主査：飯島(日本大学理工学部)
幹事：中山(SUBARU 桂の代理)

日本機械学会 エンジンシステム部門委員会 A-TS07-59
第 12 回 高効率エンジン燃焼技術の高度化研究会
日時：2023/3/20(月)13:30～17:15
場所：日本大学理工学部 駿河台キャンパス(御茶ノ水)
タワースコラ 2 階 S202 室
参加者：**小川**(北海道大学)，**佐々木**(元・千葉工業大学)，**渡邉**(Honda R&D)，養祖，山川(マツダ)，松村(同志社大学)，**川上**(法政大学)，北畠，五味，古川(いすゞ中央研究所)，石井，永吉(日野自動車)，**青柳，内田**(新エィシーイー)，森(帝京大学)，**佐藤，田原，白根，林，山田**(日本大学理工学部)，熊谷(本田技研工業)，石山(京都大学)，**衛藤**(やまびこ)，佐古(大阪ガス)，**飯島**(日本大学)，**中山**(SUBARU：書)
計 26 名，敬称略，順不同，**太字**は現地参加者，ハイブリッド開催(現地+Web)

話題提供：
１．「逆デルタ噴射率ディーゼル燃焼の燃焼観察」
元・千葉工業大学 佐々木洋士 先生

(1)序論：多段 HCCI 機関について
特徴：熱発生率のピークの低減，適度な燃焼期間が実現できる．急激な燃焼を回避できる期待がある．
⇒燃焼室を大小二つの燃焼室に分割，小燃焼室(副室)⇒大燃焼室の順に HCCI 燃焼
・制御弁付副室式遮熱型天然ガスエンジン(単気筒)の紹介
セラミック：SI_3N_4(窒化ケイ素)を採用．
仕様：Φ110mm×125mm:1187cc，ε13.7～15.7，燃料：CNG(天然ガス)
全量を副室に天然ガスを供給する⇒一部を副室に供給する・・・うまくいった．
当初の遮熱エンジンコンセプト：冷却系の除去
⇒排熱回収による熱効率向上，軽量化
⇒ディーゼルでは燃焼悪化で熱効率は低下，エンジンの無冷却運転には成功．
・作動方法
圧縮上死点手前で副室内の CNG を噴射し，燃焼させる．燃焼～膨張～排気行程にかけて副室の制御弁が開く．
性能：制御弁の開くタイミング次第で IMEP のコントロールが可能．
熱効率が高い時は二段燃焼．一段目は副室，二段目は主室での燃焼になる．熱発生率形状から主室では HCCI 燃焼になっている．
⇒遮熱エンジンでも燃焼が正常に行われれば高熱効率が実現可能．
・多段 HCCI 機関の試作
型式：横型水冷，Φ96mm×105mm，行程容積 760cc，ε13～17，副室容積比：10～20%

・性能結果

燃料：小燃焼室：イソオクタン，大燃焼室：エタノール

多段 HCCI 燃焼により高い負荷(～600kPa 以上)まで運転可能，NOx 排出濃度は高い.

小燃焼室で先に着火すれば多段 HCCI 燃焼が可能

図示熱効率は 47.7%達成(IMEP300kPa 程度)，EGR で熱効率向上，運転範囲の拡大が可能.

小燃焼室で先に着火・燃焼できれば大燃焼室，小燃焼室共同一の燃料で多段の HCCI 燃焼可能.

(2)本題：逆デルタ噴射率ディーゼル燃焼

ディーゼル機関における課題の一つ：後燃えの抑制

コンセプト：噴射率を逆デルタ側にすることで後燃えの抑制を実現する.

研究目的：逆デルタ噴射による噴霧の可視化

ピエゾアクチュエータ+針弁の直接駆動で任意の噴射率パターンが実現可能.

インジェクタ仕様：ストローク量：0.2mm，ピエゾアクチュエータ印加電圧：1000V，発生力：35N/um

インジェクタとピエゾアクチュエータを接続させたもの．Piezomechanik 社製.

噴射率計を試作：Zeuch 法を採用.

ピエゾ駆動信号を制御することでピエゾ素子の変位量をコントロール⇒噴射率を逆デルタ型にする.

定容容器：反射式のシャドウグラフを採用.

ヘッド内面を鏡面加工することでシャドウグラフが可能になる.

可視化計測条件：撮影速度：25,000fps，解像度：640×470，燃圧：200MPa，

矩形波(従来)：火炎の進行はある程度進むと停止，噴射終了後しばらく輝炎が壁面近傍に滞留.

逆デルタ：火炎は噴孔に向かって進行し，噴射終了時には火炎は噴孔近くまで達する．逆デルタ噴射率の大きな特徴．燃料噴霧が壁面に到達後の輝炎は壁面からの厚みが薄く，透明度も高い．壁面に到達後の輝炎は速やかに消滅する.

⇒スモークレスディーゼルが実現できる？

後燃えが改善できたか？

⇒今回の条件ではあまり見られず・・・

Set-off 長さ(噴孔～輝炎までの距離)が時間経過に伴い，短くなる.

◎まとめ

・噴霧先端部で着火後，火炎は噴孔部に向かって進行，Set-off 長さ噴射と共に減少

・噴射狩猟後の燃焼室外周部に滞留する輝炎の厚さ，輝度減少，消滅も速やか

・噴孔数が増加(噴霧当たり男燃料噴射量は減少)すると輝炎が大幅に減少

⇒エンジン内で同様の現象が行われたら，出力・熱効率はどうなる？排ガスは？

スモークレスディーゼル燃焼の実現は可能か？・・・といった性能確認は今後の課題.

Q&A

【川上先生】

火炎が噴孔近くに出てくる．うまく組み合わせると NOx は低減すると考えるがどのような見解か？
⇒そう考えている．うまくバランスが取れるといい．ディーゼルエンジンで NOx か Soot のどちらかがなくなれば非常に楽になる．Soot がなくなれば，NOx に集中できる．逆も然り．
【小川先生】
デルタ噴射で燃圧 200MPa とあって，噴射率が高いのと低いのがあるが？これはレール圧なのか？
⇒噴射圧は両方とも 200MPa．噴孔径の大小および駆動信号によって逆デルタ噴射率パターンを変更させている．
【内田様】
小燃焼室の構造はどうなっているのか？
⇒小燃焼室の噴孔面積比は 1%．噴口出口部で面積比が 1%となるように僅かに絞りを設けている．
当量比の設定は？
⇒大燃焼室，小燃焼室共に吸気量比．したがって小燃焼室の着火時の当量比とは大きく異なる．着火時は大燃焼室の燃料が流入するので．
【小川先生】
圧縮着火ではなく，トーチ火炎だから高い当量比まで回せる？大燃焼室で圧縮着火させるとノックがひどくなるはず．
⇒今回の燃焼室では噴口とピストン頂面が近いのでトーチ状火炎とはなっていないと考えている．噴口から出た燃焼ガスは大燃焼室の混合気とあまり混合せず，ヘッドとピストン頂面の間を同心円状（小燃焼室が傾いているので必ずしも同心円状にはならないが…）に広がり，結果として大燃焼室の混合気をシリンダ壁方向へ押しつける（圧縮する）ように予混合気を圧縮し，HCCI と同様の（予混合気の自着火）の燃焼となったものと考えている．ジェットの効果を狙ってピストンキャビティをディーゼルのような深皿形状にしたことがあるが，結果はあまりよくなかった（*）ので，深皿形状は早々にやめて今の形状で進めてきた．
※渡邊，山田，佐々木：副室式予混合圧縮着火燃焼機関の研究（燃焼室諸元の影響），第 23 回内燃機関シンポジウム CD-ROM，B1-11，（2012）
【内田様】
ピストン上部には SUS を装着，下部は空洞？ピストンの面は冷却しているのか？ジェットはある？
⇒冷却はしていない．オイルジェットもない．
ピストン表面温度も重要だと思うが，ピストンを深くしたときに壁面温度が大きく関わっているのでは？スキッシュエリアでよく燃えるのは難しいと思っている．
⇒それを懸念して広めにとっている．
スキッシュのような火炎が回らない領域は厳しいと思う．熱発生について位相がもう少し近くすると理想に近くなってくる．
⇒熱効率は 47.7%の時の COV of IMEP は 1%以下レベル．その他の点は 2～3%程度．燃焼変動がかなり抑えられる．
結局後燃えは変えられなかった？
⇒逆デルタだと難しかったと考える．

燃焼室の中で逆デルタを使えば，後燃えは本当によくなるのか気になる．セットオフ長さが短くなれば，燃焼としては悪化する．後期燃焼が逆デルタだと狙った方向にはいかないのでは？
⇒後燃えと逆デルタとはリンクしていないのかも．実際に調べたいところだが，継続できない研究なので．理想は噴射期間≠燃焼期間．逆デルタの初期の噴射量が後燃えに影響しているのかもしれない．
【小川先生】
せっかく上げた噴射率を下げていくのはもったいない？噴射自体を短期間で終わらせてしまった方がいいのでは？
⇒相澤先生によると噴射率の傾きを大きくした方が良いとのこと．
森先生：スモークレスには輝炎の発生ゼロにしないといけない．逆デルタの場合で輝炎があるがどうすれば良いのか？
⇒噴孔数を多くすると輝炎は減る．まずは噴射率波形を滑らかに低減させる．火炎に濃い燃料噴霧が突入し，それが輝炎になっていく．噴孔数を増やすと，噴孔当たりの噴射量が減るので輝炎も減らしていけるはず．過去の取り組みでも輝炎が発生しにくい状況はつくれた．
変動を無くすのは難しいが，何か考えはあるのか？
⇒逆デルタで変動を減らしていきたい．
【衛藤様】
シャドウグラフの動画でガスが振動しているように見えるのは？
⇒噴霧によって着火時期が異なるので振動しているように見える．最初の着火箇所が元になって振動となって進んでいく．
振動の往復のスピードとしては火花点火のノックのようにダメージがあるのか？
⇒単に圧力波が行ったり来たりしているだけで，SI 燃焼のダメージほどはない．(内田様回答)
◎資料（スライド pdf 版，動画は含まず）ご希望でしたら佐々木宛（hk2.sasaki@gmail.com）ご連絡ください

２．「燃料噴霧間干渉の抑制および無煙含酸素燃料によるディーゼル燃焼改善のポテンシャル」

北海道大学　小川英之 先生

(1)燃料噴霧間干渉の抑制

問題：噴孔数の過度な増加による噴霧間干渉の誘発
燃焼緩慢化および黒煙生成助長
ゼロスワール化は不可能？

対策：千鳥噴孔配置ノズル
噴霧上下分配型燃焼室
・・・2021 の内燃機関シンポジウムにて CFD による検討と，燃焼室形状を提案⇒本日は実証と機構解明について説明

エンジン仕様：Φ85×96.9mm，550cc，ε16.3
燃焼室：リエントラント型，噴霧上下分配型(中段リップ付き)(評価仕様は燃焼室の上下の燃

焼室割合 4:6，5:5，6:4）パイロット噴射，プレ噴射は行っている.
噴霧上下分配型で図示熱効率は向上．冷損が悪化．排気損失が改善．黒煙減少.
性能評価(解析)
噴霧上下分配型では，噴霧同士の干渉が少ない.
千鳥ノズル+中段リップ付き燃焼室の採用で冷却損失が増加.
◎まとめ
・千鳥噴孔配置ノズル，噴霧上下分配型燃焼室
⇒主燃焼活発化+噴霧間干渉抑制⇒後燃え減少
・噴霧間干渉抑制効果
⇒熱効率向上+排気黒煙低減

Q&A
【内田様】
2250rpm の結果で低回転化すると状況は変わるのでは？スワール感度が大きいのでスキッシュとスワールの変化があると思う．検討されているか？
⇒いろんな運転条件までやれていないので今後検討する.
【衛藤様】
黒煙低減について運転後のピストンやヘッド表面のススの付着はどうなっているのか？
⇒みていない.
【青柳様】
性能が一番いいのは千鳥にしたものが良かった．黒煙も少ない．聞きたいのは，P.4 の噴霧が干渉している動画で，こうやって干渉していると黒くなって見えるから燃料濃度が高くなっているということを言いたいのか？噴霧が蒸発していれば，干渉してもそんなに濃くならないかもしれない．粒同士が干渉しているというのは定量的に言えるのか？黒いのは何か？
⇒黒いのはススを示している．気相場での撮影結果になる.
燃焼させた画像なのか？
⇒はい.
燃焼させていないものかと思ったが，黒い部分はススということ.
⇒干渉させることにより酸素不足になり，ススが形成されてしまう.
CFD の結果 P.21 で，8CA の右側のイメージで赤い領域は？
⇒ヘッド面での温度分布を示している.
NOx が悪い？
⇒これだけで判断するのは尚早.
ススが多く出ているのがわかればいいが，CFD でわかるのか？
⇒CFD での排ガス結果は精度として信用していない.
【森先生】

中段リップの耐久信頼性向上について，鋳鉄製か？
⇒アルミ製．耐久試験にはしていない．マツダと形状が似ている．マツダのピストンは鉄製のはず．
噴射時期制御が難しくなりそうだが？
⇒細かい制御が必要になってくる．適当な制御でもいい結果になっているので，更に制御でよくなるはず．

(2)無煙含酸素燃料
含酸素燃料に関する概要：特徴・種類，低位発熱量と単位体積量論混合気の発熱量．密度と沸点．
単気筒，燃圧 20MPa のディーゼル．
酸素含有率の増加に対し黒煙は一元的に減少
三元触媒で，高出力，低 NOx，無煙運転が実現．
酸素含有率の増加に伴い・・・燃料噴射期間増加，熱発生終了時期：同等
噴霧中心軸付近の燃焼活発化．
後燃え減少，特に後半の緩慢な燃焼が減少．
酸素含有率の増加に伴い・・・等容度向上(後燃え短縮)
冷却損失低減～増加に転じる．20%くらいがベスト．
等容度向上～冷損増加のバランスから，27%くらいが最高熱効率
高酸素含有率で Smoke ゼロ，NOx は高 EGR 低吸気酸素濃度で低レベル．

Q&A
【川上先生】
含酸素量でみるとかなり高くないと制御ができない．DMC あたりがベストなのか？
⇒DMC だとガソリンが向いているかもしれない．
【渡邉様】
燃料系としてのハードウェアの最適化について何か要望，コメントなどあるか？
⇒噴霧間干渉が起きても問題ないのでもっと多孔化するなど，軽油だとできない，やってはいけないようなハードを作ってみるとかいいかもしれない．まだまだ伸び代がある．固定概念を取っ払うような考えがあればいい．
【内田様】
無煙燃焼は良い．効率がどれくらい良くなるのかが大事．効率が良く成ればユーザとしても開発するための動機付けになってくる．高効率エンジンを見ると圧縮比が高くなってくる．燃焼として果たしてうまく燃えてくれるか，高セタン価も影響ありそう．高効率化しているエンジンで使うにはでチューンする可能性もある・・？
⇒その通りかもしれないが，高セタン価は含酸素燃料でも当てはまるのか？を考えることも大事．
【青柳様】
含酸素燃料をλ1 で燃焼させて三元触媒を使うのは独自のアイデア？
⇒昔の話なので覚えていない．
小川先生のオリジナリティであれば強調してもよい．
⇒過去の話なので，量論比で回ったから三元触媒を使った・・・だけだったかも．

FAME を使って試験をやった．内燃機関の開発をやっている人は深刻な状況になっているのでうまくやっていきたい．
⇒合成燃料に期待したい．
衛藤様：含酸素燃料について，燃料タンク容量や・・・アプリケーションを考えたい．
⇒OME はゴムの腐食性が高い．軽油に混ぜるのもよくない．

両講演共，非常に活発な質疑が行われた．

以上