性が高いため, 不必要な干渉縞が現れてしまうが, 本手法では蛍光剤を含む樹脂から成る波長変換素子にレーザ光を通過させることで, 広帯域の波長の光を作ること成功した. また, 影画像撮影では測定領域の奥行き積分情報が CCD カメラに記録されてしまうため, 被写界深度の極めて浅い対物レンズを用いることで, 粒子の位置を正確に特定することを試みた. 対物レンズは被写界深度 $80\mu\text{m}$ で, 作動距離が 33.5mm のものを用いた. 一般に小さな粒子径を観察しようとすると被写界深度が浅いと, 輪郭のボケた粒子が出てくることが予想されているが, 本報告では当計測法の実力を把握するために特に補正式は用いず, 画像から直接計測を行うものとする.

実験では, ノズルスリットからの扇状の噴霧を測定対象とした. ノズル直下では液膜と液糸が観察され, 下流に行くに従って, 液滴へと成長する様子が捉えられている. 観察範囲は 1.5mm 角の領域である. 50mm 下流の位置においては, 複数の奥行き液滴が同時に映り込んでおり, これらを分離する必要がある. そこで, 得られた画像の輝度情報を解析し, 勾配があるしきい値以上のものをピントが合っている, すなわちレンズの被写界深度の範囲に存在すると判断した. 特定された画面上の各液滴は, 輝度値の 2 階微分の値を, 角度 2 度間隔で 180 個求めることにより輪郭を検出し, 粒子径を求めた. 求められる粒子径の精度を評価するため, USAF のテストターゲットを用いて $2.19\mu\text{m}$ のパターンで試験を行ったところ, $2\sim 2.5\mu\text{m}$ の範囲で算出されており, 小さな液滴に対してもよい精度があることが期待される.

また高密度の噴霧の計測に際しては, 多重散乱の影響で得られる影画像が薄くなり誤差が生じることが懸念される. そこで, 厚さ 0.5mm の石英ガラスを 0.15mm 間隔で 24 枚積層し, その表面にガラスビーズを分布させ, 噴霧観察のための標準粒子群デバイス(レティクル)を作成した. 間隙部には液体を封入して屈折率を合わせるようにしている. ガラスビーズの分布は直噴ガソリンエンジンの噴霧を模擬している. 数密度 150, 300, 500 個/ mm^3 相当のものを作成し, まず, 各ガラス板上の粒子の位置と粒子径を光学顕微鏡で 1 つ 1 つ特定した. このレティクルに対して, 本計測法を適用したところ, 500 個/ mm^3 のもので $\pm 1\mu\text{m}$, 150 個/ mm^3 のもので $\pm 0.7\mu\text{m}$ の精度があることが分かった. ただし粒子径が $5\mu\text{m}$ 以下のものに対しては, $+0.5\sim 2\mu\text{m}$ とやや大きめの値が出るが, 粒子径が小さい液滴は原理上輪郭がボケて大きく映ってしまうため, このような結果となったものと考えられる. 本測定法を, n-ヘプタンを 12MPa の噴射圧で常温常圧下に噴射したケースに適用し, ノズル下流 50mm で観察したところ, 噴射初期では分布にばらつきがあり, また大きな粒子が存在しており, 中期においては一定の分布, 後期において細くなるという傾向をとらえることができた. このような分布情報を調べることにより, 噴霧構造が解析可能になると考えられる. また, 本実験で作成したレティクルを用いて計測限界となる数密度を調べたところ, 平均数密度 N_{Av} (個

/mm³)と噴霧厚さ L_s (mm)対して、 $N_{AV}^{\frac{2}{3}} \times L_s = 900$ という関係式で限界数密度が表わされることが分かった。

Q1:エンジンのサイクル変動と噴霧の変動を調べたことはあるのか?

A1:測定範囲は 1.5mm 角の範囲であり、この部分からすべての状態を把握することは困難である。また、高温高圧下での測定も厳しいのが現状である。

Q2:計測限界に粒子径の依存はないのか?短波長の光源を使えば、小さい粒子径のものが計測できるようになるのか?

A2:粒子径が小さくなると被写界深度が小さくなりすぎ、大きな粒子が計測できなくなるため、今回の範囲くらいが適当なのではないかと思う。いずれにせよ、波長を変えると波長変換素子を作り直す必要がある。

Q3:粒子の投影面積で計測限界が決まる、つまり噴霧の透過率が計測限界を決めると考えてよいのか?

A3:そう考えてよいと思う。

Q4:従来の計測技術に比べてどの程度のレベルアップがあるのか?これまでの感覚では粒子径は計測法とセットで考えなければならなかったか?

A4:今回の計測範囲ではあるが、真値に近い粒子径が得られていると考えている。たとえばレティクルを用いて測定した結果は、レーザ回折では 24 枚積層では測定不能、1 枚だけでは分布がブロードで、粒子径も過大評価であった。また、位相ドップラー法では、分布がレティクルのものとは異なり、また、粒子径は過小評価であった。

Q5:ノズル下流で非常に鮮明な影写真が取れているが、これは簡単に取れるのか?

A5:今回開発した波長変化素子を用いたブロードな波長の光源であれば簡単に取れる。レーザを直接使うと干渉縞が出てくる。

(2) 豊橋技術科学大 鈴木孝司 先生 (15:20-16:50)

「流れの制御による微粒化促進と噴霧制御の試み」

要旨:

次の 3 項目について御講演頂いた: 1. 内燃機関と液体の微粒化について, 2. 吸気管燃料噴射用微粒化ノズルの開発 (デンソー谷氏との共同研究), 3. 扇形噴霧同士の衝突による浮遊噴霧生成の試み。

まず、内燃機関、水素、バッテリーのエネルギー密度の比較結果が示され、移動機械の動力源としては、液体燃料と内燃機関の組み合わせが最良であることが強調された。また、液体燃料を速やかに蒸発させるために液体の表面積を増やす微粒化が必要であることから、そのような研究を行っている。

1. 内燃機関と液体の微粒化: 表面張力により液体は球形にまとまろうとするが、液体を微粒化するには、膜とか棒状にして流体力学的な不安定を利用する手段を採らざるを得ない。例えば、①気流のエネルギー、②液体の圧力、③回転による遠心力、④静電気、などが利用されている。具体的には、エアアシスト・アトマイザー、スワール・アトマイザー、扇形噴霧、ロータリー・アトマイザー、フラッシュ・ボイリング・スプレー、超音波振動利用などが考案または実用化されている。これらの微粒化装置の歴史を振り返ると、油田の掘削法 (1859 年)、Lenoir の石炭ガス内燃機関 (1860 年)、Otto サイクル (1867 年)、Daimler の表面気化器 (1886 年) といった時代以前には遡ることはできない。論文としては、回転微粒化 (1864 年)、加圧空気微粒化 (1873 年)、霧吹き (1885 年)、Maybach のフロートフィード気化器 (1893 年) まで遡れ、1910 年頃には、全ての自動車にフロートフィード気化器が用いられるようになった。時代を下ると、1980 年頃から吸気管燃料噴射が主流となり、最近では、筒内直噴が日本では当たり前前の技術になっている。一方、スリランカ (2 サイクル 250cc 原動機付きの 3 輪車が市内タクシー) のような発展途上国では、安くて丈夫で環境に優しい自動車が必要とされており、微細な噴霧を作るだけでなく、壊れない低コストの技術が求められており、そのような研究も講演者は行っている。

2. 吸気管燃料噴射用微粒化ノズルの開発: 環境に優しい自動車を考える上では、排気浄化が重要である。HC の大半は、エンジンの冷間始動後 1 分以内に排出される。その理由は、燃焼室の壁面に付着した燃料が排気行程で出てくるからであり、それを防ぐためにも燃料の微粒化が重要である。しかし、ノズル加熱や超音波利用及びエアアシストのような方法は、生産性や信頼性に欠けている。そんなわけで、デンソーの谷氏が、高圧を利用する multiple-hole plate nozzle を考案した。これは、ステンレスの薄い板に小さな噴孔を幾つか空けただけのものであり、単純であるにも拘らず微粒化性能に優れ、なおかつ安いために比較的広く利用されている。これをさらに改良するために、まずオリジナル (燃料の圧力は 3 気圧) の微粒化メカニズムを解明した。実験には、オリジナルの商品を模倣した 4 噴孔 (孔径 0.34 mm 放電加工) のステンレス板 (厚さ 0.2 mm: ノズルプレート) と正確に模擬された電磁弁を組み合わせて用いた (これをバルブモデルと呼ぶことにする)。また、比較のために、ニードル弁の部分先の平らな棒で置き換え (これをフラットヘッド・ニードルと呼ぶ)、ニードル弁の先端とノズルプレートとの間のギャップ (0.1~0.4 mm) を変えた実験も行った。ノズルプレートの 4 噴孔の配置は、ピッチ円の直径を 3 通りに変えている。なお、実験では、燃料の代わりに 3 気圧の水道水を定常的に噴射し、透過光を用いて観察した。また、粒径測定にはシャドウグラフを用いた。オリジナルを模倣したバルブモデルでは、噴射された水は激しく振動し、ノ

ズル下流 10 mm 未満で微粒化を開始している。フラットヘッド・ニードルを用いたとき、ノズルプレートとの間のギャップが小さい場合には、オリジナルに近い微粒化挙動を示すものの、ギャップが大きくなると、噴霧は棒状となって全く微粒化しなくなる。また、ピッチ円の径が大きくなると、やはり噴霧は棒状となって全く微粒化しなくなる。粒径測定の結果でも同様である。すなわち、このギャップ及びピッチ円の直径が小さいということが微粒化のキーと考えられる。そこで、長距離顕微鏡を用いて噴孔まわりの流れを撮影した。横方向（噴孔軸に垂直な方向）から視ると、噴流に付随して薄い液膜が生成され、それが激しく振動し壊れていることがわかる。一方、噴孔軸の上の方から視ると、剥離が見られる。ところが、ギャップが大きいと、剥離はあるが液膜が生成されない。そこで、さらに、20 倍の拡大モデルを作って空気を噴射し、その流速を熱線流速計で測定した。その結果、噴孔内の乱れ強さが大きいことがわかった。また、ニードル弁の先端とノズルプレートとの間のギャップが小さいと、流体が 1 方向から噴孔に流れ込み、噴孔内で跳ね返るために薄い液膜が生成されることがわかった。つまり、オリジナルの微粒化メカニズムは、薄い液膜が生成され、それが強く乱れていることである。このメカニズムをもとに、微粒化をさらに良くする方法を見つけるために幾つかのアイデアを試してみた。最初に、6 噴孔から出る噴流を外で干渉させることによって薄く乱れた液膜を作ることを水試験（かつフラットヘッド・ニードル）で試みた。各噴孔の軸を傾けて、噴孔の外で噴流の一部がクロスするように振ってある（一様双曲面の母線になるような軸の配置）。振りが無いと、噴流は単に一体となって流れて行く。振りがあると、中空円錐形状で旋回して流れる薄い環状液膜が形成される。粒径もオリジナル（4 噴孔）に比べて小さくなるが、現在のエンジンの吸気管は 2 本に分かれているので、噴流が 1 本にまとまるのでは使えないため、次の様な別のアイデアを試した。すなわち、ノズルプレートの上に、薄いダクト状の流路を作ってみた。噴射量が減るという難点はあるが、粒径（ザウター平均）は半分程度まで小さくなる。そこで、さらに各噴孔の先端にある形状の部品を取り付けて、実燃料間欠噴射で粒径を測定した。この場合、噴流同士が重ならないように、各噴孔は強く外側に向けている。噴射開始後 1 ms 程度で燃料は円錐状に吹き出し始め、2 ms 程度できれいな中空円錐ができる。その後、細かく微粒化する。しかし、この場合、形状が複雑過ぎて製品化は困難であった。そこで、最終的なアイデアとして、より単純に、ノズルプレートとして長方形の板（4 隅に孔）を用いたところ、4 噴孔のそれぞれから中空円錐状の激しく乱れる液膜が生成され、それらが干渉することなく細かい粒に分裂させることができた。オリジナルに比べて、分裂長さは短く、discharge coefficient もむしろ大きくなっている。また、噴孔の位置によって、噴霧形状が変わり、平均粒径にも極値があることがわかった（水試験及び dry solvent 試験）。そこで、何故、中空円錐状の噴霧ができるかを調べるために、ノズル内部の数値計算（Star-CD: VOF, k- ϵ モデル）を行った。噴孔に渦を巻きながら液体が流入することから、それによってスワール・アトマイザと同様に薄い液膜が生成すると想像される。また、噴孔に渦を巻きながら液体が流入する理由は、噴孔の上流に M 型の速度分布ができるためである。このように、オリジナルよりも微粒化性能の良いものができたが、残念ながら商品化には至らなかった。

Q1: M 型の速度分布が生成される機構あるいは M 型の速度分布により噴孔部入口に渦が形成されて中空状の薄い液膜が形成される機構の説明が不十分ではないか？

A1: どんな方法であっても乱れた液膜を作ることが重要だ。この噴射弁では、中空部の壁に流れをぶつけることによって乱れを作っている。

Q2: では、その乱れは、流路の断面積が小さくなることによる Re 数増大の効果で生成されているのか？ それとも、流路の形状が変わるエッジ部の wake による乱れ生成なのか？

A2: 測定ができないので結論できない。

Q3: 商品化されなかったということだが、改良型を実際にエンジンに装着して燃焼特性などを評価されたことはあるか？

A3: 冷間始動時の燃料の壁面付着を減らすという効果はあったようである。

Q4: 間欠噴射の場合、最初から液膜が旋回することはないと思うが、経時変化はどうなっているのか？

A4: 最終バージョンについては、残念ながら、非定常の実験は行っていないが、その前のタイプにおいて噴射開始後 1 ms では円錐状に広がる噴霧が形成されている。また、粒径測定でも噴射開始直後の噴霧先端部にさほど大きな粒径は観測されていないので、最初にどろりと棒状の噴霧が出るようなことはないと思われている。

Q5: ニードルとノズルプレートとの間のギャップを横から見た計算結果はどうなっているか？

A5: この計算を行った頃（2005 年）の Star-CD の表面張力モデルは良くないので、実噴流と大きく異なる計算結果になっている。

Q6: ポート噴射では、雰囲気を負圧になる場合がある。そのような場合でも中空円錐状の液膜は生成されるというロバスト性があるか？

A6: 乱れた液膜にした理由がまさにそれである。ケルビン・ヘルムホルツの不安定に頼る限り、中空部の密度が小さくなると全く分裂しない。だからこそ乱れを作る工夫をした。ただし、負圧試験及び実車試験までは行っていない。

Q7: 流量係数は噴孔面積基準の値か？ また、ニードル部の流路面積を基準にする必要はないか？

A7: オリジナルの噴射弁で微粒化が良いのは、ニードル部の流路面積が噴孔面積と同等のオーダーであって、ニー

ドル部の絞りが乱れを促進していることが理由だと考えている。

Q8: スライドタイトルの「吸気管噴射」という言葉には違和感がある。1970年代であれば、「吸気管噴射」という言葉でよいが、噴射弁の取り付け位置がバルブに近づいているので、現在は「ポート噴射」という用語にすべきだ。採用されなかったのは、そのせいかもしれませんね。

Q9: ニードルが動き始めるときのデッドボリウム内の挙動はどうなっているか？

A9: 移動境界ではなく固定境界を設定して定常状態の数値計算しか行っていないので、残念ながらわからない。現在の Star-CD を使えば、可能ではある。

3. 扇形噴霧同士の衝突による浮遊噴霧生成の試み：液体の微粒化という技術分野で、長い間懸案となっている事項がある：①微粒化特性を正確に測定または評価する。②ノズルの形状や条件を与えて噴霧の微粒化特性を数値シミュレーションで予測する。③簡単な装置で効率的に微粒化する。④微粒化における運動量交換や蒸発の適正化技術。もし噴霧の位置や形及び速度を自由に調整できれば、④がある意味可能になる。そこで、現在、これに取り組んでいる。従来技術では、噴霧の形や速度はノズルが決めてしまうので、一般には自由に変えることができない。ところが、ノズルから離れた任意の位置に噴霧を形成できれば、壁面からの熱損失が減るので、噴霧燃焼や反応において有利になると考えられる。そのためには、噴霧を衝突させて、噴霧から運動量を奪ってやるのがおそらく最良の方法ではないだろうか。群馬大のグループが既に EFI 噴霧やディーゼル噴霧の衝突を研究しているが、デンソー殿から提供頂いた扇形噴霧ノズルを用いて研究に着手した。ガソリンは厄介なので、液体にシリコン油 #2 を用い、噴射圧力は 4~8.5 MPa で、ストロボ写真観察と前方微小角散乱型粒径計測を行った。単独（衝突なし）噴霧では、ノズルから 15 mm 程度で分裂が終了し、扇形噴霧の頂角は約 70° である。粒径は噴射圧力が上がれば小さくなる。衝突させると、漂うように低速で棒状の濃い噴霧塊ができる。平均粒径は、単独噴霧に比べて若干小さくなる。また、噴射圧力が低いと、噴霧塊ができずに二つの噴霧は互いに突き抜けてしまう。理由を調べるために、一方の噴霧に染料を混ぜて着色し、衝突位置の下方にミラーコート紙をおいた。噴射圧力が高い場合は全体が染まる。一方、噴射圧力が低いと、着色した側の噴射弁の反対側だけが染まっている。つまり、衝突しても二つの噴霧は混ざらないことがわかる。衝突前の噴霧粒径を調べると、噴射圧力が高い場合は小さな粒が多い。一方、噴射圧力が低い場合は、大きな粒が多い。それゆえ、大きな粒が衝突時に突き抜けてしまうと思われる。

Q10: 二つの噴霧がずれた場合のロバスト性はどうか？

A10: EFI 噴霧のような棒状噴霧に比べれば、扇形噴霧のロバスト性は高いと考えられる。ただし、二つの噴射弁の開弁時期がずれる場合は大きな問題になると思う。

Q11: 衝突させた方が、粒径が若干小さくなるのは何故か？合体後、微粒化が起きるのか？

A11: 手作りの粒径分布測定装置の精度も考慮すべきだが、特に大きい 50 μm 程度の粒が衝突後無くなっているのので、そのような粒は衝突の激しい乱れの中で分裂している可能性がある。また、千葉大の森吉先生からは、衝突位置で単独噴霧の微粒化が完全に終わって粒径が安定しているのかどうかという疑問が提示されている。衝突による液塊の微粒化促進の可能性は否定できない。

Q12: 粒径の測定位置は何処か？

A12: 私の研究室では定常な粒径分布計測しかできないので、5 Hz で繰り返し衝突させて、衝突位置のはるか下（300 mm 下）の流れの安定した領域で測定している。

3. 懇親会（東天紅名古屋店 17:20-19:00）

研究会終了後、2010 年度懇親会を行った。15 名の参加があり、相互の親睦を深めた。

以上