

# 論文の内容の要旨

論文題目「固気液混相流解析法を応用した自動車エンジン内ピストンリングまわりの流体挙動予測」

学位申請者 川本 裕樹

キーワード： エンジン ピストンリング 数値流体力学 直交格子法 混相流解析

地球温暖化防止に向けた CO<sub>2</sub> 排出量削減には自動車用エンジンの熱効率向上が不可欠な要素である。摩擦損失低減の観点より近年ではピストンリング関連に対しオイルの低粘度化およびリングの低張力化が進められているが、これらの排反事象としてオイル消費量の増加が問題とされている。本研究ではオイル消費に寄与する流動機構を明らかにするため気液二相流解析を用いてピストンリングまわりの流体挙動予測を実施した。リング周辺を経由したオイルの輸送は主に摺動面、背面、合口隙間の各経路であるが、本研究では実験での観察が困難とされるリング背面に着目した解析条件を設定した。固気液混相流解析法として **Sharp interface model** である **Level set** 法と **Ghost fluid** 法を適用し気液界面の明確な定義を行うとともに **Ghost cell** 法による埋め込み境界法により複雑形状を有する移動物体の定義を可能とした。本研究では一般的なエンジンに使用される 2 ピースオイルリングと 3 ピースオイルリングを対象としエンジン内部を模擬した条件に基づく数値解析によりオイル消費に寄与する現象の把握とパラメータの影響について検討した。以下に本論文の構成と要約を示す。

第一章では気候変動問題に関する近年の世界的な取り組みと将来的な内燃機関の需要について示し、CO<sub>2</sub> 排出量削減に対する自動車エンジンの熱効率向上の重要性について述べた。またエンジン内の各要素の摩擦損失割合を示しピストンリング周辺の損失低減策として用いられるリングの低張力化とオイルの低粘度化がオイル消費の要因となる点について実験による研究例を挙げた。またリング背面など実験による観察が困難な場合における数値計算の有効性と従来の研究例を示した。近年はピストンリング周辺に対する数値流体力学の応用が実施されているがオイル消費に対する定量的な評価は困難な課題であり、直交格子法と埋め込み境界法を用いた気液二相流解析が有効である点について述べた。

第二章には固気液混相流解析法として非圧縮流体解析と気液二相流解析の手法をそれぞれ記した。支配方程式は非圧縮性 **Navier-Stokes** 方程式と連続の式とし、これらの離散化手法とアルゴリズムを示した。また二相流解析手法として一般的に用いられる **Diffuse interface model** は界面の移流に伴う数値拡散の影響が生じるが、本研究ではピストンリング周辺の薄い油膜を取り扱うため **Sharp interface model** である **Level set** 法を用いることで界面形状の明確な定義を可能とした。そして各相を個別の単相流問題として扱い界面近傍の格子に適切な境界条件を与える **Ghost fluid** 法を適用し、流体と物体の境界に対して **Ghost cell** 法による埋め込み境界法を用いることで複雑形状を有する移動物体に対応した。

第三章では気液二相流のベンチマーク問題による検証解析を実施した。静的な条件下での表面張力の妥当性確認として実施した **Static drop** 問題においては液滴内部の圧力について理論値との一致を確認した。また表面張力が支配的かつ動的な検証解析である **Oscillating bubble** 問題に

においては液滴形状の時間的な変化を確認し先行研究と同様の解が得られ、液滴が初期体積を維持することが示された。重力による界面移流が支配的となる **Dam break** 問題では液相の先端到達距離について先行研究の実験結果と同様の結果となり解析手法の妥当性が確認された。

第四章では実験データに基づく条件での現象再現に着目した 2 ピースオイルリングを対象とした解析とオイル挙動に着目したパラメータ影響調査として 3 ピースオイルリングを対象とした解析結果についてそれぞれ論じた。

2 ピースオイルリングの解析では圧力境界条件とリング挙動に対して実験で得られた値を入力条件として用いることでエンジン内部の現象を模擬し、リング溝壁面に形成される油膜の厚みについて実験値との比較を行った。結果より溝中心部の油膜厚さは実験値と同様の傾向を示し、格子解像度の向上に伴い整合性が向上した。このことからピストンリング周辺における解析手法の妥当性が示された。また初期条件の依存性が確認され、厚い油膜の場合には膨張行程を除く全体的な傾向が実験と一致したが薄い油膜の場合には膨張行程のみ実験と同様の油膜厚さとなり、実現象においては膨張行程において生じる高速な気流が溝内に存在するエキスパンダと干渉し油膜厚さに影響を与えることが推測された。また粘性係数に関する検討においては、厚い油膜に対してピストンの慣性力の影響が増大し、薄い油膜に対しては粘性の影響が増大することを明らかにした。またリング溝内を上下動する際のオイル先端部の形状は慣性力と粘性力と表面張力の影響がそれぞれ生じる領域であることが示された。エンジン回転数に関する検討では高回転での運転時においてリング溝内でのオイル挙動が分散的となるほか、オイル消費に繋がるサイドクリアランスへのオイルの流入を確認した。

オイルの輸送に着目した解析ではピストンの下降行程においてオイルがスカート部より計算領域内に流入しリング溝内に進む様子が見られ、高圧化した溝内部とサードランド部の圧力差による輸送を確認した。また回転数の増加に伴い輸送量は増加し、先行研究の実験により計測されたオイル消費量と同様の傾向を示した。またドレン穴を考慮した解析ではドレン穴からの空気とオイルの流出が確認されたとともに、スカート部からの供給油膜が厚い場合にはリング溝下の圧力と流量が増加する傾向が示された。またサイドクリアランス幅の増大はリング下部の流量の増加に繋がるが圧力には大きく影響しないことが分かった。本解析よりスカート部から溝内へのオイルの流入量はシリンダ壁面の油膜厚さとサイドクリアランス幅が大きく影響することが明らかとなった。

3 ピースオイルリングを対象とした解析においてはリング下部のサイドレール下側の流量に対しスカート部の圧力変化が支配的となった。また供給油膜厚さが薄い場合においても格子依存性は低く、よどみ圧の観点からも物理的に妥当な解が得られた。さらにリング溝内部におけるオイルの移動速度は溝内部の油量や油膜厚さと対応することが明らかとなった。

リングパックまわりの三次元解析においては合口隙間を経由したオイルの輸送を確認した。合口の位置の変化によりオイルの輸送に差が生じ、合口隙間が一直線上に配置される条件下ではオイルの上昇が顕著に見られた。

5 章では本研究の総括および課題と今後の展望について述べた。本研究よりリング背面によるオイル輸送のメカニズムとして主にリング溝内部とランド部の圧力差とリング挙動の影響が支配的であることが明らかとなった。本研究は **Level set** 法による明確な界面形状の定義によりオイル形状の定量的な評価と比較が可能となった。より詳細な検討にはピストンの周方向を考慮した三次元解析や、複数のリングを対象とした解析を実施する必要がある。従来のエンジン設計に使用されてきた予測モデルはリング挙動やブローバイを中心に現象のモデル化がなされてきたが、本研究において構築した解析手法とその結果から得られた知見に基づきオイル挙動の定式化が可能となれば新しい設計ツールの開発への貢献が期待できる。