

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

(/)

研究テーマ	タイヤ空洞内温湿度が空洞内共鳴音に与える影響	報告書作成者	田中洋介
研究従事者	田中洋介		
研究目的	パリ協定により、2035年以降新車は電気自動車のみとなり、騒音源はエンジンからタイヤになる。タイヤ車外騒音は健康被害抑制のため規制される一方で、タイヤ空洞内気柱共鳴音に関しては手付かずである。1990年に Sakata らが報告したタイヤ空洞共鳴音から、Thompson(1995)が静止タイヤの共鳴音予測式を提案し、タイヤ形状と音速が基本的な変数であることが示された。2003年に Feng らが回転タイヤの予測式を提案したが、実験結果との差を埋めることができなかった。一方で、ハイブリッドカー普及に伴う車内静音向上から静音タイヤが2006年に販売され、タイヤ空洞共鳴音に注目が集まってきた。 そこで、申請者は静音評価法の提案(Tanakaら2013、2016)、未変形タイヤの減衰を考慮した空洞共鳴音の解析解(Horikawaら2016)、大変形でも予測可能な拡張 Thompson 理論(Sugiyamaら2020)を提案した。さらに電気自動車の普及が始まり、Liu ら(2021)による回転タイヤの数値計算予測とHuら(2020)の実験が行われたが、互いに一致することがなかった。加えて申請者が Thompson と Feng の理論を相補的に使う予測手法を提案した(Tanakaら2022)。Liu らの数値計算予測とは一致したが、やはり Hu らの実験とは一致しなかった。そこで、タイヤは接地部との摩擦で速度に応じて気温から100℃まで変化することから、この論文中で音速は温度依存するため温度を最小二乗法で予測すると傾向が一致した。 さらなる一致には温度だけでなく湿度にも音速は依存していることも知られており、本申請でタイヤ空洞内温湿度が空洞内共鳴音に与える影響の実証が必要である。よって、本申請の目的は、音速の温度に加えて湿度依存性も理論で考慮し、実験によって空洞共鳴音に与える影響を実証することである。 1) Tanaka et al. (2013). “Development of multiple microphone system for measuring acoustic cavity resonance of tire model”, J. Jpn. Soc. Exp. Mech., 13(Spec. Iss.), s167-s171. 2) Tanaka et al. (2016). “An evaluation method for measuring SPL and mode shape of tire cavity resonance by using multi-microphone system”, Appl. Acoust., 105, 171-178. 3) HORIKAWA et al. (2016). “Theoretical Analysis of Sound Pressure Distributions inside a Tire Cavity”, Adv. Exp. Mech., 1, 149-154. 4) SUGIYAMA et al. (2020). “Theoretical Analysis for Tire Cavity Resonance inside Deformed Stationary Tire”, Adv. Exp. Mech., 5, 163-168. 5) TANAKA et al. (2022). “Theoretical Predictions of Horizontal and Vertical Frequencies of a Rotating Tire Cavity Resonance Using Two Complementary Models”, Adv. Exp. Mech., 7, 137-141.		

研究内容	パリ協定により、2035 年以降新車は電気自動車のみとなり、騒音源はエンジンからタイヤになる。タイヤ車外騒音は健康被害抑制のため規制される一方で、タイヤ空洞内気柱共鳴音に関しては手付かずである。1990 年に Sakata らが報告したタイヤ空洞共鳴音から、Thompson(1995)が静止タイヤの共鳴音予測式を提案し、タイヤ形状と音速が基本的な変数であることが示された。2003 年に Feng らが回転タイヤの予測式を提案したが、実験結果との差を埋めることができなかった。一方で、ハイブリッドカー普及に伴う車内静音向上から静音タイヤが 2006 年に販売され、タイヤ空洞共鳴音に注目が集まってきた。 説明書中図1のように申請者が論文 5 で提案した●プロットの理論は先行研究の□プロットの計算とよく一致している。しかし、図2のように先行研究の×プロットの実験と一致しなかった。どちらの先行研究でもタイヤ空洞内の音速の温度依存性について注目していない。一方で、最小二乗法で温度を変化させた■プロットは傾向が一致した。しかし、図3のようにタイヤ空洞内の空気が温度に対して相対湿度によっても音速が増加するため、これを実測する必要がある。 さらなる一致には温度だけでなく湿度にも音速は依存していることも知られており、本申請でタイヤ空洞内温湿度が空洞内共鳴音に与える影響の実証が必要である。よって、本申請の目的は、音速の温度に加えて湿度依存性も理論で考慮し、実験によって空洞共鳴音に与える影響を実証することである。 そこで、タイヤ空洞内温湿度と共鳴モード測定システムを開発した。上記のタイヤ空洞内の温湿度を測定するために図4のシステムを製作した。図5のタイヤ加熱システム内で、内部を 200 kPa に加圧したタイヤ(NANOENERGY2 195/65R15 91H, TOYO TIRES)内にネブライザー(EW-KA30, Panasonic)を用いて相対湿度を 98%に上昇させ、タイヤを 12 rpm で回転させたままヒーティングガン(883B, HAKKO)でタイヤ内部を 63 °Cまで加熱する。ヒーティングガンを停止して、装置横にあるスピーカー(DC130B-4, Dayton Audio)で 1 Hz ごとに周波数を変化させて音響加振を実施する。その振動を加速度センサ(SA12ZSCA, 富士セラミックス)で計測する。また、タイヤ内部の温湿度は無線システムに接続した温湿度センサー(SHT-35, Sensirion 製)を用いた。タイヤ内の温度低下とともに温度ごとに計測を行った。 図 6 に(a) 温度 22.3 °C, 湿度 98.8%の時、及び(b) 温度 59.4 °C, 湿度 96.2%の時のタイヤ空洞共鳴音を加速度センサーで測定した結果を示す。(a) の場合、得られた共鳴周波数 f_r は 219 Hz であり、(b) の場合、f_r は 234 Hz であった。(a) の結果を用いて、タイヤ周長 L_c は音速 c と $f_r = c/L_c$ の式から、$L_c = 1.58$ m であった。図 6 中の f_c を湿り空気での理論共鳴周波数とした。温湿度が上昇すると、空洞共鳴周波数の実測値 234 Hz は、乾燥空気の共鳴音の 231 Hz より高く、理論共鳴周波数の 238.7 Hz より低くなることがわかった。本申請により、タイヤ空洞共鳴音は温度だけでなく湿度も考慮する必要があることが実証された。
------	---

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

(/)

研究のポイント	本申請の実証により、タイヤ空洞共鳴音の理論と実験のギャップが解消される。共鳴音は自動車メーカー納品時の検査項目の 1 つで、タイヤ設計時に空洞共鳴音を理論的に予測が可能となると、開発コストの削減や歩留まり低下が期待できる。環境負荷や経済的損失両方で社会的負担が低減できる。また国内では義務化が進んでいないタイヤ圧力モニターによる空洞共鳴音検知で、過負荷によるタイヤ異常変形などタイヤ健全性の把握が可能となり、さらなる交通事故の減少につながることを期待できる。
研究結果	図 6 に(a) 温度 22.3 °C, 湿度 98.8%の時、及び(b) 温度 59.4 °C, 湿度 96.2%の時のタイヤ空洞共鳴音を加速度センサで測定した結果を示す。(a) の場合、得られた共鳴周波数 f_r は 219 Hz であり、(b) の場合、f_r は 234 Hz であった。(a) の結果を用いて、タイヤ周長 L_c は音速 c と $f_r = c/L_c$ の式から、$L_c = 1.58$ m であった。図 6 中の f_c を湿り空気での理論共鳴周波数とした。温湿度が上昇すると、空洞共鳴周波数の実測値 234 Hz は、乾燥空気の共鳴音の 231 Hz より高く、理論共鳴周波数の 238.7 Hz より低くなることがわかった。本申請により、タイヤ空洞共鳴音は温度だけでなく湿度も考慮する必要があることが実証された。
今後の課題	本申請により、タイヤ空洞共鳴音は温度だけでなく湿度も考慮する必要があることが実証された。以下に今後の課題を示す。 ●実験装置 加熱システムの縫製部の断熱性が低いため昇温時間が 4 時間必要で、縫製部を減らすことや加熱ヒーターを 1 台から 2 台に増やすなどで、断熱性向上と昇温時間の短縮が課題である。 ●温湿度を考慮した音速式の導出 現状の蒸気圧を推定する理論式は 40°Cまで保証されており、理論共鳴周波数と実験値の差の原因となっている。実運用上は 90°Cと倍以上保証する必要がある、推定する理論式を導出することが課題である。 ●車載計測システム 本システムは実車では 10 km/h 程度の再現であり、将来的に実車での検証が課題となる。