

平成 27 年度 TSUBAME 産業利用トライアルユース 成果報告書

車室外音場の音響伝達予測手法の高効率化  
Efficient prediction method of vehicle exterior acoustics

河合 英樹 柳瀬 純一 天神 重樹 塩崎 弘隆  
Hideki Kawai Junichi Yanase Shigeki Tenjin Hirotaka Shiozaki

三菱自動車工業株式会社  
Mitsubishi Motors Corporation  
<http://www.mitsubishi-motors.co.jp/>

高周波領域までの音の伝播をシミュレーションする際、解析周波数における音の波長に合わせた解析モデルの細分化が必要になり、計算負荷が増大してしまう。商用音響解析ソフトウェア『ACTRAN/DGM』では、解析周波数に応じた要素次数を自動的に変化させる機能と領域分割による並列計算によって、高周波数までの音響解析を効率良く実施できる。

そこで今回、ACTRAN/DGM による大規模並列計算を TSUBAME で実施し、車外音場における車両接近通報装置からの音の伝播シミュレーションを行った。その結果、約 2400 万自由度の大規模モデルのシミュレーションを並列計算により実用的な計算時間で実施でき、接近通報音の伝播予測やスピーカー位置の影響検討に本解析手法は有効であることがわかった。

For numerical simulation of acoustic propagation up to high frequency region, calculation cost increases using smaller mesh adapted the acoustic wavelength at the frequency interested. ACTRAN DGM supports adapting the order of the elements automatically and the parallel computation based on domain decomposition. This commercial software simulates efficiently.

In this study, large scaled parallel computation is performed by using ACTRAN DGM on TSUBAME. The acoustic propagation from proximity warning device at the vehicle exterior field is simulated. As a result, the model of 24 million DOF was calculated within a realistic time. It has been indicated that this analysis is beneficial for predicting the acoustic propagation and studying the influence of device layout.

*Keywords:* TSUBAME, ACTRAN DGM, Vehicle exterior acoustics, Finite element method

## 1. 背景と目的

電動車両(EV, PHEV)は歩行者に車両の接近を知らせる音を発する車両接近通報装置の設置が義務付けられている。この装置から発する音(接近通報音)は法制化が予定されており、事前の成立性検討や車室外音場の伝播メカニズムを分析する技術の必要性が高まっている。

一般的な車外音場の計算には、音の波長に合わせた音場モデルの細分化が必要であり、高周波になるほど計算負荷が増大する。しかし、今回試行した有限要素法音響解析ソルバー『ACTRAN DGM (DGM: Discrete Galerkin Method)』では、解析対象周波数の音の波長に応じて空間要素を自動的に高次化する機能があり、並列計算も可能なため、高周波数までの音響解析を効率良く実施できるメリットがある。

今回、大規模な並列計算が可能なスパコン

『TSUBAME』にて『ACTRAN DGM』を用いて、接近通報音の解析予測に適用し、解析手法と TSUBAME の有効性を検証した。

## 2. 接近通報音の解析概要

接近通報音を模擬した車両前方に設置したスピーカーからの音の伝播を解析対象とした。最初に、ACTRAN DGM の自動高次化機能による解析周波数と解析モデルの節点数の変化を明確にし、次に、解析によって求めた音響伝達関数を、実車で計測した音響伝達関数と比較して計算精度を検証した。そして、TSUBAME での並列数を最大 512 並列まで変化させ、システムの解析効率のベンチマークを実施した。最後に、音の伝達経路分析およびスピーカレイアウトの検討を行った。ACTRAN のバージョンは全て 15.1 で検証した。

### 3. 解析モデル

解析に用いた車外音場の有限要素法モデルを図1に示す。地面を完全反射とし、それ以外の境界を無反射境界として設定している。車両中央から2m離れた計測マイク位置を評価点として再現している。モデルの初期節点数は約30万節点であるが、2kHzの計算では要素次数の自動高次化機能により約2400万節点に増加する。

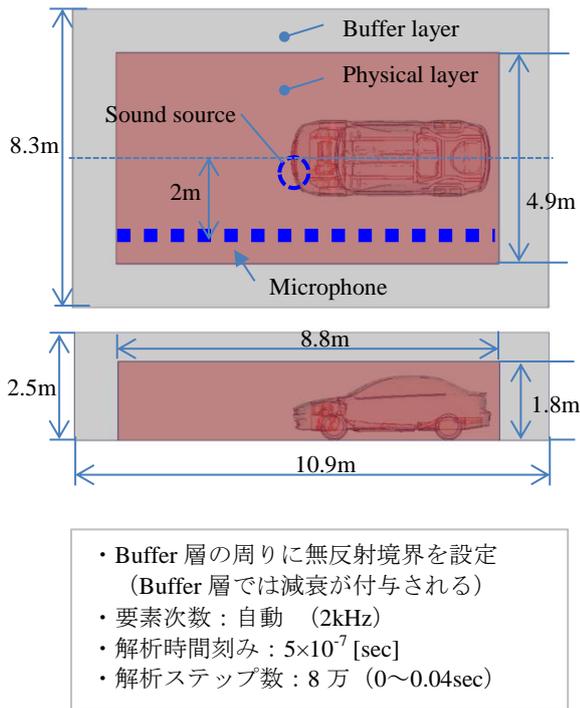


図1 接近通報音解析モデル

表 節点数

初期	自動高次化の設定周波数	
	1000Hz	2000Hz
30万	500万	2400万

### 4. ACTRAN DGM の再現性検証

500Hzの単一周波数音源から放射される車外音場における音の分布をACTRAN DGMによって求めた結果を図2に示す。単一周波数音源では、音の聞こえない領域が発生する。これは、音源からの直接波と路面からの反射波との干渉により音波が小さくなるためであり、経路長差が音源の半波長（500Hzでは0.34m）の領域で発生する。

音の伝播の再現性を検証するため、地面のみ反射

する半無響室に実車両を設置し、体積速度音源を解析とほぼ同じ位置に設置し試験を行なった。音源から評価点までの音響伝達関数を解析結果と計測値で比較した結果を図3に示す。評価点のレベルの傾向を概ね再現している。次に、車両前方の音響インテンシティを球面近距離ホログラフィにより計測し、解析結果の音圧分布と比較した結果を図4に示す。直接波と反射波の干渉による音圧増減域をどちらも確認できた。

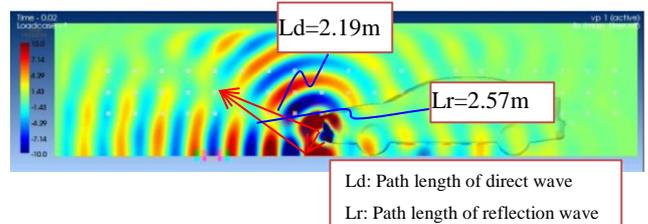


図2 単一周波数（500Hz）音源の音の伝播

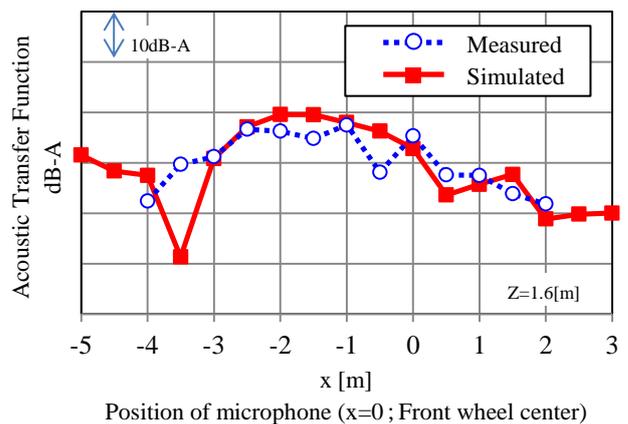


図3 解析結果と計測値の音響伝達関数の比較

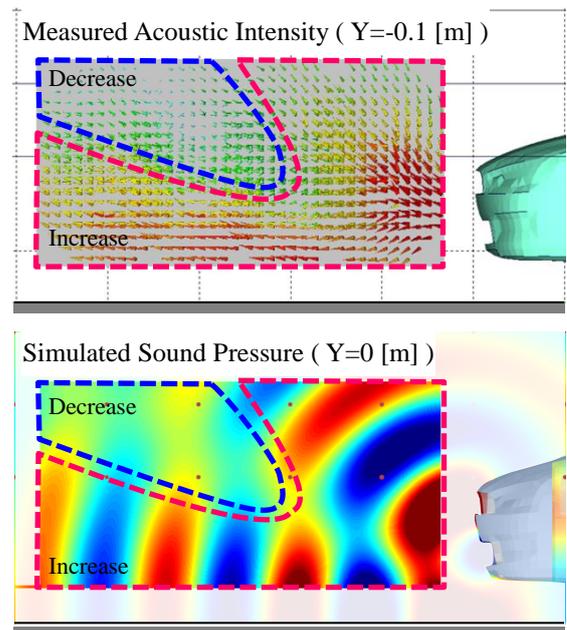


図4 解析結果と計測値の音場の比較

### 5. 解析手法とシステムの検証結果

計算時間への並列化の効果を検証するため、今回の解析モデルを TSUBAME (8~512 並列) で計算した場合の並列数と計算時間の関係を図 5 に示す。TSUBAME では最短 5 時間で計算でき、実用的な計算時間で実施可能になることがわかった。

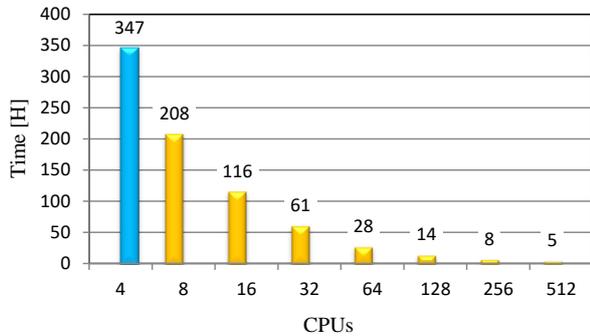


図 5 解析効率(並列化)のベンチマーク結果

### 6. 音源及び音源レイアウトの検討

実際の車両では複数の周波数帯を含む音源としており、500Hz, 1kHz, 2kHz を足し合わせた合成波音源では、干渉による音のレベル低下を回避できることが確認できた。(図 6)

音源の設置位置を変えた場合(図 7), 音の伝達特性が変わり、フロントエンド下部に設定した場合の方が、車両後方の音圧レベルは、大きくなる。(図 8) その伝達のメカニズムは車両下を経由して車両後方へ伝わっていることが分かる。(図 9)

### 7. まとめと今後の課題

接近通報音の伝播予測に TSUBAME を用いることで実用的な計算時間になり、社外計算リソース活用の有効性を確認できた。

音の伝播やスピーカー位置の影響を検討できることがわかり、本解析手法の有効性を確認できた。

ACTRAN DGM ソルバーの新バージョン (バージョン 16) では、GPU による計算高速化が図られている。

るため、TSUBAME での更なる計算効率化が期待できる。

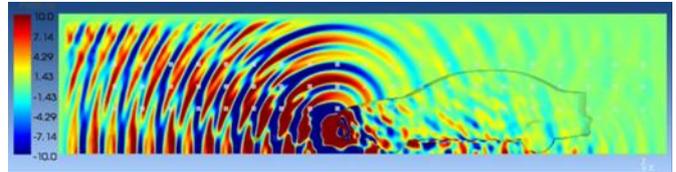


図 6 合成波 (500Hz/1kHz/2kHz) 音源の音の伝播

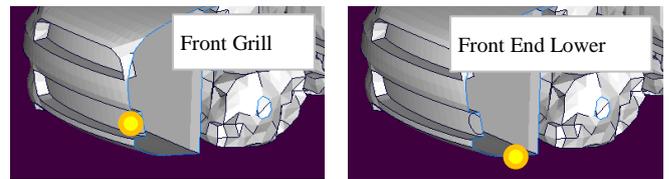


図 7 音源位置

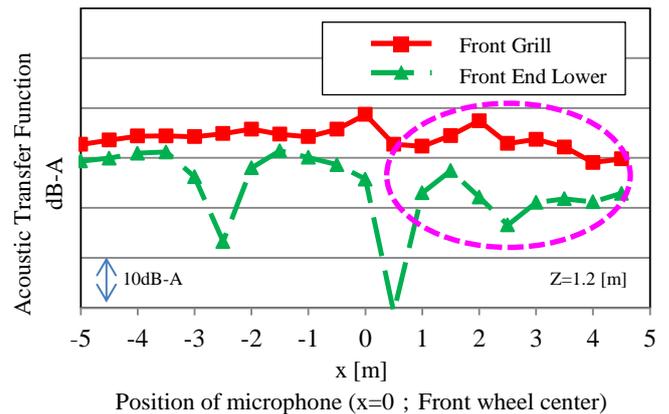


図 8 音源位置による音圧分布の違い

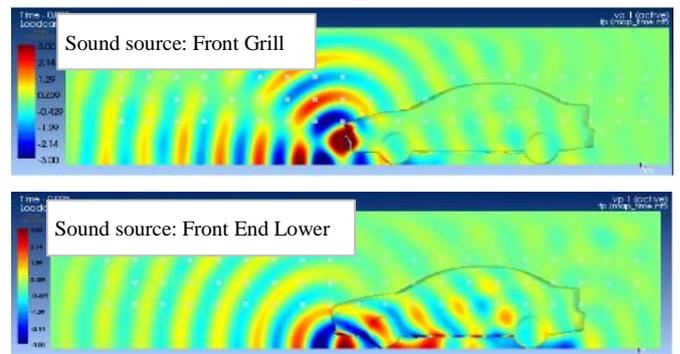


図 9 音源位置による音の伝播の違い