

脈動を伴うエンジン吸排気系の 三次元シミュレーション法とその適用による エミッションクリーン化技術に関する研究

学位論文内容の要旨

大気環境改善のためエンジンに対して排気および燃費の一層の改善が求められている。エンジン吸排気系のガス・熱流れは筒内燃焼および排気浄化触媒の性能に与える影響が大きく、その最適化はエミッションクリーン化のための有効な手段と成り得る。エンジン吸排気系のガス・熱流れの現象解明の手段として、シミュレーションを活用する努力が続けられてきた。エンジン吸排気系にシミュレーションを適用しようとした場合、エンジン全体をモデル化する必要性から計算モデルが膨大になるという問題がある。また流れ場も間欠的に行われるガス交換の影響を受けた非定常流れとなっており、従来一般的に用いられてきた定常流計算手法では十分な予測精度が確保できない。このためエンジン吸排気系の改良によるエミッションクリーン化の検討に用いる実用的な計算手法は見出されていない。

そこで本研究の目的は、エンジン運転時の吸排気脈動下におけるガス・熱流れをシミュレートするための実用的な計算手法を考案すると共に、シミュレーションを活用したエンジン吸排気系のガス・熱流れの現象解明およびその最適化により、エミッションクリーン化を図ることにある。

論文は以下の5章から構成した。

第1章は序論であり、自動車用内燃機関のエミッションクリーン化の背景について述べると共に、従来のエンジン吸排気系シミュレーションに関する研究動向について述べ、本研究の目的を明らかにした。また各章で得られた結果の概要について論述した。

第2章では、本研究で用いるシミュレーションソフトについて検討した。まず、各ソフトの計算精度と実用性を比較し、汎用ソフトの中から脈動流解析に最適なソフトとしてSTAR-CDを選定した。次にSTAR-CDを用いた場合の計算精度の向上および計算時間の短縮を図るための解析条件について検討した。さらに吸気系への適用として、計算によりガソリンエンジンの吸気ポートを最適化した例について説明した。

第3章では、吸排気脈動下におけるガス流れ予測手法（脈動計算手法）を構築し、その適用として空燃比制御に用いる酸素センサ設置条件について解析した。排気浄化用触媒を有効活用し、エミッションを低減するためには、酸素センサを最適な位置（各気筒のセンサ感度が均一な位置）に設置する必要がある。排気マニホールド内のガス流れは排気脈動の影響を強く受けるため、従来一般的に用いられてきた定常流計算手法では、センサ感度を精度良く予測することができないことが明らかとなった。排気脈動の影響を考慮するためには、吸排気系を含めたエンジン全体の計算モデルが必

要となるが、エンジン全体を三次元で解くのは計算時間の点から現実的でない。そこで吸排気系を含めたエンジン全体を一次元でモデル化し、解析の中心となる排気マニホールドのみを三次元とする脈動計算手法を構築し、排気脈動下におけるガス流れ予測を可能とした。次に、エミッションクリーン化を図るため、センサ感度を支配している因子を分析した。その結果、センサ感度はセンサ部における1サイクル中の時間積分平均ガス濃度に支配されることがわかった。すなわち各気筒のセンサ感度を均一化するためには、従来考えられていたように1サイクル中の各気筒の排気ガスのセンサ部通過流量を均一にするだけでは不十分であり、各気筒の排気ガスがセンサ部に滞留する時間を均一にする必要があることを見出した。

第4章では、前述した脈動計算手法を吸気系に適用し、EGR気筒分配均一化によるエミッションクリーン化について検討した。大量EGRはCO₂排出量の低減あるいはNO_x排出量低減が図れるため、エミッションクリーン化に有効である。しかし大量EGRの実現には、EGRの気筒間ばらつきの低減が不可欠であるため、シミュレーションを活用し、EGRガス流れの最適化を図った。EGRガス導入部に当たるスロットルバルブ下流には逆流域が存在し、その形状およびサイズは運転条件によって変化する。このためスロットルバルブ下流にEGRガスを導入する従来のEGRシステムでは、各運転条件においてEGR分配を均一化することは困難であることがわかった。シミュレーションによる解析から均一なEGR分配を実現するための3要件を明らかにした。そして、本要件を満足する新しいEGRコンセプト“スパイラル吹きEGRシステム”を考案し、運転条件に因らず、EGRガス分配の均一化が実現できた。

第5章では、超多サイクル計算を要する排気浄化触媒の非定常温度シミュレーション法を構築し、触媒の早期活性化の方策について検討した。計算の適用を考えた場合、流速変化の大きい吸排気系流れ場においては、流れ計算の要求タイムステップは小さく、相対的に時間変化の小さい過渡的な伝熱計算を同時に行うには計算時間が多大となるという問題がある。そこで、エンジン吸排気系流れのサイクル性およびガス流れと熱流れの時定数の違いに着目した流れと熱の非同時連成計算手法を構築した。本計算では、流れの計算は1サイクルのみ実施し、前記計算結果を繰り返し使って伝熱との連成計算を行った。この結果、実用十分な精度を確保しつつ計算時間を1/25に短縮でき、排気マニホールド触媒の昇温予測計算が可能となった。次に、触媒の暖機過程を詳細に分析した結果、触媒の昇温は触媒センタ部から始まっていることが確認された。従来、触媒の昇温がセンタ部から始まるのは中央部を流れるガスが多いためと考えられていた。しかしシミュレーションの結果から、ガス流速は触媒断面内で均一であり、触媒センタから昇温が始まるのは排気ガスが温度分布を持っているためであることが明らかとなった。エンジン始動後における暖機アイドル条件においては、排気ガスの流量が少なく排気ガスが触媒全体に広がって流れるため、排気ガス流れをコントロールすることは困難である。従って、触媒の昇温特性を改善するためには熱流れをコントロールすることが有効であり、触媒の早期活性化のためには、排気マニホールド部の断熱化あるいは熱伝達率低減、ならびに触媒担体の熱容量低減が、唯一の方策であることを示した。上記検討結果を踏まえ、排気マニホールド部断熱化を狙った“二重管エキマニ”と、触媒担体の熱容量低減を実現する“触媒担体隔壁の薄肉化”の採用によって、排気浄化触媒の早期活性化が実現できた。

第6章は、本研究の結論であり、得られた結果の概要を記述した。

以上、本研究ではエンジン吸排気系へのシミュレーション適用を図るため、脈動計算手法および流れと熱の非同時連成計算手法を構築し、吸排気脈動下におけるガス・熱流れ予測を可能とした。また前記計算手法を活用した結果、エミッションクリーン化を実現するための技術を考案した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 近 久 武 美

副 査 教 授 小 川 英 之

副 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 池 川 昌 弘

学 位 論 文 題 名

脈動を伴うエンジン吸排気系の 三次元シミュレーション法とその適用による エミッションクリーン化技術に関する研究

近年の大気環境改善に対する要求の一つとして、エンジンの排気浄化ならびに燃費の一層の改善が求められている。そのためにエンジンシステムの高度な数値シミュレーション技術の開発が課題となっており、排気触媒系の解析のためには脈動をともなう吸排気系のシミュレーションが必要となっている。しかし、非定常なエンジン吸排気系の現象をエンジン全体に亘ってモデル化するのは計算負荷上困難であり、これまでのところ一次元の脈動計算もしくは三次元の定常流計算が行われているに留まっている。

本論文は、脈動を伴うエンジン吸排気系ガス・熱流れをシミュレート可能とする実用的な計算手法を提案し、さらに関連する現象の解明と、構造の最適化によるエミッションクリーン化技術の開発を行ったものである。

まず、酸素センサの最適な位置 (各気筒のセンサ感度が均一な位置) 探索問題を対象として、従来一般的に用いられてきた定常流計算手法の有効性について実験との比較を試みた。その結果、排気マニホールド内のガス流れは排気脈動の影響を強く受けるため、従来の定常流計算手法では、センサ感度を精度良く予測することができないことが明らかとなった。そこで、上流の給気系には従来の一次元脈動流計算法を用い、エンジン燃焼には簡便な燃焼モデルを適用して排気の非定常な温度や脈動の境界条件を与え、その下流部において詳細な三次元シミュレーションと結合する計算手法の提案を行った。実験と比較を行った結果、本手法により精度よく排気系の三次元流動やガス組成分布をシミュレート可能であることが確認できた。次に、エミッションクリーン化を実現するために、上記手法を用いてセンサ感度を支配している因子を分析した。その結果、各気筒の排気ガスがセンサ部に滞留する時間を均一にする必要があることを見出し、広い運転領域範囲において触媒性能を最大化することに成功した。

次に同様な脈動計算法を吸気系に適用し、EGR(排気ガス再循環) 気筒分配均一化によるエミッションクリーン化について検討した。排気浄化のためには極力多量の大量の EGR を行うことが求

められるが、そのためには EGR の気筒間ばらつきの低減が不可欠である。数値解析の結果、EGR ガス導入部に当たるスロットルバルブ下流には逆流域が存在し、その形状およびサイズは運転条件によって変化することが見出された。このためスロットルバルブ下流に EGR ガスを導入する従来の EGR システムでは、各運転条件において EGR 分配を均一化することは困難であることが明らかとなった。そこで、これらの知見に基づいて、新しい EGR コンセプト“スパイラル吹き EGR システム”を考案した。数値計算と実験とを対比しながら本システムの改良を行った結果、運転条件に因らず EGR ガス分配の均一化を実現することができた。

一方、排気の浄化に関して、始動時の触媒温度上昇期間の短縮は重要な問題である。ただし、こうした計算では、超多サイクルの流動ならびに温度の三次元シミュレーションが必要となる。また、流速変化の大きい吸排気系流れ場においては、流れ計算の要求タイムステップは小さく、相対的に時間変化の小さい過渡的な伝熱計算を同時に行うには計算時間が多大となるという問題がある。そこで、エンジン吸排気系流れのサイクル性およびガス流れと熱流れの時定数の違いに着目した流れと熱の非同時連成計算手法を提案した。本計算では、流れの計算は 1 サイクルのみ実施し、この三次元流動パターンを繰り返し用いて、熱的な変化に関する伝熱との連成計算を行った。この結果、実用十分な精度を確保しつつ計算時間を 1/25 に短縮でき、排気マニホールド触媒の昇温予測計算を可能とすることができた。本計算手法を用いて触媒の暖機過程を詳細に分析した結果、従来推定していたよりも流動は排気管内で一様であり、むしろ伝熱による温度分布の形成が主体的であることが確認された。また、エンジン始動後における暖機アイドル条件においては、排気ガスの流量が少なく排気ガスが触媒全体に広がって流れるため、排気ガス流れをコントロールすることは困難であることが明らかとなった。以上の解析の結果、触媒の早期活性化のためには排気マニホールド部の熱損失低減と触媒担体の熱容量低減の二方策しかないことが明確となり、排気マニホールド部断熱化を狙った“二重管エキマニ”と、触媒担体の熱容量低減を実現する“触媒担体隔壁の薄肉化”の採用によって、排気浄化触媒の早期活性化が実現できた。

以上、本研究によりエンジン吸排気系へのシミュレーション適用を可能とする、脈動計算手法および流れと熱の非同時連成計算手法を構築し、吸排気脈動下におけるガス・熱流れ予測を可能とすることができた。また前記計算手法を活用した結果、エミッションクリーン化を実現するために、酸素センサ気筒感度均一化による空燃比制御精度向上技術、EGR 気筒分配均一化技術、および排気浄化触媒早期活性化技術の提案を行った。

これを要するに、著者は、脈動を伴うエンジン吸排気系の三次元シミュレーション法について新たな提案を行うとともに、エミッションクリーン化技術に関する新知見を得たものであり、数値計算工学および自動車工学の発展に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。