

日本機械学会エンジンシステム部門

A-TS07-56 「内燃機関を改良する継続的技術力に関する研究会」第3回研究会議事録

日時：平成27年1月24日（土） 13:30~17:00

場所：邦和セミナープラザ

出席者：25名

飯島晃良（講師：日本大学），Terry Alger（講師：SwRI），大平哲也（主査：スズキ），藤村俊夫（幹事：愛知工業大学），田村守淑（幹事：東邦ガス），調尚孝（部品総研），河野正顕、瀧澤健介（部品総研：追加），太田篤治（トヨタ自動車），太田安彦（元名古屋工業大学），中島公平（名城大学），鬼頭俊介（豊田高専），内田登（新エイシーイー），芹澤毅（ダイハツ），長谷川国夫（元ダイハツ），野田進（豊橋技科大），田中大樹（大阪ガス：代理），中村俊秋（豊田自動織機），園比呂志（SWRI），内田健児（マツダ：代理），島川英明（ダイヤモンド電機），西村雅之，片岡尚紀（ダイヤモンド電機：追加），寺地淳（日産自動車），木下久寿（ヤマハ）

（敬称略）

議事

1. 話題提供（その1）

講演題目：可視化と分光計測による HCCI 機関のノッキング現象研究

講師：飯島晃良氏（日本大学 理工学部）

（1）研究室の紹介と教育

初めに日本大学のエンジン系研究室について紹介する。日本大学は理工学部、生産工学部、工学部にエンジン系研究室があり全体で日本大学熱工学研究会として活動している。私の所属は理工学部機械工学科。研究室は御茶ノ水の駿河台校舎にあるが、エンジン試験は都心ではできないので千葉の船橋校舎の内燃機関実験棟で行っている。庄司名誉教授のほか、大学院生12名、卒研生12名、3年ゼミ生9名が飯島研究室に所属している。エンジンベンチを4台使用してノックの可視化や過給 HCCI 研究等に取り組んでいる。

先日、内燃機関実験棟を整理しているとき昭和29年の栗野研究室の卒業論文を見つけた。題名が「単筒ガソリン機関におけるノッキング防止の研究」であり現在のテーマと同じであったことは少し反省している。只、昔は指圧計がなかったので排気の色でノックを判断していた。

機械工学科の講義では実技は機械工作や設計製図の実習、機械工学実験を3年かけて行う、1、2年では製図は基礎力を養うためドラフター等を用い手書きで行っている。3年で初めて CAD/CAM を使った実習を行う。実験はエンジン、風洞、圧縮機、振動などでありエンジン実験は必修科目となっている。講義は2年生から機械系の4つの力学があり、3年生からは内燃機関や熱流体工学などの専門的な講義も受講するカリキュラムになっている。

もともと内燃機関実験棟や試作工場（現・工作技術センター）は駿河台にあったが、昭和33年に江東区大島に移転、そこでも住宅が増加したため昭和40年に船橋校舎に移転した。栗野先生は実験装置も工作技術センターで製作しており、水動力計や渦電流型電気動力系などを製作、販売もしていた。451台製作・販売した記録が残っている。今でもその伝統は残っており最近ではモータリングができる交流動力計を設計・製作してエンジン試験に使用している。

年間スケジュールとして4~7月は週1回の勉強会を開催。まず、ガソリンエンジンの基本を勉強したのち燃焼等が題材となる。6月頃から実験を開始する。学会発表等は随時行い、年に2回、日大内の熱工学研究会、4年生は12月に理工学部の学術講演会、中間発表会、卒研発表で発表している。

研究室の方針として実験等を1名でやることは困難なためテーマは3名1組のグループ研究を実施している。グループでのシナジー効果を発揮して目標達成してもらうことを目指している。

## (2) 可視化と分光計測による HCCI 機関のノッキング現象研究

HCCI は高効率でクリーンなエンジン燃焼であり、運転領域の拡大、着火制御が課題である。特に高負荷時は急峻な圧力上昇や圧力振動の抑制が必要である。解決方法として燃料成層、温度成層、過給希薄化が試されている。

ノックがどのように起こるか基礎的な観点から実験的に調べている。HCCI の場合は 1000~3000rpm の幅広い範囲でノックが発生する。SI と比較すると SI では高回転数でスパークノックは収まることや自着火抑制の方法があるのに対し、HCCI ではどんな回転数でもノックが生じるし、自着火自体の抑制はできない困難さがある。一般的なにはスパークノックとディーゼルノックがあるが、HCCI では両方が存在するものと考えている。混合気を均一にするとディーゼルノックのような高い  $dp/d\theta$  の燃焼が発生し不均一にするとスパークノックのような筒内圧力振動を伴う燃焼が生じる。

2 ストロークエンジンによる可視化実験で、パークエンジンと HCCI エンジンと比較した。SI ではエンドガスで自着火しノックが発生している。HCCI はほぼ領域全体が同時に自着火して燃焼している。PV 線図をみると HCCI では燃焼期間が短く、等容度が高いことが分かる。

分光測定の方法はキセノン光源の光を燃焼室内に照射し、燃焼室で化学種によって特定の波長が吸収された光から目的の波長を光電子増倍管で検出する方法をとっている。キセノン光源を入れないうで計測すると自発光の計測ができる。

4 ストローク HCCI エンジンの発光スペクトル計測例では、冷炎反応スペクトルと主燃焼スペクトル分布が分かる。冷炎反応における吸収スペクトルでは 290nm 付近の波長帯が出てくる。これは主にホルムアルデヒドの波長帯であると考えている。

過給しリーン化した場合の発光・吸収スペクトルをみると、過給によって冷炎反応が活発化するが主燃焼では発光期間が長くなり燃焼が緩慢化する。波長帯は変わらない。過給希薄化の場合、冷炎で 290nm のホルムアルデヒドの吸収帯で吸収強度が高くなっていることが分かる。

2 ストロークエンジンの HCCI のノックの可視化について説明する。ヘッド側に 72mm 直径の石英窓を埋め込むとともにシリンダサイドにも発光や吸光計測ができるように石英窓が埋め込んである全域可視化エンジンを用いて実験を行った。燃焼室を変えることができるようになっており、ピストンとヘッドの隙間がシリンダ部でほとんどない場合でも、吸収計測ができるようピストンクラウンの直径方向に光電子増倍管の検出器に光が通じるように U 字型の細い溝が掘ってある。この部分ではシリンダ方向にガス厚さが厚いため可視化画像で少し輝度が高い。これは細い溝の影響による。

高周波放電でストリーマ放電による希薄 SI エンジン試験や HCCI をアシストする試験もやっている。

HCCI 燃焼の場合に燃焼室内でどのように燃焼しているのか、圧力振動がどのタイミングで生じ

るのか、エンジン試験と可視化実験（毎秒6万コマ）で調べた。

負荷が増大していくとノックが発生するが、負荷増大のケースとして吸気温度を変化させて着火時期をコントロールし、同一位相の場合について調べた。高当量比化に伴い筒内圧力が増大し筒内圧力振動が増大していく。

次に着火タイミングによってノックが発生するが、当量比を一定として掃気温度を上昇させて燃焼位相が進角する場合を調べた。進角によって圧力上昇率が増大し、筒内圧力振動が強くなっていく。

最後に、回転数の影響を調べた。それぞれの回転数では燃料投入量を一定として、掃気温度を変化させることで燃焼位相を変化させた。どの回転数も燃焼位相が進角すると圧力振動が強くなった。

ノッキング発生時と非発生時の可視化画像を比べた。排気口近辺の局所で開始した自着火は徐々に多点で発生する。非ノック時はやがて全域に燃焼が徐々に広がるのに対し、ノッキング発生時は燃焼室中心付近に到達するとエンドガス側から強い発光を伴いながら、エンドガス側から未燃側に急速に自着火する現象が見られ、強い筒内圧力振動が発生した。

Draper の音響圧力波公式を用いて圧力波の周波数を分析した。燃焼室温度=2000K、ガス定数  $R=291\text{J/kgK}$ 、比熱比  $k=1.27$ 、ボア径  $B=72\text{mm}$  の条件とした。一次モードは 7.00kHz、二次モードは 11.60kHz などと計算できるが、今回の試験ではどの条件もノック発生時は基本的には 7kHz の1次モードであった。

$dp/d\theta \text{ max}$  は燃焼位相の進角により増大し回転数増加によっても増大する。ノック強度  $P_{ki}$  も同様の傾向であった。ただし、上死点後の着火では回転数の影響は少なくなる。クランク角度ではなく実時間で圧力上昇を見た  $dp/dt_{\text{max}}$  とノック強度  $P_{ki}$  の相関は回転数の影響が少なくなる。

ノック発生時と非ノック時の燃焼状態をより高速、毎秒16万コマでの可視化観察を行った。ノック発生時の火炎の進展速度を画像から算出すると 1150m/s となった。圧力波の速度は 1050m/s となりノック発生時のみかけの速度は音速とほぼ同じであることがわかった。

Q 寺地委員：エンジン試験の前提条件がよくわからない。着火進角すると一般的には掃気温度（排気温度）は低くなると思えるが？

⇒ 掃気温度は吸気温度の指標とみてほしい。

Q 寺地委員：2ストロークなので不均質でも  $dp/d\theta$  が高くなる興味深い。可視化試験で強いノックが起きる場合は均一なのか不均一なのか？

⇒排気ポート側が高温となり不均質な条件である。

Q 太田（安）委員：指圧線図の圧力振動が発生しているところは普通のノックと違うところがある。停滞しているところがある。空間的にポケットになっている部分があるものと考えられる。ポケットにところで圧力波が影響を与える。所謂、デトネーションで有名なスウィサメカニズムではないか。エンジンではあまり一般的ではないが、圧力波がと可視化の関係をよく見てほしい。

⇒高度なモノクロの可視化撮影では詳細な圧力波が観察でき、話を聞いて思い当たる現象があったことを思い出した。

Q 中島委員：掃気温度のコントロール方法はどのようにしているか？

⇒空冷の 2 ストロークなので風を当ててエンジン全体を冷却している。掃気温度と吸気温度を含め機関全体の温度をコントロールしている。

Q. 河野氏（部品総研）：圧力波について燃焼器におけるくぼみの影響はあるか？

⇒くぼみの影響はないものと考えている。

Q 野田委員： 強い圧力波が発生する場合に音速で火炎が進展していく現象は火炎伝播ではないのか？

⇒自着火が連続的に移動して音速になっているものと考えている。

Q 寺地委員：いつでも排気側から強い圧力波が発生するが、いつも 7kHz の一次モードなのか？

⇒このエンジンではそのように考えている。

Q 太田（安）委員：燃焼全体においてスウェイサーメカニズムで燃焼が加速されているのではなく、後期燃焼でスウェイサーが影響与えている。また、燃焼メカニズムとしてはやはり伝播ではなく順次自着火していくものとする。

Q 内田委員：ディーゼルエンジンでは圧力波は 20 モードも出る。自着火の起点で変わる。

Q 大平委員：このエンジンは一次モードが出やすいものだと考える。また、掃気温度でエンジン温度をコントロールされているが、掃気効率も低下するので、その影響も分離して調べると面白いと考える。

Q 藤村委員：ノックする場合としない場合で火炎速度は変化あるのか。また、輝炎が発生する場合には発生するのか

⇒ノック前の火炎速度はゆっくりでノックする際に火炎速度が加速するものと考えている。輝炎は赤みがかかった火炎をさしているが、固体粒子から出る発光とは考えていない。

## 2. 話題提供（その2）

講演題目：Dedicated EGR: A Cost-Effective Solution for Low CO<sub>2</sub> and Ultra-Low Emissions.

講師：Terry Alger, PhD.

Director  
SI Engine R&D Department  
Southwest Research Institute  
6220 Culebra Road  
San Antonio, TX 78238  
(w): +1-210-522-5505  
(c): +1-210-248-6433  
terry.alger@swri.org

### 背景

世界各国において自動車に対する厳しい CO<sub>2</sub> 排出量規制が課され、2020 年代前半には 2000 年比で概ね 1/2 まで削減することが検討されている。同時に米国においては NO<sub>x</sub> および NMOG を約 80%低減する LEVⅢ排気ガス規制や、欧州においては PN 規制を含めた EURO6c 規制など有害排気ガス低減要求も今後も厳しさを増していく。更に顧客からの高性能化要求に応えるために高出力化が必要である。従って今後のエンジン開発に当たっては低燃費化および低エミッション化のみならず高出力を低価格で実現することが同時に求められている。

## SwRI の D-EGR<sup>TM</sup>システムについて

D-EGR とはある 1 つ（あるいは複数）の気筒を過濃な混合気で運転することによって H<sub>2</sub> および CO を多く含む排気ガスを生成し、その全量を全ての気筒へ還流する EGR システムである。D-EGR 気筒以外の気筒の等量比はエンジン全体としての等量比が理論空燃比となるように調整され、排気後処理には三元触媒システムが用いられる。この D-EGR システムによって改質された H<sub>2</sub> および CO によって燃焼速度が向上し、広い運転領域において EGR 率 25%でも安定した燃焼が可能となり、後述する効果と共に 42%の最大熱効率と 20bar 以上の BMEP を実現している。

この多量の EGR 還流は

- ・ノッキング抑制
- ・ポンピングロス低減
- ・比熱比の改善
- ・NO<sub>x</sub> の低減による TWC への還元剤供給量の低減
- ・メインシリンダーのエンリッチメントの廃止

という効果をもたらす。

加えて H<sub>2</sub> および CO を多く含んだ EGR によって

- ・オクタン価の向上によるノック抑制
- ・EGR 希釈燃焼限界の拡大
- ・点火エネルギーの低減
- ・燃焼速度の向上
- ・エンジン低温時の EGR 導入
- ・更なる比熱比の改善

などの効果が得られる。

この内の比熱比の向上に関しては、25%LPL EGR のサイクル平均比熱比が 1.302 であるのに対して D-EGR では D-EGR 気筒の等量比を 1.0 とした場合で 1.3075、約 2.0 で運転した場合は 1.314 となることが計算によって示された。この事により熱効率が 50.8%である EGR 率 25%の LPL EGR エンジンに D-EGR を適用した場合の理論熱効率は 51.2 (D-EGR 気筒  $\phi$  1.0) ~52% (同  $\phi$  約 2.0) であることが示された。

また H<sub>2</sub> および CO の還流による燃焼改善効果として

- ・耐希釈性の改善
- ・層流燃焼速度の向上
- ・初期火炎核の成長促進

が挙げられ、これらのことによる

- ・燃焼安定性の改善
- ・燃焼ロバスト性の向上
- ・燃焼効率の改善

が示された。

改質された H<sub>2</sub> および CO の還流により RON90 の混合気は RON93 程度の耐ノッキング性を示し、20% の EGR 希釈と相まって最終的に RON103 程度の耐ノッキング性となることが計算によって示された。

この効果により、圧縮比 12.5 のエンジンにおいて LPL EGR では BSFC が悪化する BMEP11 以上の高負荷領域でも BSFC が改善していくことが分かった。

## 実車における D-EGR 効果の証明

### 供試車両とエンジン

SwRI ではこれまでにこの D-EGR システムを Chrysler 2.4L および Renault 2.0L ガソリンエンジンに適用し良好な結果を得たため、D-EGR の商品としての実現性を検証するための実車研究を行った。

供試車両として 2012 年型 Buick Regal Premium を用い、オリジナルエンジン(排気量 2.4L, 圧縮比 11.4, 自然吸気ガソリン直噴エンジン)を GM 製過給 Ecotec LHU2.0L エンジンをベースとした試作エンジンに換装した。試作エンジンの D-EGR 化以外の主な改造点は圧縮比 11.7 のアフターマーケット用ピストンの採用, D-EGR シリンダへの PFI の追加, 市販スーパーチャージャーの追加, およびアフタークーラー用低水温通路の追加である。ただし、これらの変更に伴う燃焼系の最適化は行っていない。

### エンジン単体性能改善効果

全開性能はベースエンジンの許容最大筒内圧の制限下で行われたが、オリジナルの 2.4L NA エンジンに対して概ね 20~30%のトルク向上が得られた。BSFC は運転領域平均で約 10%の改善が確認できた。2500-3500rpm において BMEP13 まで MBT 運転ができ、過給器タービン前排気温度は全域において 900°C以下となった。

### 実車性能

ベース車両に対し 0-60mph 加速は約 1 秒短縮し、City および Highway 燃費はそれぞれ 13.1%および 9.2%向上した。排気ガスについては NMOG がベース車両と同等で NOx は 75%低減した。この結果 Tier III 排気ガス規制値である 30mg/mile (NOx +NMOG) とほぼ同等の 31mg/mile を達成した。

## 今後の課題

- ・量産化に向けたエンジン制御の更なる洗練
- ・過給器の最適化 (今回は既製品を流用)
- ・燃焼系の最適化 (今回は圧縮比以外の改造なし)
- ・ポンピングロス低減手法の追加

## 結論

1. D-EGR は車両性能を維持あるいは向上しつつ、大きな燃費低減効果と排気ガス低減効果を有する可能性がある。
2. D-EGR 燃焼はすべてのエンジン回転数において BMEP 2bar から 17bar まで可能で、また過渡制御の成立性も示された。
3. 25%の D-EGR 燃焼は多くの運転領域で約 10%の BSFC 低減効果があり、実車においてはその運動性能の向上を実現しつつ FTP75 試験においてベース車両に対して 13%の燃費向上効果があることが示された。
4. 25%の D-EGR 燃焼は LEV III 排気ガス規制をクリアする可能性が示された。
  - ・ 0.031g/mile NOx+NMOG

- ・冷間始動に対する AT オプションの可能性の示唆

### 3. その他

ダイヤモンド電機 島川英明氏が新委員として加入された。

以 上