

論文の要旨

題目 内燃機関のピストン冷却におけるオイルジェットとチャンネル内気液二相流の流動特性
(Characteristics of Piston Cooling Oil Jet and Two-phase Flow in Channel for Internal Combustion Engines)

氏名 中島 聖

自動車用内燃機関におけるピストン冷却は、曲がり管ノズルから噴出されるオイルジェットを利用した冷却が主に採用されており、近年、信頼性のみならず、内燃機関の燃費向上や高出力化のために冷却性能を制御することが求められている。ピストンは、燃焼室内(ピストン、シリンダヘッド、シリンダライナー)で最も熱負荷が高くなる部品であるが、構造上の理由から冷却水による冷却は難しいため、エンジンオイルを使用した油冷方式が採用されている。特に、熱効率向上やノッキング抑制の観点から、ピストンクーリングチャンネルを用いた冷却方法が多く用いられている。このオイルジェット流入によるピストンクーリングチャンネルを用いた冷却は、従来のピストン背面への衝突噴流による冷却に比べてピストン温度の低減効果が高く、適用可能な比出力レンジが広い利点を有するが、曲がり管を対象とした液体噴流の界面挙動やチャンネル内の定量的な流動特性の実験的検討に関する報告は見当たらず、いまだ未解明な点が多い。そのため、現状の開発では、実機を用いた試行錯誤による開発をせざるを得ない状況である。そこで、本研究では、「曲がり管ノズルから噴出するオイルジェット界面挙動特性」および「往復運動中のチャンネル内気液二相流動特性」の2つの流動様相に着目して実験的検討を行った。本論文は、本パラグラフの序論を含めて6章で構成される。

第2章では、オイルジェット界面挙動とチャンネル内気液二相流の流動様相という異なる対象を繋げて議論するために開発した実験装置および計測方法について述べるとともに、評価方法について述べている。オイルジェット界面挙動可視化装置は、噴射したオイルをタンクに戻し、再び噴射させる循環方式を採用した装置を製作した。詳細な考察を行うため、透明アクリル製拡大ノズルによる可視化では、ポンプ後流に整流器および十分に長い直管部を設けることで、曲がり管ノズルに発達した一様流を流入させた。また、往復運動中のチャンネル内流動様相可視化装置は、先に述べたオイルジェット界面挙動可視化装置の転用を可能とし、クランク機構を装置上部に設けた特殊な装置を製作した。オイルジェット界面挙動およびチャンネル内流動様相の可視化は、明瞭な気液界面を取得するため、カメラと計測対象の延長線上に光源を設置して撮影する背景照明法を用いて行った。また、開発した実験装置による検討が可能か、妥当性について検証を行っている。オイルジェット可視化装置に関する検証では、整流器および直管部による整流効果を得られることを確認した。一方、往復運動装置に関する検証では、設計値通りのチャンネル変位量を実現できていることを確認した。

第3章では、曲がり管ノズルから噴出するオイルジェット界面挙動特性を明らかにすることを目的として、はじめに、現状を理解するために、実機に搭載されているノズルによるオイルジェット界面挙動の可視化観察結果について述べている。次に、曲がりの影響について詳細に検討するため、直管タイプおよび曲がり管タイプの透明アクリル製拡大ノズルによるオイルジェット界面挙動を可視化し、曲がり有無における噴流の拡がりや界面変動などの噴流挙動特性について考察している。さらに、曲がり有無だけでなく、曲がり後長さ、および曲がり部曲率半径に着目し、曲がり管ノズルの諸元違いによる影響についても述べている。オイルジェット挙動特性は、直管ノズルに比べて複雑な噴流挙動を形成し、曲がりの影響によって界面挙動の特異な現象が生じる。噴流噴射方向に対する垂直断面における噴流断面形状は、噴流下流にいくにつれて円形から次第に楕円形状に変形する。そして、噴流形状の変化は、 Re の増加にともない $Re = 2000$ 付近でのみ長軸側が切り替わる特性があることが分かった。また、曲がり内側(Inner)および曲り外側(Outer)の界面は、 $Re \geq 2000$ になると、Inner側が遠心力の影響で高い速度となるOuter側に比べて、界面

変動が増大する特性があることが明らかになった。一方、曲率半径が 30mm~60mm の範囲では、曲がり部曲率半径が大きくなると、軸方向主流速度勾配に大きな違いが見られなかったが、噴流界面変動の違いは大きく、主流方向速度勾配の影響は小さいことが明らかになった。

第 4 章では、2 次元断面内の 2 成分速度場を計測可能な 2D2C PIV および 2 次元断面内の 3 成分速度場を計測可能な 2D3C PIV を用いたノズル内部の流動場について述べている。曲がり管ノズル内の流れ場の計測の結果、オイルジェット界面挙動における特異な現象は、曲がり管ノズル内の二次流れの影響によるものであることが明らかになった。

第 5 章では、往復運動中のチャンネル内気液二相流動特性を明らかにすることを目的として、新たに開発したチャンネル往復運動装置を用いて、基礎的な形状である直円柱状の透明アクリル製チャンネルを対象に、振動周波数(f_{os})やオイルジェット Re がチャンネル内の気相面積割合、気相重心、および、気泡径分布などの流動特性に及ぼす影響について述べている。さらに、チャンネル諸元の影響として、チャンネル流入口径の違いによる流動特性への影響についても考察している。オイルジェット流入によるチャンネル内のオイル挙動は、気相を多く含んだ複雑な気液二相流を形成することが観察された。チャンネル内の気相投影面積の割合は、 Re が増加するにつれて増加するが、チャンネル流入口におけるチャンネル内のオイルとオイルジェットとの間での衝突による気相の巻き込みによって引き起こされることが明らかになった。また、サイクル中の気相割合の変動は、振動周波数に支配されるが、 Re の増加にともない気相割合が増加すると、振動周波数による影響は小さくなる。チャンネル流入口による効果は、低 Re 条件下および Bottom Dead Center において、気相流入量の低減効果が大きい。しかしながら、 $Re=2500$ になると、オイルジェット界面変動の増大により流入口径による低減効果は小さくなる。

最後に、第 6 章では、本論文の結論を述べている。本研究で得られた知見により、曲がり管ノズルから噴出するオイルジェット挙動特性について、実験的にその界面挙動特性を明らかにした。曲がり部曲率半径や曲り後長さの組み合わせにより、二次流れにおける渦の回転方向や主流速度勾配によって生じたオイルジェット界面波速を制御できる可能性を見出した。また、実験的かつ定量的な議論が乏しかった往復運動中のチャンネル内気液二相流動様相について、チャンネル内の気相面積割合、気相重心や気泡径分布といった新たな評価指標を提示し、オイルジェット Re および振動周波数がチャンネル内流動特性に及ぼす影響について明らかにした。本研究は、曲がり管による液体噴流に関する初の研究として産業界に貢献できるものと期待される。

キーワード： Internal combustion engine, Piston cooling, Curved circular nozzle, Interfacial fluctuation, Oil, Particle Image Velocimetry (PIV)