

タイヤ道路騒音における路面からの起振力同定

Identification of Exciting Force for Tire Road Noise due to Road Surface

精密工学専攻 21号 鈴木 正純
Masazumi Suzuki

1. はじめに

自動車に関わる環境問題の一つとして、自動車外への騒音が挙げられる。そのうち、近年自動車各部の低騒音化が進み、騒音源としてのタイヤの影響が大きくなっており、タイヤ道路騒音の低減は重要な技術課題となっている。また、近年では排水性を目的に作られたアスファルトにおいて騒音低減効果も得られるなど、タイヤ側、路面側双方からのアプローチによって騒音低減が進められている。こうした中、タイヤ道路騒音を評価する際は、路面の違い（路面平坦性の違い）を考慮する必要であると考えられる。本研究ではこの路面の違いを、路面からタイヤへ加わる起振力の違いと捉え、この起振力を同定する手法を提案する。走行中のタイヤの振動を直接測定することが困難であるため、タイヤ近傍の騒音データを用いて逆問題を解くことによって起振力を間接的に同定する。

2. 路面平坦性の違いによる騒音変化の把握

路面平坦性の違いによってタイヤから発生する音が変わることを確認する。Fig. 1に実験で用いた二種類のアスファルトを示す。石が大きく全体的に表面が粗いものをrough、石が小さく表面が滑らかなものをsmoothとした。Fig. 2に実験セットアップを示す。タイヤにアスファルトを押し付け、その上から加振機で加振する。走行中は垂直方向だけでなく進行方向からの力も加わるため図のような入力方向とした。加振機からの入力をロードセルで、タイヤから発生する音をマイクロフォンによって測定し、伝達関数を計算する。実験結果をFig. 3に示す。Fig. 3のように、特に100Hzから300Hzにおいて差を生じている。加振機からの入力是一定としているので、アスファルトからタイヤに加わる力に差が生じていることがわかる。すなわち路面平坦性の違いによりタイヤから発生する音が変わったことが確認できる。

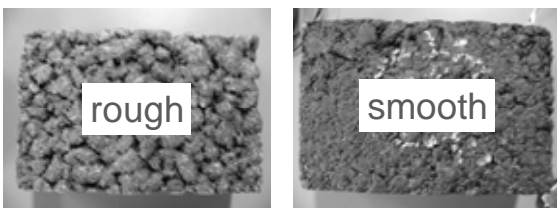


Fig. 1 Asphalts used by experiment

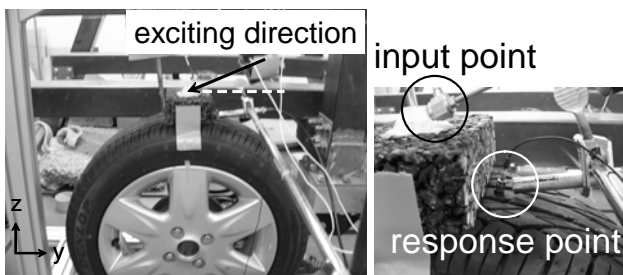


Fig. 2 Setup of experiment

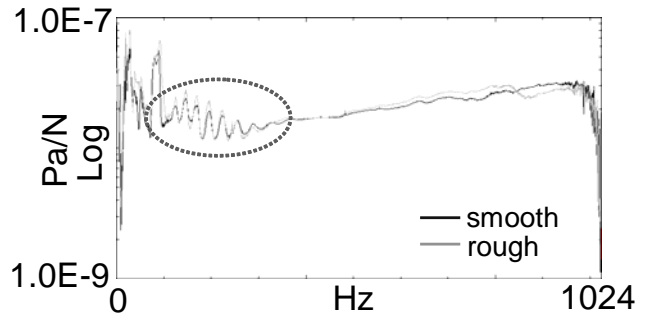


Fig. 3 Comparison of FRFs

3. 簡易解析モデルによるシミュレーション

音圧データから起振力を同定するために、まず物体から生じた放射音の音圧分布 P [pa] から音響伝達関数 G [pa/(m/s)] を用いて数値音響逆解析を行い、有限要素モデル上の速度境界条件 \dot{X} [m/s] を導出する。さらに、導出された速度境界条件と、実測もしくは計算されたモデルの伝達関数 H [(m/s)/N] を用いて起振力 F [N] を同定する。これらの流れを式で表すと式(1)のようになる。

$$P = G\dot{X} \Rightarrow \dot{X} \leftarrow G^{-1}P \Rightarrow \dot{X} = H F \Rightarrow F \leftarrow H^{-1}\dot{X} \quad (1)$$

この流れを、簡易解析モデルを用いてシミュレーション上で再現する。

3.1 簡易解析モデル

音圧データから起振力を同定するため、Fig. 4のような板状の有限要素モデルを用いてシミュレーションを行う。材質はアルミで、真中部分の板厚 ($t_1=1$ [mm])、外側の板厚 ($t_2=10$ [mm]) を変化させている。また、垂直方向だけでなく水平方向からの入力も考慮するため、真中部分はFig. 4のように若干湾曲させている。図中の加振点に $45[\text{deg}]$ 、 $\sqrt{2}$ [N] で入力したときの速度応答をFig. 5に示す。この中から、Fig. 6のように $t_1=1$ [mm] の板部分が主に振動している 2235Hz 、 2608Hz に着目して検討を進める。

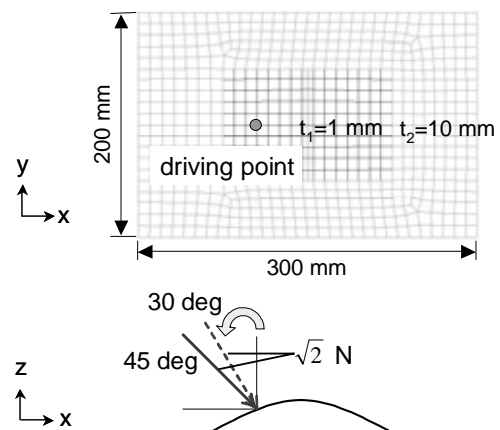


Fig. 4 Analysis model

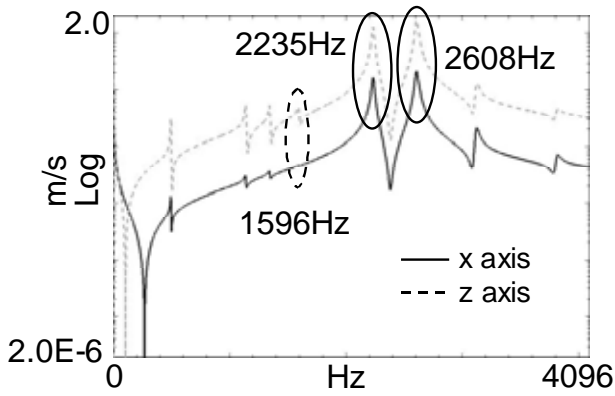


Fig. 5 Driving point velocity response

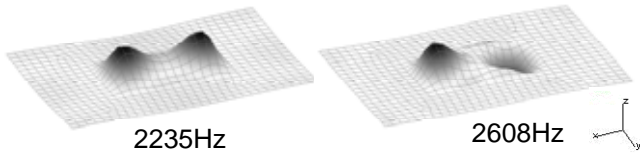


Fig. 6 Focus modes

3.2 数値音響逆解析

まず Fig. 4 に示すように、二種類の力 45[deg]、30[deg] (ともに $\sqrt{2}$ [N]) をモデルに入力したときの速度応答をそれぞれ境界条件として Fig. 7 に示す観測面 (観測点の間隔 25[mm]、モデルからの距離 20[mm]) を設定し、境界要素法 (以下、BEM) により観測面における音圧分布を計算する。この音圧分布データを用いて数値音響逆解析を行う。

逆解析には音響伝達行列 (以下、 ATM) を用いるが、 ATM は、構造物表面の各節点の速度 v_m [m/s] と任意の観測点上の音圧 p_n [Pa] の関係から定義され、式 (2) のように特異値分解により求めた逆行列をかけることにより、速度 v_m を導出することができる。

$$\{p_n\} = [ATM]\{v_m\} \Rightarrow \{v_m\} = ([ATM]^{-1})\{p_n\} \quad (2)$$

上記の音圧分布データと Fig. 7 の有限要素モデルと観測面から計算された ATM を用いて 2235Hz、2608Hz とともに逆解析を行う。Fig. 8 には 2235Hz の音圧分布と逆解析結果を示す。Fig. 6 と比較すると精度よい解析ができたことがわかる。

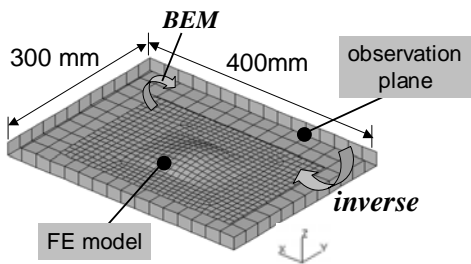


Fig. 7 Model used for BEM and inverse analysis

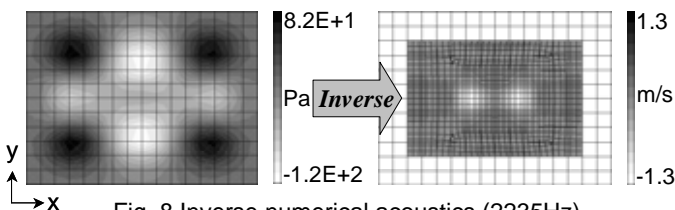


Fig. 8 Inverse numerical acoustics (2235Hz)

3.3 起振力同定

3.2 節において導出された速度条件とモード解析によって得た伝達関数を用いて起振力を同定する。加振点は周知であること、またデータ量の削減のため式 (3) によって算出する。

$$\{v_m\} = [H]\{F\} \Rightarrow \{F\} = ([H]^T [H])^{-1} [H]^T \{v_m\} \quad (3)$$

このとき、 $F_{2235\text{Hz}} = F_{2608\text{Hz}}$ の条件を加え二つの周波数同時に考慮して計算することにより、同定結果の精度向上を図る。このときの同定結果を Table 1 にまとめる。ただし、 $\theta = \tan^{-1}(F_x/F_z)$ とする。

結果を見ると、加振力が元の入力より大きくなっている。しかし、x 方向の位相が反対になり入力方向が変化していることがわかる。同定された力を入力とし、再び BEM で放射音の音圧分布を解析する。Fig. 8 で示した逆解析に用いた音圧分布データと比較したものを Fig. 9 に示すが、図からわかるように入力方向が変化したことによって、加振力の大きさが変化していても着目周波数においては音圧分布に差はない。逆問題の性質上、一つの結果にはいくつかの解が考えられ、同じ音が発生する、といった観点から見れば同定結果は妥当であると言える。2608Hz においても同様の結果を得た。

Table 1 Identified exciting force

	45 [deg]		30 [deg]	
	original	identification	original	identification
F_x [N]	1.0	-1.4	1.2	-2.1
F_z [N]	-1.0	-1.3	-0.71	-1.6
$(F_x^2 + F_z^2)$	2	2.0	2	2.7
[deg]	-45.0	46.6	-30.0	52.7

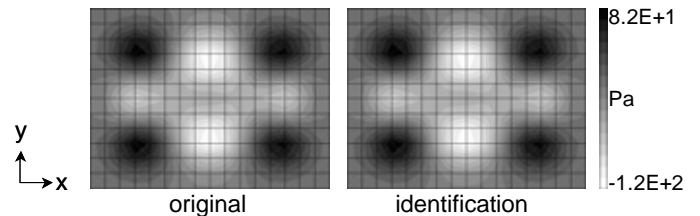


Fig. 9 Comparison of pressure distribution (2235Hz)

3.4 解析条件の変更

3.1、3.2、3.3 節で用いた種々の解析条件を変更し検討を行う。

3.4.1 観測点数と考慮するモード数の変更

詳細な音圧分布を測定すれば逆解析の精度は向上すると考えられるが、実際にタイヤからの音圧を測定する際の手間やデータ量を考えて、あまり観測点の数を増やすことはできない。そこで、観測面の大きさは変えず、観測点の間隔を 25[mm] (観測点数 221 点) から 50[mm] (63 点) に広げて観測点の数を減らしたときの起振力同定結果への影響を調べる。

また、3.3 節では $F_{2235\text{Hz}} = F_{2608\text{Hz}}$ として精度の向上を図ったが、同定結果から再び放射音を解析したとき、2235Hz、2608Hz 以外のモードでは音圧値に差を生じてしまっている。そこで、考慮するモードの数を、Fig. 5 で示す 1596Hz を加えた 3 モード、解析周波数内における Fig. 4 で示す加振点で励

起できる全8モード,と増やしてゆき全周波数における精度,更に着目している2モードにおける精度の向上ができるかを検討する.

二つの条件変更を合わせて行い,起振力同定結果を比較する.観測点数を減らす事で逆解析の精度が下がり,起振力同定結果の精度も下がってしまうが,考慮するモードを増やす事で精度が向上した.同定結果の一部をTable 2に示す.一番精度の悪いと考えられる観測点63点,考慮するモード二つの結果でも,着目している2235Hz,2608Hzに限れば放射音の解析結果の差は少ない.

Table 2 Comparison of identification

	63 points, 2 modes		221 points, 8 modes	
	45 [deg]	30 [deg]	45 [deg]	30 [deg]
F_x [N]	26.9	31.0	1.3	1.1
F_z [N]	2.5	2.9	-0.98	-1.2
$(F_x^2 + F_z^2)$	27.0	31.2	1.7	1.6
[deg]	84.7	84.7	-53.3	-42.1

3.4.2 板モデルの構造変更

有限要素モデルの板厚変更,および質量付加を行い,3.4.1項で同定した力(63 points, 2 modes)を用いて構造変更したモデルにおいても放射音の評価ができるかを検討する.元の入力(45[deg], $\sqrt{2}$ [N])と同定された力を,構造変更したモデルに入力し,BEMで放射音解析を行い比較する.構造変更したことにより固有振動数が変化すが,Fig. 6に示したものと類似のモード(板厚変更時:1759,1859Hz,質量付加時:2374,2626Hz)において,解析結果に差は少なく構造変更した場合でも同定した入力の評価に使用できることを確認することができた.Fig. 10には板厚変更時,1759Hzでの解析結果を示す.

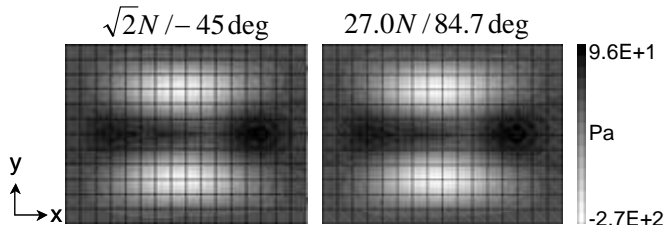


Fig. 10 Comparison of pressure distribution (change of thickness, 45 deg, 1759Hz)

3.4.3 FEモデル,観測面の一部を用いた起振力同定

トレッド面(路面に接する面)のブロック(排水用の溝によって形作られる部分)一つ一つへの入力に着目し,この力を同定することができれば,タイヤ全体の振動を考慮する必要がなく効率のよい放射音の評価をすることができると考えられる.そこで,Fig. 11に示すようにBEMにおいては観測面のモデル上の一部,また逆解析においてはFEモデルも一部を用いて3.1,3.2,3.4節と同様の検討を行う.

同定結果を見ると,入力の絶対値はどちらも元のデータよりも大きくなってしまっている.同定された力を入力として再びBEMで放射音を解析すると,元の放射音データより全体的にSound Pressure Level(以下,SPL)で約13[dB]の差を生じている.この原因として,モデル全体の境界条件によって発生する音を逆解析の段階でモデルの一部に集約して速度

を計算しているため,同定された力が元の起振力よりも大きな力の値になってしまったのではないかと考えられる.しかし,3.4.2項で用いた構造変更したモデルにおいても同様の検討を行ったところ,板厚変更,質量付加どちらも同定された起振力から計算された放射音は元のデータからSPLで約13[dB]の差を生じており,この増加分を考慮して評価すれば,この手法を用いることができる.

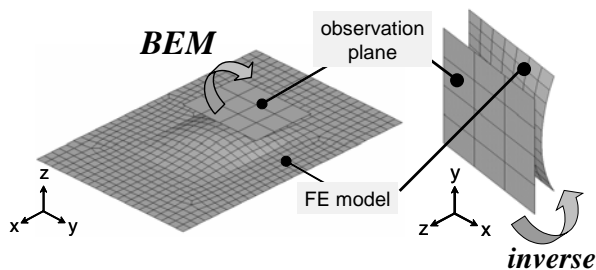


Fig. 11 Model used for BEM and inverse analysis

4. 実測した音圧分布からの起振力同定

実際に作成した板モデルを加振して放射音を発生させ,実測した音圧分布から起振力を同定する.

4.1 実験モデル

Fig. 12に作成した板モデルを示す.厚さ1[mm]の板を,真中を切り抜いた厚さ5[mm]の板二枚で挟み込み接着している.解析モデルと同様に1[mm]の板は湾曲させている.図に示す加振点による実験モデルの伝達関数を測定し,モード特性を調べる.このうち1[mm]の板部分が特に振動しているモード,1372,1735,1800,1934Hzに着目し検討を進める.

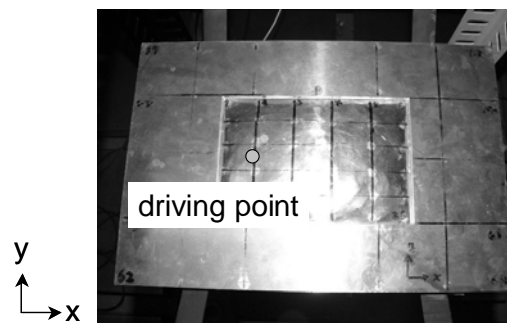


Fig. 12 Experiment model

4.2 音圧分布測定

解析同様45[deg],30[deg]の角度で加振機によってモデルを加振し,発生する放射音の音圧分布をマイクロフォンによって測定する.ただし,観測面は250x350[mm]の全48点,実験モデルからの距離は20[mm]としている.

4.3 数値音響逆解析

測定された音圧分布を用いて式(2)から数値音響逆解析を行う.ATMはモデルの形状と観測面の設定の仕方によってのみ決定されるため,3章で用いた有限要素モデル上に4.2節の観測面を設定し,ATMを計算する.そして観測面に音

圧の実測値を適用させ逆解析を行う .Fig. 13 に 30[deg]入力、1735Hz の逆解析結果を示す .

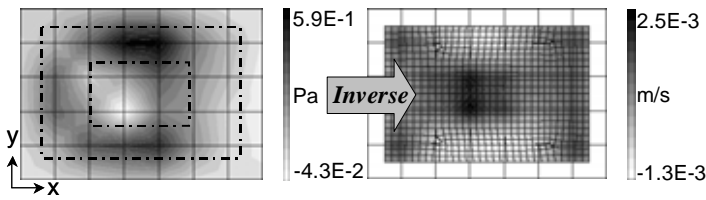


Fig. 13 Inverse numerical acoustics (1735Hz)

4.4 起振力同定

逆解析されたモデル上の速度，モデルの伝達関数を用いて式(3)から起振力を同定する．今回は有限要素モデルと実験モデルの物性値等による合わせ込みが困難であるため，伝達関数は実測したものをを用いた．精巧に解析モデルが作り込まれていれば解析上での伝達関数を用いることができる．同定結果を Table 3 に示す．この力を入力として板から発生する放射音を評価することができる．

Table 3 Identified exciting force

	45 [deg]		30 [deg]	
	original	identification	original	identification
F_x [N]	-	-0.17	-	-0.18
F_z [N]	-	0.45	-	0.67
$(F_x^2 + F_z^2)$	1.0	0.48	1.0	0.70
[deg]	45.0	20.7	30.0	15.2

5. 路面平坦性の違いによる起振力の違い

2章で用いた二種類のアスファルトを用いて路面平坦性の違いによる起振力の違いを同定する．

5.1 実験モデル

トレッド面のブロック一つに加わる力に着目するため，Fig. 14 のようにトレッドの一部をタイヤから切り出したものを用いて検討する．伝達関数を測定しモード特性を調べ，着目周波数を 623, 863, 1281Hz と決めた．

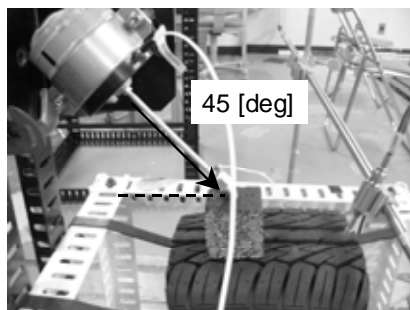


Fig. 14 Setup of experiment

5.2 音圧分布測定

Fig. 14 のように，Fig. 1 で示した二種類のアスファルト，

rough, smooth を介して 45[deg]の角度で加振し，発生する放射音の音圧分布をマイクロフォンによって測定する．観測面は一組のブロック上の 80×40[mm]の全 45 点としている．

5.3 数値音響逆解析

ブロック組分の有限要素モデルを作成し逆解析に用いる．4章と同様，精巧な有限要素モデルの作り込みは行っていない．モデルと 5.2 節の観測面との間の ATM を計算し，実測した音圧分布データを適用し逆解析を行う．Fig. 15 には rough のアスファルトを用いた 863Hz の逆解析結果を示す．

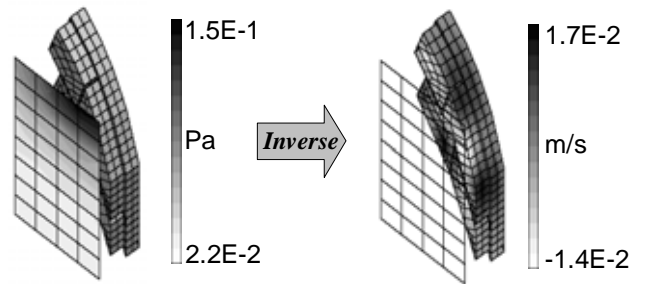


Fig. 15 Inverse numerical acoustics (rough, 863Hz)

5.4 起振力同定

逆解析結果から式(3)を用いて起振力を同定する．本節でも伝達関数は実測したものをを用いる．同定結果を Table 4 に示す．rough を用いたほうが smooth よりも同定された起振力は大きく，2章の結果と一致する．

Table 4 Identified exciting force

	rough	smooth
F_x [N]	1.2	1.1
F_z [N]	-0.8	-0.6
$(F_x^2 + F_z^2)$	1.5	1.30
[deg]	-56.6	-60.5

6. 研究成果

- (1) 二種類のアスファルトを用いた実験により，路面平坦性の違いによる騒音の変化を確認できた．
- (2) 簡易モデルを用いた検討により，数値音響逆解析の有用性を確認し，起振力を同定することができた．
- (3) タイヤトレッド部と二種類のアスファルトを用いて起振力同定を行い，路面平坦性の違いによる起振力の違いを確認できた．

参考文献

- [1] 諸橋淳一，高木久，河合雅巳，“路面性状測定車による乗り心地評価の精度検証”，日本測量調査技術協会 No. 82-16(2002)
- [2] 株式会社ブリヂストン，“自動車用タイヤの基礎と実際”，山海堂(2005)
- [3] 大久保信行，“機械のモーダル・アナリシス”，中央大学出版部(1982)