

氏 名	すぎ 杉 うら 浦 しげ 繁 き 貴
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 20 号
学位授与の日付	平成 4 年 3 月 25 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	工芸科学研究科情報・生産科学専攻
学 位 論 文 題 目	数値流体力学手法による自動車エンジン吸気系流の予測
審 査 委 員	(主査) 教 授 里 深 信 行 教 授 矢 田 順 三 教 授 齋 藤 憲 司 助教授 徳 永 宏

論 文 内 容 の 要 旨

近年、自動車エンジンの燃料供給法として電子燃料噴射方式が普及し、吸気系の諸元および形状に対する設計自由度が拡大した。そこで、吸気系の諸元、形状の最適設計によって体積効率を向上させることが、高性能なエンジンを開発する上で益々重視されてきた。しかしながら、要求されるエンジン性能が得られるように吸気系の形状を最適設計するには、多くの試作が繰り返され、膨大な開発期間と費用が費やされているのが現状である。このような問題点を緩和するには、形状と流動現象の関係を把握することにより、試作の回数を大幅に削減することが必要不可欠である。最近のコンピュータの著しい進歩により、流動現象を把握するための手法として、流体力学方程式を差分法等を用いて、コンピュータ上で流動現象を再現する数値流体力学手法が注目されるようになってきた。

自動車エンジン吸気系流に関する数値的研究は盛んに行われるようになってきているが、それらは使用されている基礎方程式および数値計算法が古典的であるために、膨大な計算時間が必要であるにもかかわらず、信頼できる結果を得られるには至っていない。さらに、幾何学的に複雑な形状を有する吸気系への適用は、格子作成法の柔軟性の不足により、殆ど行われていない。それらの問題点を克服するために、本論文では、有理ルンゲ・クッタ法を基礎とした数値流体力学手法を確立し、その手法を用いて吸気系の定常流および非定常流を数値計算することを目的とする。

亜音速から音速までの広い範囲の流速をもち、かつ流動抵抗を正確に計算することが必要な定常流予測に対しては、圧縮性ナビエ・ストークス方程式を基礎方程式として用い、さらに過去に例のない Chien の低レイノルズ型 $K-\epsilon$ モデルの導入も試みた。また、壁面近くに十分に細かい格子を設定し、物理的に正しい無すべり条件を課すことを基本とする。一方、ピストン作動に伴う圧力波動伝播による動的効果が支配的な非定常流予測に対しては、現在のコンピュータの能力の制約により、オイラー方程式を採用した。ベクトル型のスーパーコンピュータ上で効率的に計算が出来るように、数値計算法としては 2 段階の有理ルンゲ・クッタ法に基づく陽的線の方法を、格子としては境界適合型の構造

格子を利用した。幾何学的に複雑な形状の吸気系に対しても格子を容易に作成できるように、領域分割法に基づく格子作成法を採用した。

本論文では、まず、急拡大管路内流れを検定問題として取り上げ、本数値計算法の特性の明確化、一般座標系における表示形式が計算結果に及ぼす影響および乱流のモデル化法の比較検討を行った。その結果、一般座標系における基礎方程式の表示法としては、デカルト座標から一般座標へ変換する際の座標変換のメトリックを微分項の外へ出す準保存形の方が、メトリックを微分項の内に含める完全保存形よりも収束性および精度の面で優れていることや、乱流のモデル化法としては、Chien の $K-\epsilon$ モデルが、人工粘性モデル、Baldwin-Lomax の零方程式モデルおよび Myong-笠木の $K-\epsilon$ モデルに比べて、急拡大管路内流れにおいて重要なパラメータである再付着点距離に関して、予測精度が良いことおよび格子依存性が少ないという新しい知見を得た。

次に、複雑形状に対する格子作成法を検討し、領域分割法を用いることで、吸気ポート・バルブ・シリンダからなる形状に対しても境界適合型の構造格子を作成できることを示すとともに、領域接合面で2次元線形補間を用いることで、一方の領域から他方の領域に流れの情報を精度良く伝達できることを立証した。

最後に吸気ポート・バルブ・シリンダからなる形状の定常流予測およびピストン作動を伴う吸気管内の非定常流予測を応用計算として行った。前者においては、人工粘性モデルを用いた場合と Chien の低レイノルズ数型 $K-\epsilon$ モデルを用いた場合の2種類の方法により計算した。人工粘性モデルを用いた計算では、約3時間の計算時間で、質量流量を $-2\% \sim -7\%$ の誤差で予測できることや、壁法則と高レイノルズの数型の $K-\epsilon$ モデルを用いた他者の結果よりも流れパターンを精度良く予測できることを立証した。また、Chien の $K-\epsilon$ モデルを用いた計算では、計算時間が人工粘性モデルを用いた場合に比べると約30倍必要なものの、ポート曲率半径が最も小さいケースを除いては、質量流量の予測精度が向上することがわかった。また、シリンダ内の複雑な流れを完全には再現するには至らなかったものの、人工粘性モデルでは得られない乱流エネルギー分布のような流れ場の詳細な構造が予測できた。一方、非定常流計算では、直管に対してではあるが、3次元の圧力波動を世界で初めて予測するのに成功し、さらに曲管に応用することで、1次元計算では本質的に予測可能な形状が圧力波動に及ぼす影響を予測できる可能性を示せた。以上のことにより、本論文で開発した数値流体力学手法は吸気系を設計するうえで、有効なツールとなることが結論できた。

論文審査結果の要旨

杉浦繁貴君の申請による博士論文の審査委員会においては、提出された資料、論文に基づき、論文内容の信頼性、独創性、新規性および工学への寄与の期待度、さらに完成度などについて慎重に審査を行った。

申請者の論文は論文内容の要旨より明らかなごとく、自動車用エンジンの吸気系流に対して、定常流解析に基づく質量流量の予測（第9章）とピストン作動による圧力波動の予測（第10章）をエンジン内部の複雑な幾何学的形状の取り扱いに領域分割法を導入し、さらに前者に対しては壁面での低レ

イノルズ数効果を考慮した乱流モデル（第7章）を採用して、実験と比肩しうる精度でのコンピュータによる数値的予測を世界で初めて可能としており、この点で大いに新規性が認められる。また、今後の自動車エンジンの性能向上への応用を通じて自動車工学のみならず、機械工学分野全般にわたっての高い寄与が期待できると判断された。

申請された論文の基礎となる内容は、すでに自動車技術会論文集に4編、日本機械学会論文集に1編、権威ある国際会議の論文集に3編、いずれも審査の結果掲載されており、したがって、それらを基にする本論文の内容については十分な信頼性と客観性があると認められる。

特に自動車技術会論文集に掲載された4編の論文に対しては自動車技術会より奨励賞を授与されており、この点からも高く評価された。