

学位論文要旨

題目 90° 曲がりノズル内の非定常流特性が噴出するオイルジェットに及ぼす影響

(Effect of characteristics of the unsteady internal flow of a 90-degree bent nozzle on the ejected oil jet)

氏名 川口 幹祐

地球環境問題の対応策として、世界各国で自動車用エンジンのCO₂排出規制が強化されている。例えばEUでは2021年より販売する新車に対して企業平均で走行距離あたりのCO₂排出量を95g/km以下にすることが義務付けられており、基準を満たさない場合は多額の反則金を支払う必要がある。その規制をクリアするため、自動車用のエンジンは単位燃料流量あたりに取り出せる有効仕事の割合である熱効率を高める必要がある。熱効率を高める工学的手法として、エンジン内の圧縮比(上下に運動するエンジンピストンが下限の下死点時のエンジン筒内容積とエンジンピストンが上限の上死点時のエンジン筒内容積の比)を大きくすることや、ターボチャージャーやスーパーチャージャーなどを用いてエンジンの吸気量を増やす過給機を用いることなどが提案されている。熱効率を大きくするためのいずれの工学的手法もエンジンピストン上死点付近での急峻な燃焼を引き起こし、結果として燃焼ガスの温度が高くなる。エンジンピストン上死点付近での急峻な燃焼が内燃機関の熱効率の改善に重要であることは理論的にも古くから示されており、今後のエンジン開発において燃焼温度はさらに高くなることが予想される。

燃焼温度が高くなると周辺部品への熱負荷が高くなり、最悪の場合、破損に繋がる。エンジンピストンにおいては、エンジンピストン内にクーリングチャンネルと言われる流路を設け、エンジンの重力方向下側に設置されたノズルより噴出されるオイルジェットによりクーリングチャンネルへの流入口に供給されるクーリングチャンネル/オイルジェットシステムが提案されている。クーリングチャンネルは摺動時にオイルを攪拌することで効果的に冷却することを狙っている。

クーリングチャンネルへのオイル供給において最も重要なことは、オイルがノズルから安定して真っ直ぐ噴出され、ロスなくピストンを冷却することである。しかし、噴出されたオイルは一般に、Kelvin-Helmholtz不安定性とRayleigh-Taylor不安定性に代表される不安定性を有し、雰囲気の空気とオイルの界面が乱れる。さらに、エンジンの構造上、ノズルは曲がり角を有しており、界面の乱れが助長される。現状、曲がり管ノズルから噴出するジェットの不安定性に関して詳細なメカニズムが不明なため、クーリングチャンネルへ適切にオイルを供給できるかの判断は、メーカーで多くの時間と人員をかけて試行錯誤的に行っている。

以上より、本研究の目的は曲がり管ノズルから噴出するジェットの挙動のメカニズムを解明することである。本研究では、自動車用エンジンの内燃機関におけるピストン冷却を工学的応用対象として、90° 曲り管ノズルから噴出するオイルジェットの挙動および、ノズル内流れの非定常特性を調査する。主に、明瞭な気液界面の撮影が可能な背景照明法を用いた可視化とLED変位計を用いたジェット挙動の計測、およびノズル内流れのParticle Image Velocimetry (PIV) を行い、流れの非定常速度場データを取得した。実験に用いたノズルは3種類で、直管ノズル・曲率半径の小さい、R15ノズル、曲率半径の大きいR60ノズルである。作動流体はシリコンオイルで、25°Cの条件で、80°C時点のエンジンオイルと同程度の粘性と表面張力を有する。Reynolds数(以下、 Re 数と表記)は円形ノズル直径と断面平均流速に基づいて算出しており、実際のオイル

ジェットを基に $Re=1000\sim 3000$ とした。本稿では、下記大きく3種類の項目について議論する。

- ① 「直管ノズルおよび90° 曲がりノズルから噴出する噴流挙動」
- ② 「出口近傍のノズル内流れとジェットの波立ちのきっかけ」
- ③ 「主流方向に対して垂直な断面のノズル内流れの特性」

①「直管ノズルおよび90° 曲がりノズルから噴出する噴流挙動」では、背景照明法を用いた可視化とLED変位計を用いたジェット挙動の計測により、3種類のノズルから噴出するジェット挙動の特性を明らかにする。純粋なKelvin-Helmholtz不安定性に近いと考えられる、直管ノズルおよび、曲率半径の大きいR60の条件では、 Re 数が大きくなっても比較的ジェット下流まで波立ちが確認できず、安定したジェット界面を形成するのに対し、曲率半径が小さいR15および、 Re 数が大きい条件で、ジェット界面が下流にかけて激しく波立ちながら幅を広げていくことが分かった。この結果から、ノズルの流れの非定常特性が噴出するオイルジェット界面の不安定性に影響を及ぼすことが示唆される。

「出口近傍のノズル内流れとジェットの波立ちのきっかけ」について、ノズル内流れのPIV計測とジェットの可視化計測を時間同期させて実施することで、ノズル内流れの時間的な変動とジェット界面の波立ちについて分析した。Taylorの乱流凍結仮説で示唆される、ノズルの中の乱れの伝播の様子を、相互相関手法を用いて分析した。その結果、ノズル内の乱れの伝播がジェット界面の波速と一致した。このことからジェット界面の波立ちのきっかけはノズル内の乱れであることを示した。また、固有直交分解(POD)を用いて、ジェット界面が激しく波立つ条件において、ノズル内の乱れを形成する特徴的な双子モードが発生することを示した。次に、乱れの構造について、詳細に調べるために、「主流方向に対して垂直な断面のノズル内流れの特性」を調査した。前章で示した乱れの性状を、主流の垂直断面でのPIVにより分析した。曲率半径が小さく、 Re 数が大きい条件で複数の渦構造が確認された。同じ条件の非定常の計測結果より、主流位置が断面内で激しく変動していることを確認した。さらに、前章と同様にPODを用いて、ジェット界面が激しく波立つ条件において、最大流速位置を管径方向に変動させるモードを抽出した。このことから、ノズル内の流れは、曲率半径が小さく、 Re 数が大きい条件で激しく乱れ、噴出するジェット界面が激しく波立つきっかけとなり、不安定になる原因となっていることを示している。

本研究では、ノズル内流れの乱れがジェット界面の波立ちのきっかけを与えていることを示しており、一般的なKelvin-Helmholtz不安定性やRayleigh-Taylor不安定性とは異なるメカニズムでジェット界面が不安定になることを示した。さらに、PODの手法を用いることで、ジェット界面の不安定性に影響を及ぼすノズル内流れの乱れの構造に特徴的なモードが出現することを示している。つまり、特徴的なモードの出現を回避することで、ピストンクーリングチャンネルシステムの最適化検討へ繋がると考えられる。