

氏名	王 宇
学位の種類	博士(情報科学)
学位記番号	情博第787号
学位授与年月日	令和4年9月26日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程)システム情報科学専攻
学位論文題目	燃料機器用電磁弁を対象にした流体-磁場-機構連成解析に関する研究
論文審査委員	(主査) 東北大学教授 石本 淳 東北大学教授 山本 悟 東北大学教授 服部 裕司 東北大学教授 高奈 秀匡

## 論文内容の要旨

### 第1章 序論

近年、地球温暖化等の環境問題に対する社会意識の高まりを背景に、自動車の燃料規制及び排ガス規制が年々強化されている。2021年10月に開催された「第26回国連機構変動枠組み条約締約国会議(COP26)」で、自動車分野に関しては「世界のすべての新車販売について、主要市場で2035年までに、世界全体では2040年までに、電気自動車(EV)等、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を排出しないゼロエミッション車とすることを目指す」という共同声明が発表されている。自動車業界ではこれらの規制等に対策するため、低燃費化技術や電動化技術等の開発が行われている。ガソリン車では、燃費効率向上と排出ガス規制等の対策の一つとして、直噴エンジンが採用されている。エンジンのシリンダ内にガソリンを直接噴射する直噴エンジンでは、低燃費化と高出力化を両立でき、排出されるCO<sub>2</sub>の量を削減することが可能であるが、排出ガスに含まれる粒子状物質(PM(Particle Matter)、PN(Particle Number))の低減が課題となる。PMやPNの低減策として、燃料の高圧噴射による微細化促進が有効な方法の一つであると考えられている。このため、燃料タンクから高圧に加圧された燃料をインジェクタに供給するための高圧燃料ポンプが設けられる。

直噴エンジンで使用されている高圧燃料ポンプは、近年の快適性向上の観点から、ポンプの静音化に対するニーズが高まっており、ポンプの騒音はポンプ内に設けられている電磁弁の衝突によって生じることが分かっている。また電磁弁は、ソレノイドに流れる電流が電磁石となり、弁が動くことで流れを制御する。このため、電磁弁の挙動を正確に把握するためには、流体、機構、磁場の3つの影響を同時にかつ正確に把握・予測する必要がある。

本研究では、高圧燃料ポンプ内に設けられている電磁弁の弁挙動の詳細把握を実現するため、流体、磁場、機構を連成した解析技術の構築を目的としている。製品設計に置いて、解析主導による設計による試作回数の低減や設計の高効率化等が求められている。そこで本研究では、設計検討段階で解析による弁挙動の詳細把握を可能にする流体-磁場-機構連成解析技術の提案と実験結果との比較による妥当性の検証を行った。また、連成解析に置いて総解析時間の長時間化が課題の一つであるため、

構築した連成解析技術の高速化と実験計画法を用いた弁形状最適化に関する評価をも行った。

## 第2章 流体—磁場—機構連成解析技術の構築と妥当性検証

従来の製品設計では、構造解析や流体解析等の3次元解析技術を用いて製品の現象を把握することにより、製品性能を高精度に予測してきた。また、機構解析やシステム解析等の1次元解析技術を用いた現象の把握も行われている。1次元のシステム解析等は部品単体やシステム全体の現象の模擬が簡略化されているため、性能や挙動等を短時間で予測評価することは可能であるが、予測精度が低いといった課題がある。また、3次元の流体解析等は部品単体の性能などを高精度で予測可能である。しかし、システム全体を3次元の流体解析等を用いて評価する際、膨大な解析時間を必要とするため、適用可能な製品に限られる。そこで本研究は、上記の課題を解決するため、必要な精度に応じて解析モデルを選択し、システム全体と部品単体の性能や挙動等を同時に把握可能とする解析技術を開発した。

本研究では、MATLAB/Simulinkを用いてポンプシステム全体の挙動を解析した。本解析モデルは、指定された稼働条件下における燃料ポンプシステム全体の挙動を予測するものである。構築した機構解析において、流路はパイプ／オリフィスモデルで模擬し、アンカー／ロッド／吸入弁の挙動もばねマスの方程式等を用いて模擬している。流体解析は機構解析によって得られた入口/出口圧力とアンカー／ロッド／吸入弁の変位量を基に非定常移動境界解析を行い、算出されたアンカーと吸入弁に作用する流体力を機構解析に反映している。また磁場解析では、機構解析によって得られた電流値とアンカー／ロッドの変位量を境界条件とした過渡応答電磁場解析を行い、算出されたアンカーに作用する磁気吸引力を機構解析に戻している。

流体解析では、Star-CCM+12.06.010を用いて、2次元軸対称の非定常移動境界解析を行っている。また、移動境界流体解析ではメッシュモーフィングを用いて電磁弁の挙動を解析している。しかし、メッシュモーフィングとは既存のメッシュモデルを利用し、CADに戻らずメッシュモデルの接点や要素形状だけを変えて、形状を変更する解析手法であるため、移動量に応じてメッシュの歪量が大きくなり、解析が不安定になるといった課題が生じる。そこで、本研究では弁の移動量に応じてメッシュモデルを再生成するオートリメッシュ機能を開発し、流体解析モデルに統合した。

磁場解析は商用電磁界解析ソフトJMAGを用いて2次元軸対称の過渡応答電磁場解析を実施した。また本研究で行っている磁場解析は、有限要素法と境界要素法を併用した解析を行っている。有限要素法と境界要素法を併用した解析を行うことにより、可動部と固定部間の隙間領域のメッシュを作成する必要がなくなるだけでなく、可動子と固定子の要素分割数を揃える必要もなくなる。このため、磁場解析モデルの総メッシュサイズを少なくし、解析コストを下げることが可能となる。

本研究では、実験結果と従来の機構解析と磁場—機構連成解析、流体—磁場—機構連成解析で得られた比較を行い、構築した解析技術の妥当性に関する検証も行った。

## 第3章 流体—磁場—機構連成解析の高速化に関する検討

本研究で構築した連成解析技術は各解析の時間進行を同じにする必要がある。このため、流体解析、磁場解析、機構解析で使用する解析時間刻み幅を、全解析で必要となる解析時間刻み幅の最小値で設定する必要がある。この結果、連成解析の総解析時間が長時間化するという課題が生じ、産業界での設計業務に適用するのが困難になる。また、本研究でこれまで行ってきた解析により、流体解析の1解析ステップ当たりには要する解析時間が最も長いことが分かっている。そこで本研究では、構築した

非定常移動境界流体解析の高速化に関する検討を実施した。

本章では、まず初めに磁場-機構連成解析を行い、磁場解析の時間刻み幅の変化がアンカー挙動の解析結果に及ぼす影響に関する検討を行った。この結果、磁場解析の解析時間刻み幅を従来の 10 倍に大きくした場合でも従来の解析結果と同じ結果が得られることを確認した。次に、流体解析で得られる流体力を対象に 4 種類の内挿補間アルゴリズムを適用し、アンカー挙動に及ぼす影響を検討した。この結果、流体解析の解析時間刻み幅が同じ条件下で、異なるアルゴリズムを用いた際に得られるアンカー変位量の時刻歴変化に関する解析結果は概ね一致していることが判明した。また、流体解析の解析時間刻み幅が大きくなるにつれ、アンカーの立ち上がりのタイミングも早くなっていることも判明した。最後に流体解析に圧力の速度の中間流れ場の解析解析を用いた収束加速アルゴリズムを適用し、アンカー挙動に及ぼす影響に関する検討を行った。この結果、収束加速アルゴリズムを適用したことにより、従来の解析結果と同等の結果を得られ、1 ケース当たりの解析時間を従来の 144h から 22h まで短縮させることに成功した。

## 第 4 章

本章では第 2、3 章で構築した解析技術と実験計画法を用いた形状最適化に関する解析を実施し、対象にした各設計パラメータが評価項目に及ぼす影響に関して検討した。本検討では、アンカーとコアが凹凸と斜め形状の解析モデルを対象に、構築した連成解析に 0 次の補間法(固定値による内挿補間)と L9 直行表を用いた際の検討を行った。この結果、凹凸形状モデルでは、アンカーに作用する流体力の絶対値は、弁凸部高さが小さくなるにつれて増加すること明らかになった。斜め形状モデルではアンカー・コア衝突時の流体力の変化傾向とアンカー衝突速度の変化傾向が類似し、アンカーに作用する流体力の絶対値が磁気吸引力よりも大きいことが本検討によって判明した。

また、斜め形状の解析モデルを対象に、第 3 章で検討した収束加速アルゴリズムを適用した際の検討も実施し、その結果アンカーに作用する流体力の影響が明らかになった。しかし、アンカーに作用する磁気吸引力に及ぼす平坦面長さや斜めの角度の影響は小さく、コアの平面長さが短くなるにしたがい、アンカーに作用する磁気吸引力が大きくなることが明らかとなった。

## 第 5 章 結論

本論文では、解析による自動車用直噴エンジン等で用いられている燃料機器用電磁弁の弁挙動の高精度予測を目的とし、高圧燃料ポンプの実稼働時において弁に作用するスクイーズ効果や渦電流等の過渡現象を考慮に入れ、弁衝突時までの現象を詳細に把握可能とする流体-磁場-機構連成解析手法の構築を行った。本研究で構築した解析技術を適用したところにより、弁衝突速度の予測誤差を機構解析のみ時の 108%から 7%まで低減することを可能にした。また、流体解析に収束加速アルゴリズムを適用したことで、1 ケース当たりの総解析時間を従来の 144h から 22h まで短縮可能にした。さらに構築した解析技術と実験計画法を用いた形状最適化に関する検討を実施することで、各設計パラメータが弁挙動に及ぼす影響を把握することを可能にした。

## 論文審査結果の要旨

高圧燃料ポンプにおいては電磁弁が多く用いられ、電磁力デバイスに渦電流が誘起されることが広く知られており、磁気吸引力を計算する際は渦電流の影響を考慮する必要がある。しかし、電磁弁の挙動に関する先行研究の多くは、静的な電磁場解析の解析結果を用いており、静的な電磁場解析では渦電流の影響を考慮することは難しい。このため、電磁弁稼働時の弁に作用する正確な磁気吸引力を予測するためには、過渡応答の電磁場解析を行う必要があり、さらに燃料の中で電磁弁が動作するため、弁に作用する流体力を正確に考慮する必要があるが、これらの相互作用に関する検討はほとんど行われていない。また、弁が衝突する前に、2枚の固体壁が十分に近づくと固体壁間の圧力が上昇するスクイーズフィルム効果が発生することが知られているが、この現象に関する電磁場・流動場・機構の相互作用を考慮した連成解析的検討は未だ行われていない。上記で述べた燃料ポンプの流量制御弁を含む電磁弁は自動車だけでなく、建設機械等の油圧機器に多く用いられており、流体(油やガソリン等)が流れる流路の開閉を制御する役割を担っている。また電磁弁は、ソレノイドに流れる電流が電磁石となり、弁が動くことで流れを制御する。このため、電磁弁の挙動を正確に把握するためには、流体、機構、磁場の3つの影響を同時にかつ正確に把握・予測する必要がある。本研究は、高圧燃料ポンプの実稼働時において弁に作用するスクイーズ効果や渦電流等の過渡現象を考慮に入れ、弁衝突時までの現象を詳細に把握可能とする高精度連成解析手法(流体-磁場-機構連成解析手法)を構築するとともに、実験結果との比較により構築した解析手法の妥当性に関する検証を行ったものである。

本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、以下に示す全編5章から構成される。

第1章は序論であり本研究の背景、目的および構成について述べている。

第2章では流体-磁場-機構連成解析モデルの構築と妥当性検証について述べている。まず、電磁弁で設けられているアンカー・コアとの衝突現象を対象に非定常移動境界流体解析と過渡応答電磁場解析、機構解析を連成させた連成解析手法の構築を行い、アンカーの移動量に応じて解析メッシュを再生成するオートリメッシュ機能を開発し、流体解析モデルに統合した。この結果、流体解析では常にメッシュを高品質で維持することが可能となり、数値的に安定な流体解析を実現した。また、非定常移動境界流体解析により、アンカー・コア衝突直前の減速現象はスクイーズフィルム効果によって生じることを明らかにし、流体-磁場-機構の連成解析によりアンカー・コア衝突速度の予測誤差を機構解析のみ場合よりも90%以上低減させることに成功したことは重要な成果である。

第3章では流体-磁場-機構連成解析の高速化に関する検討結果について述べている。流体-磁場-機構連成解析における0次補間式(固定値)と1次の線形関数、3次精度風上差分関数を用いた解析結果の内挿補間アルゴリズムを検討し、新たに開発した収束性改善アルゴリズムの適用により、1ケース当たりの解析時間を従来の144hから22hまで短縮した点は重要な成果である。

第4章では実験計画法を適用した弁形状最適化に関する検討結果について述べている。まず0次補間式を用いた凹凸形状モデルに関して検討を行い、アンカー、コアの凹凸部の幅長さが弁に作用する流体力に対し最も支配的な因子であることを明らかにしている。続いて、収束加速アルゴリズムを用いた斜め形状モデルに関する検討を行った結果、電磁弁を用いた高圧ポンプ内流動においては流体力がアンカー・コア衝突速度に最も大きい影響因子であることを明らかにし、今後の高圧燃料機器用電磁弁開発に活用できる可能性が示されている点は重要な知見である。

第5章では結論と今後の展望について述べている。

以上、要するに本論文は高圧燃料ポンプの実稼働時において弁に作用するスクイーズ効果や渦電流等の過渡現象を考慮に入れ、弁衝突時までの現象を詳細に把握可能とする流体-磁場-機構連成解析手法の構築を行ったものであり、機械工学ならびにシステム情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文として合格と認める。