泰成

一人勇人

日大生産工(学部)	○斎藤 宗孝	日大生産工(院)	前田
日大生産工	髙橋 亜佑美	日大生産工	見坐地
東洋ゴム工業㈱	櫻井 弘幸	東洋ゴム工業㈱	) 余合

# 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,高次 元での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.そこで我々は,振動・音 響解析に優れているハイブリッドSEA法(Hybrid Statistical Energy Analysis Method:HSEA法)<sup>[1]</sup>と, 構造変更シミュレーションが可能である有限要素法 (Finite Element Method:FEM)を組み合わせることで, 仕様変更に対応した高精度な解析が可能であると考え た.そのためには,FEMで作成したタイヤモデルから, SEAの理論を用いてSEAパラメータを求め,HSEA法 のSEAパラメータと比較する必要がある.

本論では、HSEAとFEMによる合わせ込みに着目し、 まずSEA法の理論について説明した後、FEMから SEAパラメータを求め、HSEAとFEMのSEAパラメー タを合わせ込む手法を提案し、順次説明する。また提 案した手法を2要素の平板の簡易モデルに適用させ検 証実験を行い妥当性を考察する.

## 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.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.

$$\begin{pmatrix} P_{1} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_{1} + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_{2} + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{21} \end{pmatrix}$$
(1)  
$$\begin{pmatrix} 0 \\ P_{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_{1} + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_{2} + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{12} \\ E_{22} \end{pmatrix}$$
(2)

各要素の内部損失パワーを P<sub>d1(d2)</sub>,各要素間の結合 損失パワーを P<sub>12(21)</sub> とすると,それぞれ (3),(4)式で 表すことが出来る.

$$\mathbf{P}_{d1(d2)} = \omega \eta_{1(2)} \mathbf{E}_{11(21)} \tag{3}$$

$$\mathbf{P}_{12(21)} = \omega \eta_{12(21)} \mathbf{E}_{11(21)} \tag{4}$$

ここで $\omega$ は角振動数,  $\eta_{1(2)}$ 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(仕事)を表す.

式(3), (4)をそれぞれ式(1), (2)に代入し, 行列表現 すると(5)式で表すことが出来る.

$$\begin{pmatrix} P_1\\0\\0\\P_2 \end{pmatrix} = \omega \begin{pmatrix} E_{11} & E_{11} & -E_{21} & 0\\0 & -E_{11} & E_{21} & E_{21}\\E_{21} & E_{21} & -E_{22} & 0\\0 & -E_{21} & E_{22} & E_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_1\\\eta_{12}\\\eta_{21}\\\eta_2 \end{pmatrix}$$
(5)

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

Taisei MAEDA, Munetaka SAITOU, Ayumi TAKAHASHI, Kazuhito MISAJI,

Hiroyuki SAKURAI, Hayato YOGOU

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 $\eta$ 行列をSEAパラメータ(内部損失率, 結合損失率) と呼び, (5)式を $\eta$ について解く際, 測定誤差の生じやす い微小項 $E_{ij}E_{ji}(E_{ii}>>E_{ij})$ を無視し,支配的な項のみを考 慮することにより得られた近似式内部で内部損失, 結合 損失はそれぞれ(6), (7)で表すことが出来る.また

$$\eta_{1(2)} = \frac{P_{1(2)}}{\omega E_{11}} \tag{6}$$

$$\eta_{12(21)} = \eta_{1(2)} \frac{E_{12(21)}}{E_{11(22)}} \tag{7}$$

この方法はパワー注入に直接関係している.各要素の内 部損失率と結合損失率が一括して同時に求められるため 非常に有効な方法に見えるが,実際には各要素に対する 平均入力パワー及び平均エネルギーを実験的に,より精 度よく求めないと各損失率,特に結合損失率が負になる ことがある.

そのため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.

### 3 HSEA法のSEAパラメータ算出

本研究で用いるHSEA法におけるモデル化ついて説 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.

# 3.1 解析SEAモデル作成

解析SEA法とは、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.

DLFの理論式:
$$\eta_i = \frac{Ac_0}{Ac_W} \alpha$$
 (8)

CLFの理論式(音響系): 
$$\eta_{ij} = \frac{Sc_0}{4\omega V} \tau_{ij}$$
 (9)

CLFの理論式(構造系): 
$$\eta_{ij} = \frac{\rho_0 c_0}{\omega m} \sigma_{rad}$$
 (10)

ここで、Vは体積、mは質量、Aは表面積、 $\omega$ は角振動 数、Sは境界面の表面積、 $\rho$ は密度、 $\sigma_{rad}$ 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。

### 3.1.1 解析SEAモデルのサブシステム定義

解析対象となるタイヤから解析SEAモデルの サブシステムを作成する. Fig.3に構造系サブシ ステム, Fig.4に音響系サブシステムを示す.



Fig.3 構造系サブシステム



Fig.4 音響系サブシステム.

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SEAパラメータ 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SEAパラメータ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.

構造系:
$$E_i = m_i \langle V_i^2 \rangle$$
 (11)

音響系:
$$E_i = \frac{V_i}{\rho c} \langle P_i^2 \rangle$$
 (12)

ここで,mは質量,構造系の $(V_i^2)$ は空間平均速度の2 乗,音響系のVは音場の体積, $\rho$ は密度,cは音速, $\langle P_i^2 \rangle$ 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(13), 式(14)を用いて求める.

$$\eta_i = \frac{$$
各バンド成分空間周波数平均減衰  
27.3×バンド中心周波数
(13)

$$\eta_i = \frac{2.2}{T_{60} \times f_0} \tag{14}$$

次に, CLFは式(15)を用いて求める.

$$\eta_{ij} = \eta_j \frac{E_{ji}}{E_{ii}} \tag{15}$$

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.

# 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分が±3[dB]以内になるよう にCLFを調整することである.

### 4 FEM/からSEAパラメータ算出

隣り合う全ての要素に対するCLFを全ての要素で求 める. 要素iから要素jのCLF( $_{F}\eta_{ij}$ )を求めるには,要素 iの各グリッドから要素jの各グリッドへの伝達関数を 求め平均化を行う.

ここで、Fは加振させた力、xは振動速度、mは要素i内のグリッド数、nは要素j内のグリッド数、nは要素j内のグリッド数である.

同様に要素iから要素iの伝達関数  $\frac{\dot{x}_i}{F_i}$  も算出を行う.

次に,空間平均速度えを力Fで正規化することにより, (11)式を用いてエネルギーは(16)式で表せる.

$$E = M_{eq} \times \left(\frac{\bar{x}}{F}\right)^2 \tag{16}$$

ここで $M_{eq}$ は等価質量である.

次に,得られた伝達関数 $\frac{\bar{x}_i}{F_i}$ , $\frac{\bar{x}_j}{F_i}$ を(16)式に代入すると(17),(18)式となる.

$$M_{eq} \times \frac{\bar{x}_i^2}{F_i^2} = \frac{E_{ii}}{F_i^2} \tag{17}$$

$$M_{eq} \times \frac{\bar{x}_j^2}{F_i^2} = \frac{E_{ji}}{F_i^2} \tag{18}$$

ここで, *E<sub>ij</sub>*は要素jを加振させたときの要素*i*のエネ ルギーを表す.

(17), (18)式より, 要素*i*から要素*j*のCLF(<sub>F</sub>η<sub>ij</sub>)は(15) 式に代入することで算出可能である.

5. HSEA 法と FEM/SEA 法の SEA パラメータ比較 HSEA 法では高精度な解析を行う事が出来るが,の仕 様変更に適用できないという欠点がある. 仕様変更 シミュレーションが可能な解析手法としては,有限 要素法(Finite Element Method:FEM)が挙げられる. このことから,構造変更シミュレーションが可能な FEMと高周波領域の解析に有用な SEA 法をハイブリッ ド化した FEM/SEA 法と HSEA 法を組み合わせることで, 高精度な仕様変更シミュレーションが可能であると 考える.

4.1 補正係数の算出

あるタイヤに対するモデルの SEA パラメータ(結合 損失率: CLF)を HSEA モデル, FEM/SEA モデルそれぞ れで算出する. HSEA モデルにおける SEA パラメータ を<sub>H</sub> $\eta_{ij}(\omega)$ , FEM/SEA モデルにおける SEA パラメータ を<sub>F</sub> $\eta_{ij}(\omega)$ とし,高精度な解析が可能な HSEA モデル での SEA パラメータ<sub>H</sub> $\eta_{ij}(\omega)$ が正しいと仮定すると, 補正係数 $C_{ij}$ を用いて(19)式で表すことができる.

$${}_{H}\eta_{ij}(\omega) = C_{ij} \cdot {}_{F}\eta_{ij}(\omega)$$
(19)

ここでiは加振するサブシステム, jはiに隣接するサ ブシステムである. (19)式を解くことにより, FEM上 の SEA モデルにおける SEA パラメータを補正する係 数 $C_{ij}$ を求めることができる. 仕様変更後の HSEA モデ ル, FEM/SEA モデルの SEA パラメータをそれぞれ NH $\eta_{ij}(\omega)$ , NF $\eta_{ij}(\omega)$ とおくと(19)を用いて(20)式で 表すことができる.

$$_{NH}\eta_{ij}(\omega) = C_{ij} \cdot {}_{NF}\eta_{ij}(\omega)$$
(20)

例として、Tire Upr-L と Tire Upr-R をそれぞれ要素 1,2 とすると、それぞれの要素を加振させたときの CLF はそれぞれ  $_{F\eta_{12}}(\omega)$ 、 $_{F\eta_{21}}(\omega)$ と表される. 要素 1-2 間の補正係数 $C_{12(21)}$ は(19)式を用いて(21)式で表すことができる.

$$_{H}\eta_{12(21)}(\omega) = C_{12(21)} \cdot _{F}\eta_{12(21)}(\omega)$$
 (21)

(21)式を解くことにより,補正係数*C*<sub>12(21)</sub>を得ることができる.

上記までの補正係数*C<sub>ij</sub>*算出をタイヤのモデルを構 成する要素すべて(17 要素)で行いプールする. 概念 図を Fig. 5 に示す



Fig.5 FEM/SEA モデルから補正係数算出の概念図

Fig.5におけるlは要素2に隣接する番号m, nは要素17に隣接する要素の番号である.

FEM/SEA モデルにおける,全ての要素間の補正係数  $C_{ij}$ が得られれば,FEM/SEA 解析においてタイヤの仕 様変更を行った場合でも,仕様変更後のSEAパラメ  $- \rho_{NF} \eta_{ij}$ に対応する補正係数 $C_{ij}$ を掛け合わせるこ とで,HSEA 解析と同等な高精度のSEAパラメータを 得ることができ,シミュレーション可能であると考 える.

本研究では二要素から作成される平板モデルの各 要素をそれぞれ Tire Upr-L と Tire Upr-R として解 析を行った. 作成したモデルを Fig. 6 に示す.



Fig.6 作成した FEM/SEA モデル

また本研究では HSEA から算出した SEA パラメータ を真値として FEM/SEA モデルの SEA パラメータを比 較し算出された補正係数*C<sub>ij</sub>を*用いた HSEA 解析と同 等な高精度のシミュレーションの提案をしたが、今 回の解析では解析 SEA モデルにおける CLF を真値と し、FEM/SEA モデルにおける CLF と比較を行うことで 補正係数*C<sub>ij</sub>の*算出を行った.比較したグラフを Fig7 に示す.また板厚を 1/2 に変更時の FEM/SEA モデルに 補正係数を適応して求めた FEM/SEA モデルの CLF の 比較を行った.

## 6 検証結果



Fig.7 SEA パラメータ比較

Fig. 7 における CLF (SEA), CLF (FEM/SEA) はそれぞ れ ASEA, FEM/SEA から算出した CLF でありこれらの 値と(19)式から補正係数 $\alpha$ が得られた.ここで平板 モデルの板厚を 1/2 に使用変更して,3章で述べた 提案手法により求めた CLF を $\alpha$ によって補正し ASEA の CLF と比較し考察する.その結果を Fig. 8 に示す.



Fig.8 補正係数を用いたSEAパラメータ予測

Fig8より,補正を行ったCLFは仕様変更後のASEAの CLFに近づいたことが確認できた.

# 7 まとめ

本研究ではHSEA法における全てのSEAパラメータと それに対応するFEM/SEAのSEAパラメータを比較するこ とにより、補正係数 $C_{ij}$ を得ることができ、モデルの仕 様変更シミュレーションが可能となる手法の提案をし た.

また提案手法二要素の平板の簡易モデル作成し補正 係数を求め、使用変更シミュレーションの検証実験を 行いその妥当性を確認することが出来た.

#### 「参考文献」

[1]Misaji, K., et al.: Hybrid SEA Modeling Scheme for Analysis of High frequency Noise in Passenger Cars, Review of Automotive Engineering JSAE, Vol.26, No.1, P3~8, JSAE20054023(2005)

[2] 龍野俊一, 今井敦士, 後藤一斗, 髙橋亜佑美, 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

[3] 髙橋亜佑美, 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

[4] 今井敦士,高橋亜佑美,見坐地一人,「ハイ ブリッドSEA法を用いたタイヤ放射音の音響解 析に関する研究」