[共同研究成果]

次世代低騒音タイヤ開発に向けた高精度流体音響解析

― 先端 HPC 利用でタイヤ空力騒音に挑む ―

- 藤井 孝藏:東京理科大学工学部情報工学科
- 阿部 圭晃:東京大学大学院(現:Imperial College of London)
- 李 東輝:東京大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻(現:現代自動車)
- 原田 拓弥:東京理科大学工学部機械工学科
- 野々村 拓: JAXA 宇宙科学研究所(現: 東北大学工学系研究科)
- 小石 正隆:(株)横浜ゴム
- 池田 俊之:(株)横浜ゴム

1. はじめに

シミュレーション技術の向上などを受けて、走行時の自動車の低騒音化には急速な進歩が 見られ、近年タイヤから発生する騒音評価までもが重要となってきた.低騒音タイヤの設計 はこれまで主に実験をベースに進められ、構造音と空力音の切り分けなどが十分に行える状 況になかった.その結果、高速走行時に支配的となる空力音の観点で優れたタイヤを考える ことが十分に行われてきたとはいえない.数値シミュレーション技術はスーパーコンピュー タというハードウェアの急速な性能向上にも助けられ、この30年著しい発展を遂げてきた. しかしながら、複雑な流体場が生み出す dB レベルの音響波を捉えることは現在でも容易で はない.私たちは、自ら開発してきた空間解像度の高い手法を利用することで、タイヤが発 生する空力音を直接数値シミュレーションによって捉え、主たる音源を特定することで最終 的に低空力騒音のタイヤ設計につなげる試みを進めてきた.実用レイノルズ数でのシミュレ ーションが困難なことから音響特性が大きく変化はしないと推察されるレベルまでレイノル ズ数を落としたシミュレーションを実施している.一連の研究は、得られる現象から見えて くる物理に基づいたタイヤ設計法構築に向けた基礎研究と位置づけられる.

このようなタイヤ周りの乱流渦構造と音響場の直接シミュレーションに関する研究は極端 に低いレイノルズ数における流れ構造を議論したものなどを除き,我々の知る限りいまだ存 在せず,当研究チームが開発・検証を重ねてきた高解像度流体ソルバーを用いることで解析 可能となる.これまで,10⁴という低いレイノルズ数を利用して溝の影響などを評価[1,2],溝 なしタイヤの走行シミュレーションによって初めてタイヤが生み出す明確な音響波を捉える ことに成功[3],続いてレイノルズ数を一桁上げたシミュレーションを実施(2014 年度に欧州 で開催されたタイヤメッセ REIFEN2014 において(株)横浜ゴムがイノベーションアワードを 受賞),単一の縦溝の効果,縦溝形状の影響(2015 年度 HPCI 産業利用課題,HPCI システム 利用研究課題優秀成果賞を受賞)[4,5]と一歩ずつ研究を進めてきた.2016 年度に実施した本 共同研究の目的は、レイノルズ数を上げたときの影響を見定めるための基盤シミュレーショ ンである.具体的には、タイヤ径の影響に焦点を当て、形状スケールという観点でレイノル ズ数を上げたときにその影響がどう出るかを評価するものである.今後さらに形状が複雑化 し、格子点数もさらに増加することから、更なる計算効率の向上を目指したプログラム構成 の再検討、ベクトル機の特徴を活かしたチューニングなどをあわせて本共同研究の枠内で実 施させていただいた.

2. 計算モデル

2.1 解析対象

最終的な解析対象は、122[km/h]走行(マッハ数 0.1)・直径 60[cm]のタイヤである.タイヤ径を 代表長さ、走行速度を代表速度とするとレイノルズ数は 10⁶程度となる.本研究では計算可能な 格子点数の下で LES を行うため、意図的にレイノルズ数 10⁵の流れ場を計算対象とした.これが 基準となるケースである.図1にタイヤ表面と地面の移動方向とその領域を示す.計算手法は表 1の通りである.



図1 タイヤ表面と地面の移動領域

ここでは、レイノルズ数を Re=150,000 に上げて、タイヤ径が音響場に与える影響に関するレ イノルズ数効果を評価する.同じレイノルズ数でも速度と形状(大きさ)によって実際の状況は 異なる.このシミュレーションでは、タイヤ径が 1.5 倍になった場合を想定する.相似形状に対 して単にレイノルズ数を 1.5 倍としたシミュレーションはタイヤ幅が 1.5 倍のタイヤを対象にし たことになる.従って、タイヤ幅を 1/1.5 に狭め、レイノルズ数を上げたシミュレーションを行 うことでこの状況を再現した.なお、実空間の同じポイントにおける音響波の強さでタイヤ径の 影響を比較・評価するには、タイヤ径が 1.5 倍のケースにおける計測ポイントを無次元距離で 1.5 倍近傍に置く必要がある.以上のことを踏まえつつ、レイノルズ数の効果をシミュレーションに よって調べた.ここでの計算では、上記の 2 ケースの計算格子には重合格子を利用し総格子点数 約 2 億 5000 万の ultra-fine 格子を採用した.背景格子とタイヤ廻りに用意された 3 つの領域格 子からなっている.

2.2 計算手法

支配方程式	圧縮性ナヴィエ・ストークス方程式
空間差[6,7]	6 次精度コンパクト中心差分+3 重対角フィルター(ar=0.40)
時間積分[8]	2 次精度後退差分(収束法:ADI-SGS 陰解法)
乱流モデル	Implicit LES
地面と	タイヤと実験におけるドラム回転を模擬した速度(マッハ数 0.1)を
タイヤ表面	境界条件として与える.

表1:計算手法

なお,計算領域外縁には圧力波の反射を抑えるためにスポンジ領域を設けている.図2は計算 格子である.赤色がタイヤ周辺格子,黒色が背景格子であり,領域間の物理量内挿[9]で計算を行 う.



図2 タイヤ周辺格子(赤色),背景格子(黒色)(大きなゾーンのみ表示)

2.3 並列化に関して

ここで利用しているプログラム LANS3D はさまざまな形で多くの学術研究者や産業界の方々 に利用していただいてきた.このプログラムは元々1980年代半ばに開発したもので(例えば、文 献[6]-[9]),その後,空間離散化を TVD 法へと修正[10],時間積分法もより効率的で並列計算に 適したものへと変更してきている(例えば、文献[11]). 2000年頃には、時間発展(流れの時間 変化)を捉えることの重要性が高まり,乱流モデルを利用したシミュレーションの限界が見えて きた. その結果, DES (Detached Eddy Simulation)に代表される RAN/LES ハイブリッド法や LES (Large Eddy Simulation)の実形状への利用が拡がり、空間解像度の要求が急速に高まりは じめた. 筆者らは、コンパクト差分法と呼ばれるスペクトル的空間解像度を有する離散化法に着 目し、この手法を産業界が求める複雑形状に適用することを試みてきた(例えば、文献[12]-[14]). 圧縮性ナヴィエ・ストークス方程式によるシミュレーションのための計算プログラム LANS3D はこのような経緯を経て現在の姿に至っている. さらに、本計算課題を含めて空力音響の直接シ ミュレーションやマイクロデバイスによる流体制御など最近のシミュレーションは極度に密な格 子解像度を要求する.基本的にシミュレーションプログラムはシンプルなものが望ましいが、ハ ードウェアがより複雑化し、かつシミュレーション時間が膨大になることもあり、さらなる並列 化の工夫やプログラムの一部がマシン依存で異なることも起きてきている. 現在の LANS3D は 基本的に各スーパーコンピュータの性能を十分に活かしているが、本課題のシミュレーション実 施と並行して SX-ACE における各計算ルーチンの計算負荷分析を実施, センターの方々からさら なる高速化のヒントをいただいた.本報告は利用内容を広く知って頂くことを意図していること から、具体的な内容は省略させていただくが、今後のベクトル機に向けても有益な意見交換を行 うことができた.

最後に本計算における並列化とおよその計算時間について記載する.並列化は計算領域を分割, その上で各領域に関してハイブリッド並列,すなわちノード内はスレッド並列(自動並列),ノー ド間は MPI による並列化としている.利用ノード数はケースによるが最大 32 ノード,計算時間 は1ケース最低で 160 時間である.タイヤの回転が初期状態から抜けて落ち着くところからデー タ取得を始めることから「助走」にかなりの計算時間を要する.さらに,空力騒音を計算するに はスペクトル解析をするだけの時間領域のデータをとる必要があり,特に低周波までを対象とす る場合さらに積分時間ステップ数を増やすことが求められる.本来なら,この数倍の時間積分幅 を利用したいところであるが,計算資源や時間の制限からこの範囲のデータを利用した解析を実 施している.左右の流れに非対称性が残っているのはこれが原因であることも付記しておく.

3. 計算結果

3.1 流れ場の比較



図3瞬間場の渦構造(左:Re=100,000/右:Re=150,000)

図3に瞬間場における圧力変動(色)と渦構造(Q値)を示したものである.意図的に図の大き さも物理サイズにあわせてある.タイヤ幅の増加に伴い,タイヤ表面付近の圧力変動に少し変化 が見えるが,定性的な意味では傾向に違いは見られない.ただ,左図の大きなタイヤ径の結果は タイヤ側方の細かい渦構造と圧力変動がより遠くまで拡がっているように見える.

図4は上方から圧力変動分布を見たものである.図3と同様に大きさスケールをあわせた表示 による比較から、側面部の圧力変動の広がりの角度はタイヤ径が短い方が大きい.結果的に、タ イヤ前方からの距離でおよその広がりを評価できそうであることを示唆している.強い乱れの開 始位置はタイヤ前方からの距離で決まっているように見えるが、あくまで瞬間データからのプロ ットなので、より詳細な検討が必要である.一方、タイヤ前方における圧力変動はタイヤ径が大 きい場合の方が若干であるが前方にまで拡がっている.タイヤ外径での周方向速度はタイヤ径に 比例して増加する.その結果、タイヤ径の増加が回転するタイヤに空気が引きずられて生ずるタ イヤ境界層の速度および形(大きさ)スケールが増加ししたことが影響したと想像される.



図4瞬間場の圧力変動(左:Re=100,000/右:Re=150,000)

3.2 音響場の比較

図 5(a)-(d)に各周波数域における接地面上の空間音圧レベル(Sound Pressure Level; SPL)分布 を示す.各図の上方半分が大きなタイヤ径の結果,下半分が(基本となる)小さなタイヤ径の結 果を示している.また,実際の位置を合わせた音響場の比較のため,この図も実際のタイヤ直径 を意識した大きさスケールで描画している.図4の結果からも想像されるように、タイヤ直径が 増加することにより,広い周波数帯域でタイヤ前方の音圧レベルを増加させているのが観測でき る.特に図5(a),(b)における低周波域での違いが著しい.図4のところで述べたように、タイヤ 直径の増加はタイヤ周方向速度と設置付近の形状スケールを増加させるため、タイヤの接地面積 を増加させ,音源を前方に移動させる効果があると推測される.タイヤ側方の空間 SPL を見ると、 タイヤ径にかかわらず中心位置から同じ距離のところからはじまっているように見える.また、 タイヤ径が小さい場合に低周波においてタイヤ側方に強い空間 SPL の広がりが見えるが、この原 因については今後の検討が必要である.



図5空間SPL分布(接地面,下段-Re=100,000,w1.0,上端-Re=150,000,w1/1.5)

3.3 **今後の研究計**画

本報告では、スペースの都合もあってタイヤ径の効果だけについて報告した. 同様に、今後は タイヤ幅などタイヤに関する他のパラメータの効果を1つ1つ見ていくことが必要である. すで に、縦溝の影響については溝幅や溝形状などを変化させたシミュレーションを多数実施して、最 も影響するパラメータを同定することを試みている[5]. また、タイヤの騒音はタイヤトレッドパ ターンと密接なつながりがあると推測される. そのため、横溝を入れたシミュレーションなど更 なるシミュレーションの高度化を進めていく予定で、さらにコンピュータ性能の向上にあわせて 実スケールのレイノルズ数へと適用対象を広げていく予定である.

4. まとめ

騒音の少ない新しいタイヤを考える上で、タイヤが発生する騒音の発生メカニズムの理解が望 まれる.実験では音響波の発生要因が流体変動か構造振動かを見けるのは難しく、それぞれの寄与 分は明らかにされてない.タイヤが発生する空力音響について一連の研究を進める中で、今回は タイヤ径の影響を調査した.1.5 倍にタイヤ径を増やしたシミュレーション結果との比較により、 タイヤ廻りの流れの変化、タイヤ付近の空間音響圧などを明らかにし、一定の知見を得た.ただ、 定量的な評価は十分ではなく、明確な結論を出すにはさらなる解析が必要である.このような数 値シミュレーションには高性能のスーパーコンピュータ利用が不可欠であり、並列プログラムの さらなる高効率化も必要となる.一連の成果は、高度な数値計算法、高性能のプログラムと高性 能のスーパーコンピュータの3つの要素があってはじめて得られるものであったことを最後に付 記しておきたい.

謝辞

まだ基礎的な段階のものでとはいえ,時間・空間的にこれまでにない解像度が要求される 本研究における数値シミュレーションは先端スーパーコンピュータを利用してもかなりの計 算資源を必要とする.ここに記載させていただいた成果は,東北大学サイバーサイエンスセ ンターの SX-ACE を利用することで実現できたものである.研究にあたっては同センター関係 各位に有益なご指導とご協力をいただいた.(当時の)小林広明センター長をはじめ,滝沢寛 之,江川隆輔,磯部洋子の諸先生方をはじめセンターの皆様にこの場を借りて謝意を表した い.

参考文献

[1] 金田一哲,宇賀神誠也,野々村拓,藤井孝藏,池田俊之,小石正隆,"回転するタイヤのパタ ーンから発生する空力騒音の数値解析,"第24回数値流体力学シンポジウム,第24回数値流体力 学シンポジウム USB 論文, C8-3,平成22年12月

[2] I. Kaneda, T. Nonomura, K. Fujii, T. Ikeda and M. Koishi, "Computational Analysis of Aeroacpustic Waves Induced by Rotating Tire," ECCOMAS CFD 2010, Proceedings CD, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Lisbon, Portugal, June 2010.

[3] 阿部圭晃, 野々村拓, 近藤勝俊, 飯田大貴, 渡邉毅, 池田俊之, 小石正隆, 山本誠, 藤井孝藏, "回転するタイヤ周りに発生する空力音の数値解析(Re=100000),"第27回数値流体力学シンポジ ウム, 2013 第27回数値流体力学シンポジウム USB 論文集, A10-2,平成25年12月18日.

[4] D. Lee, K. Kondo, Y. Abe, T. Nonomura, T. Ikeda, M. Koishi, M. Yamamoto, and K. Fujii, "Analysis of Aeroacoustic Noise Generated from a Rotating Tire Using Large-Eddy Simulation," 2nd Frontiers in Computational Physics: Energy Sciences, O4,17, ETH, Zurich, June 3-5, 2015.

[5] D. Kato, Y. Abe, T. Nonomura, A. Oyama, K. Fujii, T. Ikeda and M. Koishi, "Computational Analysis of Aeroacoustic Noise Generated from a Rotating Tire with a Longitudinal Groove," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 140, No. 4, 2016.

[6] K. Fujii, H. Endo and M. Yasuhara, "Activities of Computational Fluid Dynamics in Japan: Compressible Flow Simulations," High Performance Computing Research and Practice in Japan, Wiley Professional Computing, pp. 139-161, JOHN WILEY& SONS, 1990.

[7] K. Fujii and H. Yoshihara, "NAVIER-STOKES BENCHMARK TESTS," Supercomputers and Their Performance in Computational Fluid Dynamics Ed. by Kozo Fujii, Notes on Numerical Fluid Mechanics Vol. 37, pp. 105-126, Vieweg, 1993.

[8] K. Fujii, "Performance of a Japanese Vector-Parallel Supercomputers on Large-Scale CFD Problems" "Solution Techniques for Large-Scale CFD Problems," Computational Methods in Applied Sciences, Ed. by W. G. Habashi, pp. 123-137, February 1995.

[9] K. Fujii, "Unified Zonal Method Based on the Fortified Solution Algorithm," Journal of Computational Physics, Vol. 118, pp. 92-108, 1995.

[10] K. Fujii and S. Obayashi, "High-Resolution Upwind Scheme for Vortical-Flow Simulations," Journal of Aircraft, Vol. 26, No. 12, pp. 1123-1129, December 1989.

[11] K. Fujii, "Simple Ideas for the Accuracy and Efficiency Improvement of the Compressible Flow Simulation Methods," Proceedings of the International CFD Workshop on Supersonic Transport Design, Tokyo, March 1998.

[12] T. Arasawa, K. Fujii, and K. Miyaji, "High-order Compact Difference Scheme Applied to Double-Wing Vortical Flows," Journal of Aircraft, Vol. 41, No. 4, pp. 953-957, 2004.

[13] K. Fujii, T. Nonomura and S, Tsutsumi. "Toward Accurate Simulation and Analysis of Strong Acoustic Wave Phenomena—A review from the Experience of Our Study on Rocket Problems," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.64, pp.1412-1432, December 2010.

[14] K. Fujii, "High-performance computing based exploration of flow control with micro devices," Philosophical Transaction A, Vol.372, pp.1471-2962, 2014.