

# 「京」による高速鉄道車両の下部空力騒音解析及びトンネル突入解析

## Unsteady Aerodynamic and Aeroacoustic Simulations of High-speed Train Using K Computer

- 上野陽亮, 川崎重工 航空宇宙カンパニー, 岐阜県各務原市川崎町 1, ueno\_yosuke@khi.co.jp  
 田島厚志, 川崎重工 エンジニアリング, 岐阜県各務原市川崎町 2, tajima\_atsushi-kge@corp.khi.co.jp  
 越智章生, 川崎重工 航空宇宙カンパニー, 岐阜県各務原市川崎町 1, ochi\_a@khi.co.jp  
 佐々木隆, 川崎重工 車両カンパニー, 神戸市兵庫区和田山通 2-1-18, sasaki\_takashi@khi.co.jp  
 Yosuke Ueno, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., 1, Kawasaki-cho, Kakamigahara, Gifu  
 Atsushi Tajima, Kawaju Gifu Engineering co., Ltd., 2, Kawasaki-cho, Kakamigahara, Gifu  
 Akio Ochi, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., 1, Kawasaki-cho, Kakamigahara, Gifu  
 Takashi Sasaki, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., 2-1-18, Wadayama-dori, Hyogo-ku, Kobe, Hyogo

This paper describes a summary of unsteady aerodynamic and aeroacoustic simulations of high-speed train using K computer. The CFD tool used in this study is “Cflow” that has been developed at Kawasaki Heavy Industries (KHI). First simulation is focusing on aeroacoustic noise generated by bogies of “efSET<sup>®</sup> (environmentally friendly Super Express Train)” which is under development at KHI for the global market. The noise levels of frequency up to 400 Hz seem to be captured with 832 million cells. Another simulation is performed for the efSET<sup>®</sup> entering a tunnel to investigate the influence of track bed on a micro-pressure wave radiated from the tunnel exit. The magnitude of the micro-pressure wave on the far-field ground is reduced in the elevated railroad compared to the embankment.

### 1. はじめに

近年の新幹線の高速化や海外での高速鉄道導入機運の高まりに伴い、沿線周辺環境の向上、特に低騒音化に対するニーズが高くなってきている。

海外の高速鉄道においても、速度向上に伴い、速度の約 6 乗に比例して増大する空力音の寄与が、速度の約 3 乗に比例する騒音と比較して大幅に増大する。

筆者らはこれまでに、海外仕様の高速用パンタグラフを対象とした空力騒音解析を実施し、風洞試験結果との比較により遠方場の騒音予測のために適切な格子幅や解析手法に関する研究を行ってきた<sup>(1)(4)</sup>。

今回は、高速鉄道車両の台車部等から発生する下部空力騒音解析に適用し、スーパーコンピュータ「京」を用いて最大 8.3 億セルの大規模解析を実施したので、その結果を報告する。

また、高速化により顕著になる振動・騒音問題としてトンネル内外での圧力変動がある。主に高速鉄道において、鉄道車両が高速でトンネルに突入するとトンネル内に圧縮波が生じ、トンネル出口から微気圧波として放射される。鉄道車両が現状よりも高速で走行すると、このトンネル微気圧波が大きな発砲音を発生させたり周辺家屋の窓を振動させたりする可能性があるため、微気圧波の大きさを高精度に予測し低減対策を施すことが必要となる。

筆者らは過去に、自社開発 CFD 解析ソフト「Cflow」によるトンネル微気圧波の解析精度検証を行い、トンネル内での圧縮波や膨張波、そしてトンネル外での微気圧波が走行試験結果と非常に良く一致することを確認した<sup>(2)(3)</sup>。

本稿では、「京」を用いて高速鉄道車両のトンネル突入解析を実施し、軌道（盛土・高架）やトンネル長の違いによる微気圧波の影響を調査したので、その結果についても報告する。

### 2. 自社開発 CFD 解析ソフト「Cflow」

川崎重工では、複雑形状に対応した格子生成ソフトと非定常流に対応した CFD 解析ソルバー「Cflow」を開発してきた<sup>(5)(6)</sup>。筆者らはこれまでに、航空機の空力性能解析や、航空機脚や高揚力装置から発生する空力騒音解析などに Cflow を適用し、解析精度の検証を行ってきた<sup>(1)(10)</sup>。

Cflow の格子は、AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法<sup>(11)</sup>を用いた非直交八分木格子と境界層を解像するための境界適合層状格子を組み合わせたもので“NOBLU (Non-orthogonal Octree with Boundary-fitted Layer Unstructured) grid”と呼ばれる。物体表面の形状ファイル (STL 形式など) と初期格子が与えられると、Cflow が自動で格子生成を行う。初期格子に非直交格子を用いる場合は、ユーザーがその初期格子を手動で作成する必要があるものの、初期格子のセルのアスペクト比や格子密度を調整して格子解像度を任意に設定することで、全体の格子点数を節約できる等の利点がある<sup>(8)</sup>。

Cflow による CFD 解析で主に使用されている計算スキームを表 1 に示す。

Table 1 Numerical schemes of Cflow.

Governing equation	Three-dimensional compressible Navier-Stokes
Time integration	MFGS implicit method <sup>(12)</sup>
Spatial discretization	Cell-centered finite volume method MUSCL with modified Green-Gauss + SLAU <sup>(13)</sup> 2 <sup>nd</sup> -order central difference (viscous term)
Turbulence model	Spalart-Allmaras (S-A) Detached-Eddy Simulation (DES) Delayed DES (DDES) <sup>(14)</sup>
Parallelization	Domain decomposition method with MPI

### 3. efSET<sup>®</sup>の下部空力騒音解析

#### 3. 1. 解析条件

今回の解析対象は、図 1 に示す自社開発の海外向け新型高速鉄道車両 efSET<sup>®(15)</sup>の台車部から発生する空力騒音である。解析モデルは図 2 に示すように、先頭車 (car No. 1)、中間車 (car No. 2)、後尾車 (car No. 3) の 3 両編成とし、前方 1.5 両分の軸ハリ式高速台車<sup>(15)</sup>を詳細に模擬した (図 3)。台車カバーは、先頭車前方と後尾車後方のみフルカバー (カバーあり) とし、残りは全てハーフカバー (カバーなし) とした。地面には移動壁の境界条件を与え、実際の走行状態を模擬している。解析は実車スケールで実施し、先頭車長 (=後尾車長) は 26.4m である。

計算格子は Fine 格子, Medium 格子, Coarse 格子の 3 種類作成した. 各計算格子の諸元を表 2 に示す. Medium 格子は Coarse 格子に比べて台車部のセル幅が半分になっており, Fine 格子は Medium 格子に比べて更に半分になっている.

図 4~図 7 に計算格子の図を示す. 図 4 は詳細台車の表面格子であり, このような複雑な形状に対しても Cflow は自動的に格子を生成することができる. 図 5 と図 6 は各格子の断面格子を示している. 図 5 は先頭部台車断面 (位置は図 6(c)参照) の格子, 図 6 は車体中心断面の格子である. 台車部と車間部に渦を捉えるための細かい格子を配置するために, 初期格子の段階で格子密度を調整し, 全体の格子点数を節約した. また, 車体の上方や側方には音波の伝播を捉えるために比較的細かい格子を配置した. Medium 格子と Fine 格子ではより高周波の渦まで解像できるように, Coarse 格子に比べて台車まわりの空間格子を 1 レベル (=セル幅が xyz 各方向に 1/2) ずつ細かくした. 図 7 は Fine 格子における台車の表面格子と台車近傍の空間格子を示しており, 台車表面近くには境界層を捉えるための層状格子が配置されている. 層状格子の層数は 20 層である.

解析条件と各格子における計算コストを表 3 に示す. 本解析では, 最初に定常解析を実施し, その後に非定常解析を実施した. 非定常解析では, データ取得までの助走区間として 1.5sec 分 (一樣流が約 5 両分進む時間) 解析した後, 0.6sec 分の非定常データを取得し周波数解析等の分析に用いた. 解析は時間 1 次精度で行い, 乱流モデルには Spalart-Allmaras ベースの DDES モデルを用いた.



Fig. 1 efSET<sup>®</sup> (environmentally friendly Super Express Train).

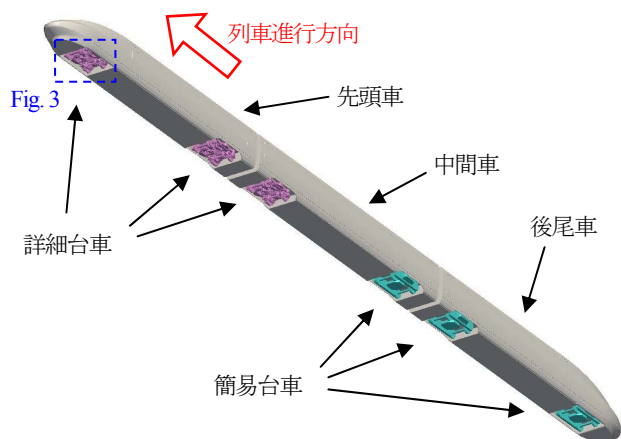


Fig. 2 Computational model (efSET<sup>®</sup>).

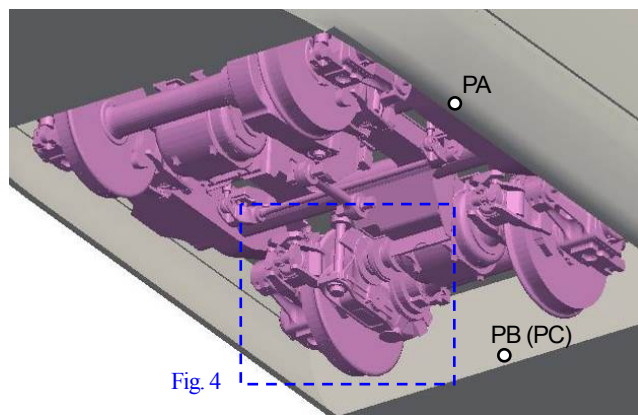
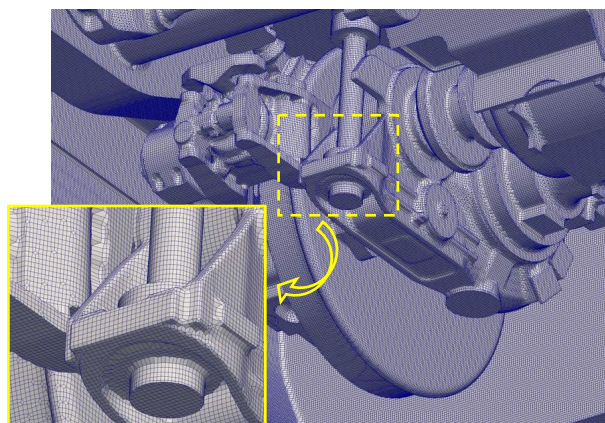
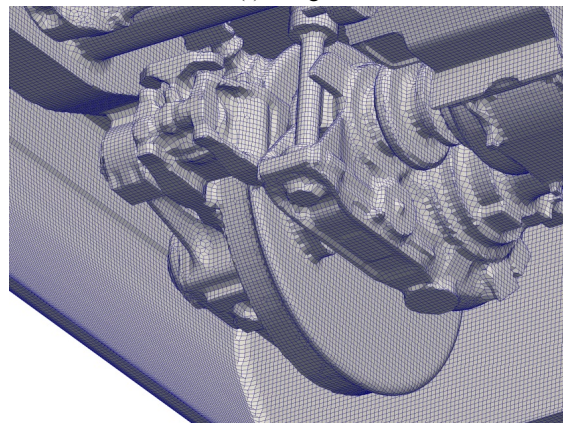


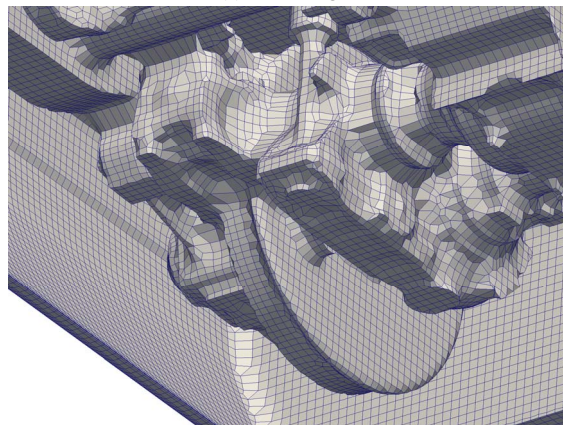
Fig. 3 Computational model (bogie).



(a) Fine grid



(b) Medium grid



(c) Coarse grid

Fig. 4 Surface mesh.

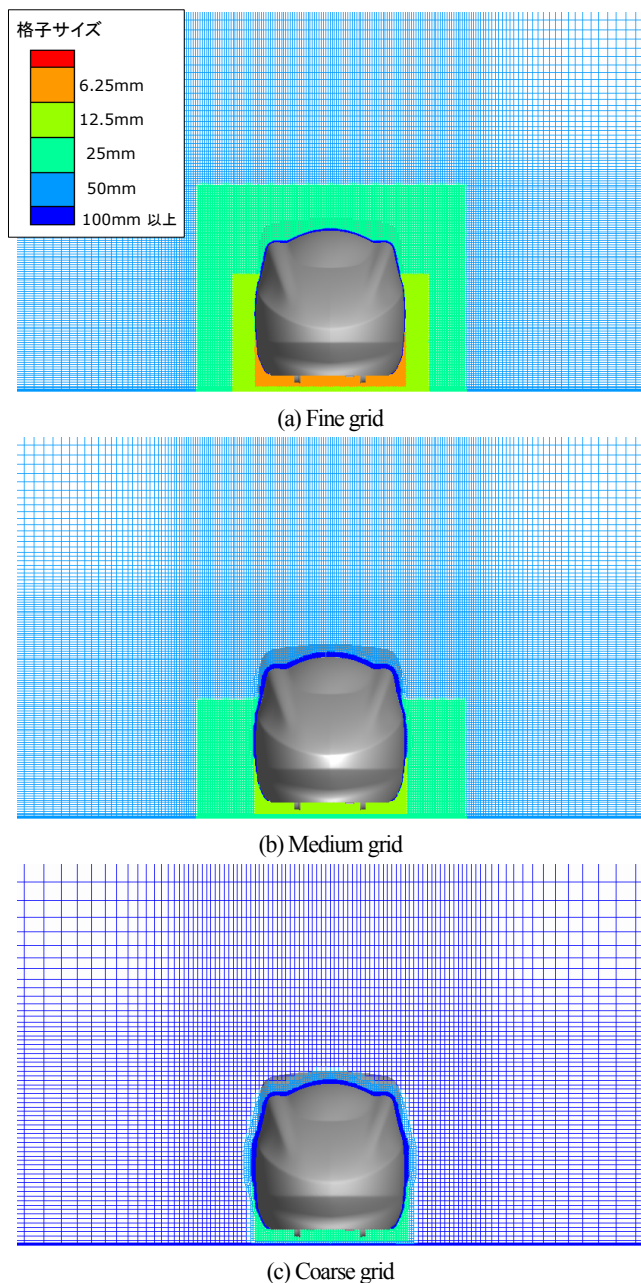


Fig. 5 Grid cross section (front view).

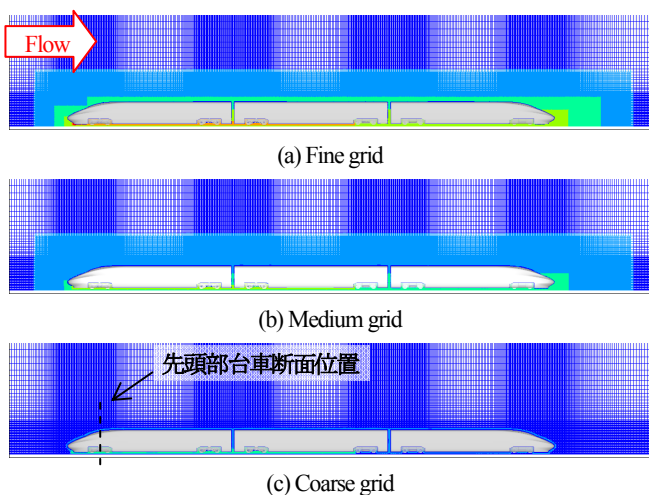


Fig. 6 Grid cross section (side view).

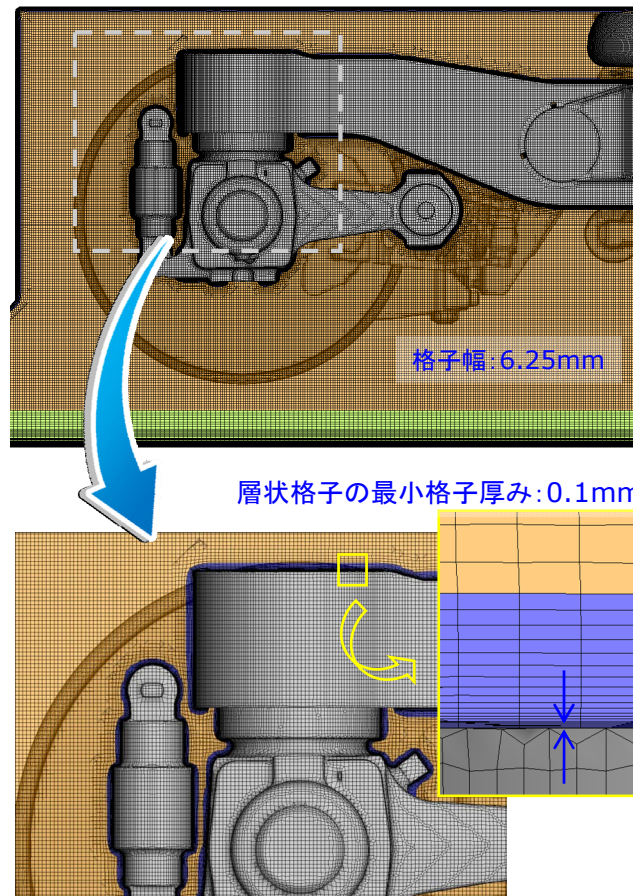


Fig. 7 Layer grid around bogie (Fine grid).

Table 2 Grid properties.

	Fine	Medium	Coarse
Total number of cells [million]	832	169	34
Number of surface cells [million]	14.6	4.0	1.3
Minimal grid size <sup>※1</sup> [mm]	0.1	0.1	0.1
Surface cell spacing <sup>※2</sup> [mm]	6.25	12.5	25.0
Grid generation time [hours]	40	6	1

※1 境界層を捉えるための層状格子の最小厚み (実車スケール)

※2 前方 1.5 両の詳細台車部 (xyz 各方向に同じ格子幅)

Table 3 Computational conditions.

	Fine	Medium	Coarse
Train speed [km/h]	350 (=97.2 m/s)		
Reynolds number	21.9×10 <sup>6</sup>		
Reference length [m]	3.3		
Time step (calculation) [sec]	2.94×10 <sup>-5</sup>		
Total number of time steps for unsteady data sampling	20,000		
Time step (data sampling) [sec]	2.94×10 <sup>-4</sup>		
Nyquist frequency [kHz]	1.7		
The number of CPUs utilized [cores]	8,192	4,096	2,048
The time required to obtain 10,000 time steps [hours]	4.3	1.7	0.7

### 3. 2. 解析結果

図8にFine格子の車体床下における主流方向速度分布(瞬時値)を示す。(a)は先頭部、(b)は先頭車後方と車間部の可視化結果である。台車キャビティ前縁部から発生したせん断層が台車前方の車輪等につぶかり、さらに流れが乱れて台車後方やキャビティ後端につぶかっている様子が確認できる。また(b)の図から、先頭車後方台車に流入してくる流れは、前方台車の影響で乱れており、境界層も厚くなっているのが分かる。

図9と図10に各格子における渦領域抽出のため、渦核をあらわす特徴量である $\lambda_2^{(16)}$ の等値面(瞬時値)を示す。色は渦度の絶対値である。図9は先頭部の可視化結果であり、スカートのエッジから強い渦が発生している。また、台車部は全体的に乱れた流れ場になっており、格子が細くなるにつれて渦の解像度が増しているのが確認できる。図10は先頭車と中間車の車間部の可視化結果であり、こちらも台車部全体から細かい渦が発生しているのが分かる。しかしながら先頭部の台車から発生する渦に比べると、先頭車後方台車や中間車前方台車から発生する渦は弱くなっている。また、Fine格子やMedium格子では車体下面の車間部からも渦が生成されているが、Coarse格子では解像度不足により渦の生成は見られない。

図11にFine格子の車体と台車表面における、400Hzの圧力変動分布を示す。(a)は先頭部の圧力変動であり、スカートのエッジから剥離した流れが再付着する車体下面での変動が大きくなっている。また、台車カバー外表面や台車キャビティ部後方の変動も大きくなっているのが分かる。さらに、台車キャビティ前縁部から発生したせん断層にさらされる台車の各部位(車輪や機器類)の圧力変動が大きくなっており、全体的に台車部の広い範囲から空力騒音が発生していることが予想される。一方(b)は先頭車と中間車の車間部の圧力変動であるが、先頭部に比べて全体的に圧力変動は小さくなっている。これは、図8からも分かるように車体床下の流速が先頭部に比べて遅くなっているためと考えられる。ただし、新幹線の車間部は1編成に複数あり(例えば8両編成のefSET®の場合は7箇所)、空力騒音低減のためには車間部の対策も必要であると言える。

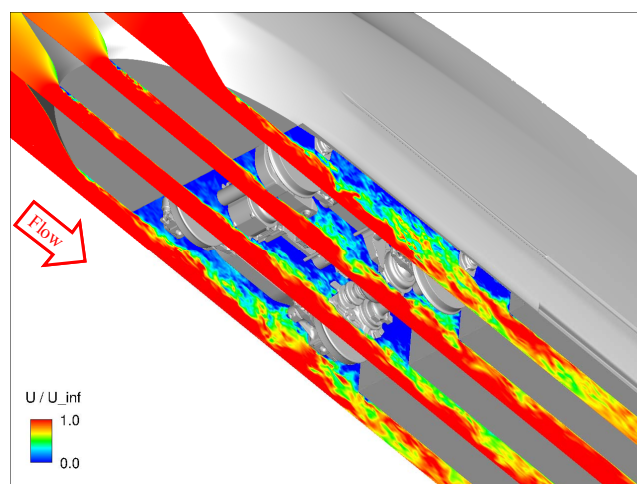
図3に示すPA, PB, PCの各位置における車体表面の音圧レベルを図12に示す。PAは先頭車前方台車の台車カバー外表面、PBは先頭車前方台車のキャビティ後端面、PCは先頭車後方台車のキャビティ後端面である。全ての位置において、特に目立った周波数での圧力変動が大きい訳ではなく、ブロードバンドのノイズとなっている。また、格子が細くなるにつれてより高い周波数でのレベルが大きくなっている。Coarse格子とMedium格子を比べると、実車スケールで25mmセルのCoarse格子では概ね100HzまでMedium格子の結果と一致している。さらにMedium格子とFine格子を比べると、12.5mmセルのMedium格子では概ね200HzまでFine格子の結果と一致しており、格子幅が半分になると2倍の周波数まで捉えられることが分かる。以上から、実車スケールで6.25mmセルのFine格子では概ね400Hzの音の発生まで捉えられていると推測できる。今回は時間1次精度で解析したが、時間2次精度で解析することでさらに約2倍の周波数まで捉えられることが、筆者らの過去の研究で分かっている<sup>(10)</sup>。ただし、時間2次精度は物理時間1ステップあたりに10回程度の反復計算を行うため、解析コストが大きいのが課題である。

次に、台車部からの音の伝播の様子を確認するために、先頭部台車断面(位置は図6(c)参照)における400Hzでの音圧レベル分布を可視化し、各格子を比較した結果を図13に示す。台車部からの400Hzの音は左右対称に伝播しており、指向性は側方であることが分かる。また、格子が細くなるにつれて、遠方へ伝播する音のレベルが大きくなっている。海外においては、新幹線のよう

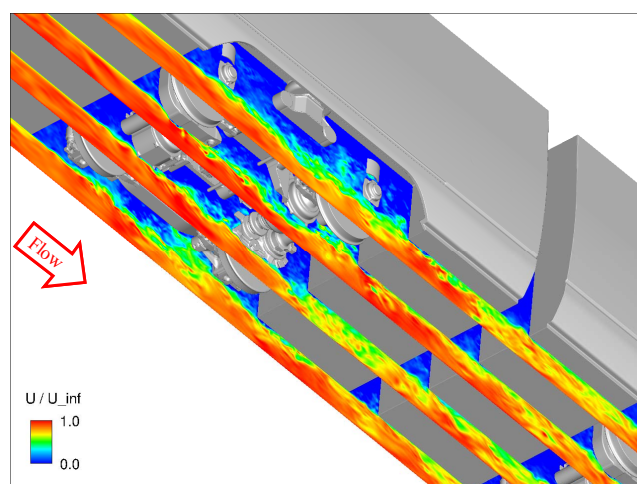
な専用軌道や防音壁が必ずしも設置されている訳ではないため、車両下部からの詳細な騒音源特定とその部位の低騒音化が必要となる。

最後に、Fine格子におけるバンドパスフィルター処理を施した瞬時圧力変動分布を図14に示す。バンドパスフィルターにより同時刻の400Hzと200Hzの圧力変動を抽出して可視化した結果である。断面位置は図13と同じ先頭部台車断面である。この図(a)からも400Hzの音は側方に指向性を持っていることが分かる。ただし、この瞬間の音の伝播は左右非対称であることから、放射される音の強さが時々刻々と変化していることが予想される。また、(b)から200Hzの音についても主な指向性は側方であることが分かるが、(a)の400Hzに比べるとやや上方にも伝播していることが確認できる。

今回は主に近傍場騒音の評価を実施したが、最終的には更なる高速化による環境負荷低減に向けて、遠方評価点での騒音評価や騒音低減対策を行うことが目的である。これまでに筆者らが実施したパンタグラフ単体の解析<sup>(14)</sup>では、遠方場騒音評価の際にFWHによる伝播解析を用いており、本解析に対しても適用するつもりである。ただし、今回のような3両編成の長い車両に対してはFWHによる伝播解析の計算コストが大きくなってしまおうが課題である。

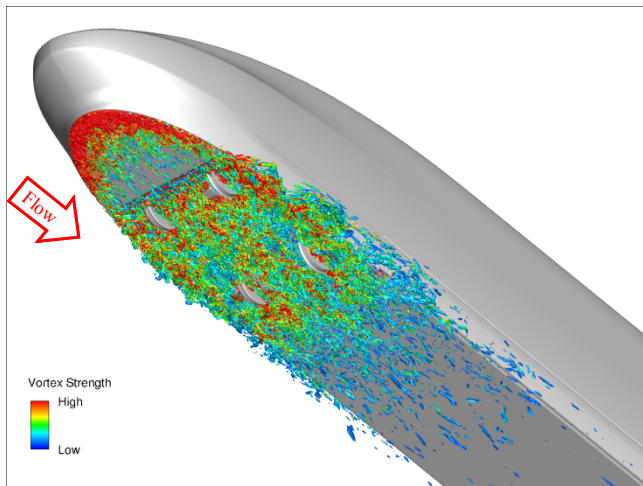


(a) head part of car No. 1

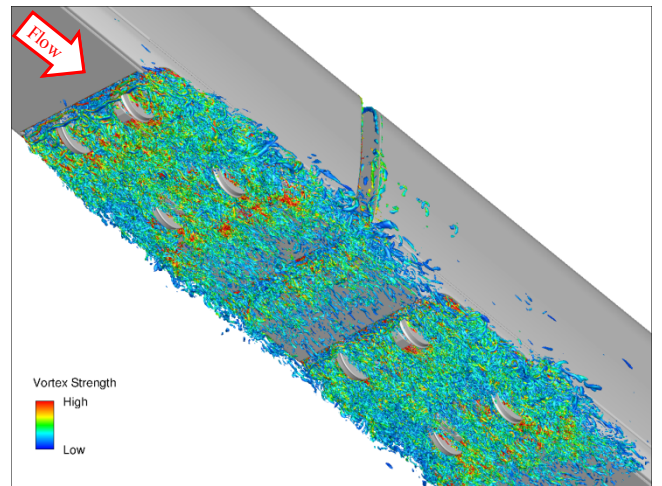


(b) between car No. 1 and car No. 2

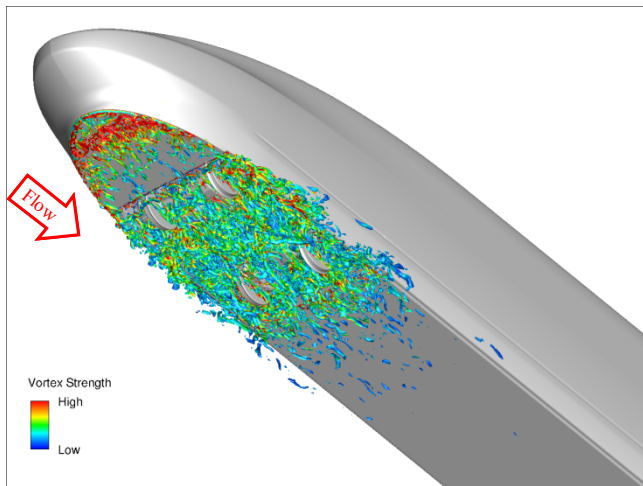
Fig. 8 Distributions of streamwise velocity (Fine grid).



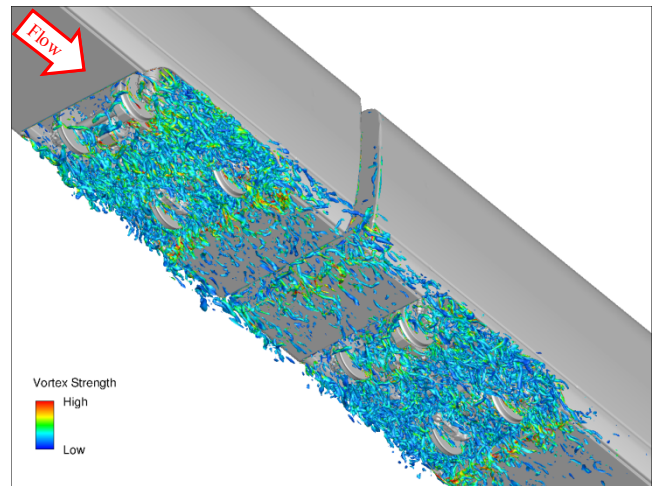
(a) Fine grid



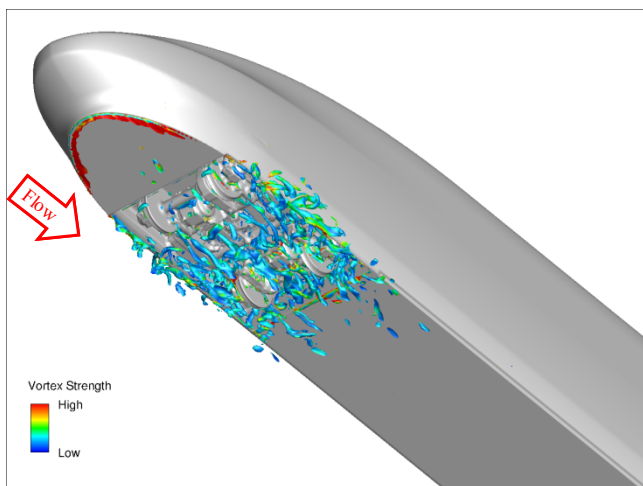
(a) Fine grid



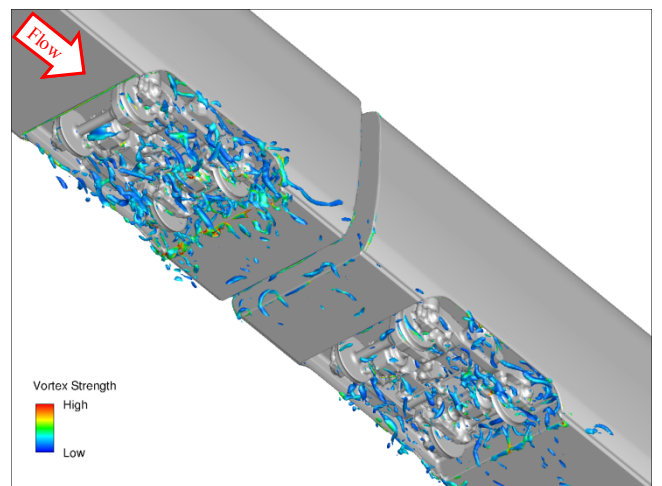
(b) Medium grid



(b) Medium grid



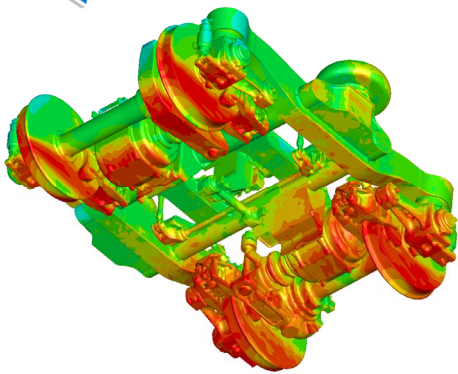
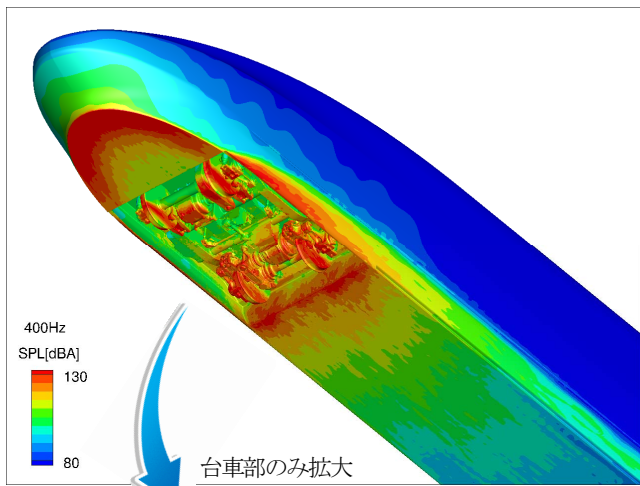
(c) Coarse grid



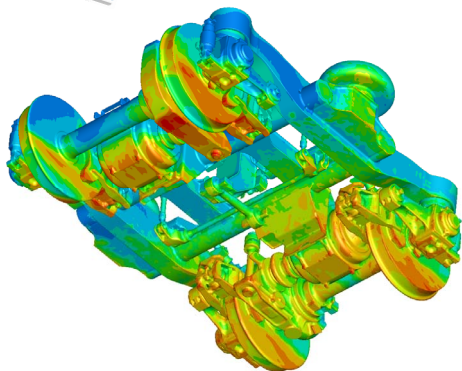
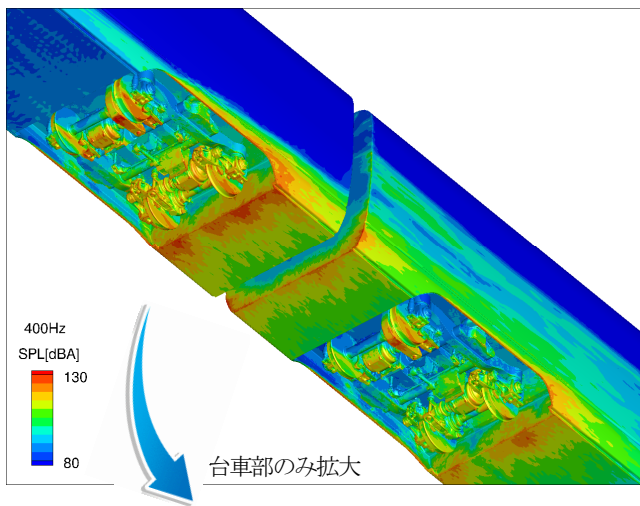
(c) Coarse grid

Fig. 9 Iso-surface of  $\lambda_2$  colored by vorticity magnitude (head part of car No. 1).

Fig. 10 Iso-surface of  $\lambda_2$  colored by vorticity magnitude (between car No. 1 and car No. 2).

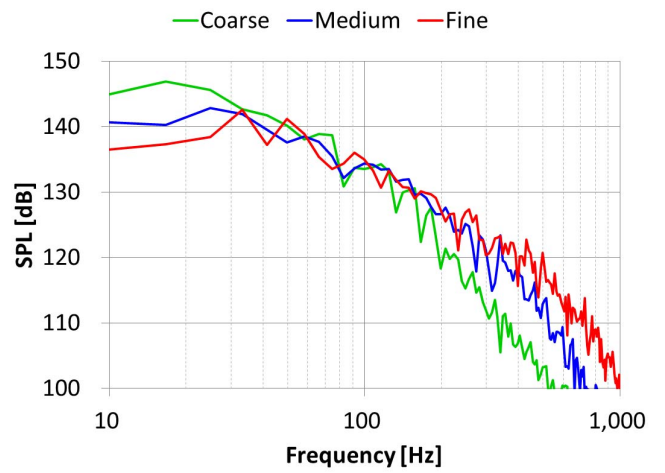


(a) head part of car No. 1

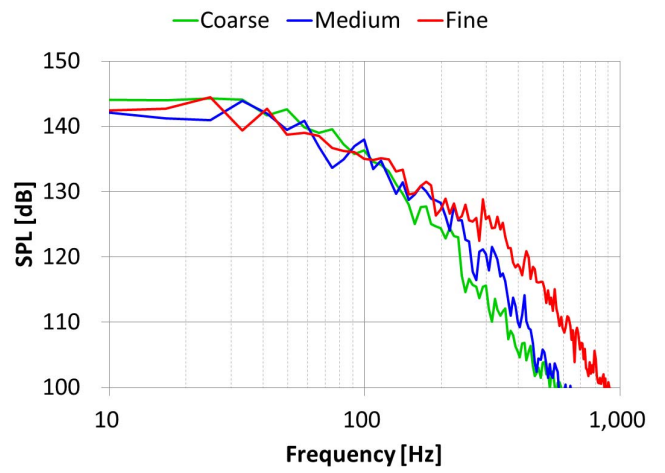


(b) between car No. 1 and car No. 2

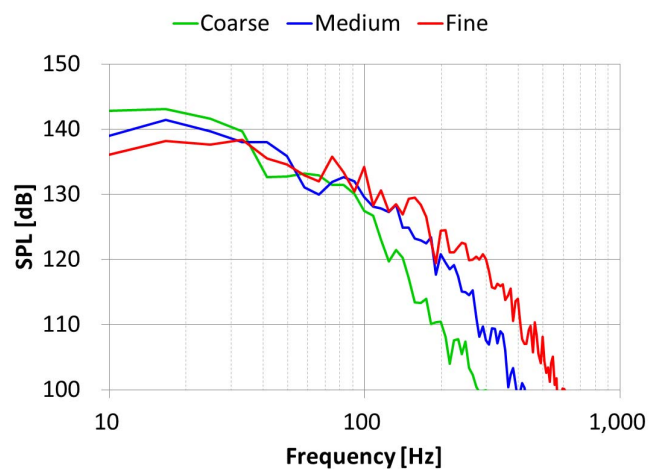
Fig. 11 Surface distributions of SPL at 400 Hz (Fine grid).



(a) outer surface of 1st bogie cover (PA)



(b) rear surface of 1st bogie cavity (PB)



(c) rear surface of 2nd bogie cavity (PC)

Fig. 12 SPL on the surface.

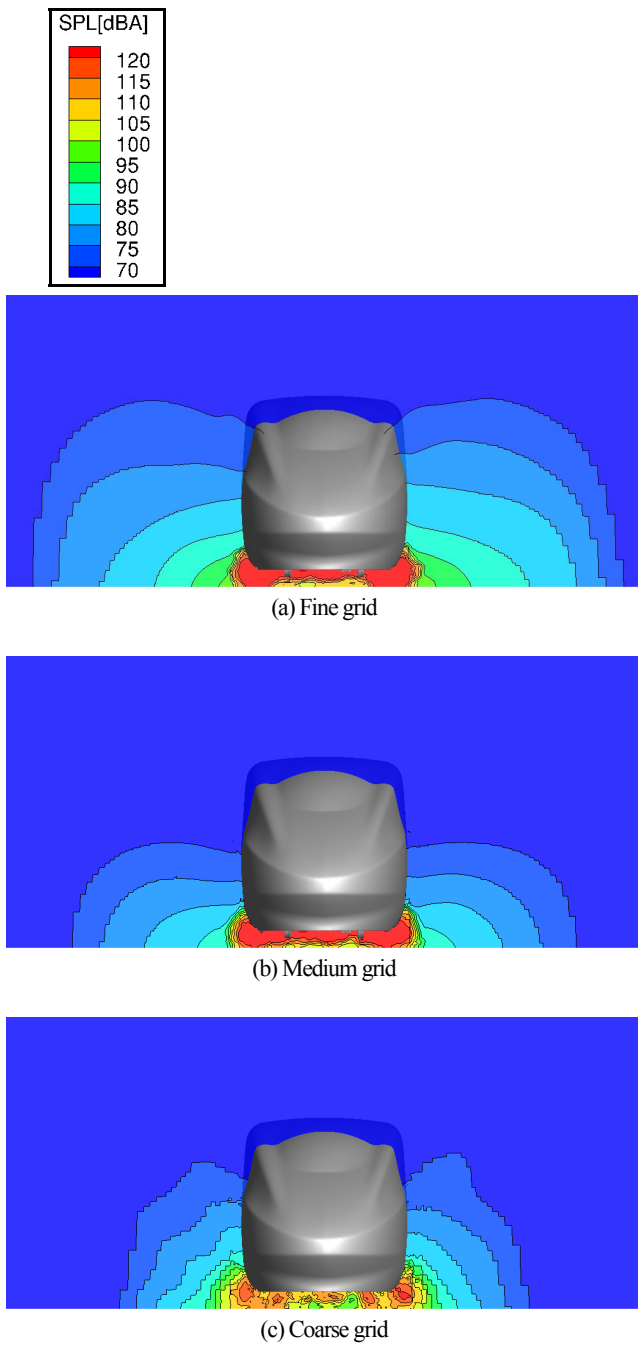


Fig. 13 Distributions of SPL at 400 Hz.

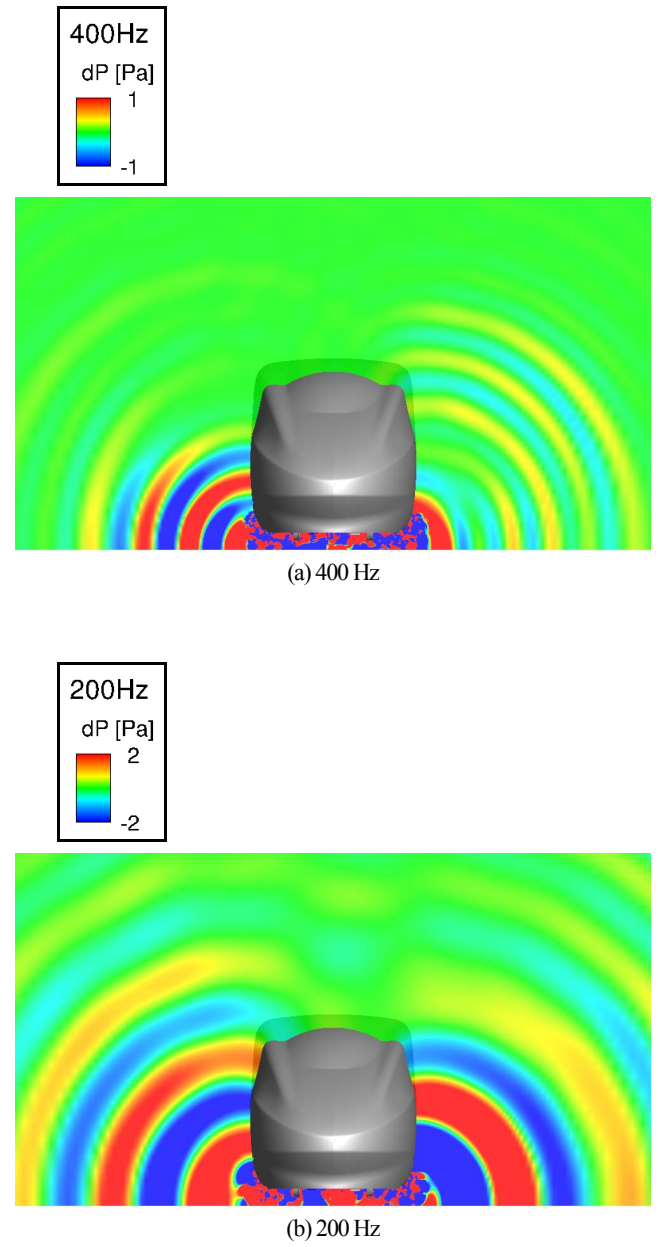


Fig. 14 Filtered pressure fluctuation (Fine grid)

#### 4. efSET®のトンネル突入解析

##### 4. 1. 解析条件

Cflow はスライディングメッシュの機能を有している。過去に新幹線のトンネル突入解析に適用し精度検証を行った結果、微気圧波を精度良く解析できることが分かった<sup>(2), (3)</sup>。今回は、efSET®のトンネル突入解析を実施し、軌道の違いによる微気圧波の影響を調査した。解析は実車スケールで実施し、efSET®は 12 両編成で全長は 302.8m である。efSET®の走行速度は 350km/h (=97.2m/s) とした。軌道を表すパラメータは、トンネル明かり区間の盛土と高架の二つとした。またトンネル長 (2km と 4km) の違いについても調査した。トンネルはスラブ軌道で入口・出口共に緩衝工は設置していない。解析ケースは表 4 に示す 4 ケースである。

図 15 に解析領域を示す。トンネル入口側と出口側のそれぞれの解析領域は半径 100m、長さ 550m の半円柱とした。図 16 にそれぞれの軌道の解析モデルを示す。盛土の高さは 1.23m、高架の高さは 10m である。トンネル入口と出口それぞれから 50m 内側に山を模擬した壁面を配置した。

トンネル入口断面の計算格子を図 17 に示す。青色のトンネル格子は GUI 上で作成した。赤色の efSET®まわりの格子は、GUI 上で作成した初期格子を用いて Cflow で自動生成 (AMR による細分割と層状格子の作成) した。赤色の格子と青色の格子の境界がスライド面で、各時間ステップで物理量のやりとりを行う。各ケースの解析に用いた格子の空間セル数を表 5 に示す。

解析は時間 1 次精度で実施し、時間刻みは  $5.88 \times 10^{-5}$  [sec] とした。乱流モデルは Spalart-Allmaras (Unsteady RANS) モデルを用いた。まず定常解析により efSET®まわりの流れ場を形成させた後、格子を移動させて非定常解析を実施した。計算機はスーパーコンピュータ「京」256 ノード (2048 core) を使用した。解析コストは、ケース 1 について物理時間 1sec 分の解析に 4.3 時間要した。

Table 4 Computational cases.

Case No.	Track bed	Tunnel length
1	embankment	2 km
2	elevated railroad	2 km
3	embankment	4 km
4	elevated railroad	4 km

Table 5 Number of cells.

Case No.	Total	Train	Tunnel
1	54 million	16 million	38 million
2	58 million	16 million	42 million
3	74 million	19 million	55 million
4	78 million	19 million	59 million

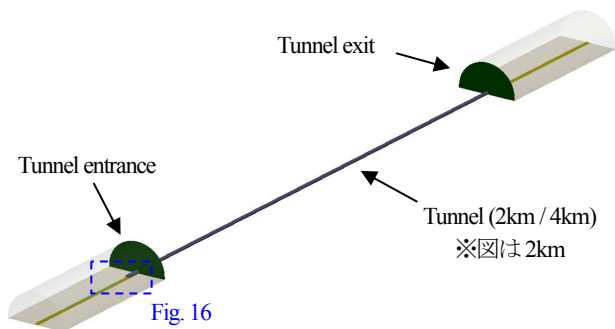
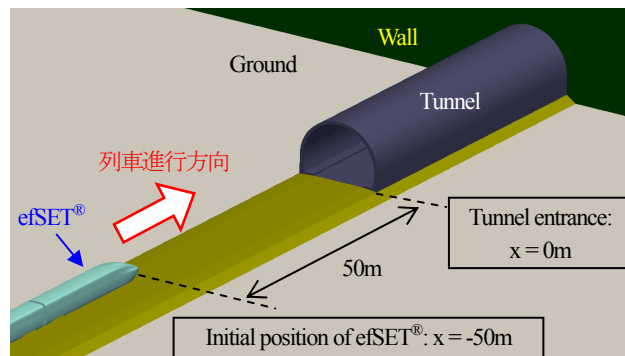
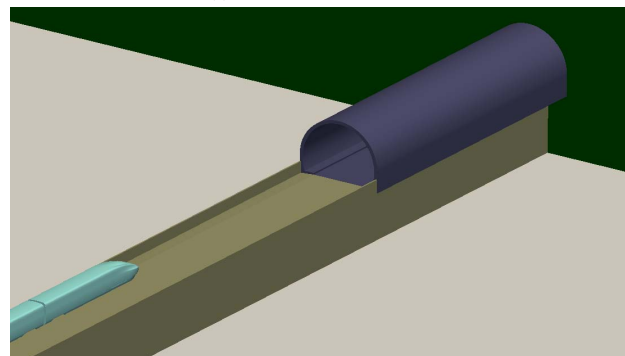


Fig. 15 Computational region.

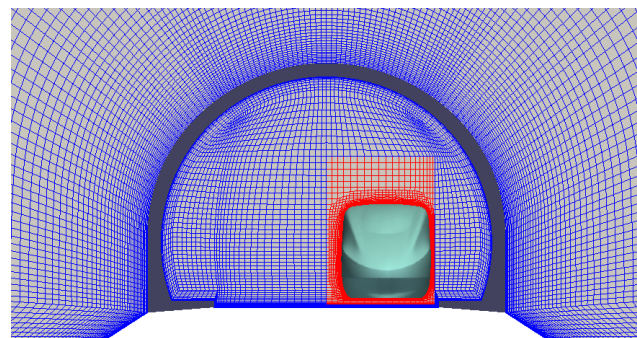


(a) embankment (盛土)

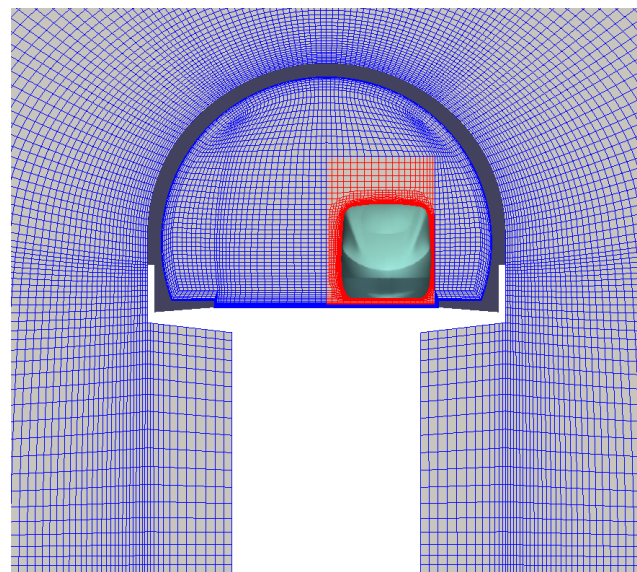


(b) elevated railroad (高架)

Fig. 16 Computational model (track bed).



(a) embankment (盛土)



(b) elevated railroad (高架)

Fig. 17 Grid cross section.



#### 4. 2. 解析結果

図 18 にトンネル中心 (Case 1, 2 はトンネル入口から 1km 地点, Case 3, 4 はトンネル入口から 2km 地点) の内壁での圧力時歴を示す。横軸は車両先頭がトンネル入口に突入してから時間である。一部のケースはまだ計算中のため、グラフが途中までになっている。

図中の①は、車両先頭がトンネル入口に突入した際に発生する圧縮波が音速で伝播してきたことによる圧力上昇である。その後②で圧力が低下するのは、車両後尾が突入した際に発生する膨張波の影響である。さらに、③では最初に発生した圧縮波がトンネル出口で反射し、膨張波となって戻ってきたことにより圧力低下が生じている。④での圧力低下は、車両先頭がトンネル中心を通過したことによるものである。このようにトンネル内では圧縮波と膨張波が往復し、さらには車両自体も通過することで複雑な圧力変動が生じていることが分かる。また、トンネル内圧力変動に対する盛土と高架の軌道の影響は小さい。

図 19 は、各ケースにおいてトンネル出口での微気圧波の伝播を可視化した結果である。地面や壁面の物理量は圧力変動値であり、空間に+20Pa の等値面も同時に示している。時刻  $t$  [sec] は車両先頭がトンネル入口に突入してから時間である。

盛土の結果では微気圧波が半球面上に伝播し、高架の結果では地面がトンネルよりも 10m 下方にあるためにより球面波に近い形で伝播しているのが分かる。よって、高架の方が盛土に比べて伝播する微気圧波が小さくなっている。また、高架では微気圧波が防音壁に反射するため、伝播の様子が複雑になっているのが確認できる。トンネル長 2km の結果 (Case 1 と 2) において、 $t=6.068$  [sec] の結果を見ると、微気圧波が壁面に反射している様子も確認できる。

トンネル長の影響を比較すると、トンネル長 4km の結果 (Case 3 と 4) は 2km の結果 (Case 1 と 2) に比べて、スラブ軌道トンネル内を圧縮波が伝播する過程で圧力勾配がより大きくなるため、放射される微気圧波も大きくなっている。

トンネル出口から真横に 25m 離れた地点で観測した圧力時歴を図 20 に示す。(a) はレール上面相当の高さ ( $z=0$  [m]) での観測結果であり、盛土と高架でトンネル出口からの相対距離は同じである。一方 (b) は地面での観測結果であり、高架の方がトンネル出口からの相対距離は長い。グラフの横軸は車両先頭がトンネル入口に突入してから時間である。

車両先頭がトンネルに突入した際に発生する圧縮波が、2km のトンネルでは 5.9 秒後に、4km のトンネルでは 11.8 秒後に微気圧波となって伝わってきている (図中①)。図中に②で示した圧力上昇は、微気圧波が壁面に反射して戻ってきたことによるものであり、実際の山のような地形ではより減衰すると思われる。③の圧力低下は、微気圧波が計算領域の外部境界で非物理的に反射してきたことによるものである。現状の解析でも微気圧波のピーク値評価に影響は無いが、計算領域をさらに広く設定することでこの非物理的な圧力反射の影響を抑えることができると考えている。

トンネル長が同じ盛土と高架の結果を比べると、高架は盛土に比べて微気圧波の大きさが小さいことが分かる。また、トンネル長 2km に比べて 4km の方が、前述の理由により微気圧波が大きくなり、今回の解析から盛土では約 40Pa 大きくなることが分かった。

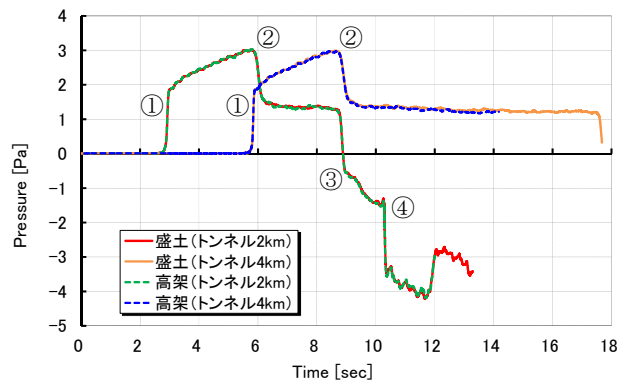


Fig. 18 Time history of pressure on the tunnel wall (tunnel center).

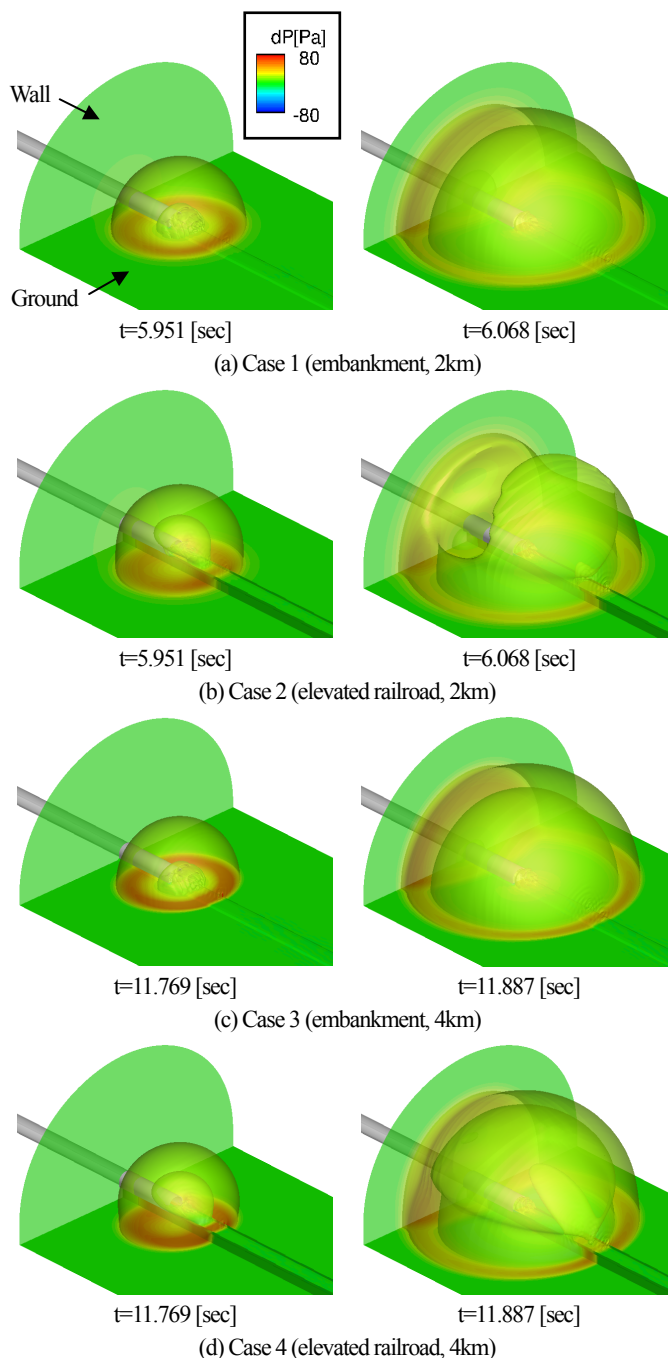
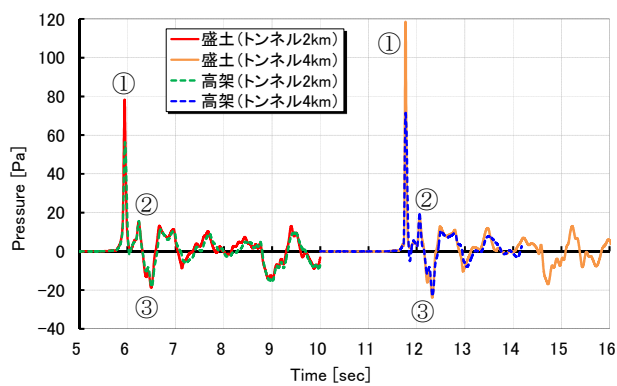
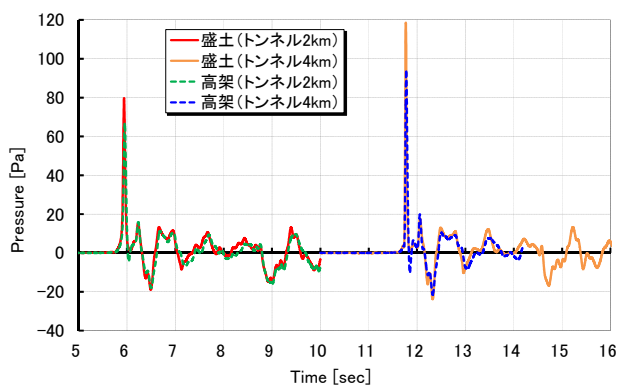


Fig. 19 Visualizations of micro-pressure wave.

(a)  $z=0$  [m] (レール上面高さ)

(b) on the ground

Fig. 20 Time history of pressure at far-field observation points.

## 5. まとめ

当社が開発した CFD 解析ソフト「Cflow」を、高速鉄道車両 efSET<sup>®</sup>の実車スケールでの空力騒音解析やトンネル突入解析に適用した。

空力騒音解析では、台車部から発生する下部空力騒音を評価した。得られた結果は下記の通りである。

- 台車部から発生する空力騒音はブロードバンドノイズであり、車体床下の気流にさらされる部位（車輪や機器類）や台車キャビティ等の広い範囲から空力騒音が発生している。
- 台車部のセル幅が25mmの格子（総セル数0.3億）では100Hzまでの音の発生を捉えることができ、台車部のセル幅が半分の12.5mmの格子（総セル数1.7億）では200Hzまでの音の発生を捉えることができた。よって、台車部のセル幅が6.25mmの格子（総セル数8.3億）では400Hzの音の発生まで捉えられていると推測できる。
- 台車部から発生する400Hzの音は左右対称に伝播しており、指向性は側方であることが分かった。

今後は、遠方場の騒音評価や低騒音化設計を行う予定である。

トンネル突入解析では、軌道やトンネル長の違いによる微気圧波の影響を調査した。得られた結果は下記の通りである。

- 放射される微気圧波の大きさは、盛土に比べて高架の方が小さいことが分かった。
- スラブ軌道トンネル内を圧縮波が伝播する過程で圧力勾配がより大きくなるため、長いトンネルの方が放射される微気圧波も大きくなる現象を解析でも捉えることができた。
- トンネル出口側の計算領域が狭いために、外部境界で非物理的な圧力反射が発生した。ただし、微気圧波のピーク値評価への影響は無く、計算領域を改良することでこの非物理的な圧力反射を低減できると考えている。

今後は、計算領域の再設定を行うと共に、より実際に近い地形（山や住宅）を用いた解析を実施し、実車開発に適用する予定である。

## 謝辞

本論文の結果は、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ある（課題番号：hp150059）。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- (1) Ueno, Y., Ochi, A., Hayama, K., and Sasaki, T., "Prediction of Aeroacoustic Noise around High-speed Train using Unsteady CFD Analysis," Inter-Noise, Osaka, 2011.
- (2) 上野, 越智, 葉山, 佐々木, "高速鉄道車両の空力騒音解析及びトンネル内すれ違い解析," 第27回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (2013)
- (3) 佐々木, 上野, 越智, 葉山, "高速鉄道車両の非定常流れ場に適用した自社開発 CFD ソフトの精度検証," 第20回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2013) 講演論文集 (2013)
- (4) 佐々木, 越智, 上野, "「京」による高速鉄道車両の空力騒音シミュレーション," 第22回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2015) 講演論文集 (2015)
- (5) 越智, 上野, 葉山, "高次精度 CFD 解析の航空機脚まわりの非定常流れ場に対する検証," 日本航空宇宙学会論文集, Vol.59, No.684, pp.7-15, 2011.1
- (6) 越智, 上野, 永田, "非直交八分木格子と境界適合格子を組み合わせた CFD ソフトの開発," 第27回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (2013)
- (7) Nagata, T., Ueno, Y., and Ochi, A., "Validation of new CFD tool using Non-orthogonal Octree with Boundary-fitted Layer Unstructured Grid," AIAA Paper 2012-1259, 2012.
- (8) 永田, 上野, 越智, "Cflow による NASA-CRM の空力解析," 第53回飛行機シンポジウム講演論文集 (2015)
- (9) Ueno, Y., Nagata, T., Ochi, A., and Hayama, K., "Aeroacoustic Analysis of the Rudimentary Landing Gear Using Octree Unstructured Grid with Boundary-fitted Layer," AIAA Paper 2012-2284, 2012.
- (10) 上野, 永田, 越智, 葉山, "境界適合非構造格子を用いた航空機ランディングギアの空力騒音解析," 第45回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム 2013 講演論文集 (2013)
- (11) Berger, M. J. and Colella, P., "Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics," *J. Computational Physics*, Vol. 82, Issue 1, pp. 64-84, May 1989.
- (12) 嶋, "構造/非構造格子 CFD のための簡単な陰解法," 第29回流体力学講演会講演論文集 (1997)
- (13) 嶋, "AUSM 族全速度スキームと前処理付き陰解法," 第22回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (2008)
- (14) Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M., Squires, K., Strelets, M., and Travin, A., "A New Version of Detached-eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities," *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 20, pp. 181-195, 2006.
- (15) 栗山他, "海外対応新型高速鉄道車両 efSET<sup>®</sup>," 川崎重工業技報, 170号, pp.10-15, 2010.2
- (16) Jeong, J. and Hussain, F., "On the identification of a vortex," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 285, pp. 69-94, 1995.