

博士學位論文

内容の要旨
および
審査結果の要旨

第21編

平成25年度

神奈川工科大学

は し が き

本編は、学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条によるインターネットの利用により公表を目的として、平成25年度内に本学において博士の学位を授与した者の、論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨を収録したものである。

学位記番号に付した甲は、学位規則第4条第1項（いわゆる課程博士）によるもの、乙は、同規則同条第2項（いわゆる論文博士）によるものであることを示す。

< 目 次 >

乙第6号 武山 哲 Multi-Physicsを含んだシミュレーション活用による
車の新技術創出の研究 ・ ・ ・ ・ 1

氏名(本籍)	武山 哲 (神奈川県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	乙第6号
学位授与日	平成26年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
研究科・専攻名	工学研究科 機械システム工学専攻
学位論文題目	Multi-Physics を含んだシミュレーション活用による車の新技術創出の研究
論文審査委員	(主査) 神奈川工科大学 石濱 正男 教授 神奈川工科大学 平山 弘 教授 神奈川工科大学 西口 磯春 教授 神奈川工科大学 田辺 誠 教授 明治大学 萩原 一郎 教授

内容の要旨

(要旨)

本論文では、全体を通じて①シミュレーションによる新技術の創出，②シミュレーションの広範囲の解法への発展，③最新の技術として熱流体に固体弾性変位も加えた Multi-Physics 連成シミュレーションの活用，④コンピュータの発展にともなうシミュレーション技術の変遷に関する研究結果と今後の方向を示す。

この研究で開発したシミュレーション技術は、単一の手法ではなく、一次元差分法，三次元差分法，そして複数の解法を同時に実行する Multi-Physics 連成シミュレーションという広範囲にわたるものである。論文後半には、熱流体に固体弾性変位も加えた Multi-Physics 連成シミュレーションの手法と、それを活用して創出した新冷却法を述べる。

下記に本論文の構成を記述する。

本論文の構成

第1章は、本研究の目的、車に求められる性能の変遷、CPU 性能等コンピュータ環境の変遷と熱流体を中心としたシミュレーションの推移について述べる。シミュレーション開発には次の要素を考慮しながら、対象毎に重点を変えて異なる手法を用いた。すなわち、対象とする現象の性質（次元、速度）、計算機環境、市販コードの有無などである。

第2章では吸気系脈動解析によるエンジン出力向上に一次元差分法を用いて、独自のプログラムコードを開発した例を示す。排出物制御のための大量 EGR（排気還流）解析には市販コード利用の三次元現象モデリングと新気・排気の効率的混合用吸気系設計例を示す。まず、計算機資源の質と量に頼らず、現象の本質をとらえた効率的な一次元計算手法により、エンジンの出力を予測できる熱流体解析シミュレーション、すなわちガス交換過程シミュレーションの数値計算手法の開発について述べる。同時にその手法によって、新しい機構を創出した開発例を示す。次に、計算機環境の向上とともに出現した3次元の熱流体シミュレーションを、その特性を生かして、実エンジン内の熱流体解析の実例と、改良設計の創出例について記述する。

第3章では、熱流体解析と固体の弾性変化解析を同時に進行させる Multi-Physics 連成シミュレーションの実用化手法について述べる。個々の物理現象毎に開発された解析コードとメッシュ生成コードを活用しながら、それを簡単に統合しつつ修正できる Concurrent

Mesh Platform という新しい概念の創出を記述する。これにより異なる物理現象が複数存在して相互に作用する現象を、同時かつ効率的にシミュレーションすることを実現した。

第4章では、実際に Multi-Physics 連成シミュレーションを活用し流体力による固体の振動により流体境界層を通しての熱輸送を促進する新しい振動冷却方式の開発例を報告する。実例は、従来と比較して40%冷却効率が向上する新しい冷却方式振動冷却である。

第5章の結言では、第2章から4章の内容から得られたシミュレーション技術開発と新技術開発に当たっての肝要なことを記述する。および今後の課題についての考察を述べる。

次に各章の内容の要約を述べる。

第1章 緒言

時代と共に、車に対する規制や市場要求が変わり、それに応じてシミュレーションの対象が変わってきていることを示す。加えて、コンピュータ能力の向上により、シミュレーションの適用範囲が拡大している概要を記述する。

特に著者が携わってきた熱流体シミュレーションを中心として、その数学的離散化の手法とその適用結果、さらに、近年では車に対する要求の複雑化と、計算機能力の向上とが相まって Multi-Physics 連成シミュレーションが適用の域まで達してきたその変遷について概要を述べる。

第2章 熱流体シミュレーションを用いた新技術創出

2-1, 2-2項では車に要求される性能と、それを予測する熱流体シミュレーションの従来の課題を述べている。

2-3項では、車の出力性能を改善する手法と創出した新技術について述べる。エンジンの出力向上の要求に対し、従来は多数のエンジンを試作し実験により開発することがほとんどであり、かつガス交換過程の現象理解が不十分で実機に応用できなかったため、シミュレーションを適用したガス交換過程の予測とその解析、および吸入空気量増大が大きな課題として求められていた。特に、吸入管内の脈動を利用し吸入空気量増大ができる設計案を、シミュレーションを活用して創出することが大きな課題として求められていた。

しかし従来のシミュレーションは吸気系と極端に単純化した音響理論あるいは特性曲線法を用いていたため、前者の音響理論では、充填効率の予測精度が低く、後者の特性曲線法では、菅の断面積変化の設定が難しい等の問題点があった。

2-3-1節では、ガス交換過程シミュレーションの概要を述べる。

2-3-2節では、離散化の手法として差分法を取り入れ、人工粘性係数に工夫を加えた管モデルについて記述する。

2-3-3節では、マニホールド分岐部のモデルについて述べる。分岐モデルでは、それまでの手法では、分岐中心部の流速を考慮しなかったが、本モデルでは変形 FLIC 法を用いて、分岐中心部の慣性を考慮した。

2-3-4節では、シリンダ等の容器モデルおよび燃焼モデルについて述べる。

2-3-5節では、境界条件について示す。境界は、質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、断熱変化式と管内との差分式でモデルどうしを結合する。排気バルブ開時の場合、吐出する流速が音速になり断熱式が成り立たないため、断熱式の代わりに音速の条件を入れる工夫を行った。同条件は、排気バルブの開口面積が狭い時だけの条件設定のため、充填効率の予測精度の相違はわずかである。

2-3-6節では、実測値と計算値の比較を示す。

2-3-7節では、シリンダ壁面における熱伝達が、充填効率予測の絶対値を決める重要なフ

アクターであることを示している。

2-3-8 節では、**2-3-1 節**のガス交換過程シミュレーションを用い、6 シリンダエンジンの吸気系の圧力脈動を分析した内容を示す。

2-3-9 節では、上記吸気系の挙動を活用し、可変吸気方式と呼ばれる新しい吸気方式を開発し、実機エンジンの出力改善に貢献した内容を示す。

2-3-2 節から**2-3-6 節**の数値解析技術と、**2-3-9 節**の可変吸気方式の実機への適用に対し、1988 年 IMechE (The Institution of Mechanical Engineers; 英国機械学会) Dugald Clerk 賞を受賞している。

2-4 項では出力増加による排気音の増加を抑えるため、同シミュレーションを活用し、排気吐出音を低減する排気位相差カムの開発を報告する。

2-5 項では、排気エミッション (特に HC, NO_x) の削減が必要とされた状況とその対策について記述する。従来は、大量 EGR が NO_x 削減の手段であったが燃焼不安定を招き、十分に混合する為に吸気系容積大にするとエンジンの応答、スペースの点で成立しないなどの問題があった。また、加熱式の触媒を使う試みもされたが、大電流を要することから、バッテリーの大型化等も招き、実用性がなかった。

1990 年代になって3次元シミュレーションの市販が始まったが、解析対象の現象に合ったモデリングを行わないと、計算不能、計算時間の過大、大きな誤差集積などの問題が発生していた。

2-5-1 節では、3次元熱流体の解法を良く知った上で、計算対象となる現象を必要最小限の計算量で表現するモデリング技術を、実験との対応付けをしながら開発した結果を報告する。これらの技術革新を活用することにより、エミッション発生源である燃焼の改善を可能とした。この手法は、計算資源が発達した今日においても、シミュレーションをいたずらに複雑化することなく、設計者にとって現象の理解が容易となる価値のある方法である。

2-5-2 節は、このエンジン内のガス流動解析を説明したものである。

但し、1990 年代前半の市販の熱流体シミュレーションソフトは、精度や収束性が高くなく、エンジンに適用すると、計算途中で発散や、実測値と合わないという問題があった。そこで、4社の市販シミュレーションにて、計算メッシュ作成が可能であるか、可視化実験と計算のフローパターンが一致するか、およびバルブリフトに対する流入量の精度が適切であるか、加えて収束性が良いか等の観点で最適なソフトウェア (STAR-CD) を選び、本研究で用いるエンジン解析スタンダードシミュレーションとした。本3次元熱流体シミュレーションのエンジンへの適用は日本初である。

2-5-3 節では、**2-5-2 節**のシリンダ内のガス流動改善に加えて、もう一つのエミッション低減手法である EGR (Exhaust Gas Recirculation) の改善を、3次元シミュレーションによって現象解析と実機適用を行った結果報告である。

燃焼室内で生成される NO_x は窒素の燃焼時の高温熱解離と酸化により発生する。EGR を施すとシリンダ内ガスの熱容量が増して火炎温度が下がるので、NO_x 低減に効果的である。このとき、排気ガスの新気への混合度合いの実験計測は殆どで不可能であるため、3次元シミュレーションを現象解析に応用した。その結果からシリンダに流入する新気と排ガスを均等に混合するスパイラル混合 EGR という設計案を考案した。

2-5-4 節では、インホイールモータを有する電動車の車体周り熱流体解析を記述した。インホイールモータは、一定の熱を発生する要素として、当該要素の体積に比例した発熱条件を与えた。ホイールの回転はなく、床面にはフリースリップの境界条件を与えている。ここではフロント部、インホイール廻りの流れおよび、熱の分布は解析できた。これにより、インホイールモータが高温になり、さらなる詳細な解析が必要であるという課題が把

握できた。

第3章 Multi-Physics 連成シミュレーションを効率的に行なう Concurrent Mesh Platform の創出

3-1項では、CO2 低減の要求から始まった電動化の究極の姿としてのインホイールモータ (in-wheel motor) の冷却改善設計に対し、Multi-Physics 連成解析手法が必要であることを述べる。

3-2項では、構造振動と空気流変動の Multi-Physics 解析実行にあたっての解析用メッシュ生成の困難さを記述する。インホイールモータのような狭い空間を形成する構造の設計修正を行う場合、連成計算をする流体側の計算メッシュを再度構造体に沿って修正し、処理に多くの時間を要する課題を示した。

3-3項では、熱流体现象と構造振動現象の圧力を介しての連成問題を、効率的に解くため、著者が新しく開発した Concurrent Mesh Platform について述べる。まず、この Multi-Physics シミュレーションの基本方針として、すでに充分発達している個別 Physics の解析ソフトを統合的に使い、シミュレーション全体として連成解析を行なうという考え方を説明する。昨今の連成シミュレーションでは、橋脚の変形のように弾性体外部の空間が広く、熱流体のメッシュが多く作成できる開かれた空間の連成計算は発表されるようになってきた。しかしながら、車の内部のように閉空間に部品が多数存在する複雑な対象に対して、メッシュ作成やメッシュの連結が難しく、多大な時間がかかるという 3-2項に示した問題があった。開発した Concurrent Mesh Platform は、構造体と熱流体メッシュを連結する機能を持つほか、モーフィングによってメッシュを動かす機能も有する。これにより、設計変更によって CAD 形状が変わっても、そのたびにメッシュを作りなおす必要がないため、形状変更に対するメッシュ作成時間が大幅に削減できることで、連成シミュレーションの普及が可能となったことを述べる。

3-3-1節では、本 Platform の中心となる概念を述べる。この概念を用いながら、本研究で開発したメッシュ操作機能を使うと、構造体や流体のメッシュを使い慣れたメッシュジェネレータで作成した後は、異なる物理系のメッシュを半自動で連結し、データベース上でペアとすることによって、設計変更によって構造体の形状を修正した場合、同時に流体側のメッシュが自動的に作成できる。

3-3-2節と 3-3-3節では、メッシュ作成の基本アルゴリズムを述べる。

3-4項では、連成計算に用いた一般的なカップリングの方法を記述する。

3-5項では、計算の結果最終的に到達したメッシュ形状を CAD 情報に戻す技術として使った一般的な技術を記述する。

第4章 熱流体・構造体の Multi-Physics 連成シミュレーションの適用と振動冷却手法の創出

4-1, 4-2項はインホイールモータに要求される冷却性能と従来の課題について述べている。

4-3項から 4-4項 (4-4-1節, 4-4-2節, 4-4-3節) は、3章で開発した、CMP を用いて Multi-Physics 連成シミュレーションを、インホイールモータの冷却に適用した結果について述べる。

4-5項では、実際に Multi-Physics 連成シミュレーションを適用して、振動冷却と呼ぶ新しい冷却方式を開発できたことについて記述する。

振動冷却方式とは、冷却用のフィンに断続的に当たる風の力と弾性復元力の連成現象を利用しフィンを振動させ、乱流熱伝達を向上させ、冷却対象部位をさらに低温に保つ新機構である。計算では同振動により冷却性能が40%向上する結果を得た。

4-6項では、同技術の特許化した具体的な構成について記述した。

第5章 結言

本章では、熱流体を中心としたシミュレーション技術と Multi-Physics シミュレーション技術の開発、およびそれらを用いた新技術開発に関する研究の結論を述べる。

車に対する要求は、その年代ごとに異なってきたが、計算機の発達と共に、計算可能な熱流体シミュレーションの範囲が徐々に広がり、本研究も1次元から3次元現象への拡張に貢献をした。

さらには、本研究により開発した Concurrent Mesh Platform により Multi-Physics 連成シミュレーションを、車のような狭い空間で応用することに成功し、構造の流体の交互作用を解くことができるようになった。ただし、変形は比較的小さく、大変形に対しては発散する課題が残っている。

本研究では、シミュレーション技術適用により、エンジンの出力向上、排気清浄化、電気自動車駆動ユニット性能向上の具体的技術開発に貢献できた。これらの例を振り返っての総合的結論として、シミュレーション技術は、開発短縮等の効率化だけに活用するものでなく、新しい機構を開発するにあたって、物理現象を理解する重要なツールとなり得るものであり、工業製品の更なる発展に貢献していくことを最後に述べる。

なお、本論文の欧文題名は

Development of New Vehicle Technology by Advanced Usage of Computer Simulation Including Simultaneous Multi-Physics Analysis である。

審査経過の要旨

1. 審査の経過

- (1) 2013年7月4日 指導教授・石濱正男に対し学位請求論文と学位申請書が提出された。
- (2) 2013年7月10日 機械システム工学専攻会議にて、上記5名を審査委員として予備審査を行なうことを決定した。
- (3) 2013年8月27日 15時から17時30分まで予備審査が開催され、本審査に移るだけの内容があることを全予備審査委員が確認した。
- (4) 2013年10月2日 機械システム工学専攻科会議にて論文受理を決定した。
- (5) 2013年10月11日 研究科委員会において提出論文の受理を決定し、研究科長より上記5名がその審査委員として指名された。
- (6) 2014年1月13日 5名の審査委員による中間審査を実施。論文としての完成を確認し、公聴会の開催を決定した。
- (7) 2014年1月28日 午前10時から11時50分まで公聴会を開催した。
- (8) 2014年1月28日 午前11時50分から12時20分まで、審査会を開催して英語による発表及び英文要旨や海外発表論文などから外国語の能力を確認し、論文内容とともに公聴会での質疑応答も含めて博士(工学)の学位授与にふさわしいと判定し、合格とした。
- (9) 2014年1月29日 15時10分から15時30分まで、機械システム工学専攻科会議において学位授与を可とした。

2. 審査の結果

論文題目：Multi-Physics を含んだシミュレーション活用による車の新技術創出の研究

申請者の学位請求論文は、自動車用エンジンや電気自動車駆動モーターなどの性能向上や技術的な問題解決のために、熱および流体のシミュレーション技術を開発し、新技術を創出した内容をまとめたものである。

論文は以下の章によって構成されている。

第一章 緒言

第二章 熱流体シミュレーションを活用した車の新技術創出

第三章 Multi-Physics 連成シミュレーションを効率的に行なう Concurrent Mesh Platform の創出

第四章 熱流体・構造体の Multi-Physics 連成シミュレーションの適用と振動冷却手法の開発

第五章 結言

[参考文献]， [謝辞]

第一章では、自動車開発におけるシミュレーションの目的と変遷についての概論を述べ、以下の章に記述している申請者の研究の必要性和アプローチについての導入としている。

第二章の前半では、まだ CAE を直接自動車の研究開発に使うことが困難な 1980 年代初頭から、流体運動解析に差分法を巧妙な工夫をして応用し、自動車用エンジンの高性能化のために吸気流量を増加する新技術開発を行った研究報告を論文の冒頭部分で記述している。計算方式の開発だけでなく、実用かされた可変吸気システムへの応用までを含んだ内容となっている。

第二章の後半では、排気ガス清浄化に必要なエンジン燃焼室内流動解析や排気ガスの還流と吸気の混合促進について、物理現象を精度良く表現する計算モデル構築によって解析を実施し、具体的な製品開発につなげ、排気ガス規制をクリアーしたエンジンの実用化に至る研究を記述している。

第三章では、流体力学と構造力学との相互作用などの複数の物理現象の連成解析を、既存の個別物理現象用ソフトウェアを活用しながら実行できるように、計算用格子を流動的に結合できるシステムの研究開発を記述している。これは、Concurrent Mesh Platform という申請者が新しく打ち立てた概念のもので、CAD で作られる設計データ、それぞれの単一物理現象解析用に生成される計算格子 (Mesh) を有機的にリンクして自動結合する一種のデータベースマネジメントシステムである。それぞれの物理現象解析に必要な要件を満たしながら、効率的に計算を実行する準備をする新しい方式である。また、これをベースにして、ある時刻での単一物理現象での解析結果から、ほかの物理現象解析計算用 Mesh を変更して、つぎの時刻で解析するという、交互計算の繰り返しにより、事実上の同一時刻での複数物理現象解析を実行することに成功している。

第四章では、上記の Concurrent Mesh Platform を電気自動車のモーター冷却に応用し、冷却フィンを振動させて冷却する「振動冷却」という新しい概念を計算により確認している。

第五章では、研究の総括と今後の展望を述べている。

これら上記の研究内容は、学会の印刷論文として認められているものが多く、審査会での質疑応答の内容からも、申請者独自の研究成果と認められる。

かくして、本論文はこの分野における新たな道を切り開いており、その独創性、有用性、信頼性、完成度から判断して学位論文に値するものであり、申請者は博士 (工学) の学位に値するものとの結論に達した。