

トンネル内の鉄道車両周りの流れと音場の数値解析

日大生産工 (院) 相磯 友宏
日大生産工 角田 和彦

1. 緒言

鉄道の高速化に伴って、空力騒音・空気抵抗などの空力学的現象が顕著となり、環境に優しい鉄道を現実化するためには、それらの現象解明と空力騒音の低減対策法の開発が不可欠である [1]。

列車が駅のホームに進入する時や目前を列車が通過していく時、突風に見舞われる事がある。この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、トンネル内の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]。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_i^{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 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

表 1 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。Case2 で用いた有限要素メッシュは、総節点数 107,556、総要素数 89,723 で、それぞれ八節点六面体要素で構成されている。図 1 は xz 中央断面の流線図、図 2 は xz 中央断面の圧力図、図 3 は xz 中央断面の音源分布図を表している。また、図 2(c) は鉄道総合技術研究所環境工学部の列車通過時の圧力変動の可視化結果である。

Numerical Analysis of Flow and Sound Field around a Railway Vehicle in Tunnel

Tomohiro AISO and Kazuhiko KAKUDA

表 1. 計算条件

Case	Re	Δt	T	α_i
Case1	10^5	0.01	0 ~ 100	0.25
Case2	10^6	0.01	0 ~ 100	0.25

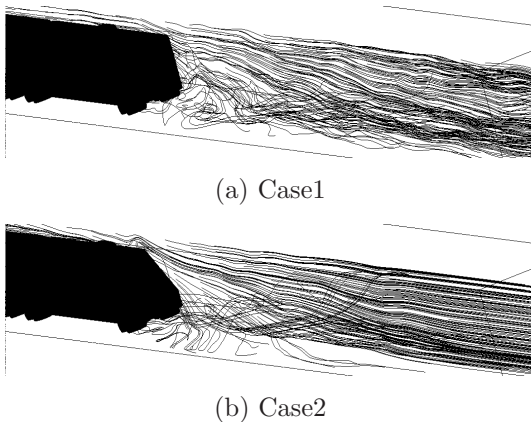
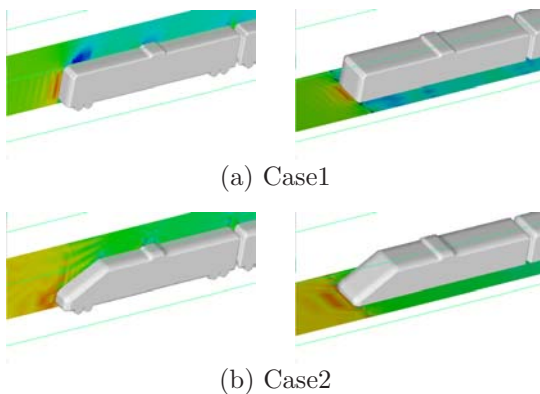


図 1. T=100 での流線 (xz 中央断面)



(c) 列車通過時の圧力変動 [1]

図 2. T=100 での圧力場 (xz 中央断面)

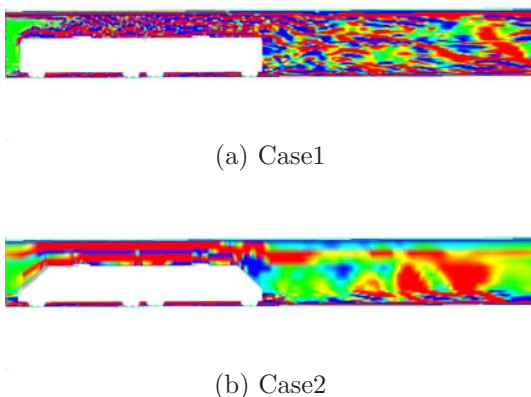


図 3. T=100 での音源分布 (xz 中央断面)

6. 所見

トンネル内の鉄道車両周りの流れについて非定常非圧縮 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。

- ・図 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。

- ・図 2 を見ると、Case1, Case2 ともに物体の前面では圧力が高く、物体の後方の圧力は低い事が確認出来た。また、(c) の研究結果と Case2 を比べると、圧力の分布が似たような結果になった。

- ・図 3 を見ると、Case1, Case2 ともに圧力の低い部分と強い音源の部分がほぼ一致している。

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、圧力場および音源場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。また、相対的に流れの条件を設定し解析したため、現実的な車両移動に伴う流れの現象とは言えない。

今後の課題としては、実際に車両モデルを移動させての解析が必要である。対象物体を実際に移動させて解析する方法の一つとしてフリーメッシュ法が挙げられる。これはメッシュレス法の一つである。この方法は、節点情報のみを入力とし、それぞれの節点の周囲で局所要素を生成することにより解析が行われる [4]。

この手法を用い移動車両周りの流れの解析を検討したい。

参考文献

- [1] 鉄道総合技術研究所ホームページ
”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] 矢川元基・細川孝之, ”フリーメッシュ法 (一種のメッシュレス法) の 3 次元問題への適用”, 日本機械学会論文集, A, 63-614, (1997), 2251-2256.