

氏名(本籍)	徳 留 大 樹 (鹿児島県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第127号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
学位授与年月日	平成26年3月31日
学位論文題目	SIエンジンにおけるリングクレビス内の燃焼現象の研究
論文審査委員	主査 是 松 孝 治 副査 水 野 明 哲 雑 賀 高 大 竹 浩 靖 森 棟 隆 昭 (湘南工科大学教授) 永 橋 優 純 (高知高専教授・地域連携センター長)

論文要旨

<目次>

第1章：緒論

1.1. 研究背景

第2章：SIエンジンの未燃焼炭化水素排出に与えるリングクレビスの効果

2.1. まえがき

2.2. 触媒に頼らない技術を求めて

2.3. 研究目的

2.4. 計算モデル

2.5. 計算結果と考察

2.6. HC排出に関する結論

第3章：SIエンジンにおけるクレビス流路内で発生するノック

3.1. まえがき

3.2. 定容燃焼容器実験

3.3. 実験結果

3.4. 計算モデル

3.5. CIエンジンにおけるクレビスノックへの展開

3.6. 結論

第4章：結論

4.1. 本研究で得られた結果

第1章：緒論

本論文は、リングクレビス内の燃焼現象を計算モデルと燃焼実験を中心にして基礎的な現象が解明されることでエンジンの設計・性能改善の技術の確立を目指すことを目的としている。

エンジンの永遠のテーマに有害排ガス低減と燃費改善

がある。SIエンジンから排出される有害物質は、一酸化炭素(CO)、未燃焼炭化水素(HC)、窒素酸化物(NOx)がある。これらの有害物質の低減技術には、エンジン内で排ガスを低減する方法(燃料噴射装置の電子制御化、排気再循環方式、燃焼室形状の設計による燃焼過程の改善)と後処理により排ガスを低減する方法(酸化触媒や三元触媒、NOx吸蔵還元型三元触媒)の発達により環境基準は満足している。

しかし、燃費に関しては、燃焼室内で燃焼を回避した燃料の一部が未燃焼のまま排気管へ達するため、その量が多ければ燃費の悪化要因になる。エンジン冷間時においては触媒が活性温度に達しないため、十分に浄化することができない。このことから未燃焼炭化水素の削減をさらに推し進めるには後処理技術に頼るだけではなく、エンジンから排出される未燃焼炭化水素そのものを削減する必要がある。

そのため、主な未燃焼炭化水素の発生源となっているリングクレビス内の燃焼現象を明らかにすることが重要になってくる。

リングクレビスは、ピストン、シリンダ壁面およびピストンリングで囲まれており、燃焼室の角部に設置してある。燃焼室角部近傍の火炎挙動は、

- ① 燃焼室の角部では消炎層が大きくなるため火炎がリングクレビスに進入しない場合(角部の効果による火炎消炎、クレビスの効果による火炎消炎)：第2章に関係する未燃焼炭化水素の排出量の内容
 - ② ブローバイガス流の影響、クレビス幅が大きいとき火炎が進入する場合：第3章に関係するリングクレビス内で発生するノックの内容
- の2つが考えられる。

リングクレビス内の解析には、従来のクレビス内を一つの系として取り扱う熱力学的モデルではなく、クレビス内の場所による温度・圧力などの情報、クレビス深さや幅の影響を考慮できる1次元非定常圧縮性流れの計算モデルを作成した。さらに、クレビスに火炎が進入することで誘発されるクレビス内で発生するノックすなわち、進入火炎誘導型「クレビスノック」の可能性を明らかにするため、Livengood-Wu積分を組込んだ計算モデルと燃焼実験から検証した。

第2章：SIエンジンの未燃焼炭化水素排出に与えるリングクレビスの効果

圧縮行程でクレビス内に圧入された混合気が膨張・排気行程でシリンダ内に流出し燃焼を回避することがSIエンジンの未燃焼炭化水素発生の原因のひとつである。この燃焼回避機構を明らかにする方法として、クレビスの形状の影響と場所による温度や圧力の値を明らかにするため1次元非定常の圧縮性流れの計算モデルを作成し、計算を通じて明らかになったことを示す。

クレビス内の流れの時間的変化は入口付近が盛んであり、底部の変動は比較的少ない。これは、ガスの出入りはクレビス入口付近で盛んに行われていることになる。

次に、クレビス内に燃焼を回避し圧入された混合気が、酸化されて排気管入口における未燃焼炭化水素の発生に至るプロセスを提案し、回転数の影響を検討した。回転が上がっても、クレビスから流出する未燃ガスの質量はほとんど変わらない。しかし、回転が上がると高濃度の未燃焼炭化水素が排気管入口へ排出される。それは、膨張行程の後半部でクレビスからの流出が起こるため、ガス温度の低い雰囲気の中に未燃焼ガスが流出・混合・反応するので、高回転ほど酸化しにくい。すなわち、酸化反応時間が短いためであることが分かった。

クレビス寸法（クレビス深さ L 、クレビス幅 δ ）が未燃焼炭化水素の排出量に与える影響は、未燃焼炭化水素排出量 $\sim L$ 、未燃焼炭化水素排出量 $\sim \delta^2$ の関係がある。そして、未燃焼炭化水素の発生には燃焼終わりの酸化反応が影響する。この時点の未燃焼炭化水素排出量の大小が重要である。 L が大きいとこの値は大きくなることが分かった。 δ の影響は比較的小さいことが分かった。

第3章：SIエンジンにおけるクレビス流路内で発生するノック

伝熱量を考慮しない熱力学的モデルを適用すると、クレビス内の混合気温度は、燃焼室のエンドガス部と同じ温度を示すことになり、クレビスノックは燃焼室のノッ

クと差異はない。しかし、クレビス部の S/V 値（＝表面積/体積の）比が燃焼室に比べて大きく、伝熱量が多くなり、ガス温度が下がるのでクレビスノックは起こりにくい傾向になる。そのため、クレビスノックが起こるにはガス温度が高くなるが必要不可欠になる。そこで、クレビス流路をモデル化した定容燃焼容器を使ってクレビスノックの発生条件を調べた。燃料には、メタンと水素の混合燃料を用い、火炎速度を制御するために水素のモル分率を変化させる。火炎進入判定に、クレビスの入口と底部にイオン素子を2つ設置した。この間の反応時間から、クレビス内を伝播する火炎の平均火炎速度とする。

実験により明らかになったことを示す。

水素モル分率 α が大きくなるとクレビス内を伝播する火炎速度は大きくなる。また、当量比 ϕ と火炎速度は逆U字型になり、最大の速度は ϕ が1.1付近で計測された。クレビスノックを支配しているのは、混合気の種類や濃度よりも平均火炎速度であることが分かった。これは、火炎伝播は発熱を伴う波とし、ノックの発生源となる自己着火を検査体積内の急激な加熱とし、クレビス流れを1次元非定常圧縮性として、Livengood-Wu積分を組み込んだ熱理論による計算モデルが有効なことを示している。

クレビス内の管端でおこる自己着火が誘発する圧力波は、燃焼室ノックで生ずる圧力波よりも振幅が大きく、温度境界層の破壊による熱伝達促進によるピストン材料の溶損にはクレビスノックが主な役割を演じている可能性が否定できない。

本論文で述べてきたことはSIエンジンのみを想定してきたが、クレビスノックがCIエンジンでも起こる可能性がある。希薄状態で運転されるディーゼルエンジンは、CO、HCの排出量が少ない。それは、クレビスノックが起こりにくいことを示している。しかし、NO_x低減するための技術のひとつである燃料噴射制御、具体的には、吸気管に燃料の一部を霧化混合するフェミゲーション方式がクレビスノックを引き起こす可能性として着目した。この方法だと、希薄予混合気が圧縮行程でクレビスへ進入することが考えられる。

また、植物由来のディーゼルエンジン用バイオ燃料を使用するさい、石油由来の潤滑油が使われている。しかし、排ガスや化石燃料枯渇の観点から、潤滑油にもバイオ由来のものを用いるべきと考える。このとき気を付けることは、バイオ燃料由来の潤滑油がクレビスにも存在することである。この燃料となりうる油膜が蒸発し、クレビス内には自己着火できる燃料が存在する。この様な

観点から、CIエンジンにおけるクレビスノックが起こる可能性について推察した。

第4章：結論

リングクレビス内の燃焼現象の解析を、1次元非定常圧縮性の流れを考慮することでクレビス内部各々の場所による温度・圧力などの情報と、クレビス幅・深さの形状の影響を考慮した未燃焼炭化水素の排出量の計算が可能になった。未燃焼炭化水素の発生には燃焼終わりの酸化反応が影響し、この時点の未燃焼炭化水素の排出量の大小が重要になる。クレビス深さが大きいとこの値は大きくなることが分かった。リングクレビスからの未燃焼炭化水素の流出を抑制するには、リングクレビスの幅を狭くすることで体積を減らし、リングクレビスに流入する量を減らすか、あるいは逆に幅を広くし火炎を進入させ酸化させる方法が考えられる。

前者は、実際の自動車に搭載するには、耐久性が要求される。後者の、リングクレビス内に火炎を進入させた場合は、SIエンジンは予混合燃焼であるため火炎はリングクレビス内に進入し未燃焼炭化水素を低減させる効果がある。

しかし、リングクレビス内に火炎が進入した場合は、火炎が進入することでクレビス内のエンドガスの温度が上昇し自己着火が起こる火炎誘導型クレビスノックの問題が浮上する。それを解決するため、定容燃焼容器を用いた燃焼実験と Livengood-Wu 積分を組込んだ1次元非定常圧縮性の流れの計算モデルを用い以下のことを明らかにした。

①着火限界とノック限界から、火炎進入誘導型クレビスノックには範囲があり燃焼速度が関係する。②燃焼室でのノック強さより、クレビス内で発生するノック強さが、局所的にみると大きい。このため温度境界層を破壊、機関損傷につながる。③クレビスノック発生時期が、燃焼室でのノック発生時期よりも早いことから、燃焼室の設計をするさいは、燃焼室で発生するノック限界だけでなく、クレビスノック限界も考慮する必要がある。

論文審査要旨

150年以上の歴史のあるSIエンジンは、高性能化するわち排ガスのクリーン化と燃費の改善をいまだに目指している。本論文は、SIエンジンのリングクレビス内でおこる燃焼現象について、計算モデルと実験を行なって、その現象を解明したものである。これにより、SIエンジンのリングクレビスの部品設計に、新たな技術の確立を目指している。本論文には、2つの内容があり、第2章

で述べる「SIエンジンの未燃焼炭化水素の排出に与えるリングクレビスの効果」と第3章で述べる「SIエンジンにおけるクレビス流路内で発生するノック」である。

さて、本論文は4つの章からなっている。第1章の緒論では、研究の背景について述べている。まず、クレビス内の燃焼現象は、未燃焼炭化水素(HC)が関係していることを論じている。そして、後処理により排ガス中の有毒成分を除去する方法(酸化触媒や三元触媒、NO_x吸蔵還元型三元触媒)の発達により環境基準は満たされている。これで何も問題がないように見える。触媒の考え方が、HCとNO_xとは大いに異なる。NO_xは、燃焼ガス温度が高いほうが性能のよいので、エンジン燃焼室内でのNO_xは高くして構わない。HCは未燃焼の燃料であるので、後処理で酸化させても、燃料が保有している仕事を生み出すエネルギーは失われる。そこで、膨張行程でクレビス内の混合気を流出させ燃焼させると供給熱量が5%程度増えることで、燃費が改善されることが期待される。

第2章では、圧縮行程でクレビス内に圧入された混合気が膨張・排気行程でシリンダ内に流出し燃焼を回避して排気管に達することがHC排出量を多くする原因である。SIエンジンの未燃焼炭化水素発生の原因である。この燃焼回避機構を明らかにする方法には、クレビスの形状の影響と場所による温度や圧力の値を明らかにする必要があり、1次元非定常の圧縮性流れの計算モデルを作成し、計算を通じてHCの排出量を見積ることが可能であることを示している。

第3章では、SIエンジンにおけるクレビス流路内で発生するノックについて研究した。実際のエンジン内におけるノックについては、様々な因子が影響するので、これを明らかにするには、ノックを発生させることから始めることにした。ノックの発生が容易な定容燃焼器による実験を行った。想定するノックは、火炎誘導型クレビスノックと呼ぶものを想定した。定容燃焼容器を用いた燃焼実験と Livengood-Wu 積分を組込んだ1次元非定常圧縮性の流れの計算モデルを用いた。

まず、クレビスと燃焼室内のどちらが先に自己着火がおきるかについて考えてみると、伝熱量を考慮しない熱力学的モデルを適用すると、クレビス内の混合気温度は、燃焼室のエンドガス部と同じ温度を示すので、同時に自己着火の発生が起きる。クレビス部では表面積と体積の比が燃焼室に比べて大きく、伝熱量が多くなり、ガス温度が下がるのでクレビスノックは現実では起こりにくい傾向になる。ところが、そのため、クレビスノックが起こるにはガス温度が高くなるが必要不可欠になる。

そこで、クレビス流路を、円形断面の管とし、さらにその直径を必ず火炎が通路を伝播していく値（=3.0mm）とした。定容燃焼容器を使ってクレビスノックの発生条件を調べた。燃料には、メタンと水素の混合燃料を用い、火炎速度を制御するために水素のモル分率及び当量比 ϕ を変化させる。火炎進入判定に、クレビスの入口と底部にイオン素子を2つ設置した。

検査体積内の急激な加熱とし、クレビス流れを1次元非定常圧縮性として、Livengood-Wu積分を組み込んだ熱理論による計算モデルが有効なことを示している。クレビス内の管端でおこる自己着火が誘発する圧力波は、燃焼室ノックで生ずる圧力波よりも振幅が大きく、温度境界層の破壊による熱伝達促進によるピストン材料の溶損にはクレビスノックが主な役割を演じている可能性が否定できない。ここで、リングクレビスと円管では形状が異なるのでモデルとして適切かどうかの議論を行っている。

4章の結論では、リングクレビス内の解析を、1次元非定常圧縮性の流れを考慮するとクレビス内部の位置に

よる温度・圧力の時間経過の情報が得られ、クレビス幅・深さの形状の影響を考慮した未燃焼炭化水素の排出量の計算が可能になった。これは、未燃焼炭化水素の発生には燃焼終わりの酸化反応が影響し、この時点の未燃焼炭化水素HCが最小になる運転条件やクレビス寸法の選択が可能になることを示している。

以上、本論文はクレビス内に、火炎が進入するとクレビス内の混合気温度が上昇しノックが発生することを明らかにした。混合気の成分を変化させるとノックの発生時間が敏感に変化するが、Livengood-Wuの積分を1次元非定常圧縮性流れの計算に組み込んだモデルによる計算結果は実用上十分耐えうるものである。さらに、クレビスノックの存在はこれまで指摘されなかった、新しい現象であり、今後ノックの研究が盛んになるきっかけとなることに期待したい。

以上のことから、博士（工学）の学位請求論文として充分なる価値があると認められる。