’18. 6. 24

JSME　「内燃機関の熱効率55%達成に向けた技術の道筋を議論する研究会」

‘18年度　第1回研究会議事録

【日時・場所】

日時：‘18年5月19日（土）　13:30～16:45

場所：愛知工業大学　本山キャンパス　講義室1

【出席者】

西山（講師・ｲﾏｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ），田村（講師・東邦ｶﾞｽ）

太田 篤（ﾄﾖﾀ）,太田 安（元名古屋工業大）,河野（SOKEN）,鬼頭（豊田工専），

小島（名城大）,,佐古（大阪ｶﾞｽ）,高野（豊田工大）,,高橋（岐阜大），中島（名城大），

永田（元ｱｲｼﾝ）,長谷川（元ﾀﾞｲﾊﾂ），船山（日野自動車）,宮川（豊田中央研究所），

山川（ﾏﾂﾀﾞ）,山根（滋賀県大）,田中（追・SOKEN）,小林（追・岐阜大）

芹澤（主査・ﾀﾞｲﾊﾂ）,井原（幹事・大同大）,中村（幹事・豊田自動織機）

※　敬称略　代：代理, 追：追加

【主査挨拶】

1．18年度の体制

・会の目的：内燃機関の熱効率を将来的に55%まで引き上げるにはどのような技術が必要か議論する.

・運営：主査　芹澤　毅（ダイハツ工業),
　　　　幹事　井原　禎貴（大同大学）中村　俊秋（豊田自動織機）

・開催日程：第1回　5月19日（土), 第2回　9月1日（土),
　　　　　　第3回　11月24日（土), 第4回　‘19年2月16日（土）

・会場：愛知工業大学　本山キャンパス

・委員の交代, 追加：三菱自動車㈱　口田　征人委員より久米　建夫委員へ交代
　　　　　　　　　　岐阜大学　小林　芳成委員追加

2．今回の話題について

「火花点火機関火炎伝播」の起点となる, 点火から着火現象について,
電気系の点火と化学系の点火の2件の話題を提供いただく.

【話題提供】

1.「Microwave　Discharge　Igniter(MDI)による燃焼改善」

講師：株式会社　ｲﾏｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ　西山様

1）　MDI

これまで超希薄な環境下で安定的な着火可能な点火系として, 2.45GHzのﾏｲｸﾛ波を使ったﾏｲｸﾛ波ﾌﾟﾗｽﾞﾏ技術に取り組んできた. 本日はﾏｲｸﾛ波だけを使ってﾌﾟﾗｽﾞﾏを生成

するｲｸﾞﾅｲﾀを新たに開発したので紹介する.

基本的にﾚｰｻﾞｰの集光や点火ﾌﾟﾗｸﾞの放電で作ったﾌﾟﾗｽﾞﾏにﾏｲｸﾛ波を供給することによりﾌﾟﾗｽﾞﾏを拡大する. 開発したｲｸﾞﾅｲﾀは Microwave discharge igniter(MDI)と名づけた. 内部は共振構造となっており, 供給したﾏｲｸﾛ波を増幅し先端でﾌﾟﾗｽﾞﾏを生成する.
ﾏｲｸﾛ波は断続的に供給する. 最初に 5~40 μs のﾊﾟﾙｽ幅でﾌﾞﾚｰｸﾀﾞｳﾝを起こし, その後短ﾊﾟﾙｽを供給し続けることによりﾌﾟﾗｽﾞﾏを維持する. ﾌﾟﾗｽﾞﾏは 30m/s（大気圧）の流れの中でも吹き消えることなく維持可能.

MDI の利点はﾌﾟﾗｽﾞﾏをﾏｲｸﾛ波の供給により長く維持することができる, 高流動でも吹き消えにくい. ｲｸﾞﾅｲﾀは小型で多点等, ｴﾝｼﾞﾝへの搭載自由度が高い. ﾌﾟﾗｽﾞﾏによるﾗｼﾞｶﾙを長く生成できる.

ﾏｲｸﾛ波の発振源は半導体を使用している. 元々は携帯電話の中継基地に使用されるﾃﾞﾊﾞｲｽで 2.45GHz で 1kW 程度ﾊｲﾊﾟﾜｰが使える. これにより 0.1 μs のｵｰﾀﾞｰでﾊﾟﾙｽ幅を制御可能.

ﾌﾟﾗｽﾞﾏの特性を分光分析により調査した. 1 発めは従来の火花放電のアーク放電と同様な幅広い波長を持つ. 2 発め以降は変化し, 3 発め以降は非平衡なﾌﾟﾗｽﾞﾏの特性となる.
N_2 の分子発光による回転温度, 振動温度に乖離が見られ非平衡ﾌﾟﾗｽﾞﾏになっている.

ﾊﾟﾙｽ幅（間隔 1 μs）を変化させた場合, ﾊﾟﾙｽ幅が長いと回転温度が高くなり, ﾌﾟﾗｽﾞﾏの状態を変えることができる. 圧力を変化させた場合, 低圧ではﾌﾟﾗｽﾞﾏが広がり, 高圧ではﾌﾟﾗｽﾞﾏが集中することが見られた.

ﾍﾟﾝﾄﾙｰﾌ型定容容器において放電方法の燃焼への影響を確認した. ﾌﾟﾛﾊﾟﾝを φ0.9, 初期圧力 3bar で燃焼させ等価火炎半径および火炎成長速度を計測した. 初期の火炎伝播速度として火炎成長速度が最低となるﾎﾟｲﾝﾄに着目した. ﾊﾟﾙｽの打ち方を L18 直交表に割り付け実験を行った. 最低火炎成長速度に感度が高い因子はﾌﾟﾗｽﾞﾏ持続時間とﾊﾟﾙｽ間隔であった. この時, 最低火炎成長速度の回転温度への影響は見られなかった.
また, O の発光強度に感度が高い因子もﾌﾟﾗｽﾞﾏ持続時間とﾊﾟﾙｽ間隔であり, ﾗｼﾞｶﾙの影響が大きいことが分かった.

ｲｸﾞﾅｲﾀ中心電極—接地電極ｷﾞｬｯﾌﾟ部の OH ﾗｼﾞｶﾙを LIF により計測した. ﾏｲｸﾛ波停止後の OH 強度の減衰をﾏｲｸﾛ波の持続時間を変化させ計測した. 持続時間が長い程, ﾏｲｸﾛ波停止直後の OH 強度は高い.

ｴﾝｼﾞﾝでの評価前に定容容器（0.5MPa, N_2）において連続放電(50Hz, 2 千万回)を行い問題なきことを確認した. また 3 気筒, 658cc ｴﾝｼﾞﾝを用い, 3000rpm, IMEP550kPa で 100Hr 運転し共振周波数の変化がないことを確認した.

単気筒 496.8cc ｴﾝｼﾞﾝにてﾘｰﾝ限界を評価した. 1000rpm, IMEP550kPa にて A/F28(COV5%), 3000rpm, IMEP550kPa にて同 24 と, いずれも従来 SI よりﾘｰﾝ限界が改善した.

更なるﾘｰﾝ限界の改善を狙い, M12 ｽﾊﾟｰｸﾌﾟﾗｸﾞの体格で MDI を 3 個組付けた.. 着火源の増加（1→2→3）に伴いﾘｰﾝ限界が改善した. また持続時間の増加によってもﾘｰﾝ限界が改善した.

本点火系を 3 気筒, 658cc ｴﾝｼﾞﾝを用い 1460rpm, 20Nm にて試験を実施した.. ﾘｰﾝ限界は気筒によって異なるが A/F30 付近となった. この時, 排気温が低下, NOx も低い値となった.

2） **Flat Panel Igniter（FPI）**

□8 のｾﾗﾐｯｸ平板に渦巻状のﾏｲｸﾛ波アンテナのﾊﾟﾀｰﾝを形成し, 平板上でﾌﾟﾗｽﾞﾏを発生させる.

平板上のﾌﾟﾗｽﾞﾏは 30m/s の高流動場においても吹き消えることは無い. 定容容器での評価において FPI は従来ｽﾊﾟｰｸﾌﾟﾗｸﾞに対して, 等ｴﾈﾙｷﾞｰで火炎伝播速度が速まった.

【質疑応答】

Q. MDIにおいて接地電極が4つあるが，可視化画像では同じ場所，1か所でしか放電が起こっていないので，従来のｽﾊﾟｰｸﾌﾟﾗｸﾞと同様に1つで良いのでは（太田安委員）

A. MDIは当初ﾏｲｸﾛ波の特性を優先し接地電極は全体を取り巻く形状であったが，初期の火炎の広がりが良くなかったのでｽﾘｯﾄを入れた．1か所で放電し続けるとｱﾝﾃﾅが消耗するので4か所にばらけるようにしている．ただし分光分析の際には便宜上1か所で放電させている．

Q. 放電ｴﾈﾙｷﾞは放電端電圧と電流の積の積分か，点火装置の出力か．
従来点火だとｺｲﾙで消費したｴﾈﾙｷﾞで示すが，同等か（太田安委員）

A. 放電端のｴﾈﾙｷﾞを送ったｴﾈﾙｷﾞと反射して戻ってきたｴﾈﾙｷﾞの差を取っている．
従来点火に相当するのはﾃﾞﾊﾞｲｽに送ったｴﾈﾙｷﾞで，その効率は60%程度

Q. Oｱﾄﾑの量でこのような点火は全て評価できるか．（太田安委員）

A. 一つの指標として分かりやすいOを使った．Oで全て説明できる訳ではない．

Q. 振動温度や回転温度は従来火花点火で言われている温度とは異なるが，それらが点火に効いているということか．（太田安委員）

A. 今回示した温度は定容容器での値で、ｴﾝｼﾞﾝ実機と紐づけられたものではなく，ﾌﾟﾗｽﾞﾏの特性を示すものと考える．

Q. 大量EGRでは火炎核形成の時間短縮が課題．それに有効か．（太田安委員）

A. 点火ﾌﾟﾗｸﾞにﾏｲｸﾛ波を入れたｼｽﾃﾑではEGR限界改善の効果を確認したが，今回ｼｽﾃﾑでは見ていない．但しﾌﾟﾗｽﾞﾏ持続時間を延ばしているので火炎核形成の時間を短縮するものでは無いと考える．

C. 従来点火に対してどの課題が解決したのか整理していただきたい．（太田安委員）

Q. FPIは熱伝達が小さいか．表面の材質は．（小島委員）

A. はい，そう考えております．ｱﾝﾃﾅのﾊﾟﾀｰﾝの上にｾﾗﾐｯｸをｺｰﾃｨﾝｸﾞしている．

Q. 熱伝導を考慮されて試行錯誤されたか．（小島委員）

A. 一つは熱，もう一つは電極の摩耗対策．

Q. 渦巻の長さは関係するか．（小島委員）

A. ﾏｲｸﾛ波の波長に関係する．

Q. 温度は火炎伝播に必要な温度であればよく，ﾗｼﾞｶﾙが必要ということか．
A/F30超で必要な既燃ｶﾞｽの温度は（小島委員）

A. はい．温度はそういう観点で整理していない．

Q. A/F30を超える領域は，今回発表にあった低回転，低負荷領域を想定して開発されているか（小島委員）

A. 実際狙っているのはもっと高い領域．今回条件は一番厳しい条件． NOxを20pppm程度を目標としてλは2＋αが必要．

Q. ｼｭﾘｰﾚﾝの画像で中心電極部から何か噴出しているように見えるのは何か（芹澤主査）

A. 電極の周りにも強い電界が出来，ﾌﾟﾗｽﾞﾏが電極間の水平方向だけでなく下方まで広がっていることが影響

Q. ﾌﾟﾗｸﾞの中で空洞共振を使っているか，ﾌﾟﾗｸﾞの構造体の中は何かで埋めているか（宮川委員）

A. はい，大部分がｾﾗﾐｯｸ．

Q. 点火限界が延びている理由は．ｴﾈﾙｷﾞｰ，火炎核の経路，ﾊﾟﾙｽの持続か．（宮川委員）

A. 最初に作る火炎核としては大きくはなく，ﾌﾟﾗｽﾞﾏが吹き消えることなく持続していること．

Q. 点火限界の延長は効率に影響しているか．未燃分の増加はないか．（宮川委員）

A. ISFCは良くなっている．入れているｴﾈﾙｷﾞによって，着火から2%燃焼割合くらいまでは安定するが，ﾌﾟﾗｸﾞ径φ12を超えると効果は無く通常点火と大きくは変わらない．
（芹澤主査：共同研究者）

Q. 点火時期はどういう形でｺﾝﾄﾛｰﾙしているか．（永田委員）

A. 最初の点火信号を起点として後のﾊﾟﾙｽを打っている．

Q. ｲﾘｼﾞｳﾑ電極のような高温対策は不要か.（永田委員）
A. 白金を使用, 初期はﾌﾟﾚｲｸﾞも発生していたので熱引けも考慮している.
Q. 4 つの設置電極に対して, 放電先の設置電極が左から下の電極に移っている.
その間で結構じっとしているのはどういう放電か.（太田安委員）
A. 電極の柱と柱の間の谷部に放電している.
Q. 投入ｴﾈﾙｷﾞを入射と反射の差で計測しているとのことであるが, 反射率はある臨界の電子密度に達すると入っていかないのでは.（宮川委員）
A. そうです. 持続している間でも先端のｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽが変ってくるので入り易くなり、断続的になる. 今以上にどんと入ってしまうとﾌﾟﾗｽﾞﾏの密度が上がり過ぎ電極が摩耗し易くなる.
Q. 気流を与えた時に SI に比べて流される量が少ないのはどう解釈すれば良いか.
（芹澤主査）
A. 電界が強い領域で保持されている.
Q. FPI は境界層があるので流速が SI より遅いのでは.（小島委員）
A. 実際は遅い.
Q. FPI の放電は面（帯状）または厚みがある（棒状）か.（太田安委員）
A. 棒状.
Q. 平面上では無く, .（太田安委員）
A. 棒状.

２.「副室型天然ガスエンジン燃焼について」

講師：東邦ガス株式会社　田村委員

GHP（ガスヒートポンプ）用ガスエンジンにおけるプレチャンバープラグ開発を紹介する. GHP の特徴として, 電力消費量小, 天然ガス燃料のため環境保全・省エネルギー, 部分負荷運転時間が長いことが挙げられる. 一般に希薄燃焼で運転し, 低 NOx 化を図っているため, 低 NOx と高熱効率を両立する技術が重要である. 新規開発のエンジンではなく, 既存エンジンを流用してプレチャンバープラグ化することで低コストで高効率化を実現できる.

1）４気筒プレチャンバーエンジン試験

2000 cc, 自動車用, 500～2700 rpm, λ 1.5, CR 12.3, 天然ガス燃料（13A）

プラグは点火位置（突き出し量, 1～3 mm）, 副室容積（0.86～0.93 cc）, 噴口径（1.1～1.3 mm）を評価対象とした. 噴口数は 6 で一定.

・実機条件に合わせた NOx 上限値を定め, 高～低負荷 3 点で試験.
・ノーマルプラグとの熱効率比較：低負荷は 1.9%, 中負荷は 6.9%向上. 高負荷は差異なし.
・熱効率向上条件では, 燃焼期間が短縮されている.
・冷却損失が増加したものの, 時間損失・排気損失の低減が上回って熱効率向上に寄与.
・点火位置は, 燃焼室側に突き出すと低負荷で失火抑制効果が高い.
→計算モデル（Converge, kε標準モデル, GRIMech3.0）で検証.
メタンモル濃度分布履歴を見ると, 副室内ガス交換に時間がかかり, 点火までの期間が短く, 失火の原因となる.
・副室容積は, 大きいほど中負荷で効率向上.
・噴口径は小さい方が高効率. 火炎ジェットの速度が増し, 燃焼期間が短縮されるためか. 一方でガス交換がしづらくなり, 失火確率は上がる.

2）３気筒プレチャンバーエンジン試験

952cc, 800～3000 rpm, λ 1.5, CR12.0

プレチャンバー化で燃焼期間短縮. 時間損失の減少幅が縮小, 冷却損失増大の結果, 熱効率改善なし. スワール流のある燃焼室形状のためか.

3) 定容容器燃焼試験

主室:142.4 cc, 副室:1.19～1.73 cc, 当量比 0.8, メタン.

小口径化あるいは副室容積拡大で最大熱発生率が大きくなる.

直接撮影:小口径(2 mm)で壁にぶつかった噴流の火炎面の乱れが見られる.

シュリーレン撮影:小口径では, 未燃混合気の噴流が噴出してから, 火炎が後に続く.

計算モデル(Converge): 2 mm の場合, 温度分布で見た火炎形態は実験と大きく異なる. 実験との圧力履歴比較では, 2 mm より大きい条件では比較的一致している.

【質疑応答】

Q. 計算では 2 mm の場合, 何が起きているのか. (芹澤主査)

A. 2 mm では渦輪の形成がなく, 混合気部分の火炎伝播がない点が, 実験と異なる.

Q. エンジンの場合, 副室内混合気は前サイクルの影響で高 EGR になり, 温度も主室より高いと考えられる. 計算や定容容器の場合とは, 条件が異なってくる. エンジンの場合は副室内の既燃ガスがどれくらいガス交換されるのか. 噴口径が小さい場合, 副室から噴出するのは火炎ではなく, ホットガスではないか. (太田安彦委員)

A. 計算では実際に起こっていることが当てはめ切れていない. 確かにエンジン実験で温度計測をすると, 副室内の温度が高くなっている. もっと詳細な検討を進めたい.

Q. 定容容器のシュリーレン写真を見ると, 小噴口の場合, 噴流が出てきてから燃焼しているように見えるが, 何が起こっているのか. (長谷川委員)

A. 副室内で既燃ガスが未燃ガスを押し出して, 押し出された未燃ガスに火炎伝播していると考えている. 噴口が大きいと, 主室との圧力差が小さいので未燃ガスの噴出量が少ないと思われる.

Q. ヨーロッパのバイオガスエンジンもプレチャンバーを使っているが, もっと噴口径が小さい(0.5 mm 程度). 空燃比の変動も大きいのだが, 安定して燃焼し, 効率 44%等を実現している. 今回の内容でも, もっと小噴口でやるとどうなるのか. (永田委員)

A. 定容容器の実験でもっと小噴口(1 mm 以下)でやったが, 失火した.

Q. 噴口径 2 mm の場合, 火炎部分は, 副室内の既燃ガスが噴き出ているのか, 噴出した未燃ガスが自着火するのか, どちらか. (小島委員)

A 副室内の既燃ガスが噴き出ていると考えている. 主室に噴出した未燃ガスはまだ自着火温度に達していないのではないか.

C. 噴口が小さくなると, 火炎が通過できなくなる. 通過時に失火してしまったホットガスが噴出すると, 着火に時間がかかるのが特徴. (太田委員)

Q. シュリーレンの既燃ガスのしわ状のものは何か. (長谷川委員)

A. わからない. 乱れではないか.

C. オリフィス通過によって生じる, ウェイク(後流)だと思われる. (太田委員)

Q. 噴口径 2 mm では計算が実験と合っていないが, kεモデルの拡散項を最適化できないか. (中村委員)

A. シュミット数を調整可能だが, やっていない. メッシュの大きさは火炎帯厚さ程度(0.5 mm)確保しているが, もっと細かい方がいいのかもしれない. 計算機パワーの都合でこれ以上は細かくしていない.

C. 計算の圧力経過を見ると, 主室は燃えていない. 実験では明らかに燃えている. そこが違う.

Q. シュリーレン写真では, 同時期を比較すると火炎長さは 3, 4 mm の方が長いように見える. どう解釈すればよいのか. (芹澤委員)

A. 噴口径 2 mm では主室に火炎が出るのが遅く, その後の燃焼速度が早いと解釈している.

C. これは定容容器なので, 副室内に既燃ガスはない. 噴口径が小さいと火炎は出てこれないので, 副室内で燃えて高温になったガスが消炎して出てきて主室の混合気と混合し, ある時点で急激に自着火して, あの特異な熱発生形状になったと想像する. (小島委員)

C. 2 mm で消炎する，と決まったわけではない．（太田安彦委員）
C. あるいは，副室の未燃と既燃が混合したものが噴出してきた，という可能性もある．（小島委員）
A. 着火手法としてどれがいいのか，これらの結果から示唆を得たい．
Q. 小噴口だと，絞り損失が出ないか．（長谷川委員）
A. 副室を使って，主室を乱流で十分混合して着火を促進するという考え方と，主室壁面からの熱損失を減らすという考え方で議論はある．
C. ディーゼルでは，副室の絞り損失と冷却損失が嫌われて副室式は敬遠された．（太田委員）
Q. 小噴口で，噴流が出てから着火するような状況では，時間遅れがある．着火時期を適切なところに持ってくるのが大変ではないか．あるいは不安定では．（高橋委員）
A 点火時期で調整できる．点火に対して主室の着火時期は安定している．

【連絡事項】

１．次回研究会

日時：9 月 1 日（土）13：30-17：30

場所：愛知工業大学　本山キャンパス

議題：　別途ご案内

以上