

# 有限要素法によるトンネル内鉄道車両周りの流れ場と音源の解析

日大生産工 (院) 相磯 友宏  
日大生産工 角田 和彦

## 1. 緒言

高速列車の開発にあたって、空気力学的現象が顕著となるため、その現象解明と空力の低減策の開発は重要な課題である [1]。

列車走行に伴って発生する空気の流れは列車風と呼ばれている。特に、トンネル内での列車風は、列車通過時の列車風に加えてトンネル内の圧力波による列車風も現われ、その現象を解析することは急務である [1]。

そこで本論文では、トンネル内鉄道車両周りの流れ現象を解析するための数値解析手法として指数関数型 Petrov-Galerkin 有限要素法を適用し、時間積分の高精度化のために 2 次精度の Adams-Bashforth 法を導入する [2]。

また、流体音を予測する方法として Powell と Howe による渦音理論を用いて音源を可視化する方法が検討されている [3]。この Powell と Howe による理論は、音源を渦の運動と結びつけており、流れの構造と対比すると理解しやすい長所がある。そこで、Powell と Howe による理論を用いて音源の可視化を行い、鉄道車両周りの流れ場と比較する。尚、本研究では低マッハ数の流れ場での解析を目的とするため圧縮性は考慮していない。

## 2. 基礎微分方程式

非圧縮性粘性流体の問題に対する基礎微分方程式は、Navier-Stokes 方程式と連続の式によって与えられる。また、得られた式の時間微分項に対し、Fractional step 分解の関係を利用し、圧力場と速度場に分解すると、形式的に以下の方程式系を得る。

$$\dot{u}_i(\tilde{u}_i, u_i^n) + u_j u_{i,j} = \frac{1}{Re} u_{i,jj} \quad (1)$$

$$\dot{u}_i(u_i^{n+1}, \tilde{u}_i) = -p_i^{n+1}, \quad u_{i,i}^{n+1} = 0 \quad (2)$$

ただし、 $Re$  はレイノルズ数、 $u_i^n$  は  $n$  時間  $step$  での  $u_i$  の値、 $p^{n+1}$  は  $(n+1)step$  での圧力を表す。

## 3. 指数関数型 Petrov-Galerkin 有限要素法

高レイノルズ数の流れ解析に対しても安定した数値解を得るために、式 (1) に指数関数を重み関数とした Petrov-Galerkin 法に基づく有限要素スキームを適用する。式 (1) の重み付き残差表現に発散定理を適用し、未知関数の近似により積分形式の有限要素方程式が得られ、この方程式に、時間進行スキームとして 2 次精度の Adams-Bashforth 法を適用すると次式を得る。

$$M_{\alpha\beta} \frac{\tilde{u}_{i\beta} - u_{i\beta}^n}{\Delta t} = \frac{1}{2}(3F_{i\alpha}^n - F_{i\alpha}^{n-1}) \quad (3)$$

ただし、 $F_{i\alpha}$  は次の様に定義される。

$$F_{i\alpha} = -(K_{\alpha\beta} + D_{\alpha\beta})u_{i\beta} + f_{i\alpha} \quad (4)$$

## 4. Powell と Howe の渦音理論

Powell [4] は流れの中の真の音源は渦にあると考え、次式を導いた。

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2 \rho = \rho_0 \nabla \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{u}) \quad (5)$$

ただし、 $\boldsymbol{\omega}$  は渦度、 $\boldsymbol{u}$  は速度ベクトルを表す。

式 (5) は渦度と流速の時間変化が音源項と一致することを示している。したがって、 $\nabla \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{u})$  の分布を調べることにより、音源を可視化する事ができる。

## 5. 数値計算例

Table1 に本研究で用いた計算条件を示す。Case1 で用いた有限要素メッシュは、総節点数 368,760、総要素数 310,940 であり、Case2 で用いた有限要素メッシュは、総節点数 453,442、総要素数 386,040 で、それぞれ八節点六面体要素で構成されている。Fig.1 は  $xz$  中央断面の流れ場、Fig.2 は  $xz$  中央断面の圧力場を示す。鉄道総研によるトンネル突入前後に車両側面に生じる圧力変動の時刻歴 [1] と本解析結果との比較を Fig.3 に示す。また Fig.4 は  $xz$  中央断面の音源分布を表している。

## Flow and Sound Source Analysis around a Railway Vehicle in Tunnel by The Finite Element Method

Tomohiro AISO and Kazuhiko KAKUDA

Table1. A summary of the parameter

Case	Re	Nodes	Elements	$\Delta t$	$\alpha_i$
Case1	$10^6$	368,760	310,940	0.01	0.25
Case2	$10^6$	453,442	386,040	0.01	0.25

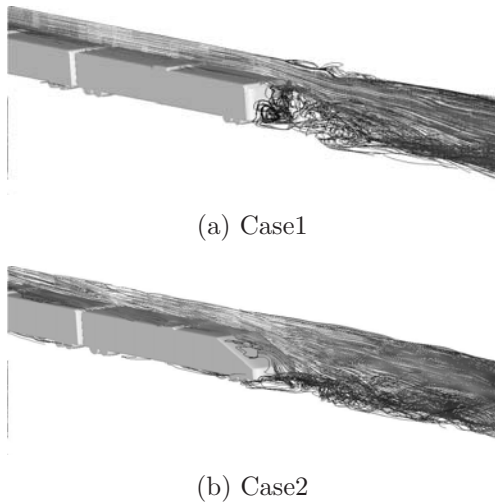


Figure1. Instantaneous streamlines

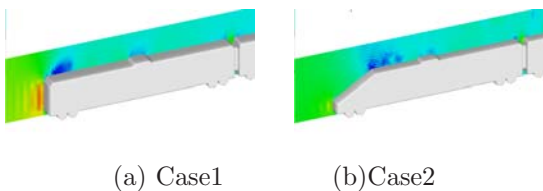
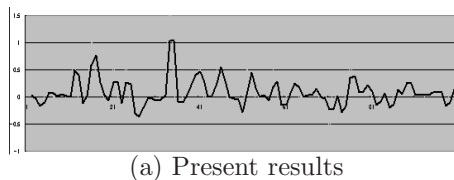


Figure2. Instantaneous pressure fields



(a) Present results

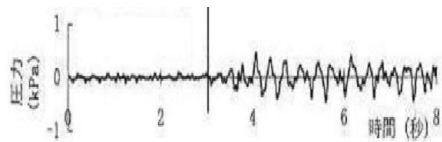
(b) Experimental data<sup>[1]</sup>

Figure3. Time histories of pressure behavior(Case2)

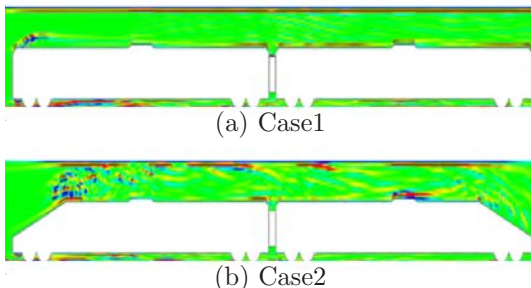


Figure4. Distribution of a sound source

## 6. 所見

トンネル内の鉄道車両周りの流れに関し非定常非圧縮 Navier-Stokes 方程式を指数関数型 Petrov-Galerkin 有限要素法による数値解析を通して以下の点が見られた。

- ・ Fig.1 を見ると、Case1 は物体の背域で縦渦が発生し、後方領域まで波を打つような流れが観察される。一方、Case2 は物体に沿った流れが、物体の背域で複雑な流れとなっているが、波を打つような流れは後方領域まで続いている。これは、物体形状が Case1 と比べると滑らかなためと考えられる。

- ・ Fig.2 を見ると、Case1, Case2 とともに物体前面を境に圧力場の散逸が見られ、特に、物体前面の上端での圧力場の散逸が大きく表れた。

- ・ Fig.3 を見ると、両結果ともトンネル突入直後に負圧に変化している。また圧力の変動の様子も概ね一致していると考えられる。

- ・ Fig.4 を見ると、Case1, Case2 とともに流れの剥離点において、強い音源と弱い音源が混在している。

## 7. 結言

形状の異なる鉄道車両周りの流れの有限要素解析を比較し、流れ場、圧力場および音源についての違いを議論してきた。また圧力場の散逸が観察され、それが原因として列車風や車両通過時に騒音が発生するものと考えられる。従って、物体後方に発生する縦渦や、圧力場の散逸を抑えられるような車両形状であれば、列車風や騒音の低減に繋がるものと思われる。

今後の課題としては、定量的な音場の理解として実験値との比較をしたり、より現実的な解析をし、さらに理解を深めたい。また、現在は十分な解析結果が出るまでに長時間を要しているため、計算効率化を図るために数台のコンピュータを並列化させ、領域分割法による数値計算を検討する。

## 参考文献

- [1] 鉄道技術総合研究所ホームページ  
”[http://www.rtri.or.jp/index\\_J.html](http://www.rtri.or.jp/index_J.html)”
- [2] 角田和彦・登坂宣好, ”非定常非圧縮粘性流れ問題の指数関数型 Petrov-Galerkin 有限要素法”, 日本建築学会構造系論文報告集, 439, (1992), 189-198
- [3] 小野ほか, ”自動車の床下風音における音源の可視化”, 第 14 回数値流体力学シンポジウム, (2000) 35
- [4] Powell, A., ”Theory of vortex sound”, J. Acoust. Soc. Am, 36, (1964) 177-195.