

日時： 2011年5月21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： 30名

小島晋爾(主査, 名城大学), 三上真人(講師, 山口大学), 鈴木敬(講師, マツダ), 高橋周平(幹事, 岐阜大学), 中田浩一(トヨタ自動車), 内田登 [追: 加藤秀輝] (日野自動車), 加藤正明 (デンソー), 佐々木覚 [追: 谷泰臣] (デンソー), 小池誠(豊田中央研究所), 堀川英知 (ダイハツ工業), 高野孝義(豊田工業大学), 調尚高 [追: 守田] (日本自動車部品総研), 園比呂志 (本田技術研究所), 中島邦彦(ユニバンス), 大平哲也(スズキ自動車), 鬼頭俊介(豊田高専), 田村守淑(東邦ガス), 太田安彦(元名古屋工業大学), 長谷川国生(元ダイハツ工業), 金子誠(富士重工), 藤川武敏(豊田中央研究所), 野田進, [追: 伊藤高啓] (豊橋技術科学大), 中村俊秋(豊田自動織機), 鈴木浩高(いすゞ中央研究所), 山本茂雄(三菱自動車), 内田 睦 [代: 高島良胤] (大阪ガス)

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) 山口大学大学院理工学研究科教授 三上真人氏 (13:40-15:10)

「液滴群の燃え広がり」と群燃焼」

要旨：

噴霧燃焼はディーゼルエンジン, ガスタービン, ロケットモーターなどの燃焼に用いられており, これらの燃焼器の安定作動には, いわゆる群燃焼の解析が重要な課題となる. 従来の研究において, 群燃焼は群燃焼理論を用いて大まかにシース燃焼, 外部群燃焼, 内部群燃焼, 単滴燃焼の4つに分類され, これらは群燃焼数 G を用いて整理されている. 群燃焼においては多数の液滴が燃焼するが, この要素として, 液滴列の燃焼解析がこれまでに多く行われてきた. 2液滴の燃焼実験においては, 液滴間隔を変化させると, 液滴同士の干渉によって燃焼時間が変化することが分かっているが, 定常理論においては, この干渉の影響は無次元液滴間距離によってのみ決定される. しかしながら, 実際の噴霧燃焼においては, 液滴は時間と共に蒸発して最終的には消滅するため, ある有限の時間内に干渉が生じないかぎり, 液滴の影響がさらに遠方へ伝達されることはないことが予想される. この観点から, 従来の群燃焼数に注目すると, 式の中に液滴直径, 間隔のほか, 液滴群の半径のスケールが現れることが分かる. 前述のように液滴同士の干渉が有限の時間内でのみ伝達されるのであれば, この液滴群の半径に関しては, 非定常性を考慮した修正が必要であると考えられる. そこで, 噴霧燃焼に対して, 予混合噴霧という概念を導入する. これは, 予混合気の当量比と同様の概念であり, 予蒸発の有無にかかわらず, ある空間にどの程度の燃料液滴と空気が存在しているかを表わすものである. この予混合噴霧内での燃え広がりを解析することで, 群燃焼が整理されると考えられる.

群燃焼の発現を観察するため, 対向流バーナーをもちいて, 定常予混合噴霧火炎の火炎構造を調べた. この実験では, 予蒸発が起こりにくい揮発性の低燃料 (n -デカン) を用いた. 液滴径を変化させて実験を行ったところ, 液滴径が小さい場合にはフラッシュバックを, 大きい場合には吹き飛びを生じることが分かった. この傾向は, 予混合気火炎の挙動と似ている. 予混合噴霧火炎を通常の CCD カメラで撮影すると, 青い火炎と黄色い火炎の二重構造が存在するように観察される. この火炎を高速カメラで調べると, 球状の火炎が多数存在している様子が見られる. この火炎構造を解析するに当たり, 静止した噴霧中に火炎が伝播していく場を想定し, 液滴同士の干渉を考える. このとき, 火炎伝播のモードは, 液滴間隔 (S) を液滴直径 (d_0) で無次元化した S/d_0 で切り替わることが, 液滴列の燃焼実験および理論より分かっている. 定常予混合噴霧火炎においては, まず, 上流から運ばれる液滴が加熱されて予混合気形成され, 着火することにより液滴まわりに青い火炎がまず発現する. 次に, この火炎同士が干渉をし, 燃料過濃な条件では, 酸素不足となることによりすすが生成され, 黄色の色を呈するようになることができる. このような観察結果から, 群燃焼においては, S/d_0 によって定まる燃え広がり速度があり, その後, 液滴間の干渉により群燃焼が生じることから, 群燃焼の発現には, 液滴の影響距離が重要なパラメータであることが理解できる.

噴霧燃焼で観察される現象と, 噴霧燃焼の要素に相当する液滴列の燃焼の知見を結び付ける手段として, パーコレーション理論が注目されている. パーコレーション理論では, ランダムに分布する系が, 近接するもの同士の間で働くルールにより支配される. パーコレーション理論を用いると, たとえば巨大クラスターの発現率が, 空間での粒子の占有率によって予想でき, 極限を取ると巨大クラスター発現の臨界占有率 (P_c) が存在することが分かる. この理論を液滴群に適用すると, 前述の液滴列間の火炎伝播モードが粒子同士を結び付ける関数となる. このとき,

液滴の占有率が P_c 以下の場合に部分燃焼が、液滴の占有率が P_c 以上の場合に群燃焼が発現することが予想される。液滴間には限界の燃え広がり限界距離 ($S/d_0 \sim 14$ 程度) が存在するので、液滴間隔がこの限界距離以下では火炎が伝播し、それ以上では伝播しないというモデルを立てて計算をする。このとき、 S/d_0 がある値に達すると、急激に群燃焼の発現確率が下がるという結果が得られた。このとき、臨界点条件での燃焼現象に注目すると、燃焼時間のばらつきが大きく、またあちこち時間をかけて燃え広がるため、燃焼時間が長くなるという結果も見られた。一般に、臨界点においては特性時間が発散することが知られているが、噴霧燃焼においても同様のことが生じることが予想される。また、臨界条件においては、液滴が密な部分と疎な部分が存在するが、密な部分の液滴間の干渉により影響距離が増える。さらに、液滴配列の方向によって影響距離が異なるという微小重力実験の結果なども得られており、これらの知見を組み込むことで、噴霧燃焼を予想できるパーコレーションモデルを構築することが期待できる。

噴霧燃焼の新しいツールとして、過濃 (当量比 4~8) な噴霧バーナーを用いた実験結果を紹介する。過濃噴霧バーナーを用いた実験を行うと、火炎基部に内部火炎が観察される。この内部火炎は定在しているとみなせるため、対向バーナーの実験と同じように、火炎燃え広がり理論で火炎高さなどの現象を説明できる。たとえば、内部火炎は総当量比を下げると高くなる傾向がある。これは、総当量比が小さくなることで、予混合噴霧の S/d_0 が大きくなり、この結果、燃え広がり速度が小さくなり火炎高さが高くなるとう理解することができる。また、当量比を大きくすると、内部火炎が消滅するが、これは、液滴が加熱されて予混合気形成され、その後、着火遅れの時間内に火炎が形成されるが、これらの遅れ時間の間に過濃になりすぎて可燃範囲から外れることにより消滅すると考えられる。

Q.1 パーコレーション理論で、ある占有率を境にステップ的に巨大クラスターが発生するのはどのような場合か？

A.1 粒子サイズが無限大になるとステップ的になるが、実際には有限であるため、ある程度曲線的なものになる。

Q.2 $S/d_0 \sim 14$ 程度で火炎伝播の限界距離となることだが、これは理論的にでるのか？

A.2 上記の値は実験結果によるもので、理論値から求めるにはまだ至っていない。

Q.3 懸垂線による液滴列の実験では、液滴間距離 (S) や初期径 (d_0) はきちんと与えることができるが、対向流バーナーではこれらに分散があると考えられる。また、パーコレーション理論においても、現時点では d_0 は固定として扱っているが、これらが結果に及ぼす影響はどのように見積もっているか？

A.3 たとえばザウター平均径 (d_{32}) で燃え広がり速度を代表できるかを、対向バーナーを用いて実験を行ったところ、若干のずれはあるものの定性的には合うことが分かっており、変動場にもある程度利用できると考えている。

Q.4 群燃焼数 G の計算に当たって、 nT , Sc , Re , Le はどのような値を使うべきか？また、パーコレーション理論での P は何を使うのか？

A.4 nT : 噴霧中の粒子数, Sc : ガスのシュミット数, Re : 液滴のレイノルズ数 (速度は相対速度), Le : ガスのルイス数。 P は体積占有率や面積占有率が相当するが、平均液滴間隔を導入して代表させる方が 2 次元格子、3 次元格子での結果を比較できるためより良いと考えられる。

Q.5 対向バーナーの実験において、液滴径 d_0 を小さくすると S/d_0 が大きくなると思うが、フラッシュバックをする理由は？

A.5 対向バーナーでの実験では、 S/d_0 一定のもとで実験しており、この場合燃え広がり速度 V_f として、 $V_f \times d_0$ 一定となるため、 d_0 を小さくすると実際の燃え広がり速度が上がりフラッシュバックする。

Q.6 パーコレーションモデル内での時間スケールはどのようにして求めているか？

A.6 時間スケールは実験値から定めている。

Q.7 パーコレーション理論で使用したモデルは、実際の燃焼器ではどのような場面で使えるのか？

A.7 揮発性の低い n -デカンの燃え広がり実験から導出したモデルなので、たとえば大気圧下で作動する石油ファンヒーターのような燃焼器が相当する。自動車のエンジンの場合は、高温で予蒸発もかなり進むため、結果は異なる可能性が高い。

Q.8 熱の移動は何が支配的になっているのか？

A.8 熱伝導が支配的である。ふく射による加熱はあまり影響なく、どちらかというと、巨大になった群燃焼火炎からのふく射損失の効果があるため、これを考慮する必要があると考えられる。

(2) マツダ株式会社パワートレイン開発本部主査 鈴木敬氏 (13:40-15:10)

「SKYACTIV エンジン技術コンセプトの紹介」

要旨：マツダの C2 削減の考え方に関して紹介。大きな方向は、ベース技術を徹底的に改良して、段階的に電気デバイスを導入。本講演では、ベース技術の中でもエンジン技術を中心にご講演。エンジンでの燃費改善は、排気損失、冷却損失、ポンプ損失を低減することである。この中でも、制御可能な因子を理想に近づける取り組みとなる。そこで、ガソリン・ディーゼルともに各因子を進化させる VISON を設定して取り組んでいる。

また、エンジンの燃費を改善すれば電動デバイスは小さくなるということであり、エンジンの燃費改善は重要である。

最初に、SKYACTIV-G のコンセプトについて紹介する。出力性能は現行エンジンから低・中速トルクを 15%上回る目標とし、また、燃費はディーゼル並みという目標を設定して進めた。これらは、ほぼ達成の見込みである。これらを実現するために高圧縮比が重要となる。高圧縮比化が進んでいない理由の一つとしてノックがあり、トルクが低下するという弊害が見られる。この点に関しては、低温酸化反応が有効に作用することで、あるレベル以上で鎮静化するのではないかとという発想から研究に着手することにした。

低速トルク改善において最も大きく貢献したのは、4-2-1 排気であり、掃気効果により耐ノック性を向上させ、吸排気の S-VT と併せて空気量を確保した。この 4-2-1 排気は、残留ガスを最小限に抑えることが可能でノッキングを改善できる。また、直噴や耐ノック性向上ピストンを採用することも大きくノック改善に繋がった。

高圧縮比化が進まないもう一つの理由は、冷却損失が増えることにある。この対策として、キャビティ付きピストンによる。初期の火炎成長促進や小ボア径の採用により低減した。

次に、SKYACTIV-D のコンセプトについて紹介する。

狙いは、厳しい排気ガス規制に対応しても従来エンジンより 15-20%燃費を改善することである。ディーゼルは圧縮比が高いために、燃料が十分に混ざる前に着火することで、NO_x や煤が多くなる。低圧縮比にすると温度が低下するので、着火するまでに混ざる時間を十分に稼ぐことが可能となり、NO_x や煤を少なくすることが出来る。その結果として、燃焼タイミングを最適化することが出来るので、膨張比を高めたのと同様の効果が得られる。

また、低圧縮比化することで機械抵抗の低減にも繋がる。この結果、機械抵抗をガソリンエンジン並みに抑えることが出来た。その結果、大幅な燃費改善(4-5%)を達成できた。

ディーゼルで低圧縮比化が進まなかったのは、低温での始動性と暖機中の半失火がある。これらに対しては、12 ホールノズルおよび近接マルチパイロット噴射や排気 VVL を採用することで対応する。

最後に、デミオに採用されるエンジンの概要について紹介。この車両は CVT を採用することから、Cooled EGR を追加し、高負荷での燃費を改善した。また、この車両の位置づけとしては、燃費に特化したものである。

Q1:欧州では 95RON 燃料なので、圧縮比を高めるのか？

→ ε 14 で対応する。

Q2:過給でも大きな効果が期待できると思うが、どうですか？

→研究は行っています。