

地形と家屋を考慮した在来線特急および高速鉄道車両のトンネル微気圧波解析

Tunnel Micro-pressure Wave Simulations of Limited Express and High-speed Train with Landforms and Houses

- 上野陽亮, 川崎重工 航空宇宙システムカンパニー, 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
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
Takashi Sasaki, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., 2-1-18, Wadayama-dori, Hyogo-ku, Kobe, Hyogo

A micro-pressure wave is one of the main issues for the development of limited express as well as high-speed train. In order to evaluate the magnitude of the micro-pressure wave, high-fidelity three-dimensional CFD simulations are performed for a train entering a tunnel with considering real landforms and houses using an unstructured Navier-Stokes flow solver, Cflow, which has been developed at Kawasaki Heavy Industries (KHI). The effect of landforms and houses on the prediction of the micro-pressure wave is discussed in this paper. As for the limited express, computations including three consecutive tunnels are conducted and the results of two types of train nose shape are compared.

1. はじめに

鉄道車両システムは、他の輸送機器よりも CO₂ 排出量が少ない地球環境に優しい効率的な大量輸送手段である。その一方で、走行時には振動・騒音等の環境問題を沿線周辺に及ぼす可能性がある。ゆえに、鉄道車両システムの開発において沿線周辺環境を維持・向上することが極めて重要であり、特に近年の新幹線高速化や海外での高速鉄道導入機運の高まりに伴い、空力音やトンネル微気圧波への対策は必須の技術課題となっている⁽¹⁾⁽⁴⁾。

走行時に生じる騒音には、パンタグラフ等からの空力音（風切音）やレールからの転動音がある。空力音は速度の約 6 乗に比例して増大するため、速度向上に伴い、速度の約 3 乗に比例する転動音と比較してその寄与は大幅に増大する。

また、鉄道車両が高速でトンネルに突入する際には、トンネル内外での圧力変動が問題になる。トンネル突入時に発生した圧縮波がトンネル内を伝播し、トンネル出口から微気圧波として放射される。トンネル微気圧波はトンネル突入速度の 3 乗に比例するため、速度向上に伴い、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。トンネル内の圧力変動は車体の振動を引き起こす可能性がある。

よって、空力騒音やトンネル内外の圧力変動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。

空力騒音について筆者らはこれまでに、自社開発 CFD 解析ソフト「Cflow」を用いて、海外仕様の高速用パンタグラフや高速鉄道車両の台車部等から発生する空力騒音解析を実施し、シミュレーションによる高精度な騒音予測技術を構築してきた⁽⁴⁾⁽⁷⁾。この技術を活用して実車の騒音発生メカニズムの解明や低騒音化設計を行っている。

トンネル内外の圧力変動について筆者らは過去に、「Cflow」を用いてトンネル突入解析を実施し、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⁽⁶⁾。また、スーパーコンピュータ「京」を利用して、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⁽⁶⁾。さらに解析精度を向上させるために、実際の地形を考慮し、車両先頭形状の違いやトンネル入口緩衝工の有無による微気圧波への影響を調査した⁽⁷⁾。

本論文では、地形に加えて家屋を考慮した高速鉄道車両のトンネル突入解析結果を示し、地形や家屋を考慮しない解析結果との比較により、それらが微気圧波へ及ぼす影響について議論する。

また高速鉄道車両のみならず、在来線特急においても速度向上に伴いトンネル微気圧波の問題が顕在化する。特に、単線トンネルの場合には、トンネル断面積に占める車両断面積の割合が大きくなり、また在来線の先頭部は切り落とし形状に近いことから、トンネル微気圧波が大きくなることが予想される。そこで、地形と家屋を考慮した在来線特急の 3 連続トンネルへの突入解析を実施し、2 種類の車両先頭形状における微気圧波の違いを評価したので、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」を開発した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。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⁽⁴⁾⁽¹⁴⁾。

Cflow の格子は、AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法⁽¹⁵⁾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⁽¹⁰⁾。

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 ⁽¹⁶⁾ |
| Spatial discretization | Cell-centered finite volume method MUSCL with modified Green-Gauss + SLAU ⁽¹⁷⁾ 2 nd -order central difference (viscous term) |
| Turbulence model | Spalart-Allmaras (S-A) Detached-Eddy Simulation (DES) Delayed DES (DDES) ⁽¹⁸⁾ |
| Parallelization | Domain decomposition method with MPI |

3. efSET®のトンネル微気圧波解析

3. 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おり、これまでに高速鉄道車両のトンネル突入解析やすれ違い解析に適用し、精度検証を行ってきた⁽⁵⁾。検証結果から、Cflow を用いて微気圧波を精度良く解析できることが分かっている。

今回は、過去に実施した実地形を考慮したトンネル突入解析⁽⁷⁾に対して、家屋を追加してより実環境に近い状況を模擬した解析を行った。解析対象車両は、図 1 に示す自社開発の海外向け新型高速鉄道車両 efSET^{®(19)} である。文献(7)と同様に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[®] の走行速度も文献(7)と同じ 350km/h (=97.2m/s) とした。

図 2 に解析領域を示す。解析モデルは高架軌道であり、レールは模擬していない。また、トンネル入口側にも出口側にも微気圧波低減のための緩衝工は設けていない。トンネル出口側は、山や海といった実際の地形に加えて家屋を考慮した。地形データは国土地理院のホームページ⁽²⁰⁾ からダウンロードした。家屋は手作業でモデル化した。地形や家屋が微気圧波の評価に与える影響を調べるために、地形や家屋を考慮しない解析も行った。比較する解析ケースを表 2 に示す。ケース 2 は文献(7)に示したものである。図 3 にトンネル出口側の解析モデルを示す。

地形や家屋の表面格子を図 4 に示す。また、トンネル入口断面と出口断面の計算格子を図 5 に示す。GUI 上で作成した列車格子(赤色)とトンネル格子(青色・緑色)それぞれの初期格子から、列車形状や地形を STL ファイルで入力し、Cflow で自動格子生成(AMR による細分割と層状格子の作成)した。各色の格子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 3 に示す。

解析は文献(7)と同様に時間 2 次精度で実施し、時間刻みは 5.88×10^{-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。

Table 2 Computational cases.

| Case No. | Landforms | Houses |
|----------|-----------|---------|
| 1 | Without | Without |
| 2 | With | Without |
| 3 | With | With |

Table 3 Number of cells.

| Case No. | Total | Train | Tunnel |
|----------|------------|------------|------------|
| 1 | 75 million | 16 million | 59 million |
| 2 | 65 million | 16 million | 49 million |
| 3 | 70 million | 16 million | 54 million |



Fig. 1 efSET[®] (environmentally friendly Super Express Train).

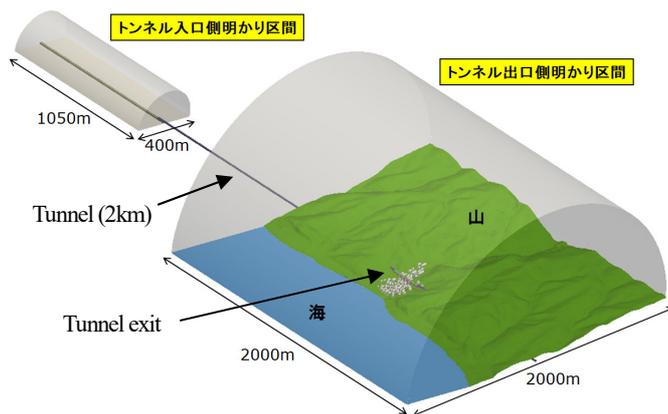
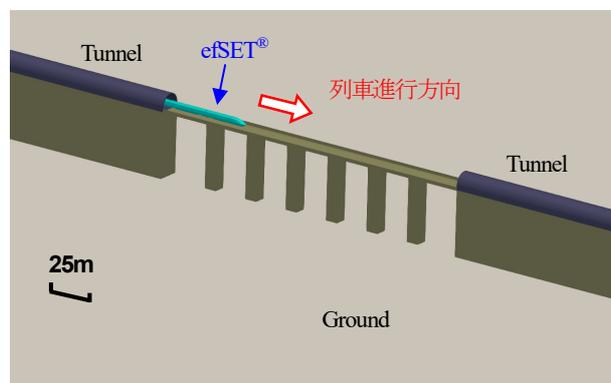
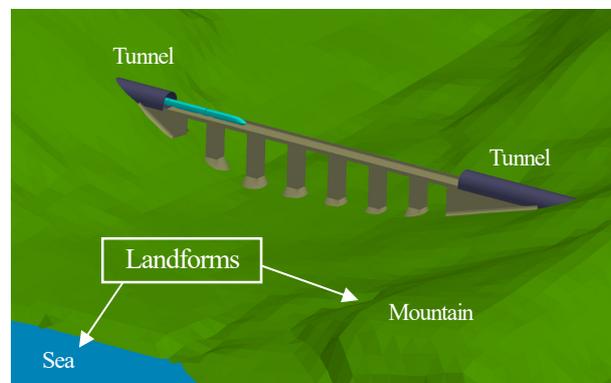


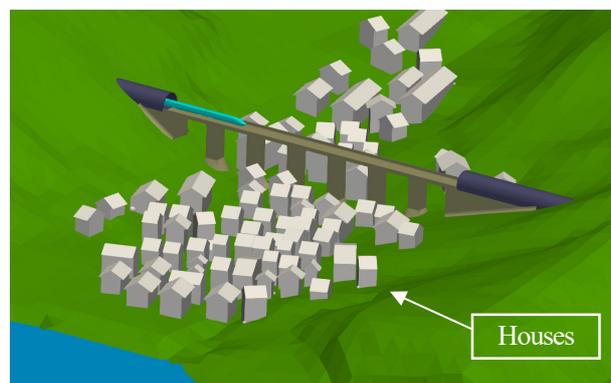
Fig. 2 Computational region (Case 3).



(a) Case 1: without Landforms



(b) Case 2: with Landforms



(c) Case 3: with Landforms and Houses

Fig. 3 Computational model of tunnel exit.

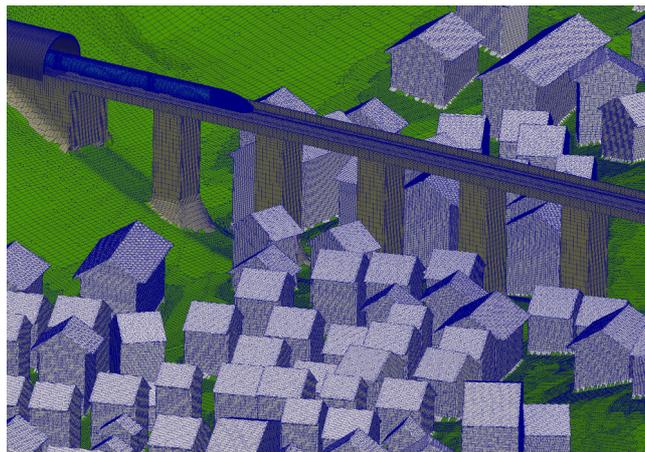
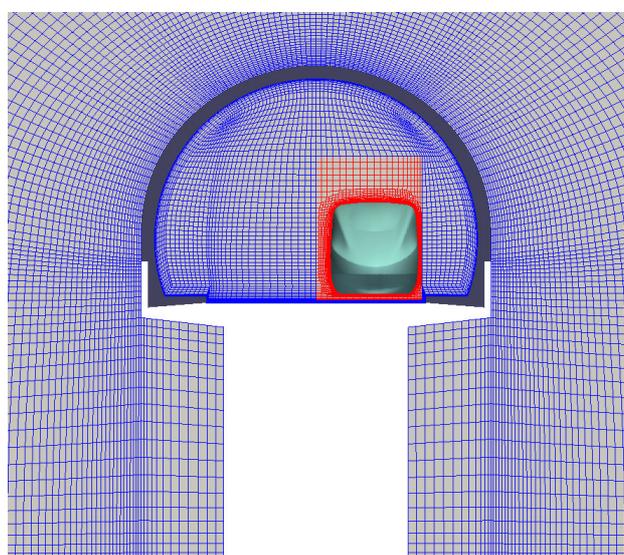
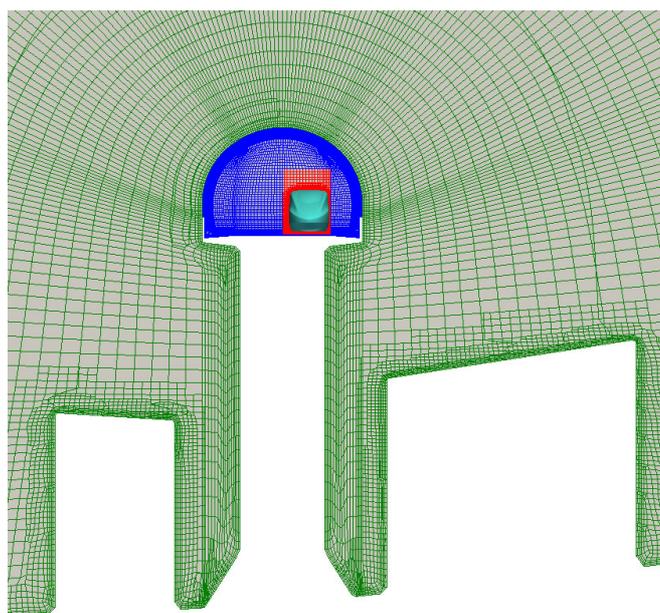


Fig. 4 Surface mesh (Case 3).



(a) Tunnel entrance



(b) Tunnel exit

Fig. 5 Grid cross section.

3. 2. 解析結果

各ケースにおける微気圧波の観測結果を図 6 に示す。観測点はトンネル出口から側方に 25m 離れた地点であり、高さはレール上面相当である。横軸の時間 t [sec] は車両先頭がトンネル入口に突入してからの時間である。Case 1 の地形なしと Case 2 の地形ありを比較すると、地形の影響で微気圧波ピークが約 3% 大きくなっている。一方で Case 2 の家屋なしと Case 3 の家屋ありを比べると、微気圧波ピークの値は変わらず、家屋の影響は小さいことが分かる。これはトンネル出口から観測点までに家屋が無いためである。地面や家屋での反射の影響を受ける時刻 $t=6$ [sec] 以降の波形を見ると、いずれのケースも圧力変動の様子が異なっていることが分かる。

図 7 に時刻 $t=9$ [sec] の瞬時圧力変動分布を示す。図には圧力変動が 20Pa の等値面も描いている。図 7(a) の地形なしの結果を見ると、高架直下では柱の影響を受けて微気圧波が高い領域が形成されている。また、図 7(a) の地形なしに比べて図 7(b) の地形ありの結果は、地形（傾斜）の影響により列車進行方向へ伝わる微気圧波が強くなっているのが分かる。図 7(c) の家屋ありの結果では、家屋の影響により 20Pa の等値面の形状が崩れており、微気圧波が複雑に反射している様子が伺える。

地形や家屋の影響をより定量的に評価するために、図 8 に示すトンネル出口から半径 25m, 50m, 100m 地点での地表面の微気圧波ピーク値を抽出した。その結果を図 9 に示す。

図 9(a) の 25m 地点での結果を見ると、Case 1 に比べて Case 2 や Case 3 の地形を考慮した場合の微気圧波が大きくなっていることが分かる。これは、地形の存在により、トンネル出口との距離が近くなったためと考えられる。また、Case 1 の地形なしでは $\theta > 0$ と $\theta < 0$ で対称であるのに対して、Case 2 と Case 3 は地形の影響を受けて非対称になっている。Case 1 の地形なしの結果から、微気圧波の大きさは列車進行方向に大きくなり指向性を持っていることも分かる。さらに、トンネル出口から 25m 観測点までは家屋が存在しないことから、Case 2 と Case 3 は同等の結果となっている。

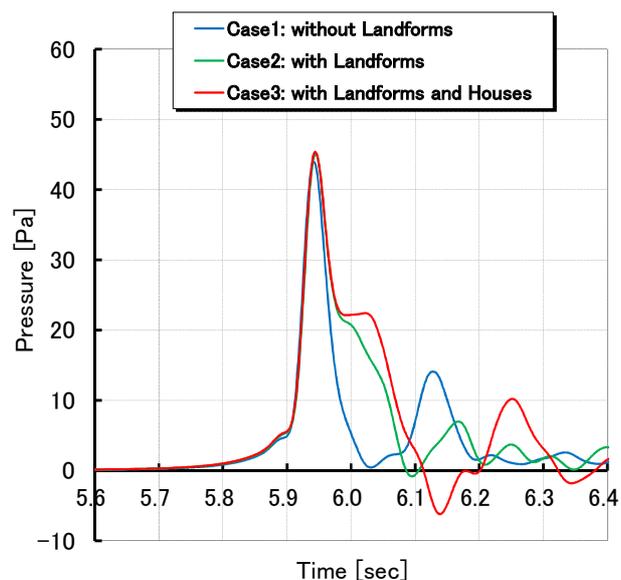
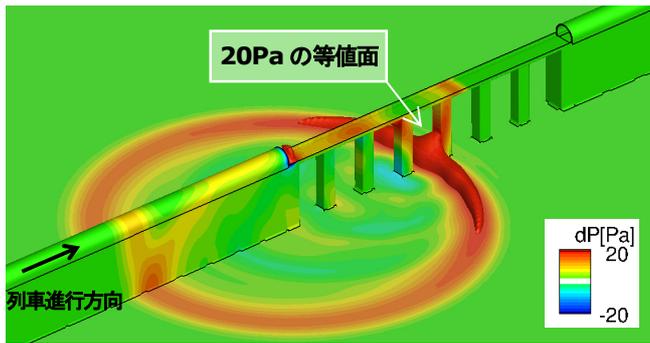
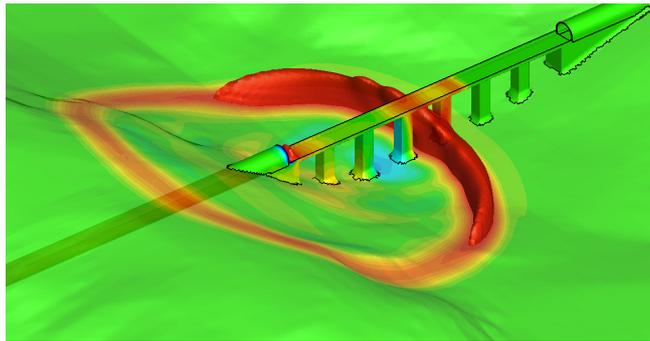


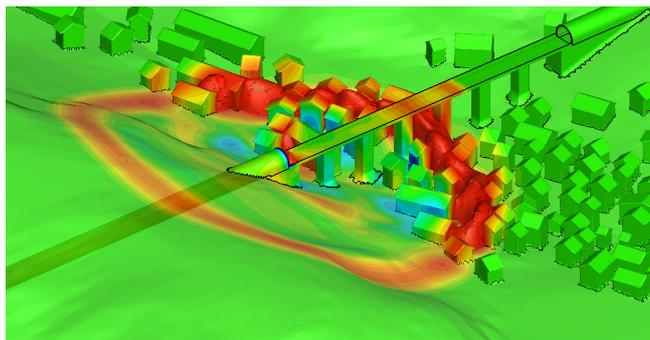
Fig. 6 Time history of pressure at far-field observation point.



(a) Case 1: without Landforms



(b) Case 2: with Landforms



(c) Case 3: with Landforms and Houses

Fig. 7 Instantaneous surface pressure fluctuation.

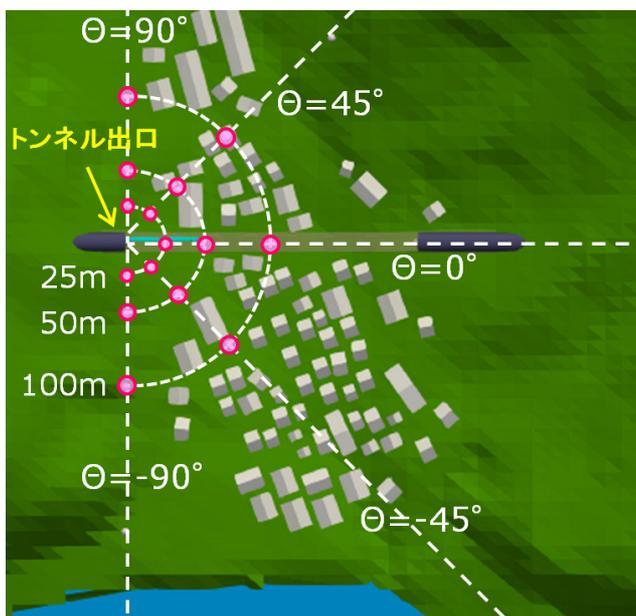
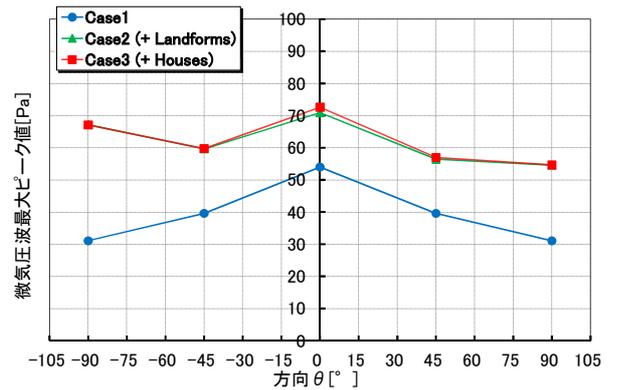


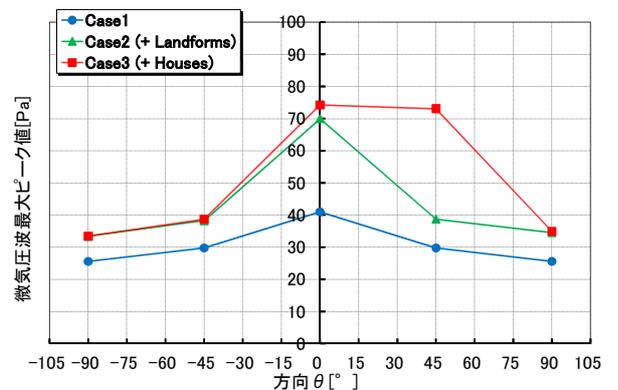
Fig. 8 Measuring points on the ground.

図 9(b)の 50m 地点や図 9(c)の 100m 地点での結果を見ると、家屋の影響を受けて、Case2 と Case3 の微気圧波の大きさに違いが見られる。

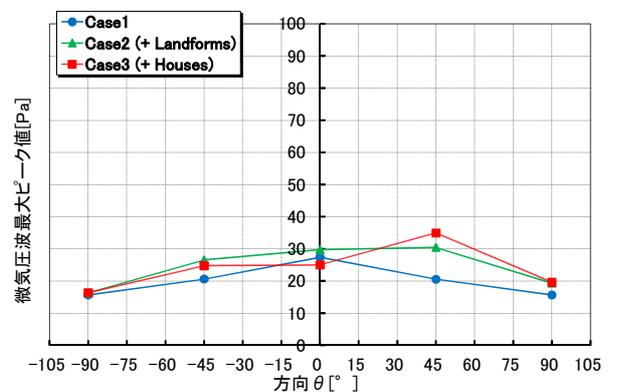
例えば、図 9(b)の 50m 地点での $\theta=45^\circ$ 方向の結果は、Case2 と Case3 で大きな違いが生じている。この地点は家屋のすぐ前方であり、Case3 の家屋ありでは微気圧波が大きくなっている。図 9(c)の 100m 地点での $\theta=45^\circ$ 方向の結果も同様のことが言えるが、反対に $\theta=45^\circ$ 方向の結果は Case3 の方が微気圧波は小さくなっている。この地点は家屋の後方にあることから、家屋の影響を受けて微気圧波の大きさが変化することが分かった。



(a) 25 m distance from tunnel exit



(b) 50 m distance from tunnel exit



(c) 100 m distance from tunnel exit

Fig. 9 Peak values of micro-pressure wave at measuring points.

4. 在来線特急のトンネル微気圧波解析

4. 1. 解析条件

前章に示した高速鉄道車両のトンネル微気圧波解析と同様の解析手法を用いて、在来線特急のトンネル微気圧波を評価した。解析モデルを図 10 に示す。トンネルは3連続の単線トンネルとした。いずれのトンネルの出入口にも緩衝工は設けていない。軌道はスラブ軌道とし、高架と盛土を混在させた。レールは模擬していない。また第3トンネル出口には微気圧波を評価するために家屋を考慮した。解析対象車両は図 11 に示す2種類の在来線特急形状とした。Aタイプ形状は切り落としに近く、Bタイプ形状は断面積変化をやや緩やかにしている。いずれの特急列車も2両編成で全長は63mである。走行速度は120km/h (=33.3m/s)とした。

地形や家屋と特急列車の表面格子を図 12 に示す。また、トンネル断面の計算格子を図 13 に示す。計算格子の総セル数は9,600万セルである。

4. 2. 解析結果

図 14 に第1トンネル中央天井部での圧力時歴を示す。横軸の時間 t [sec] は車両先頭が第1トンネル入口に突入してからの時間である。トンネル内の圧力が時々刻々大きく変化している。車両先頭がトンネルに突入した際に発生する圧縮波が、トンネル出口に向かって音速で伝わった後、トンネル出口で反射して膨張波と

なる。また、 $t=1.9$ [sec]には車両後尾がトンネルに突入し膨張波が発生する。この膨張波も音速で伝わり、トンネル出口で反射して圧縮波となる。これらの波がトンネル出口と入口で繰り返し反射して干渉し合い、トンネル内の圧力が変動している。さらに、 $t=1.7$ [sec]には車両先頭が観測点であるトンネル中央部に達し、その後の車両後尾が通過する $t=3.6$ [sec]までは、全体的に圧力が低下しているのが分かる。 $t=5.3$ [sec]に車両後尾がトンネル出口から抜け切った後も、トンネル内では最初に発生した圧力波がなかなか減衰せずに往復している様子が確認できる。2ケースを比較すると、Aタイプ形状よりもBタイプ形状の方が最初の圧力の立ち上がりやや緩やかになっており、圧力変動も小さくなっているのが分かる。

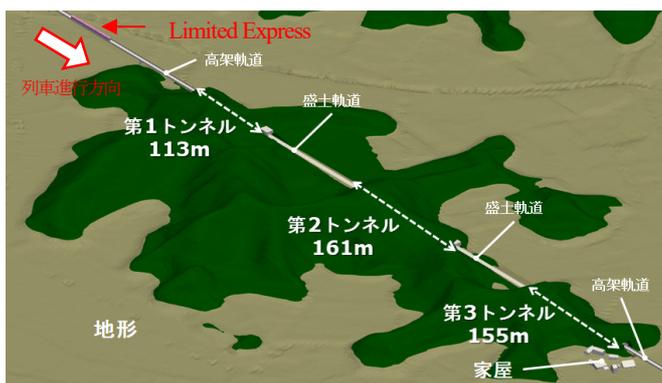
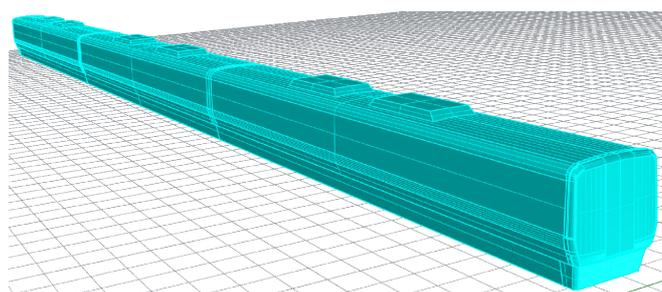
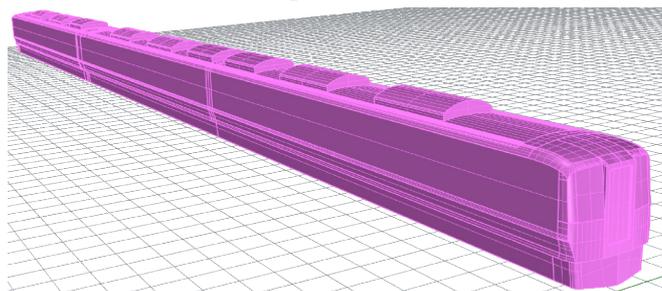


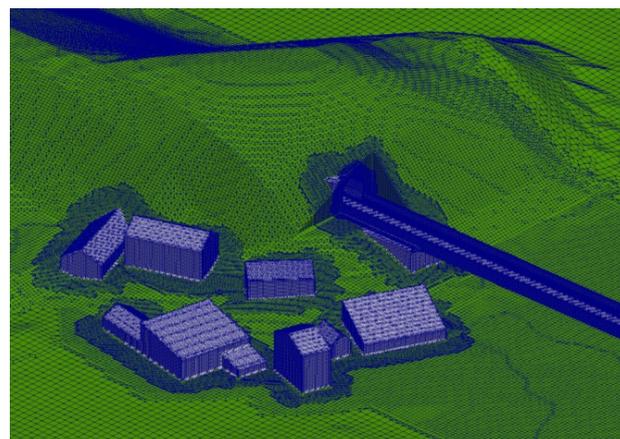
Fig. 10 Computational model.



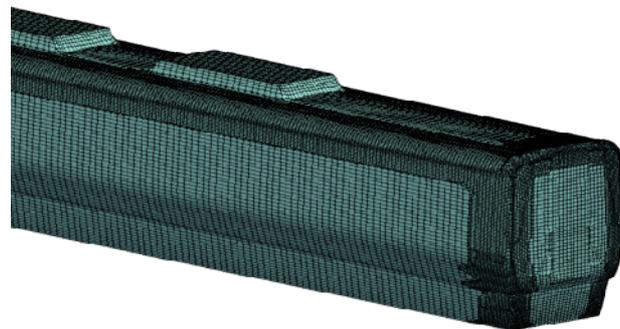
(a) A-type bluff-nose train



(b) B-type bluff-nose train
Fig. 11 Train nose geometry.



(a) Landforms and Houses



(b) A-type bluff-nose train
Fig. 12 Surface mesh.

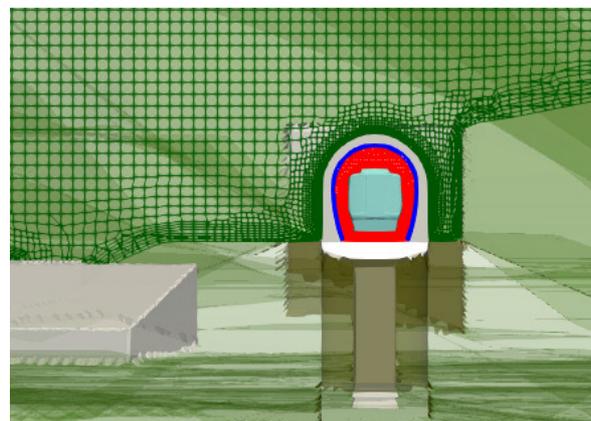


Fig. 13 Grid cross section.

第3トンネル出口に配置した家屋における微気圧波の観測結果を図15に示す。代表としてトンネル出口から一番近い家屋と遠い家屋の結果を比較する。明らかにトンネル出口に近い家屋の方が微気圧波は大きい。遠い家屋では微気圧波が減衰して小さくなり、時間もやや遅れて観測されている。先頭形状の違いを比較すると、Aタイプ形状よりもBタイプ形状の方が、約17%微気圧波が減少している。また、約1秒おきに複数回微気圧波が観測されるのも特徴的である。これは、トンネル出口で反射した圧力波（圧縮波が反射して膨張波となる）がトンネル入口で再び反射して圧縮波となってトンネル出口まで伝わり、微気圧波として放射されるためである。この圧力波はトンネル内を音速で伝播するため、音速を約340m/sとすると、その時間差は $155\text{m} \times 2$ （往復分） $\div 340\text{m/s} \approx 0.9\text{sec}$ となる。

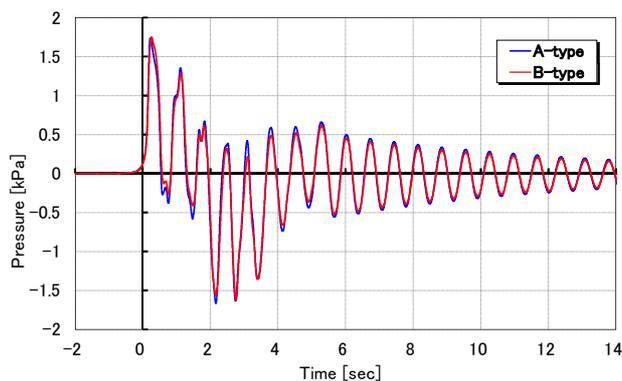
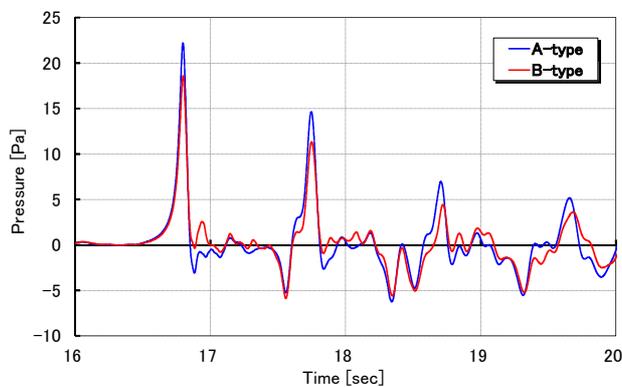
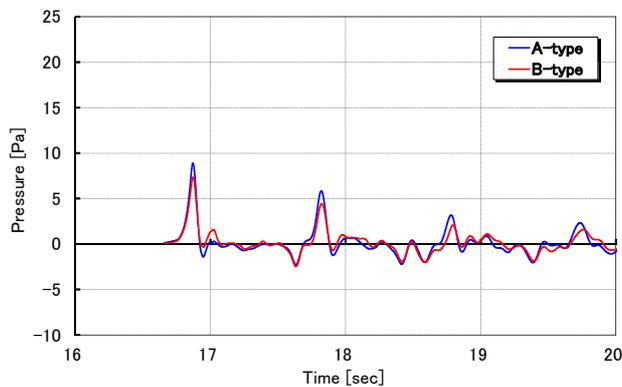


Fig. 14 Time history of pressure in the 1st tunnel.



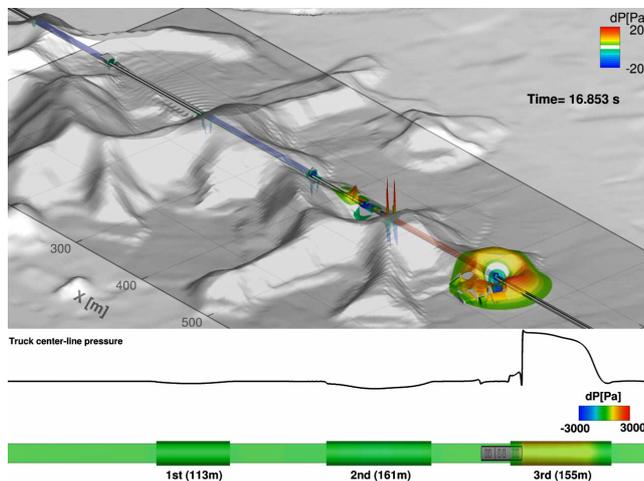
(a) nearest house



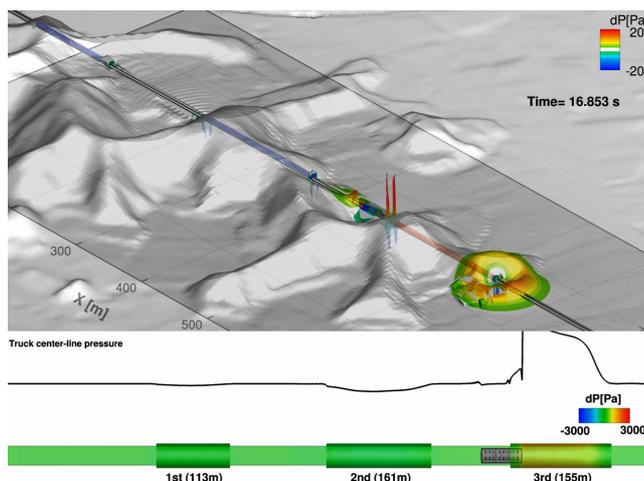
(b) farthest house

Fig. 15 Time history of pressure at houses.

図16に時刻 $t=16.85$ [sec]におけるトンネル内壁面とトンネル外の瞬時圧力変動分布を示す。トンネル外は地表面の圧力変動分布であり、地表面の小さい圧力変動（微気圧波）を分かりやすく可視化するため、圧力変動量 $dP[\text{Pa}]$ に応じて地表面を z 方向に変形 ($z=z+dP \times 2$) させている。Aタイプ形状の方が大きな微気圧波が伝播している様子が分かる。



(a) A-type bluff-nose train



(b) B-type bluff-nose train

Fig. 16 Instantaneous surface pressure fluctuation.

5. まとめ

自社開発 CFD 解析ソフト「Cflow」を用いた高速鉄道車両 efSET[®]と在来線特急の実車スケールでのトンネル突入解析を実施し、トンネル出口での微気圧波やトンネル内の圧力変動を評価した。解析では実地形や家屋を考慮し、より実環境に近い状況を模擬した。得られた結果は下記の通りである。

- 高速鉄道車両 efSET[®]の解析では、地形や家屋の存在が微気圧波の評価に影響を及ぼすことが分かったため、より高精度に観測点での微気圧波ピーク値を評価するためには、地形や家屋といった実環境に近い状況を模擬した三次元シミュレーションが必要と言える。

- 在来線特急の解析では、2 種類の車両先頭形状による微気圧波の違いを評価し、在来線特急においても先頭部の断面積分布をやや緩やかにすることで微気圧波低減に効果があることが分かった。また、トンネルが短いことで、トンネル内で反射して往復してきた圧力波が、再び微気圧波となって観測されることが分かった。さらに、連続した複数トンネルでの解析による微気圧波評価が可能となったことも、実設計への適用の観点から大きな成果である。

今後は、この三次元シミュレーション技術を活かして、低環境負荷を実現する鉄道車両システムの開発を行う予定である。

謝辞

本論文の結果は、名古屋大学のスーパーコンピュータを利用して得られたものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 小河原, “鉄道車両の市場環境と車両カンパニーにおける取り組み,” 川崎重工技報, 177 号, pp.2-5, 2016.5
- (2) 長倉, “沿線環境に関する最近の研究開発,” 鉄道総研報告, Vol. 32, No. 11, pp.1-4, 2018.11
- (3) 川上, “新幹線に関する研究開発の概要,” *JR EAST Technical Review*, No. 57, pp.7-10, 2017.
- (4) 佐々木, 越智, 上野 他, “「より速く」を実現する高速車両の開発,” 川崎重工技報, 177 号, pp.14-17, 2016.5
- (5) 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,” 日本流体力学会誌「ながれ」, 第 33 巻, No. 2, pp. 141-148, 2014.4
- (6) 上野, 田島, 越智, 佐々木, “「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,” 第 29 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (2015)
- (7) 上野, 田島, 越智, 佐々木, “高速鉄道車両の下部空力騒音解析及びトンネル微気圧波解析における精度向上,” 日本流体力学会誌「ながれ」, 第 37 巻, No. 2, pp. 145-154, 2018.4
- (8) 越智, 上野, 葉山, “高次精度 CFD 解析の航空機脚まわりの非常流場に対する検証,” 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 59, No. 684, pp. 7-15, 2011.1
- (9) 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)
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Yasuda, H., Nagata, T., Ueno, Y., and Ochi, A., “Prediction of Aerodynamic Characteristics Using CFD on the Aircraft High-Lift Configuration,” APISAT, Toyama, 2016.
- (13) 安田, 永田, 上野, 越智, “Cflow による NASA-CRM の CFD 検証解析,” 航空宇宙技術, Vol. 17, pp. 163-172, 2018.
- (14) Ueno, Y. and Ochi, A., “Airframe Noise Prediction Using Navier-Stokes Code with Cartesian and Boundary-fitted Layer Meshes,” AIAA Paper 2019-2553, 2019.
- (15) 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.

- (16) 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)
- (17) 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)
- (18) 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.
- (19) 栗山他, “海外対応新型高速鉄道車両 efSET[®],” 川崎重工技報, 170 号, pp.10-15, 2010.2
- (20) 国土地理院ホームページ, URL: <http://www.gsi.go.jp/kiban/> [cited 20 September 2019].