

HSEA法を用いたタイヤ放射音の音響解析に関する研究

日大生産工(学部) ○前田 泰成 日大生産工 高橋 亜佑美
日大生産工 見坐地 一人 東洋ゴム工業(株) 櫻井 弘幸

1 まえがき

近年、騒音規制の強化によりタイヤ放射音の低減が最重視されている。タイヤは騒音性能のみならず、ブレーキ性能や燃費性能なども考慮する必要があり、これらの性能は騒音性能と相反するケースが多く、両立は非常に困難である。そのため、タイヤ放射音の低減には開発初期段階で高精度な音響シミュレーション技術が必要になる。そこで、振動・音響解析に優れているHSEA法を用いて、タイヤ放射音の寄与解析を行い、タイヤ放射音のメカニズムを考察する。

本論ではまず、SEA法の理論について説明する。そして、HSEA法の理論とモデル化手順を説明し、最後に作成したタイヤのHSEAモデルと、その有用性について考察する。

2 SEA法の理論

HSEA法を用いる上で、SEA法の理論が重要である。そこで本章では、SEA法の理論について説明する。

Fig.1, Fig.2に示す2要素間でのSEA法について説明する。

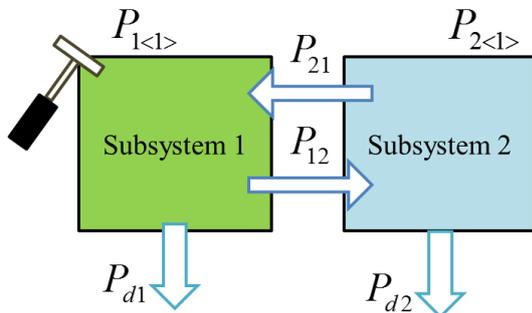


Fig.1 サブシステム1加振時のパワーフロー

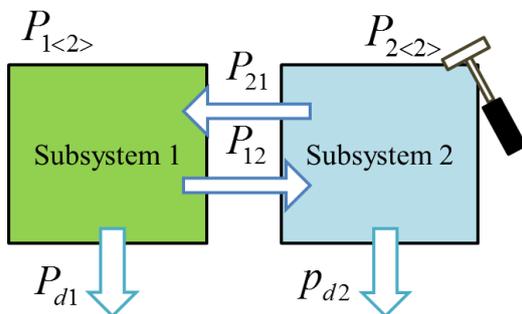


Fig.2 サブシステム2加振時のパワーフロー

<>内を加振させたサブシステムとし、Fig.1, Fig.2からエネルギーのつり合い式を立てると(1), (2), (3), (4)式となる。

$$P_{1<1>} - P_{12} + P_{21} - P_{d1} = 0 \quad (1)$$

$$P_{2<1>} - P_{21} + P_{12} - P_{d2} = 0 \quad (2)$$

$$P_{1<2>} - P_{12} + P_{21} - P_{d1} = 0 \quad (3)$$

$$P_{2<2>} - P_{21} + P_{12} - P_{d2} = 0 \quad (4)$$

各要素の内部損失パワーを $P_{d1(d2)}$ 、各要素間の結合損失パワーを $P_{12(21)}$ とすると、それぞれ(5), (6), (7), (8)式で表すことが出来る。

$$P_{d1(d2)} = \omega \eta_{1(2)} E_{11(21)} \quad (5)$$

$$P_{12(21)} = \omega \eta_{12(21)} E_{11(21)} \quad (6)$$

$$P_{d1(d2)} = \omega \eta_{1(2)} E_{12(22)} \quad (7)$$

$$P_{12(21)} = \omega \eta_{12(21)} E_{12(22)} \quad (8)$$

ここで $\eta_{1(2)}$ は各要素の内部損失率(Coupling Loss

Factor:CLF), $\eta_{12(21)}$ は各要素間の結合損失率(Damping Loss Factor:DLF), $E_{11(21)}$, $E_{12(22)}$ は各要素のエネルギーを表す。

式(5)~(8)をそれぞれ式(1)~(4)に代入し、行列表現すると(9), (10)式で表すことができ、この式から各要素のエネルギーを求めることが出来る。

$$\begin{pmatrix} P_{1<1>} \\ P_{2<1>} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{21} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} P_{1<2>} \\ P_{2<2>} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{12} \\ E_{22} \end{pmatrix} \quad (10)$$

各要素のエネルギー状態、伝達パワーなどを求める際に用いる η 行列をSEAパラメータ(内部損失率、結合損失率)と呼び、SEA法ではSEAパラメータをいかに精度良く求めるかが重要である。

Study on the Sound Analysis of Tire Radiated Sound using Hybrid SEA

Taisei MAEDA, Ayumi TAKAHASHI, Kazuhito MISAJI and Hiroyuki SAKURAI

3 HSEAモデル化手法

本研究で用いるHSEA法におけるモデル化について説明する。

HSEA法とは、SEAパラメータに理論式を用いてモデルを作成する解析SEAモデルと、SEAパラメータに実験値を与えてモデルを作成する実験SEAモデルを併用する手法である。HSEAモデルの作成手順は以下となる。

- ① 解析SEAモデル作成
- ② 実験によるSEAパラメータ測定(実験SEAモデル作成)
- ③ ハイブリッド化

3.1 解析SEAモデル作成

解析SEA法とは、タイヤの形状や材質から理論値を用いてモデルを作成する手法である。SEAパラメータの各理論式は以下となる。

$$\text{DLFの理論式: } \eta_i = \frac{Ac_0}{4\omega V} \alpha \quad (11)$$

$$\text{CLFの理論式(音響系): } \eta_{ij} = \frac{Sc_0}{4\omega V} \tau_{ij} \quad (12)$$

$$\text{CLFの理論式(構造系): } \eta_{ij} = \frac{\rho_0 c_0}{\omega m} \sigma_{rad} \quad (13)$$

ここで、 V は体積、 m は質量、 A は表面積、 ω は角振動数、 S は境界面の表面積、 ρ は密度、 σ_{rad} は音響放射効率となる。解析SEA法では、以上の式を用いてSEAパラメータを求める。

解析SEA法の作成手順について説明する。作成手順は以下となる。

- ① タイヤ形状・材質の情報収集
- ② 解析SEAモデルのサブシステム定義
- ③ 伝達経路ネットワーク図の作成

3.1.1 タイヤ形状・材質の情報収集

解析SEAモデルを作成するため、事前に解析対象物の形状や材質に関する情報を調べる。本研究で用いるタイヤのサイズは205/55R16である。Table1にタイヤサイズの説明、Fig.3に寸法と各部位の名称を示す。

Table1 タイヤサイズの説明

使用したタイヤサイズ	205/55R16
205	タイヤ幅[mm]
55	サイドウォールの幅(205mmの55%)
R	タイヤの種類(ラジアルタイヤ)
16	ホイールのインチ数

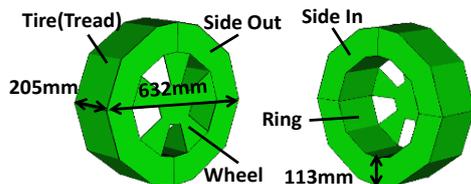


Fig.3 寸法と各部位の名称

3.1.2 解析SEAモデルのサブシステム定義

3.1.1で得られた情報から解析SEAモデルのサブシステムを作成する。Fig.4に構造系サブシステム、Fig.5に音響系サブシステムを示す。

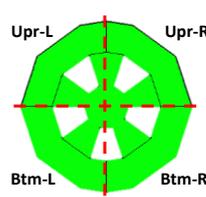


Fig.4 構造系サブシステム

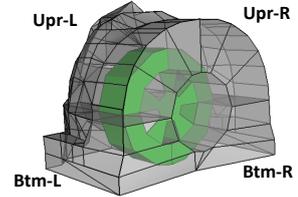


Fig.5 音響系サブシステム

本研究では、音の発生部位を詳細に解析するため、タイヤを4分割し、モデルを作成した。

3.1.3 伝達経路ネットワーク図の作成

解析SEAモデルのサブシステムから伝達経路ネットワーク図を作成する。伝達経路ネットワーク図とは、各サブシステム間の接続情報を可視化した図である。Fig.6に伝達経路ネットワーク図を示す。

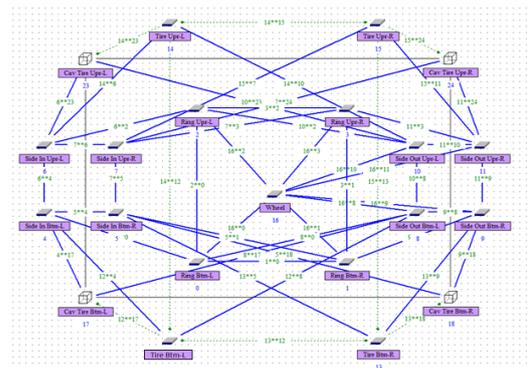


Fig.6 伝達経路ネットワーク図

以上が解析SEAモデルの作成手順である。

3.2 実験SEAモデル作成

実験SEAでは、各サブシステム間の伝達特性を求めるために、ER実験(Energy Ratio:ER)とCD実験(DLF, CLF)を実施した。解析対象のタイヤに加速度センサとマイクを各部位に取り付け、インパクトハンマーによる構造加振実験とスピーカーによる音響加振実験を行い、各サブシステム間のエネルギー伝達率とDLF, CLFを測定する。これらの実験により、各サブシステム間における伝達特性の実測値を得ることが出来る。次に、各実験で用いる式を説明する。

(a) ER実験

ER実験では、測定値をエネルギーに変換するために以下の式を用いる。

$$\text{構造系: } E_i = m_i \langle V_i^2 \rangle \quad (14)$$

$$\text{音響系: } E_i = \frac{V_i}{\rho c} \langle p_i^2 \rangle \quad (15)$$

ここで、 m は質量、構造系の $\langle v^2 \rangle$ は空間平均速度の2乗、音響系の V は音場の体積、 ρ は密度、 c は音速、 $\langle p^2 \rangle$ は平均音圧の2乗である。

(b) CD実験

CD実験では、以下の式を用いてそれぞれ構造系・音響系のDLF, そしてCLFを求める。まず、DLFは式(16), 式(17)を用いて求める。

$$\eta_i = \frac{\text{各バンド成分空間周波数平均減衰}}{27.3 \times \text{バンド中心周波数}} \quad (16)$$

$$\eta_i = \frac{2.2}{T_{60} \times f_0} \quad (17)$$

次に、CLFは式(18)を用いて求める。

$$\eta_{ij} = \eta_{ij} \frac{E_{ji}}{E_{ii}} \quad (18)$$

これらの式から各値を求めることができ、その値を用いてSEAモデルを作成する。このモデルを実験SEAモデルという。次に、実験風景をFig.7に示す。



Fig.7 ER実験

3.3 ハイブリッド化

ハイブリッド化とは、理論的に求めたエネルギーの解析値と実験から得たエネルギーの実験値を合わせ込み、エネルギー伝達率の差が ± 3 [dB]以内になるようにCLFを調整することである。例として、Tire Btm-L(赤色のサブシステム)加振時におけるCLFの調整例をFig.8に示す。

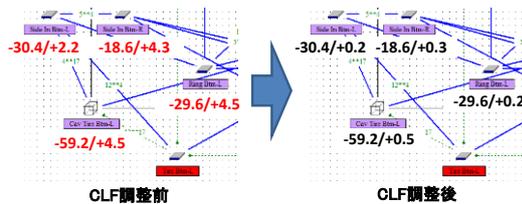


Fig.8 CLFの調整

以上がHSEAモデルの作成手順である。

4 タイヤの対称性

本研究では音の発生部位を詳細に解析するため、タイヤを4分割しモデル化を行った。しかし、実際のタイ

ヤは4要素全て同じ形状・材質であることから、対称性を考慮したモデル化が必要であると考えた。タイヤの対称性をFig.9に示す。

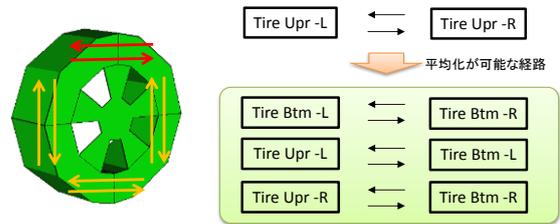


Fig.9 タイヤの対称性

例えばTread部に対し、上下左右のTread間のエネルギー伝達率は、全て一定であると考えられる。つまり測定したエネルギー伝達率を平均化し、全てのTread部の要素間に適用できると考えられる。しかし、今回の実験はタイヤを路面に接地させた状態で測定しているため、路面の影響があると考えられる。そこでその影響を確認するため、平均化する組み合わせの中でUpr部加振とBtm部加振に分けてエネルギー伝達率を比較した。Fig.10, Fig.11に平均化する組み合わせの例を示す。図中の赤の矢印は、Upr部加振を表し、紫の矢印はBtm部加振を表す。Fig.12, Fig.13にはそれぞれのエネルギー伝達率をUpr部とBtm部で比較した結果を示す。

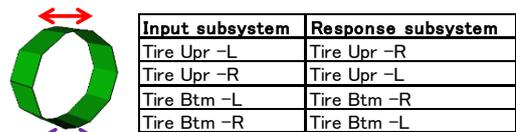


Fig.10 平均化する組み合わせ
(Tire Upr-L⇔Tire Upr-R, Tire Btm-L⇔Tire Btm-R)

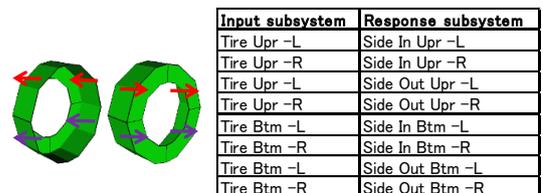


Fig.11 平均化する組み合わせ
(Tire Upr-L(-R)⇒Side In(Out) Upr-L(-R),
Tire Btm-L(-R)⇒Side In(Out) Btm -L(-R))

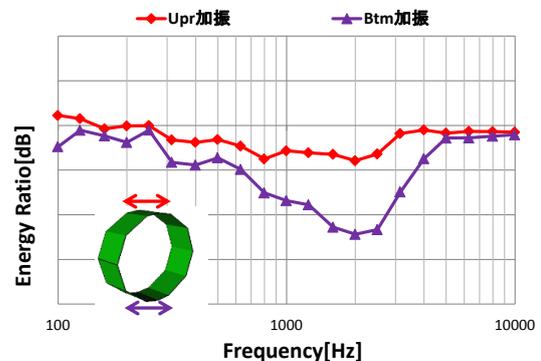


Fig.12 エネルギー伝達率
(Tire Upr-L⇔Tire Upr-R, Tire Btm-L⇔Tire Btm-R)

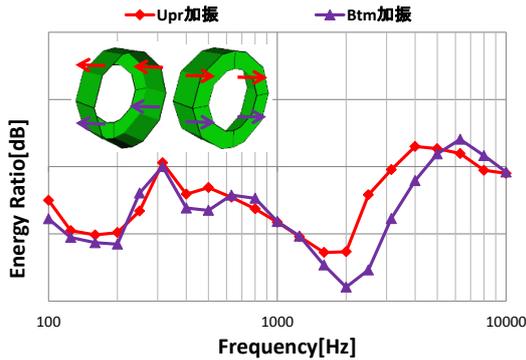


Fig.13 エネルギー伝達率

(Tire Upr-L(-R)⇒Side In(Out) Upr-L(-R),
Tire Btm-L(-R)⇒Side In(Out) Btm-L(-R))

また今回の解析対象周波数は2000[Hz]以下である。以上の結果から、Fig.12のエネルギー伝達率は全周波数において明らかにUpr部加振とBtm部加振で差があることがわかる。またFig.13は1250 [Hz]までは差が少なく、平均化することが可能であると考えられる。しかしそれ以上では差が見られるため、平均化するのは困難であると考えられる。

そのため、UprとBtmで二分化し平均化を行いモデル化した。以下のFig.14に、平均化したERを適用させ、制度検証を行った結果の例を示す。

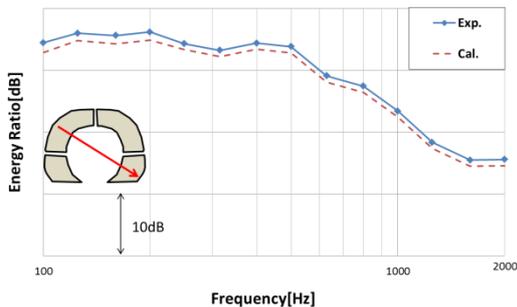


Fig.14 ERの実験値と解析値の比較
(Tire Upr-L-Tire Btm-R間)

Fig.14よりエネルギー伝達率の実験値と解析値の差が±3dB以内に収まっていることが確認できる。

5 構造-音場間のHSEAモデル化

タイヤ放射音を高精度に解析を行うには、構造-音場間の伝達特性を求め、結合をしなければならない。以下のFig.15に概念図を示す。

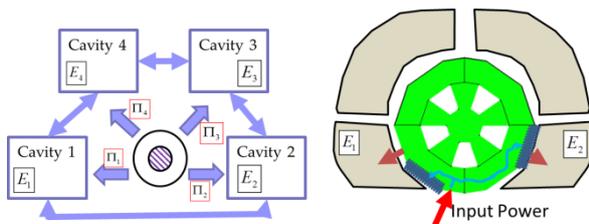


Fig.15 構造-音場間の概念図

従来は、この伝達特性は理論式を用いてモデル化していたが、それでは解析精度に問題があると考えられるため、以下の行列式(19)を用いて伝達特性を求める。

$$\begin{pmatrix} E_1^{Exp} \\ E_2^{Exp} \\ E_3^{Exp} \\ E_4^{Exp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1^{1,1W} & E_1^{2,1W} & E_1^{3,1W} & E_1^{4,1W} \\ E_2^{1,1W} & E_2^{2,1W} & E_2^{3,1W} & E_2^{4,1W} \\ E_3^{1,1W} & E_3^{2,1W} & E_3^{3,1W} & E_3^{4,1W} \\ E_4^{1,1W} & E_4^{2,1W} & E_4^{3,1W} & E_4^{4,1W} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \\ \Pi_3 \\ \Pi_4 \end{pmatrix} \quad (19)$$

ここで、例えば E_1^{Exp} はCavity1で測定されたエネルギー、 $E_1^{1,1W}$ はFig.15においてCavity1に1Wを与えた時のCavity2のエネルギー、 Π は入力パワーである。

式(19)で得られた入力パワーを以下に示す式(20)に代入することで伝達特性が求められる。

$$\begin{pmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \end{pmatrix} = \omega \begin{pmatrix} E_{1,tread}^0 & E_{1,side(in)}^0 + E_{1,side(out)}^0 \\ E_{2,tread}^0 & E_{2,side(in)}^0 + E_{2,side(out)}^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} CLF_{tread}^{rad} \\ CLF_{Side}^{rad} \end{pmatrix} \quad (20)$$

ここで例えば $E_{i,tread}^0$ はTreadのエネルギー、 CLF_{tread}^{rad} はTread-音場間のCLFである。

以上により、構造-音場間の高精度な結合を行った。

6 タイヤ近傍音の寄与解析

タイヤ放射音のメカニズムを考察するため踏み込み部(本モデルにおけるTire Btm-L)に1W加振を与えて(Fig.15)、蹴り出し部近傍の音場(Cav Tire Btm-R)の出力寄与を確認した。その結果を以下のFig.16に示す。

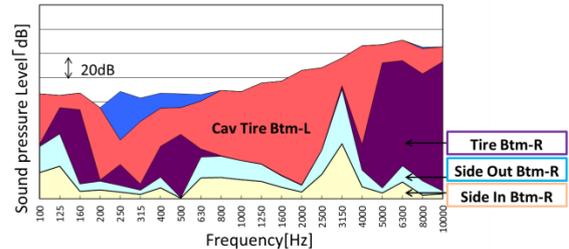


Fig.16 Cav Tire Btm-Rの出力寄与

Fig.16より、加振部位と接続している音場(Cav Tire Btm-L)からの寄与が大きいことがわかった。

7 まとめ

本論はタイヤ騒音を解析する手法としてハイブリッドSEA法を適用し、そのモデル化について検討を行った。結果、構造加振実験から得られたERは、Upr部加振及びBtm部加振時で差が生じるため、二分化した上で対称性を考慮する必要があるということがわかった。また、精度検証によりモデルの有用性、寄与解析によりタイヤ放射音の寄与度を確認することができた。

「参考文献」

- 1) 龍野俊一, 今井敦士, 後藤一斗, 高橋亜佑美, 見坐地一人, 「ハイブリッドSEAモデルのマスターモデル構築手法提案」, 自動車技術会関東支部学術研究講演会, 2014-3
- 2) 高橋亜佑美, 鈴木雄祐, 柚木浩二, 小林之徳, 見坐地一人, 「防音材の遮音性能評価設備のハイブリッドSEAモデル化研究」, 自動車技術会春季大会学術講演会, 2012-5