

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

Space–Time Computational Analysis of
Tire Aerodynamics with
Actual Geometry, Road Contact,
Tire Deformation and Fluid Friction

申 請 者

Takashi KURAISHI

倉石 孝

総合機械工学専攻・流体構造連成系応用力学研究

2019年2月

近年、流体に関する数値計算技術は進み、多くの産業で利用されている。特に、単相流による抵抗計算等は、数値風洞と呼ばれるように実験に代わる十分な精度を有する計算が可能である。こうした一方で、ローカルな現象やマルチスケール性の高い現象を高精度に捉えることが難しい問題も少なくない。タイヤの路面との接触はその一例である。タイヤの溝を含む複雑な実形状、そして路面との接触による変形・タイヤと路面に生じる隙間に発生する流体力などの接触という技術的な面と非常に高いマルチスケール性とその主な難点である。タイヤは車両を支えるだけではなく、その制動において最も重要な役割を果たし、全体のバランスが重要視されるパーツである。そして回転と接地という特異性より実験的アプローチも非常に難しいことが知られている。本研究は Space-Time (ST) 法によるタイヤの接触の実現・アイソジオメトリック離散化による複雑形状に対する高次精度化の実現、Variational Multiscale 法による低レイノルズ数から高レイノルズ数までの一貫した統一的定式化をコア技術とし、タイヤを例にし、上記の課題解決を目標として行われた。以下に審査状況を示す。

申請者から博士論文「Space-Time Computational Analysis of Tire Aerodynamics with Actual Geometry, Road Contact, Tire Deformation and Fluid Friction」の草案、研究業績が提出され審査員より予備審査の開催に値することが確認された。これを受け 2018 年 10 月 18 日（木）60 号館 206 室にて実施された総合機械工学専攻教室会議（以下教室会議）により予備審査会開催が承認された。草案は 10 月 25 日（木）より総合機械工学科事務室に於いて公開し、11 月 1 日（木）12 時から 13 時の間で、60 号館 206 室に於いて予備審査を実施した。審査では論文の概要が説明され研究成果の特に工学的価値について議論された。いくつかの論文構成上の指摘があったが、全審査員により、研究業績および内容ともに受理申請に値することが承諾された。総合機械工学専攻としては、11 月 8 日（木）に行われた教室会議に於いて、正式に受理申請を行うことが認められた。その後 11 月 22 日（木）16 時の創造理工学研究科運営委員会において受理が認められた。審査の都合で、審査は主に個別に行われ、全体としては 2019 年 1 月 14 日（月）に行われた。並行して、公聴会の準備を進め、1 月 7 日（月）13 時半から 14 時半の日程で、55 号館 N 塔 1 階第 2 会議室に於いて開催された。公聴会にはライス大学・また本学のジョイントアポイントメントである Tezduyar 教授、東京大学の越塚誠一教授・高木周教授、豊橋技術科学大学の飯田明由教授、神奈川工科大学の石濱正男教授らの数値計算・流体力学・流体実験、タイヤ研究の専門家およびタイヤ会社や自動車会社など多く企業研究者の参加があった。発表・質疑は英語で行われた。学術的な質

問から応用面の質問まで多数あり，それぞれに対して質問者の疑問が尽きるまで回答された．以上を踏まえ，審査員に対して論文の修正説明が個別に行われた．論文は，1月30日（水）に総合機械工学科事務室に於いて公開し，最終的な修正は2月4日（月）に審査員に対して個別に報告され承認を得た．2月6日（木）教室会議にて実施された総合機械工学専攻審査分科会に於いて合格が承認された．以上を経て完成した本論文は英語で記載されており全8章および2つの付録から構成されている．日本語に要約すると以下の通りである．

第1章では，タイヤ自身の重要性や求められている性能について記述され，それらを達成するための実験的計測と数値計算の2つのアプローチについて先行研究を含め記述されている．そして，特に数値計算上の難しさおよび，研究の出発点であるST法の発展について書かれている．

第2章では，本研究で使用される流体の支配方程式であるNavier-Stokes方程式が示されている．また，薄い隙間に限定すると多数の項が微量となることから単純化することができる．これはReynolds方程式と呼ばれ，その導出とその単純化の意味について第6章に先立ち説明されている．

第3章では，第2章の支配方程式の弱形式および離散化について書かれている．定式化にはST法に基づくVariational Multiscale (ST-VMS)法が用いられ，そのいくつかの特殊な手法としてST Slip Interface (ST-SI)法，ST Topology Change (ST-TC)法等について手法及びその使用法，適用法について記述している．これらが，本論文でタイヤ周囲流れの計算を可能としている．また，離散化手法としてアイソジオメトリック離散化が用いられその有効性についても記述されている．

第4章では，計算手法の妥当性について，2次元の問題を用いて検証している．従来の計算法で可能な問題設定とすることで計算法の妥当性を示した上で，格子解像度を変えることで計算法の収束性を示している．

第5章では，タイヤの実形状を用いた計算を示している．このように物体適合格子を使い時間微分に対して精緻な計算を実現したことは世界初であり唯一の計算であると言える．本章では，さらに，格子解像度を上げ計算の収束性についても議論している．

第6章では，路面粗さや横溝のように局所的にレイノルズ数の低い箇所を検討するに当たり，Reynolds方程式で記述可能な問題を検討している．ここでは，ST-VMS法にアイソジオメトリック離散化を組み合わせることで，厚み方向1要素で，Reynolds方程式と同等以上の解が得られることを示している．タイヤやベアリングのような回転物

体の使用を想定し ST-SI 法を併用しても同等の結果が得られることも示されている。

第 7 章では、第 5 章、第 6 章を組み合わせ、タイヤの実形状に加え路面粗さを考慮した計算を実現している。この時、非圧縮性流れにおいて、表面力による境界条件を含まないサブドメインが生じることが無いような工夫など実用的な手法の詳細が示されている。

第 8 章では、これらの章を総括するとともに、本研究に於いて研究された計算手法がタイヤに限らず軸受などの多くの工業製品にも応用可能であることが説明されている。

以上を要するに、本論文では、これまでの計算手法では実現できなかった接触問題を精緻に実現することおよびその接触に伴うマルチスケール性の高さに耐えうる一貫した定式化に基づく高精度な計算を実現しており、計算工学への寄与が認められる。また、これまで実験的にも接触部近傍はほとんど明らかにされていなかった流れの詳細を示すことにより、実工学問題への有効性が認められる。よって、博士（工学）としての価値のある論文であることをここに認める。

2019年2月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士（理学）東京工業大学 滝沢 研二

早稲田大学教授 博士（工学）大阪大学 宮川 和芳

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 草鹿 仁

早稲田大学教授 博士（工学）東京大学 石村 康生