

# タイヤの空力音評価体系の確立

豊橋技術科学大学 機械工学系

倉石 孝

## 1. 緒言

車速が時速 50～100 km 程度の中高速域になると、エンジン音や路面振動音が相対的に小さくなり、タイヤから発生する音が車外騒音の主要な要因として顕在化する<sup>(1)</sup>。タイヤから発生する音は、路面との接触に起因する構造的な振動音と、タイヤ周りの空気の流れによって発生する空力音が重畳したものである<sup>(2,3)</sup>。そのため、タイヤ騒音の低減に向けては、空力音の発生メカニズムを理解し、形状設計に反映することが重要である。本研究では、タイヤ空力音の中でも横溝形状に着目し、横溝が流れ場および発生音に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。横溝は、回転に伴ってファンの動翼のように周期的な流体変動を与える。また、タイヤと路面の接地部近傍では、横溝と路面により形成される空間が時間的に変化し、その内部の空気が圧縮、膨張、放出されることで音源となる可能性がある。

そこで本研究では、問題を単純化した横溝付き回転体を対象とし、速度、溝深さ、横溝数をパラメータとして、横溝形状の違いが発生音および流れ場に及ぼす影響を実験および数値解析により調査する。これにより、横溝に起因する空力音の発生メカニズムを明らかにし、横溝形状の設計指針および空力音低減策に関する基礎的知見を得ることを目指す。

## 2. 研究対象および共通条件

本研究では、図 1 に示すように横溝を有する単純形状の回転体を対象とした。横溝形状を識別するため、基準角度に対する倍率を  $T$ 、基準深さに対する倍率を  $D$  として表す。このとき、回転数を  $n$ 、ピッチ数を  $P$  とし、それらの積  $nP$  を横溝通過周波数と定義する。回転体は、半径  $R = 25 \text{ mm}$ 、幅  $0.8R$  とした。また、回転体は平板に隙間  $\sigma$  を有し支持されている。座標原点は回転体中心とし、 $x$  軸および  $y$  軸を定義した。

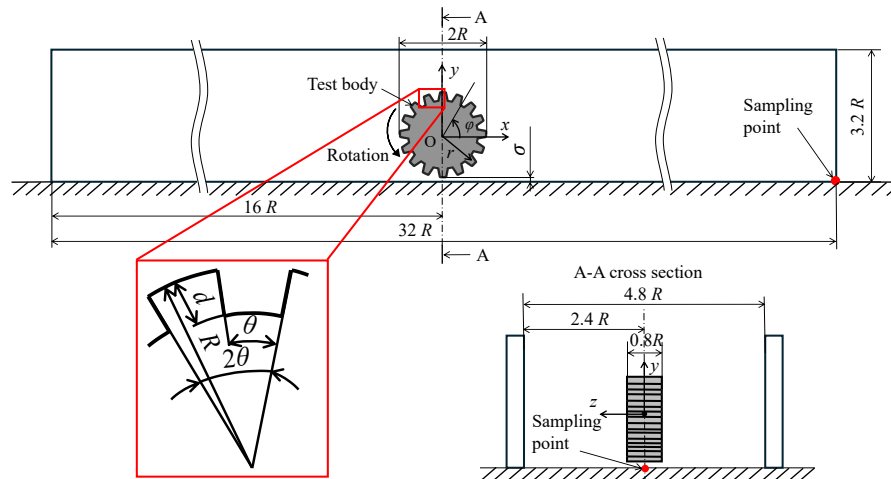


図 1 問題設定および幾何条件

## 3. 実験方法

実験には、T1D2 ( $P = 18$ )、T2D2 ( $P = 9$ )、T0D0（溝なし）の 3 種類のモデルを用いた。周速度は 15–30 km/h とし、対応する回転数  $n$  は  $26.53\text{--}53.05 \text{ s}^{-1}$  である。発生音は、回転体後方に設置したマイクロフォン ( $x/R = 16, y = 0$ ) を用いて測定した。また、流れ場の評価には熱線流速計を用い、 $x/R = 1.08, -1.08 \leq y/R \leq 2$  の範囲で速度を測定した。サンプリング周波数および計測時間は、音圧測定では 28973 Hz, 60 s、流速測定では 27162 Hz, 80 s とした。さらに、回転体直下における

圧力変動を評価するため、平板上に圧力センサを設置して圧力測定を行った。  $x/R = 0$  の位置で測定を行った。

#### 4. 解析方法

解析では、図 1 に示した体系に対応する横溝付きの回転体、端板および平板を含む条件を対象として、圧縮性流体解析を行った。代表条件として、時速 30 km/h に相当する回転数  $n = 53.05 \text{ s}^{-1}$  を用いた。境界条件は、底面を平板に対応する断熱壁、底面以外の外部境界を無反射境界とした。計算格子は、回転体近傍の Vortex region、音の伝搬を扱う Sound region、外部境界近傍の Buffer region に分けた。横溝近傍では最小格子幅を  $\Delta_{\min}/R = 1/125$  とした。解析講師の総格子数は約 1.7 億点となる。平板との隙間条件は、回転体半径に対する無次元隙間  $\sigma/R$  として整理し、隙間の影響を捉えるべく、 $\sigma/R = 0.16, 0.08, 0.04, 0.0$  の条件を設定した。また、横溝通過に伴う空気の出入りを評価するため、 $x/R = -0.5$  の検査面を通過する体積流量を位相平均し、有効開口面積で除した断面平均速度を  $U^*$  とした。位相平均では、横溝 1 ピッチに対応する回転角を  $\varphi_p = 2\pi/P$  と定義し、回転角  $\varphi$  を  $\varphi/\varphi_p$  として無次元化した。さらに、1 周期内の最大値と最小値の差を  $dU^*$  と定義した。

#### 5. 実験結果および考察

##### 5.1 回転数と発生音の関係

図 2 に、狭帯域ピークを除いた広帯域成分のオーバーオール値と回転速度の関係を示す。遠方音圧には実験装置由来の狭帯域成分も含まれるため、本研究では広帯域成分の速度依存性を発生音の傾向として整理した。T1D2 および T2D2 では、周速度の増加に伴って広帯域成分が増加し、対象とした速度範囲ではおよそ 6 乗則に近い傾向を示した。この結果は、横溝形状の違いが発生音の広帯域成分に影響を及ぼすことを示しており、空力音評価において速度依存性を把握することの重要性を示す。

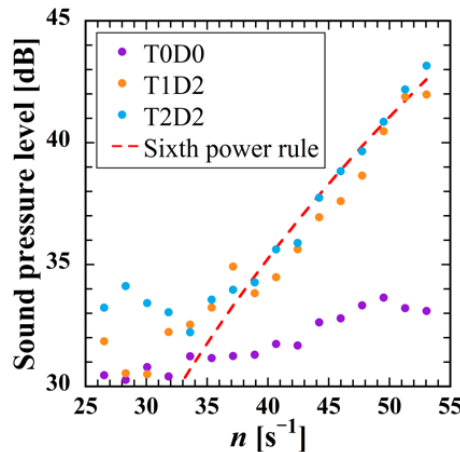


図 2 回転数と広帯域音の関係

##### 5.2 横溝形状が流れ場に及ぼす影響

図 3 に、中心位置で測定した速度変動スペクトルを示す。横溝を有するモデルでは、T1D2 および T2D2 において横溝の通過に対応する周期成分が確認された。また、全てのモデルにおいて高周波帯域では Kolmogorov の  $-5/3$  乗則に近い傾向を示しており、回転に伴う流れの乱れが速度変動に寄与していると考えられる。速度変動の大きさは、T0D0, T1D2, T2D2 の順に増加する傾向を示し、1 つの溝内体積の増加に伴って変動パワーが大きくなっている。このことは、横溝の通過に伴って回転体周囲の流れが周期的に変化していることを示している。この周期的な非定常流れは、横溝と平板の間で生じる圧縮・膨張を通じて、次節で扱う回転体直下の圧力変動に反映されることが考えられる。したがって、本節の

結果は、回転体直下の圧力変動を音源近傍の評価量として解釈するための流れ場側の根拠として位置づけられる。

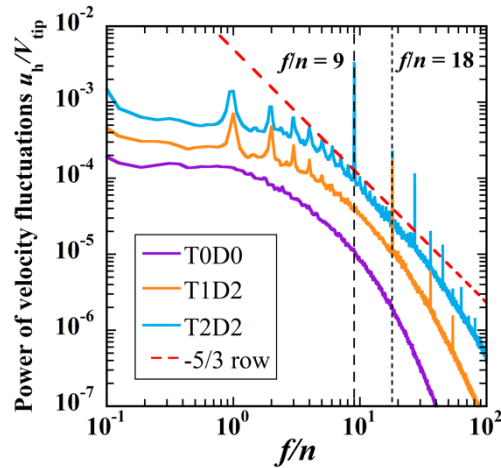


図3 速度変動スペクトル

### 5.3 回転体直下の圧力変動

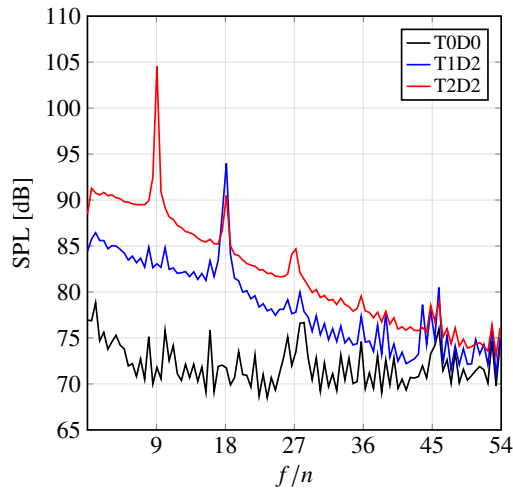


図4 回転体直下における圧力変動

回転体直下で測定した圧力変動を図4に示す。直下における圧力変動は、横溝と平板の間で生じる局所的な圧縮、膨張を反映する音源近傍の評価量といえる。測定結果では、横溝通過に対応する圧力変動成分が確認された。また、その大きさは速度変動と同様に、溝体積が大きい条件ほど大きくなる傾向を示した。溝なし条件である T0D0 では、横溝通過に対応するピーク性の圧力変動は確認されず、駆動系に起因する振動成分が圧力変動として現れている可能性がある。

## 6. 解析結果および考察

### 6.1 直下圧力変動による解析結果の検証

図 5 に、回転体直下における圧力変動スペクトルの実験値と解析値の比較を示す。回転体直下の圧力変動は実験と解析の双方で評価できる量であるため、本節ではこれを用いて、解析が横溝通過に伴う圧力変動を捉えられているかを確認する。

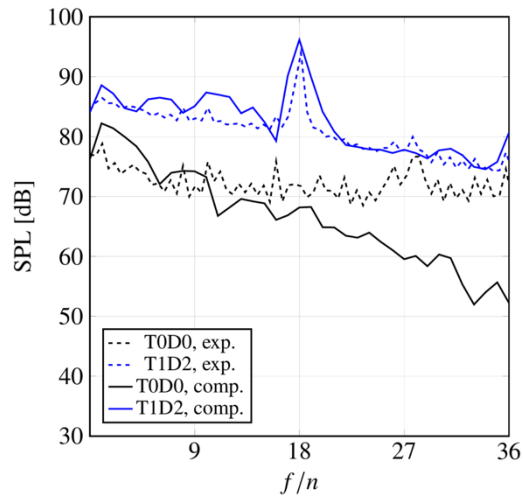


図 5 回転体直下における圧力変動スペクトルの実験・解析比較

図 5 では、T1D2 において横溝通過に対応する成分が実験・解析の両方で確認され、その周波数および音圧レベルは良好な一致を示した。また、溝の有無による明瞭な差も捉えられていることがわかる。この結果より、本解析が横溝の通過に伴う音源近傍の圧力変動を捉えられていることを示していると言える。

### 6.2 渦度分布の比較

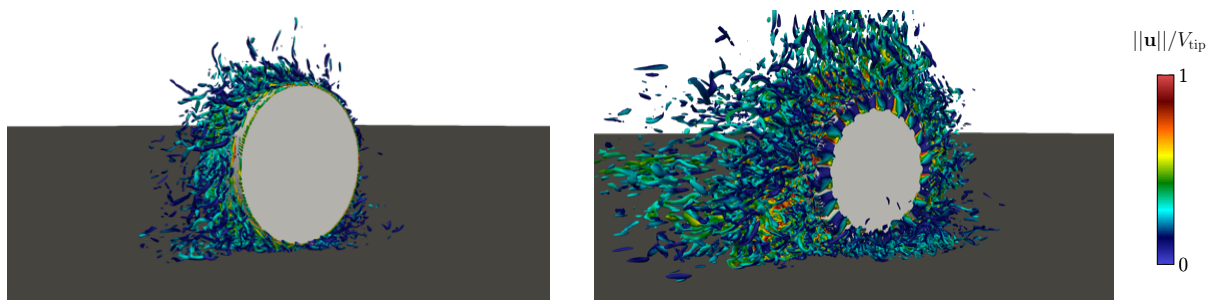


図 6 回転体まわりの渦度分布 (左: T0D0, 右: T1D2)

図 6 に、各回転体モデルにおける渦度分布を示す。横溝を有する条件では、溝なし条件と比較して回転体表面近傍および横溝周辺に渦度の大きい領域が現れ、横溝通過に伴って流れ場が周期的に変化する様子が確認された。この渦度分布の違いは、横溝が隙間内の非定常流れと圧力変動を生じさせる要因として働くことを示している。

### 6.3 隙間条件が圧力変動と音圧レベルに及ぼす影響

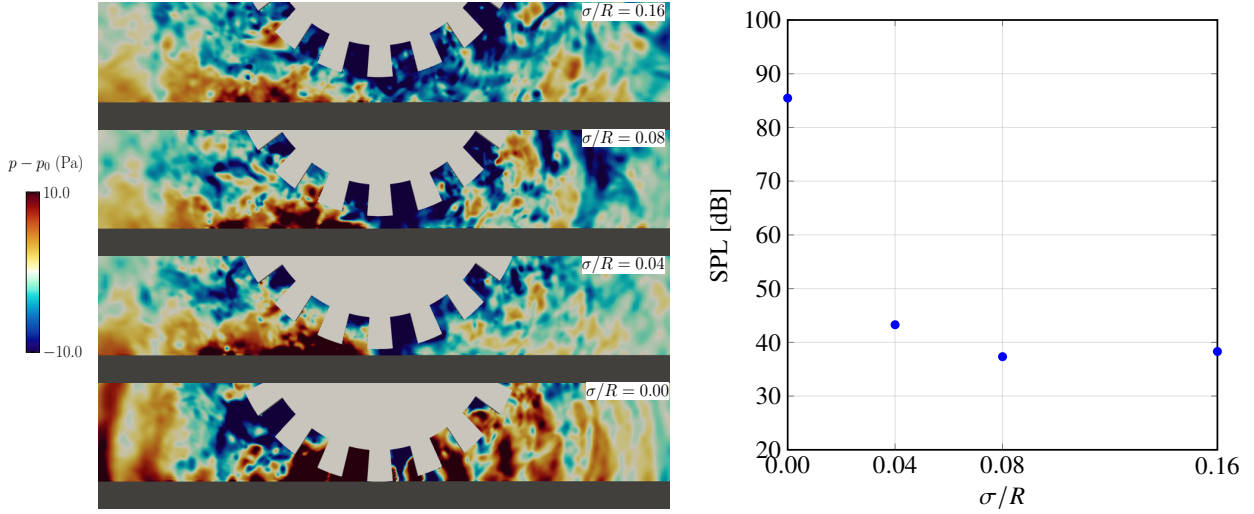


図 7 各隙間条件における瞬時圧力分布および横溝通過周波数における音圧レベル

図 7 に、各隙間条件における圧力分布および横溝通過周波数での音圧レベルを示す。平板と回転体の隙間が小さくなるにつれて、接地面近傍に相当する領域の圧力変動が強まる傾向が確認された。また、横溝通過周波数における音圧レベルにも同様の変化が現れており、隙間が狭いことで強められた圧力変動が音響場に反映されることが示唆される。

### 6.4 流量変動から見た隙間条件の影響

図 8 に、 $x/R = -0.5$  に設けた検査面で評価した位相平均した断面平均速度と、平板との隙間  $\sigma/R$  に対する断面平均速度の変動幅  $dU^*$  を示す。

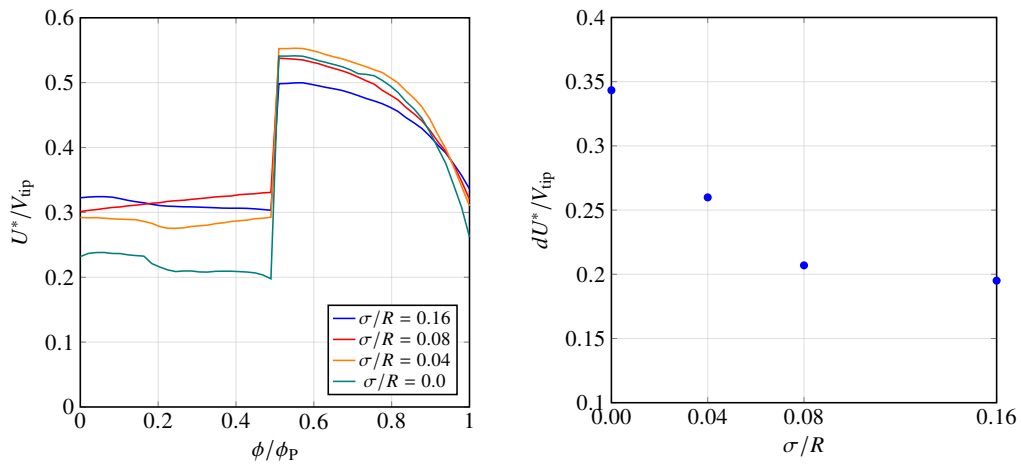


図 8 (a)  $x/R = -0.5$ における位相平均した断面平均流速,(b)  $\sigma/R$ と $dU^*$ の関係

回転角に対する断面平均速度から、横溝通過に同期して隙間近傍の流れが周期的に変化することが確認された。どの隙間条件であっても、速度の最大値に大きな違いはみられない。この最大値はモデルの溝深さが関係していることが示唆される。溝内の流体が検査面を通過する際に流量および断面平均速度が大きくなるといえる。一方、最小値は隙間が狭くなるにつれて小さくなる傾向を示した。この

1 周期の現象における速度の変動に着目すると、隙間が小さい場合はその変動が大きくなり、隙間が大きくなるにつれその変動値も減少する。この変動の大きさが遠方での音圧レベルに寄与すると考察する。

## 7. まとめ

本研究では、タイヤ横溝に起因する空力音の評価に向けて、横溝付き回転体を対象とした実験および圧縮性流れ解析を行い、発生音、速度変動、回転体直下の圧力変動、渦度分布および流量変動を示した。実験では、発生音の広帯域成分が回転速度に伴って増加する傾向を確認するとともに、速度変動から横溝通過に対応する周期的な流れの非定常性を捉えた。さらに、回転体直下の圧力変動では、横溝と平板間で生じる局所的な圧縮・膨張に対応する変動成分を確認し、音源近傍の評価量としての有効性を示した。

解析では、直下圧力変動の実験値と解析値を比較することで、横溝通過に伴う音源近傍の圧力変動を解析が捉えられることを確認した。回転体まわりの流れ場や、各隙間条件による圧力変動および音圧レベルの変化や流量変動を示した。これにより、横溝が周期的な非定常流れを形成し、平板との隙間により圧縮・膨張を強め、音源近傍の圧力変動および横溝通過周波数での音圧レベルに影響を及ぼすことを示した。

以上より、遠方で観測される発生音と、その要因となる速度変動および回転体直下の圧力変動を評価量として組み合わせることで、タイヤ空力音評価体系の基礎を示した。

## 謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2025 年研究助成を受けて実施されました。心より感謝いたします。

## 参考文献

1. X. Hua, A. Thomas, and K. Shultis, "Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness," *Scientific Progress*, Vol. 104, No. 1, 2021.
2. S. Ling, F. Yu, et al., "A comprehensive review of tire-pavement noise: Generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 287, 125056, 2021.
3. T. Li, "Literature review of tire-pavement interaction noise and reduction approaches," *Journal of Vibroengineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 2424–2452, 2018.