

# サンルーフ空力騒音の予測技術開発

大江 健司  
Kenji Oe  
森田 守  
Mamoru Morita

松井 智和  
Tomokazu Matsui  
高橋 佑輔  
Yusuke Takahashi

酒井 信治  
Shinji Sakai  
加藤 由博  
Yoshihiro Kato

## 概要

近年、CO<sub>2</sub>排出規制の強化によって、パワートレインの電動化が進んでいる。従来の音源が低下し、車両周りの音源が車室内騒音として知覚されることが多くなるため、より高いレベルの空力騒音対策が必須となる。本稿ではサンルーフを題材に、設計初期段階における空力騒音予測技術について紹介する。

### 1. はじめに

自動車動力の電動化に伴い、パワートレインから発生する騒音が低下する傾向にある。その結果、パワートレインよりも比較的低かった車両周りの空力騒音が顕在化すると考えられる。本稿では、Computational Fluid Dynamics (CFD) を用いた空力騒音予測技術について紹介する。

### 2. サンルーフの概要

#### 2.1 サンルーフシステムの構成

図1にサンルーフが搭載された車両状態を示す。サンルーフは採光、換気、開放感を得るために自動車の屋根に取り付けられる開口装置である。図2にサンルーフシステム詳細を示す。車両前側に配置されたモーターからの駆動力をギア、ベルトを介して左右レール内にあるシューが前後にスライドし、ガラスの開閉を行う。サンルーフが開くと同時に開口前縁に格納されていたデフレクタ(図1)が上方に展開し、空力騒音を抑制する構造となっている。



図1 サンルーフ搭載状態 図2 サンルーフ詳細

#### 2.2 サンルーフ周りの空力騒音

サンルーフが開状態で走行すると、様々な騒音が生じる。その代表的なものに風切音やウィンドスロップ音がある。風切音は空気の流れによって生じる音の総称として呼ばれる事もあるが、本論文ではサンルーフの開口前

縁の剥離流によって生じる、図3のように特徴的なピークを持たない、1~6kHzの広帯域騒音を風切音と呼ぶ。一方ウィンドスロップ音は、開口部で生じる周期的な圧力変動周波数と、車室内体積から決定されるヘルムホルツ共鳴周波数が一致した際に生じる気柱共鳴現象である。図4のように人間の可聴限界に近い周波数10~30Hz周辺に強いピークを持ち、耳を圧迫するような不快な騒音として対策を迫られる。

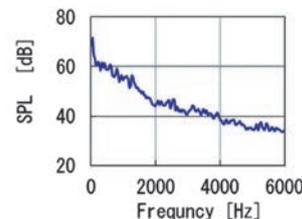


図3 風切音の例

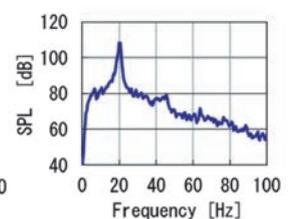


図4 ウィンドスロップの例

#### 2.3 サンルーフの空力騒音対策

サンルーフの空力騒音対策として、開口部前縁に設置するデフレクタがある。代表的なデフレクタ形状を図5, 6に示す。一般的に、デフレクタを高い位置に設置するほど気流の向きが大きく変化し、ウィンドスロップ音の低減効果が高くなるが、風切音は悪化する傾向にある。近年は高い開放感を狙った開口量の広いサンルーフが増加しており、より強い気流変化が無ければウィンドスロップ音が低減できなくなっている。その対応として、アッパフレーム下側に空気を透過する布を設置し、変化が大きい気流を意図的に作り出すメッシュタイプのデフレクタ(以降メッシュデフレクタ)が増加している。

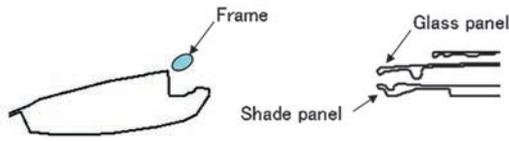


図5 コンベンショナルタイプの例

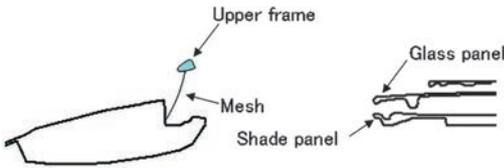


図6 メッシュタイプの例

### 3. 風切音予測手法の構築

#### 3.1 風切音の計測

メッシュデフレクタ展開状態を模擬した簡易模型に、車速100km/h相当の風を当て、風切音を計測した。風洞設備への模型設置状況を図7に示す。デフレクタと風洞ノズルの間には車両のルーフ傾斜部を模擬した板を設置した。圧損の違う3ケースの布パターン拡大図を図8に示す。(a) (b) (c)の順に圧損が高くなっており、(c)のケースは空気が通過できないものとした。騒音計測結果を図9に示す。

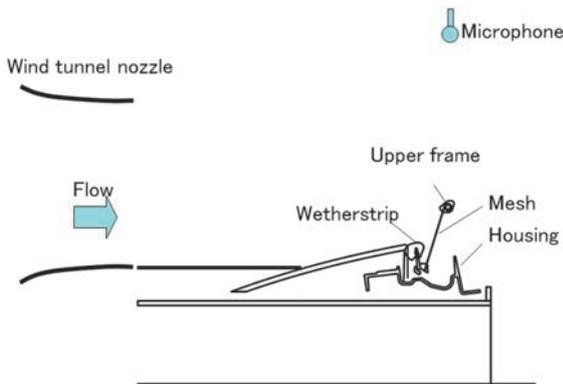


図7 風洞実験

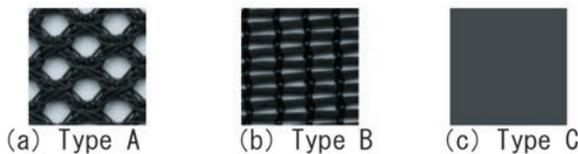


図8 メッシュパターン

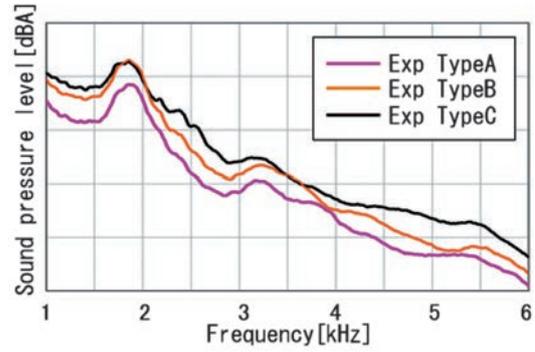


図9 風切音実測結果(スムージング処理後)

#### 3.2 風切音の計算

図10に風切音の計算モデル概要を示す。模型形状を車幅方向に100mm抜き出したモデルで計算を行う。計算条件を表1に示す。計算ソルバーは革新的シミュレーションソフトウェア研究開発プロジェクトの成果であるFront Flow/Blue-Ver8.1を用いた。初期計算として約865万格子の計算を行い、途中で約5.5億格子に細分化して計算を実施した。布部分は境界条件として圧損特性を与えた。計算には、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用した。

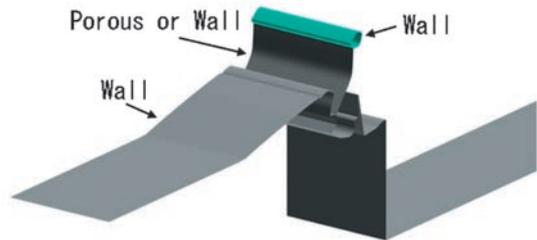


図10 風切音解析用モデル概要

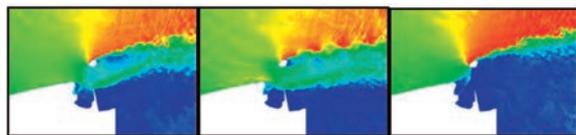
表1 計算条件

Item	Condition
Solver	Front Flow/Blue-Ver8.1
Turbulence model	LES(DSM)
Fluid	Incompressible
Cell type	Hexa, Prism mesh
Total number of cell	553 Million
Time Step	$7.2 \times 10^{-7}$ s

#### 3.3 風切音計算の精度検証

メッシュデフレクタ布部分の圧損が違う3ケースの計算結果を図11に示す。圧損の変化に応じた流れ場の変化が確認できる。また、実測の騒音と、CFDのデフレクタ流体力変動からCurleの式を用いて算出した騒音を比較した結果を図12に示す。実測は暗騒音の影響を含むため実測と計算で絶対値の比較は出来ないが、定性的な傾向は捉えられているものとして音圧変化の比を比較する。格子細分化による騒音への影響を、メッシュタイプ

Aを基準として規格化し、6.3kHzの1/3オクターブバンドで比較した。その結果、粗い格子では傾向を捉えられていないが、細分化した格子では傾向を捉えることができた。



(a)パターンA (b)パターンB (c)パターンC

図11 瞬間流速分布

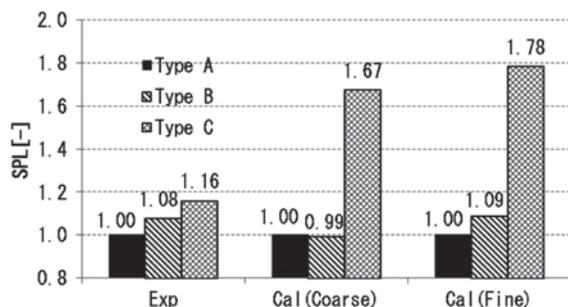


図12 風切音評価結果(6.3kHz 1/3oct)

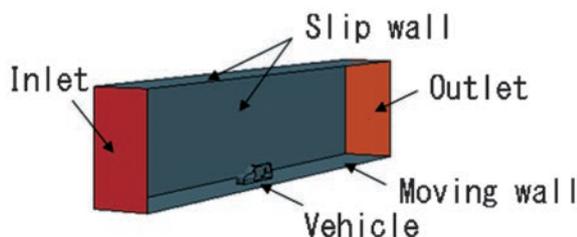
#### 4. ウィンドスロップ音予測手法の構築

##### 4.1 ウィンドスロップ音の計測

サンルーフを開いた状態で車速を20~50km/hの範囲で変化させ、ドライバ耳位置の圧力変動を測定し、騒音スペクトルを算出する。この時、10~30Hz近辺に生じるピークがウィンドスロップである。

##### 4.2 ウィンドスロップ音の計算

ウィンドスロップ音計算に用いるモデルの概要を図13、計算条件を表2に示す。ピーク音圧レベルと車速の関係をデフレクタ高さ2ケースについて実測と比較した結果を図14に示す。実測と計算では音圧レベルが大きく乖離しており、デフレクタ高さを変えた時の音圧レベルの変化代も小さい。



※Not visible face is symmetrical wall

図13 ウィンドスロップ音解析用モデル概要

表2 解析条件

Item	Condition
Solver	STAR-CCM+
Turbulence model	DES
Fluid	Compressible
Cell type	Trimmed mesh
Total number of cell	8.0 Million
Time Step	$1.0 \times 10^{-4}$ s

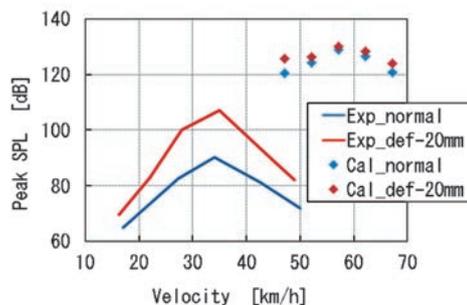


図14 速度毎の音圧レベル

##### 4.3 ウィンドスロップ音予測の課題

ウィンドスロップは開口部で生じる周期的な渦放出と、車室を共鳴箱としたヘルムホルツ共鳴が連成した現象であり、剛体の3次元オープンキャビティモデルでは計算と実測で良く一致する事が知られている<sup>1)</sup>。しかしながら、前述の結果より実車両形状では実測と計算でピーク音圧レベルに乖離が生じた。これは、実車両においては鉄板や樹脂パネルの構造振動、内装材に使われているウレタンや布の吸音効果、車室内の隙間からの空気漏れなどが影響していると推察される。そこで、実車両の音響減衰特性と計算の圧力減衰特性の差を用いて計算側のパラメータを補正する方法を試行する。

##### 4.4 圧力減衰特性把握

実験と計算の圧力減衰波形を図15に示す。車室内の音響減衰は一般的な減衰波形の様相を示しており、減衰系の自由振動式で近似できると推測できる。実測と計算では減衰特性が合っておらず、ウィンドスロップ予測結果に差異が生じた原因と考えられる。

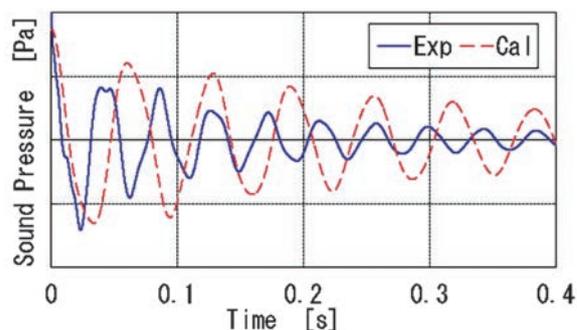


図15 実験とシミュレーションの圧力減衰波比較

#### 4.5 計算の補正方法

粘性減衰を考慮した自由振動の式を(1)に示す。

$$p(t) = Me^{-\alpha t} \cos(\omega_n t) \quad (1)$$

ここで、 $t$ は時間を、 $p(t)$ は音圧を、 $M$ は減衰の初期レベルを、 $\alpha$ は減衰係数を、 $\omega_n$ は固有振動数を示す。実測と計算、それぞれの減衰波形を式(1)で近似できる減衰補正値を導出する。導出した補正値で計算モデルに補正を加え、再度計算を実施した結果を図16に示す。実測と計算では減衰初期に乖離はあるが、減衰の進行とともに良い一致を示している。

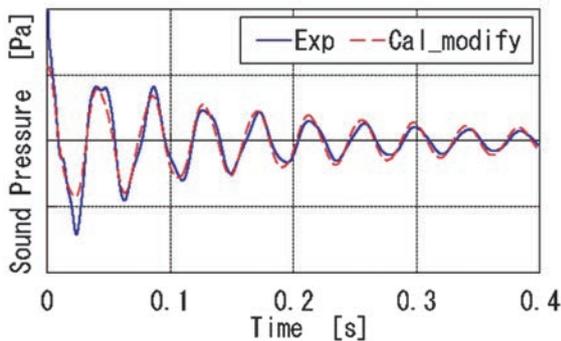


図16 修正後の圧力減衰波形比較

#### 4.6 車室からの空気漏れ計測

実車両の空気漏れを計算モデルに盛り込むため、車室の到る所にある微小な隙間の総隙間面積を測定する。車両後席窓より車内外を連通するダクトを設置、軸流ファンによって車室内の空気を車外に排出、その時のダクト流速と車室内外の圧力差を測定することで車室の隙間面積の総和を求める。

#### 4.7 計算の精度検証

減衰補正と車室からの空気漏れを再現した計算モデルを用いてウィンドスロップ音の計算精度を検証した結果を図17に示す。補正が無い場合、音圧レベル、音圧ピークとなる車速ともに実測と計算で大きく乖離している。しかし、音響減衰特性の合わせ込みと空気漏れを考慮した計算では実測と計算で良い一致を示した。

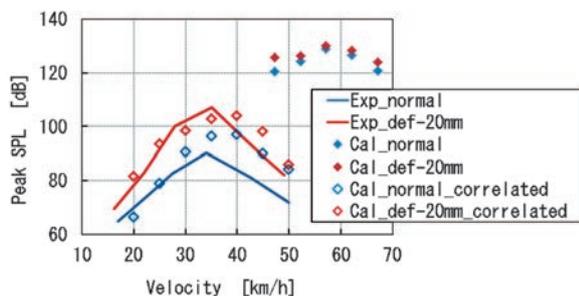


図17 速度毎の音圧レベル(改善後)

## 5. まとめ

サンルーフの風切音は、メッシュデフレクタの布部分を圧損でモデル化し、周波数に応じた渦が解像できる格子と車両断面を引伸ばした簡略モデルで実測との相関を得る事ができた。ウィンドスロップ音については車両固有の音響減衰特性から計算パラメータを補正する手法と、車両の空気漏れを計算モデルに盛り込む手法により、ウィンドスロップ音のピーク車速及び音圧レベルが実測結果に近づいた。

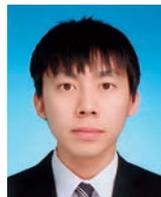
## 6. おわりに

最後に、本技術開発にあたり多大なご協力を賜りました(株)豊田中央研究所はじめ、関係者の方々に深く感謝いたします。本論分の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです(課題番号:hp150299他)。

#### 転載文献

- 1) 稲垣昌英ら:低マッハ数流れにおける流体共鳴音の数値解析法, 日本機械学会論文集(B編), 66巻, 649号, p.2274-2281(2000)
- 2) Fred G.Mendonca:CAD/CAE Combinations in Open Cavity Noise Predictions for Real Vehicle Sunroof Buffeting, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. Volume 6, Issue 1(2013)
- 3) 宇都宮五郎ら:自動車ボディの気密性能測定に関する一実験, 自動車技術会論文集, Vol.22, No.8, p.763-765(1968)
- 4) 郡 逸平:自動車開発における空力騒音低減技術, Vol.33, No.6, p.549-555(2005)
- 5) 成田弘志ら:自動車のサンルーフで発生するウィンドスロップ音のシミュレーション, 第24回数値流体力学シンポジウム前刷集, F7-2, p.1-4(2010)
- 6) 堀之内成明ら:流体共鳴音解析技術の開発-ウィンドスロップ解析への適用, 豊田中央研究所R & Dレビュー, Vol.36, No.2, p.31-38(2001)
- 7) 炭谷圭二ら:自動車と流体力学-車体周り流れと空力特性, 日本流体力学学会誌(ながれ), 23(6), p.445-454(2004)
- 8) 奥津泰彦ら:数値流体解析を活用した空力騒音予測技術, 第24回数値流体力学シンポジウム前刷集, F7-2, p.1-4(2010)

#### 筆者



#### 大江 健司

デジタルエンジニアリング部  
(IHCAE技術部)CAE技術開発グループ  
CFD技術開発に従事



#### 松井 智和

デジタルエンジニアリング部  
(IHCAE技術部)CAE技術開発グループ  
CAE技術開発に従事



**酒井 信治**

第二車体技術部 ルーフG  
サンルーフ設計に従事



**森田 守**

信頼性技術部 AR評価技術グループ  
流体計測技術開発に従事



**高橋 佑輔**

デジタルエンジニアリング部  
(旧信頼性技術部) CAE技術開発グループ  
流体計測技術開発に従事



**加藤 由博**

(株)豊田中央研究所 機械1部  
専門:流体工学, CFD