

デカルト格子を用いた数値解析による トンネル緩衝工形状が微気圧波に与える影響評価

A Study on Effects of the Tunnel Entrance Hood Shape on the Magnitude of Micro-Pressure Wave using CFD Analysis on a Cartesian Grid

- 石橋 亮治, 京工繊大院, 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, E-mail: m4623004@edu.kit.ac.jp
 福井 智宏, 京工繊大, 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, E-mail: fukui@kit.ac.jp
 森西 晃嗣, 京工繊大, 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, E-mail: morinisi@kit.ac.jp
 Ryoji ISHIBASHI, Kyoto Institute of Technology, Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto
 Tomohiro FUKUI, Kyoto Institute of Technology, Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto
 Koji MORINISHI, Kyoto Institute of Technology, Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto

The tunnel entrance hood is built at the tunnel entrance in order to reduce a micro-pressure wave. This study finds out an optimum shape of the tunnel entrance hood with a 3-dimensional CFD on Cartesian grid using virtual flux method. In this report, for the fundamental stage of this study, we evaluated accuracy of the numerical simulation on the formation of pressure wave in a tunnel when a train enters the tunnel without entrance hood, by comparing pressure variation at an inside of the tunnel with that from others. As a result, we can simulate the tendency that pressure rises about 1 kPa in the tunnel sidewall distant from the train. However we have to reconsider a train model's shape and initial condition, in order to predict the pressure wave more accuracy.

1. 緒言

近年, 地球温暖化対策や省エネルギーの観点から, 都市間輸送手段として高速鉄道が注目されている。鉄道は自動車や航空機といった他の輸送手段と比較して環境負荷が小さく, 今後も更なる高速化が期待されているが, 車両速度の向上により車両通過時の騒音や振動といった環境問題が顕在化している。特に車両が高速でトンネルに突入した際に発生するトンネル微気圧波はその大きさが車両速度の上昇に伴い著しく増大することから, 鉄道の更なる高速化には微気圧波の低減が必要不可欠であると考えられている。微気圧波の低減策の一つとして, トンネル入り口に緩衝工と呼ばれるトンネルよりも大きな断面積を持つフード上の構造物の設置, 及び車両形状に合わせた緩衝工形状の最適化が挙げられるが, 緩衝工の形状最適化による微気圧波低減の詳細なメカニズムは未だ不明瞭な部分が多いとされている。

このメカニズムの解明には車両が突入する際のトンネル内の流れ場を把握する必要があり, 近年では現地試験や模型実験⁽¹⁾の他に, 数値シミュレーションによる解析が用いられている⁽²⁾⁽³⁾。車両突入時のトンネル内の流れ場は車両形状や緩衝工形状の影響により複雑になると予想されることから境界適合格子を用いた三次元数値流体シミュレーション(CFD)による計算⁽⁴⁾が行われているが, 境界適合格子は流れを精度良く捉えることが出来る反面, 格子の形成に多くの時間を要することが知られている。特に, 車両がトンネルに突入するような移動境界問題の解析においては莫大な計算時間を要してしまうという課題があり, 様々な車両や緩衝工の形状についてシミュレーションを行う必要があることから, より計算コストの低い手法が必要と考えられる。

そこで本研究では, 格子の形状が単純であるデカルト格子と仮想流束法⁽⁵⁾を組み合わせた手法を用いて車両突入時のトンネル内の流れ場を再現し, 緩衝工の形状最適化メカニズムを明らかにすることを目的としている。本稿ではまず計算コードの検証として衝撃波管問題の解析を行い, さらに基礎研究として, 緩衝工のないトンネルに単純な形状の車両が突入する際の流れ場の解析を行い, トンネル内の圧力変動を評価することにより考察する。

2. 支配方程式と計算手法

2. 1 支配方程式と計算手法

作動流体として非粘性・圧縮性流体を想定し, 支配方程式として式 (1) に示す三次元オイラー方程式を用いる。なお, 式 (1) 中の各ベクトルは以下のように表される。

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ u(e+p) \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ v(e+p) \end{pmatrix}, \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho w^2 + p \\ \rho vw \\ w(e+p) \end{pmatrix}$$

ここで, ρ は密度, u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の速度, e は単位体積当たりの全エネルギー, p は圧力, t は時間である。

また, 理想気体を仮定すると, 以下の式(3)が成り立つ。なお, γ は比熱比で, $\gamma = 1.40$ とする。

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2 + w^2) \quad (3)$$

離散化方法に関しては, 移流項に三次精度 Weighted ENO 法, 時間微分項に二次精度ルンゲ・クッタ法を用いる。

2. 2 仮想流束法

本研究では, トンネル壁面や車両モデルをデカルト格子上に再現し, 精度よく計算するための手法として仮想流束法⁽⁶⁾を用いる。仮想流束法は物体表面上に物理現象を考慮した境界条件を与えるため, 圧力や速度, 密度に関して精度良く計算を行うことが可能

である。また、実装に関しても通常の流れ場の計算コードに対して仮想流束法の計算ルーチンを追加するだけであり、物体の移動に伴って計算格子を再構築する必要がないという利点がある。

いま、図 1 に示すように流体 A と流体 B が完全に分離されていると考え、流体 A 側から流体 B 側への x 軸方向の計算を行う。まず、格子線と仮想境界の交点である仮想境界点を設定し、仮想境界点が隣り合う格子点間の格子線を内分する比 $a:b$ を求める。

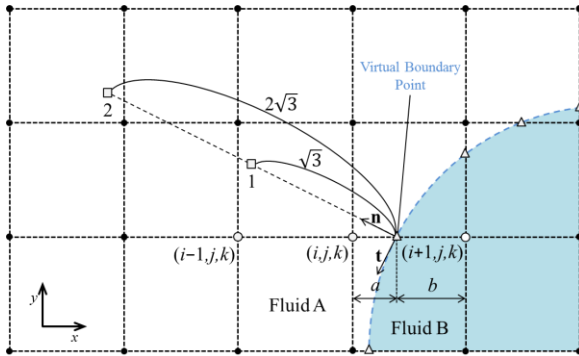


Fig. 1 Schematic view of virtual flux method.

次に、仮想境界点上における基本量ベクトル \mathbf{q}_{vb} を求める。本研究では作動流体として非粘性流体を想定しているため、仮想境界点上での境界条件として滑り壁条件を用いる。

$$\mathbf{V}_{n,vb} = \mathbf{V}_{n,wall} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_t}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{V}_{n,vb}$, \mathbf{V}_t はそれぞれ仮想境界線上での壁面法線方向速度及び壁面接線方向速度、 $\mathbf{V}_{n,wall}$ は物体の壁面法線方向移動速度、 \mathbf{n} は壁面法線方向ベクトルである。

また、圧力、密度の境界条件に関しては、壁面法線方向に対して勾配 0 として扱う

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (7)$$

なお、仮想境界線上の壁面法線方向速度、及び圧力、密度に関しては、仮想境界点から壁面法線方向に存在する点 1, 2 の物理量から求めた。

流体 A 側である格子点 (i, j, k) における数値流束を計算する際、仮想境界をまたいだ流体 B 側である $(i+1, j, k)$ における基本量ベクトル $\mathbf{q}_{i+1,j,k}$ をそのまま用いることはできない。そこで、 (i, j, k) の基本量ベクトル $\mathbf{q}_{i,j,k}$ および先ほど求めた仮想境界線上での基本量ベクトル \mathbf{q}_{vb} から次式で外挿することにより、点 $(i+1, j, k)$ における基本量ベクトル $\mathbf{q}_{i+1,j,k}^*$ を仮想的に求める。

$$\mathbf{q}_{i+1,j,k}^* = \frac{a+b}{a} \mathbf{q}_{vb} - \frac{b}{a} \mathbf{q}_{i,j,k} \quad (8)$$

この $\mathbf{q}_{i+1,j,k}^*$ を用いて仮想的な数値流束である仮想流束を算出し、実際の計算に導入することで任意形状の物体壁面をデカルト格子上に再現することが可能となる。なお、ここで示した手順は流体 A 側から流体 B 側へ計算する操作であるが、流体 B 側から流体 A 側に計算を行う際も同様の操作を行うことで、格子点 $(i, j,$

$k)$ と $(i+1, j, k)$ の間に境界が存在するような流れ場を表現できる。以上の操作を y 軸方向、 z 軸方向に対しても行うことで、デカルト格子上的の任意物体形状の再現を可能としている。

3. 計算コードの検証

3. 1 三次元衝撃波管問題

本解析で用いる計算コードの検証問題として、三次元衝撃波管問題の解析を行う。

3. 1. 1 計算モデル及び計算条件

今回、解析に用いた計算モデルを図 2 に、計算条件を表 1 に示す。

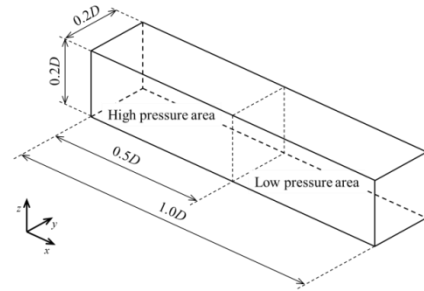


Fig. 2 Simulation model for shock tube problem.

Table 1 Simulation condition for shock tube problem.

Calculation area	$x \times y \times z = 1D \times 0.2D \times 0.2D$	
Characteristic length	$D = 1.0$	
Grid number for	100 cells / D (Case 1)	
Characteristic length	400 cells / D (Case 2)	
Characteristic velocity	$U = 1.0$	
Interval of time step	$\Delta t = 0.001$ (Case 1) $\Delta t = 0.00025$ (Case 2)	
Initial condition	High pressure side	$u = v = w = 0.0$ $p = 1.0, \rho = 1.0$
	Low pressure side	$u = v = w = 0.0$ $p = 0.1, \rho = 0.125$

計算モデルとしては代表長さを D とし、計算領域は $1D \times 0.2D \times 0.2D$ 、代表長さ D あたりの格子数を 100 格子 (Case 1)、及び 400 格子 (Case 2) とし、格子解像度の違いによる計算精度の比較を行う。初期条件として、高圧側 ($0 \leq x \leq 0.5D$) に圧力 $p = 1.0$ 、密度 $\rho = 1.0$ 、低圧側 ($0.5D \leq x \leq 1.0D$) に圧力 $p = 0.1$ 、密度 $\rho = 0.125$ 、領域全体に速度 $u = v = w = 0.0$ 、境界条件として $x = 0.0D$ 、及び $x = 1.0D$ 側の領域境界を初期値固定とし、その他の領域境界には滑り壁条件を与える。時間刻み幅は $\Delta t = 0.001$ (Case 1)、 $\Delta t = 0.00025$ (Case 2) とし、無次元時間 $t = 0.2$ まで計算を行う。

3. 2. 2 計算結果及び考察

Case 1, Case 2 より得られた $y = z = 0.1D$ における密度分布、圧力分布、 x 方向速度分布と理論解⁶⁾との比較を図 3~5 に示す。また、これらの結果の理論解との誤差を表 2 に示す。なお、表 2 の誤差の算出方法に関しては、膨張波端面 ($x = 0.49D$) ~ 衝撃波面 ($x = 0.85D$) の間の理論解との誤差の平均より求めた。

Table 2 Error compared with theoretical solution ($x=0.49D \sim 0.85D$).

	Density	Pressure	x -velocity
Case 1 ($D=100$ cells)	2.69%	0.972%	1.02%
Case 2 ($D=400$ cells)	0.929%	0.204%	0.209%

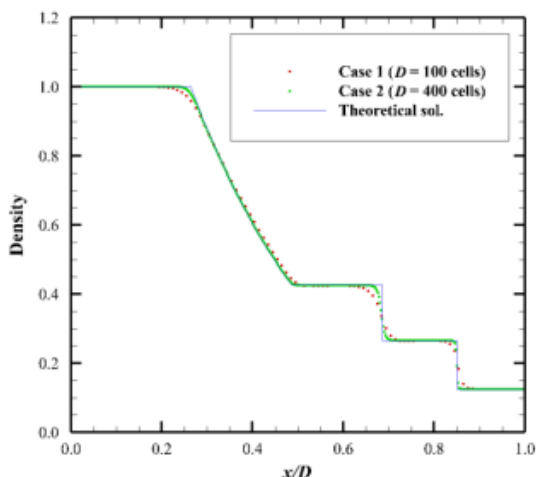


Fig. 3 Density distribution.

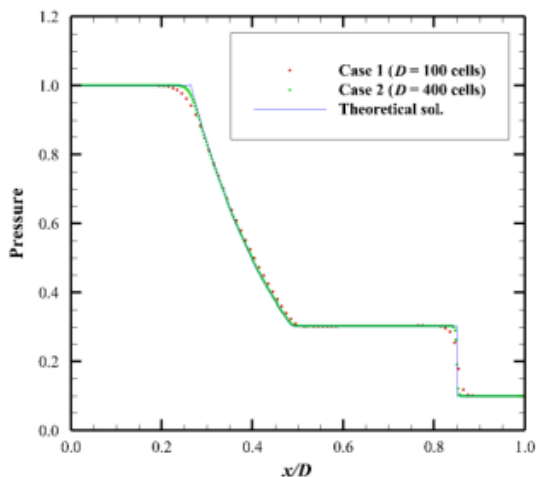


Fig. 4 Pressure distribution.

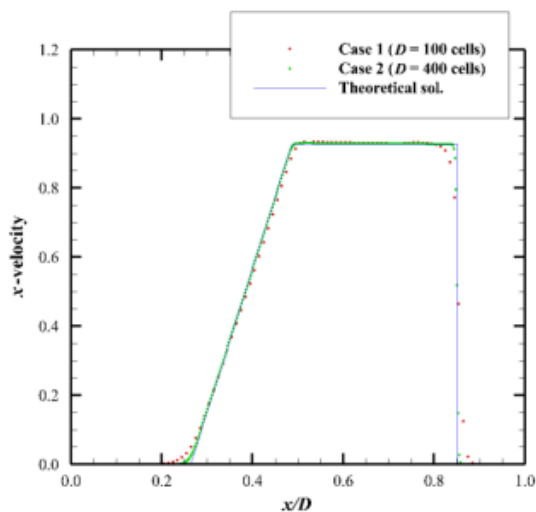


Fig. 5 x -velocity distribution.

図 3～5 より，理論値では $0.26D \leq x \leq 0.49D$ 付近で膨張波， $x = 0.69D$ 付近で接触不連続面， $x = 0.85D$ 付近で衝撃波が表れているが，Case 1，Case 2 ともに理論値と同様の傾向を示していることがわかる．また，格子解像度を上昇させ，時間刻み幅を小さくするにつれて，接触不連続面や衝撃波面，膨張波の両端面でより精度よく理論解に追従していることが確認できた．

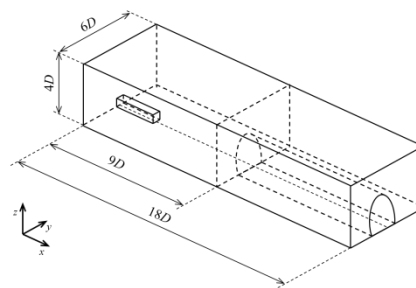
また，表 2 より密度分布，圧力分布， x 方向速度分布のいずれも，格子解像度の上昇に伴い精度が向上する傾向が確認できた．誤差の値についても，いずれの値も 3% 未満であり，十分な精度が確保できていることが確認できた．

4. 車両突入時トンネル内流れ

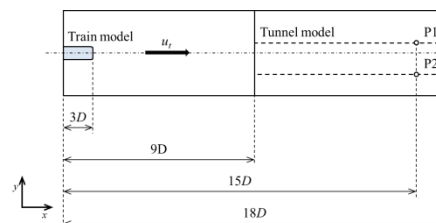
4. 1 緩衝工のないトンネルモデル

4. 1. 1 計算モデル及び計算条件

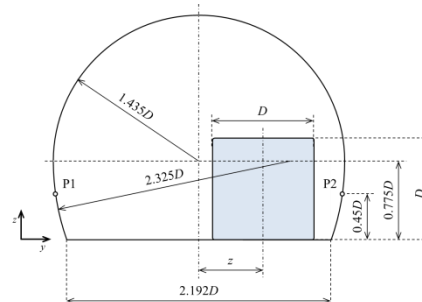
今回，車両突入時トンネル内流れの解析に用いた計算モデルを図 6 に，計算条件を表 3 に示す．



(a) Bird's-eye view.



(b) x - y plane.



(c) Cross section of train and tunnel model.

Fig. 6 Simulation model for calculation of tunnel model without entrance hood.

Table 3 Simulation condition for calculation of tunnel model without entrance hood.

Calculation area		$x \times y \times z = 18D \times 6D \times 4D$
Characteristic length		$D = 1.0$
Grid number for Characteristic length		20 cells / D
Characteristic velocity		$U = 1.0$
Train model's velocity		$u_t = 0.335$
Interval of time step		$\Delta t = 0.001$
Initial condition		$u = v = w = 0.0$ $p = 1.0, \rho = 1.0$
Tunnel model	Cross-sectional area	$a = 5.39D^2$
	Equivalent diameter	$d = 3.71D$
Train model	Cross-sectional area	$a' = 1D^2$
	Height \times Width	$1D \times 1D$
Cross-sectional area ratio of train to tunnel		$a'/a = 0.185$
Offset	Lateral offset	$z = 0.64D$
	Offset value	$z/d = 0.173$

計算モデルとしては車両幅を代表長さ D とし、車両モデルは車両断面が高さ \times 幅 $= 1D \times 1D$ の単純な直方体形状のものを用いた。トンネル形状に関しては、実際の新幹線トンネル形状を参考にモデル化を行った。車両/トンネル断面積比は 0.185、車両とトンネルの偏心量は $0.64D$ とした。

計算領域は $18D \times 6D \times 4D$ 、代表長さ D あたりの格子数を 20 格子とする。初期条件として、領域全体に $u = v = w = 0.0$ 、 $p = 1.0$ 、 $\rho = 1.0$ 、境界条件として、 $z = 0.0D$ 側の領域境界に滑り壁条件、その他の領域境界リーマン境界条件を与える。モデルの先頭部が $x = 3.0D$ 、 $y = 3.0D$ の位置になるように車両モデルを設置し、計算開始と同時に速度 $u_t = 0.335$ で衝撃出發させる。トンネル入り口は $x = 9.0D$ の位置に設置し、トンネル内の P1、P2 における圧力変動を観測した。また、時間刻み幅は $\Delta t = 0.001$ で計算を行った。

なお、有次元化に際しては代表長さを車両幅 3.35[m]、代表圧力を大気圧 11.325[kPa]、代表速度を式(9)より算出した値を用いる。今回は空気の気体定数 $R_{air} = 287.06[\text{J/K} \cdot \text{kg}]$ 、温度 $T = 293.47[\text{K}]$ とするため、代表速度は 290.25[m/s] となり、車両モデルの移動速度は 97.23[m/s] ($\approx 350[\text{km/h}]$) となる。

$$\bar{U} = \sqrt{R_{air} \times T} \quad (9)$$

4. 1. 2 計算結果及び考察

本解析によって得られた P1, P2 の圧力変動の時間履歴のうち、トンネルに車両先頭が突入した時刻(0.2[s])以降のものを図 7 に、時刻 0.3924[s] (34000 Time step)における圧力分布を図 8 に示す。

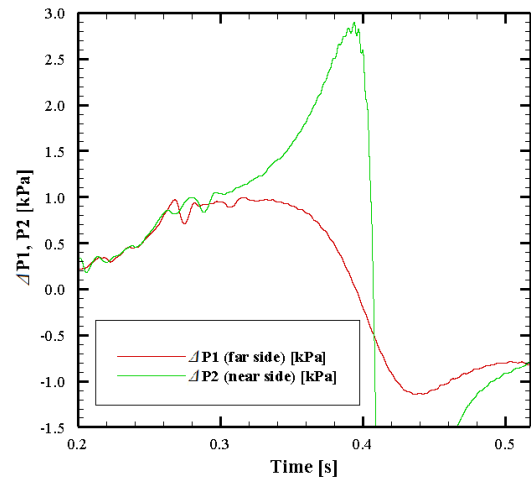


Fig. 7 Time history of pressure variations.

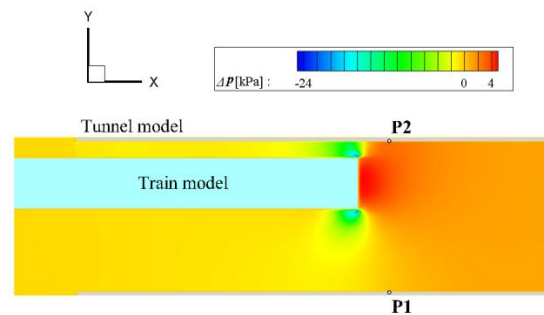


Fig. 8 Pressure distribution.

図 7 より、車両がトンネル突入した後、時刻 0.27[s]付近で圧縮波が伝播し、圧力が P1、P2 とともに 1[kPa]程度上昇している様子が確認できる。その後、車両先頭部の接近に伴って P2 側では圧力がさらに上昇し、車両が最も接近する 0.41 秒付近以降では P1、P2 とともに圧力変動が減少している。これらの傾向は他者の解析結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾や実際の現象でも確認できる。しかし、時刻 0.3[s]付近まで P1、P2 側ともに圧力変動が振動している様子が見られる。この要因としては、車両モデルを衝撃出發させていることにより車両先頭部から衝撃波が発生し、車両がトンネルに突入した後もその影響が観測されていることが考えられる。また、P2 側の圧力変動のピーク値が、他者の解析結果や実際の現象では 1.2 ~ 1.5[kPa]程度であるのに対し、本解析では 2.9[kPa]と大きいことと、車両先頭部通過後に P1、P2 とともに強い負の圧力変動が観測されていることが確認できる。これらの要因としては、車両形状の違いが考えられる。実際の新幹線などの高速鉄道車両は 10[m]程度の長さを持つ流線型の先頭形状であり、先頭部断面積変化率をなるべく小さく、かつ一定にする等の工夫が施されている。しかし、今回の解析に用いた車両モデルは単純な直方体形状をしており、断面積は車両先頭部で急激に増加している。その影響から、実際の現象よりも圧力のピーク値が大きくなっていることが考えられる。また、図 8 より車両先頭部の角部で流れが剥離し、負圧領域が発生していることが確認できる。この負圧領域の影響を受けて、車両先頭部通過後に負の圧力変動が観測されたものと考えている。今後より厳密な比較を行うために、実際的高速鉄道車両に近い形状の車両モデルを作成し、解析を行う必要があると考えられる。

5. 結言

本研究では、デカルト格子上で車両突入時のトンネル内の流れ場を再現し、緩衝工形状の最適化メカニズムを明らかにするため、その基礎研究として、緩衝工を設けていないトンネルに直方体形状の車両モデルが突入する際の流れを解析した。その結果、車両のトンネル突入に伴って圧縮波が形成される様子が確認できたが、圧力変動のピーク値が大きいことや、車両通過後に負の圧力変動を観測することなど、実現象と異なる点が見受けられた。今後の予定としては初期条件の見直し、及び実際の高速鉄道車両に近い形状の車両モデルを用いた解析を予定している。

参考文献

- (1) Doi, T., Kaku, J., Masubuchi, T. and Ogawa, T., “Development of an experiment apparatus for measuring a pressure wave generated by a model train of actual shape”, Proceedings of the Inter Noise 2006(2006).
- (2) Saito, S., Iida, M., Kajiyama, H., “Numerical simulation of 1-D unsteady compressible flow in railway tunnels”, Journal of Environment and Engineering, Vol. 6, No. 4 (2011), pp. 723-728.
- (3) Miyachi, T., Ozawa, S., Fukuda, T., Iida, M. and Arai, T., “A New Simple Equation Governing Distortion of Compression Wave Propagating Through Shinkansen Tunnel with Slab Tracks”, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 8, No. 3 (2013), pp. 462-475.
- (4) 中山将, 坪倉誠, 阿部行伸, 大西憲治, 大島伸行, “高速鉄道車両のトンネル通過時に発生する圧力変化の LES 解析”, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, G0705(2013).
- (5) Tanno, I., Morinishi, K., Matsuno, K. and Nishida, H., “Validation of Virtual Flux Method for Forced Convection Flow”, JSME international journal. Ser. B, Fluids and thermal engineering 49-4(2006),pp.1141-1148.
- (6) 山下和之, CANS1D モデルパッケージ衝撃波管 ver.1(2002).
- (7) 斉藤実俊, 福田傑, “トンネル内における列車通過時圧力変動に関する実験的研究”, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 819 (2014).
- (8) 斉藤実俊, 福田傑, “トンネル内列車通過時圧力変動の数値シミュレーション”, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 825 (2015).