

車両床下に生じる蛇行流れが 最後尾車両の変動空気力に及ぼす影響

阿部 巧* 中出 孝次*

Effect of Train Underbody Meandering Flow on Fluctuating Aerodynamic Force of a Tail Car

Takumi ABE Koji NAKADE

This study employs large-eddy simulation (LES) to examine the relationship between meandering flow beneath the underbody of a six-car train model and the fluctuating lateral aerodynamic forces acting on the tail car. While previous studies have identified large-scale meandering flow structures and clarified their role in flow-induced vibrations of car body within tunnel, their influence on the aerodynamic forces of a tail car in open-air conditions remains unclear. The present results demonstrate that fluctuating aerodynamic forces on the tail car intensify in synchronization with the meandering flow. Mode decomposition further reveals that the dominant fluctuating flow structure is an antisymmetric mode, with a frequency close to that of the meandering flow. This mode generates significant fluctuating aerodynamic force near the tail region.
キーワード：LES, 蛇行流れ, 床下流れ, 変動空気力, モード解析, POD 解析, DMD 解析

1. はじめに

鉄道車両の空力現象は多岐にわたり、車両の高速化、安全性の向上、乗り心地の改善等のためにはその現象の解明が不可欠である。特に新幹線は車高・車幅に対して全長が非常に長く、長細い物体が地面付近を高速で移動する特殊な状況となる。新幹線の営業速度が向上するにつれて、トンネル区間において左右方向の車両動揺が大きくなり、乗り心地の観点から改善が必要となった。現車での走行試験や風洞実験、数値シミュレーション¹⁾²⁾が実施され、複線トンネル区間の圧力変動は、トンネル壁に近い側の車両側面において大きく、反対の中央側の側面では小さいことがわかった。この左右の側面の圧力差が車両動揺の原因であり、このような流体関連振動を引き起こす空気力を「変動空気力」と呼ぶ。

近年の研究で、車両床下と地面および車両側面とトンネル壁面の間には、それぞれ主流に対して左右方向と上下方向の流速変動を伴う、大規模な流れ構造が発達することが数値解析により発見された³⁾。この大規模な流れ構造は蛇行流れと呼ばれ、トンネル壁面側と中央側の車両側面に左右非対称な圧力分布を生じ、変動空気力の原因であることが解明された。鉄道車両まわりの蛇行流れは上述の数値シミュレーション³⁾において初めてその存在が明らかとなり、さらに実形状車両モデルを用いて蛇行流れの性質が調査された⁴⁾。これらの研究において、蛇行流れの性質は平行渦列の安定配置により説明できることが提案された。特に、トンネル区間を模擬した単純形状モデルの数値解析では、渦列の代表長さを「車両幅+車両高さ」とすることで、平行渦列の考え方が適用できることが示された。風洞実験による数値解析結果の検証が行われ、車両床下に蛇行流れが発達することが確認され、その変動周波数などは数値解析結果と良好な一致が見られた⁴⁾。最近の研究では、新幹線を用いた過去の現車試験において窓に取り付けられたタフトの動きと車両側面圧力の測定結果の関係性が再分析され、現車のトンネル区間において大規模な蛇行流れ構造が存在することが示された⁵⁾。

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

変動空気力は最後尾車両において増加することが知られている。現車試験より、車両側面の圧力変動は最後尾車両において急激に増加することが確認され¹⁾、後尾部（車両形状が3次元的に変化する部分）における流れの非定常な剥離や再付着との関係が調査された⁶⁾。現車試験で編成車両後流の流れの可視化実験が行われ^{7) 8)}、後尾部で生じる交番渦と最後尾車両の動揺との関係が調査された。しかしながら、2つの現象の周波数には違いが見られ、両者に明確な関係性は見出されなかった。

最後尾車両の変動空気力に関係する車両後流は、複雑で非定常な流れであり、欧州において様々な研究が行われている。特に、高速車両のICE（Inter-City Express）2やICE3に関する研究が盛んに実施され、後尾車両から後流に伸びる逆回転する渦対がスパン方向変動すること⁹⁾や、最後尾車両表面の圧力が周期的に変動すること¹⁰⁾が明らかとなった。さらに、モード解析手法を用いて後流の変動が調査され、左右非対称な変動成分が確認された¹¹⁾。このように、非定常で複雑な後流への理解が進んでいるが、蛇行流れに言及した研究は見られず、後流の変動との関係性も調査されていない。車両床下の蛇行流れと最後尾車両の変動空気力の関係性を解明することで、空気力学的な観点から車両動揺の対策を検討でき、乗り心地の向上や左右の振動制御システムの簡略化によるコスト削減等が期待できる。

以上を踏まえ、本研究では車両床下の隙間部に生じる蛇行流れが最後尾車両の変動空気力に及ぼす影響を解明するため、編成車両モデルのLarge-eddy simulation（LES）解析を実施した。数値解析手法は既往研究⁴⁾と同様であるが、最後尾車両において蛇行流れを十分に発達させるため、6両編成の車両モデルを用いた。モード解析手法を適用して流れの変動成分を抽出し、蛇行流れと変動空気力の関係を考察した。なお、本稿は文献13の要部を抜粋し、論旨を変えずに再構成したものである。

2. 問題設定と計算手法

2.1 車両モデル形状

本研究で使用する車両モデルは、過去の風洞実験および数値解析で使用されたモデルである。車両モデルは車間部を有する6両編成であり、本稿では主に図1(a)、(b)と図2(a)、(b)に示す2形状の解析結果を比較する。基本の形状の車両モデルは台車とキャビティ部を有し、後尾部の断面形状が3次元的に変化するモデルであり、以降は台車形状と呼称する。一方で、比較のために編成車両全体で台車を省きキャビティ部を埋めた車両モデルを用意し、以降は平滑形状と呼称する。台車形状では蛇行流れが発達するが、平滑形状では蛇行流れが発達しないことが先行研究⁴⁾で示されており、蛇行流れありと蛇行流れなしの条件を比較するために両形状のモデルを用意した。また、参考のため、図1(c)に後尾部の断面形状が一定となる切妻型の車両を最後尾とした車両モデルを示し、以降は切妻形状と呼称する。切妻形状は、台車形状と比較することで、後尾部の3次元的な形状が変動空気力に与える影響を評価するために用いた。

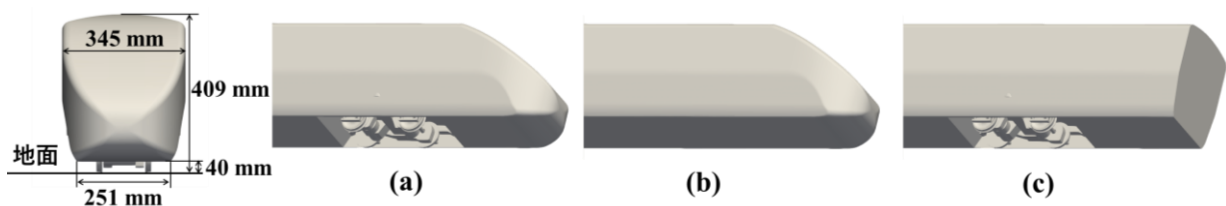


図1 車両モデルの形状 (a)台車形状；(b)平滑形状；(c)切妻形状

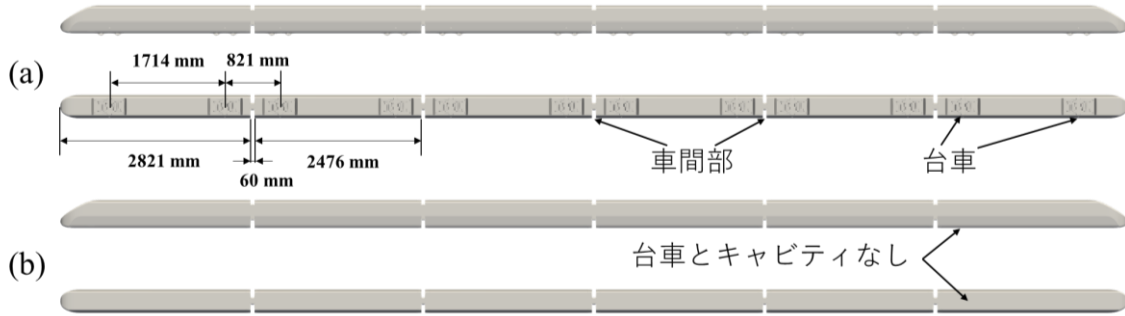


図2 車両モデルの側面図および下面図 (a)台車形状；(b)平滑形状

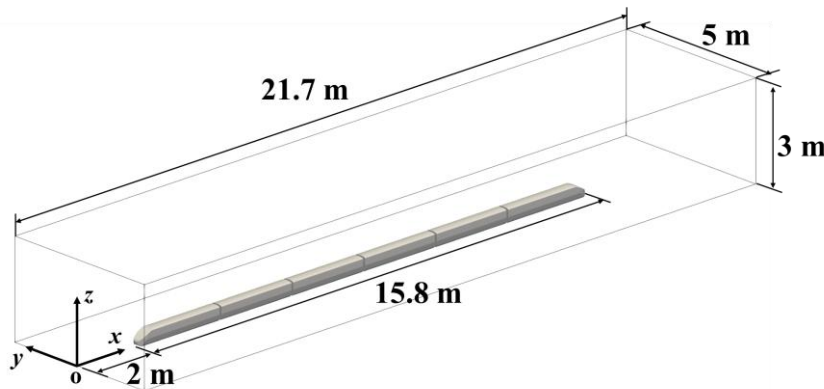


図3 計算領域の概要

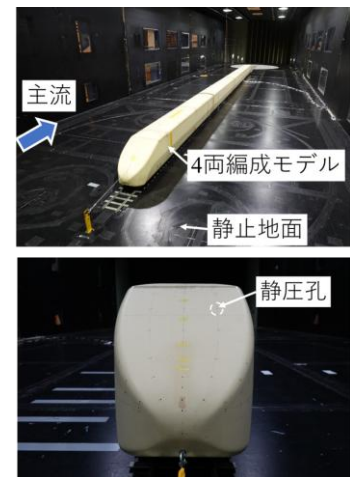


図4 風洞実験の概要

2.2 数値解析手法

支配方程式は非圧縮の Navier-Stokes 方程式と連続の式であり、LES による非定常解析を行った。サブグリッドスケールモデルにはコヒーレント構造スモグリンスキーモデル¹²⁾を用いた。空間離散化は二次精度中心差分とした。速度と圧力のカップリングはフラクショナル・ステップ法を用い、三次精度のアダムス・バッシュフォース法に基づく時間進行を行った。

図3に計算領域の概要を示す。総格子点数は $x \times y \times z = 3964 \times 546 \times 550 = 1,190,389,200$ 点であり、最小格子幅は1mmとした。主流流速は $U_\infty = 15\text{m/s}$ であり、車両幅は $W = 0.345\text{m}$ である。主流流速と車両幅に基づくレイノルズ数は $Re = 3.45 \times 10^5$ である。以下、特に断らない限り、物理量はこれらの代表速度と代表長さで無次元化した値で記述する。境界条件は流入面と地面の速度を1に固定し、流出面を対流流出条件、車両表面をすべりなし境界条件(壁関数を利用)とし、遠方境界面をすべり境界条件とした。車両形状は直交格子法のボクセル型手法で表現した。無次元時間刻み幅は $\Delta t = 0.0001$ であり、統計量の算出時間は無次元時間で $T \geq 70$ とした。蛇行流れの変動周期は $T = 2$ 程度であり、十分な統計時間を有すると判断した。

2.3 風洞実験

数値解析結果の妥当性を検証するため、4両編成車両の台車形状モデルを用いた風洞実験を実施し、最後尾車両表面の圧力係数を比較した。風洞実験により検証した4両編成車両に対する数値解析手法および計算格子解像度は、本研究で対象とする6両編成車両と同様の条件である。したがって、4両編成車両に基づく検証により、本研究の数値解析結果の妥当性が示されると考えられる。図4に風洞実験の概要を示す。最後尾車両の表面に多数の圧力測定孔を設け、圧力係数 C_p の時間平均値と標準偏差の両方を比較した。実

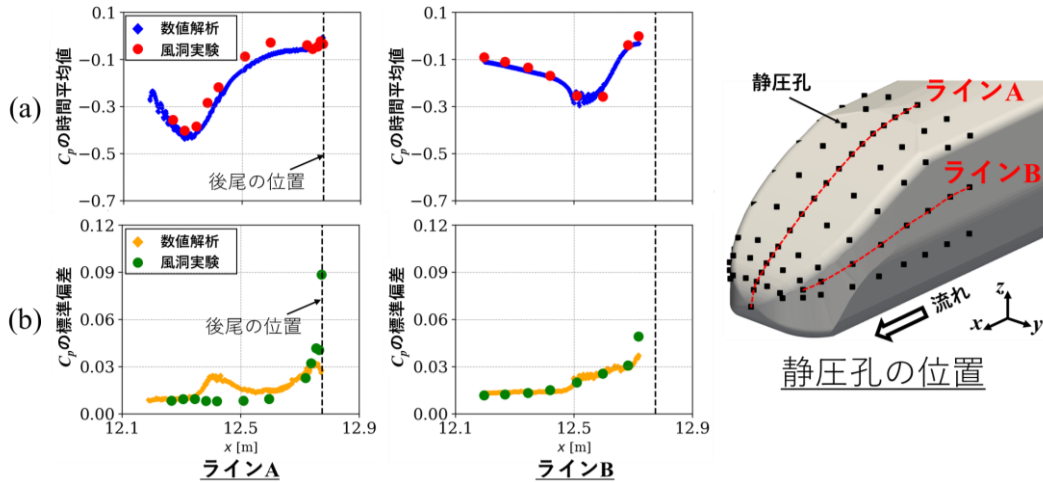


図5 数値解析結果と実験結果の比較 (a)圧力係数の時間平均値；(b)圧力係数の標準偏差

実験結果の気流速度は 30m/s であり、計算で設定した 15m/s より大きいが、気流速度 10-50m/s の条件で実験を実施し、流れの風速依存性が低いことを確認している。図 5 に 2 つの測定ライン上の圧力係数の比較結果を示す。実験の詳細は文献 13 に示すが、計算結果と実験結果は時間平均値と標準偏差ともに良好に一致しており、非正常な現象を含めて、計算結果の妥当性が確認された。

2.4 モード解析手法

本研究では、モード解析手法である POD (Proper Orthogonal Decomposition) 解析と DMD (Dynamic Mode Decomposition) 解析を実施した。POD 解析は、多次元データから効率的に低次元成分を抽出する手法であり、流れ場における支配的な空間の変動成分を抽出することができる。ただし、抽出された POD モードは複数の周波数成分を含み、特定の周波数に着目することは難しい。一方で、DMD 解析は、瞬時場の時間的な前後関係を扱うことで、流れ場の動的な情報 (例えばストローハル数) と対応する DMD モードを抽出することができる。本研究では、両者を組み合わせることで、変動空気力と関係する車両後流の複雑な流れの変動成分を考察した。本研究で用いたモード解析手法の詳細は文献 13 に示す。

3. 結果と考察

先行研究において、トンネル走行時に発生する変動空気力は、車両まわりの隙間流れ (車両床下と車両側面壁側) に形成される大規模な蛇行流れ構造に伴う圧力変動により引き起こされることが明らかとなった³⁾。明かり区間においても、編成車両床下の隙間部に蛇行流れが発達するが、台車やキャビティを取り除き、床下の形状を平滑にした場合には、蛇行流れが発達しないことが示された⁴⁾。本研究では、先行研究と同じ数値解析手法を用い、車両モデルの編成数を 4 両から 6 両を増やすことで、最後尾とその 1 両前の車両において蛇行流れが十分に発達する条件を再現した。

3.1 後尾部の形状の影響

最後尾車両に作用する変動空気力 (本研究では横方向力 F_y の標準偏差と定義) は、後尾部形状の影響を受ける。文献 13 において、後尾部の断面形状が一定となる切妻形状を用意して、各車体に作用する変動空気力を算出し、台車形状と比較した。得られた結果を要約する。2 つの車両モデルにおいて、1 両目から 5 両目の変動空気力には大きな差が見られなかった一方で、最後尾車両の変動空気力に違いが生じた。切妻

形状では5両目から6両目にかけて変動空気力は一定となるが、台車形状では増加した。後尾部の車両表面の圧力係数のRMS値を比較したところ、台車形状の後尾部の先端付近において、切妻形状にはない顕著な圧力変動が見られた。以上の結果から、後尾部の3次元的な形状の変化に起因して、最後尾車両の変動空気力が増加することが示された。

これらの結果を踏まえ、3次元的な後尾部形状を有する最後尾車両の変動空気力へ、蛇行流れが及ぼす影響を調査する。

3.2 蛇行流れの影響

3.2.1 蛇行流れの性質

車両床下の隙間における蛇行流れの有無が、最後尾車両の変動空気力へ及ぼす影響を調査する。まず、床下形状の違いによる蛇行流れの発達の有無を確認する。図6は車両床下中心高さ ($z = 0.02$) における瞬間速度場を示す。青色領域で示される低速領域は蛇行流れに対応する。台車形状では車両床下に大規模な蛇行流れが発達する一方で、平滑形状では車両床下の流速の減少が緩やかとなり、蛇行流は発達しない。

図7に、各車両の車両床下中心高さの車両中心位置 (x は車両中心位置, $y=0, z=0.02$) における横方向流速 v の標準偏差を示す。この値の大きさは蛇行流れの強さに相当する。台車形状では、 v の標準偏差は1両目から3両目にかけて増加し、その後は一定となる。一方で、平滑形状では、全車両で v の標準偏差が小さく、蛇行流れは発達しない。

図8に、6両目の車両床下中心高さの車両中心位置における v のパワースペクトル密度関数 (PSD) を示す。横軸は主流流速と車両幅で無次元化したストローハル数 St であり、ピーク周波数はどちらの形状も同程度 (台車形状: $St=0.115$, 平滑形状: $St=0.099-0.148$) となる。しかし、ピークの高さが数桁異なり、平滑形状では蛇行流れの周波数における流速変動が小さいことがわかる。蛇行流れは車両床下の隙間部の低速領域と、周囲の高速領域との速度勾配に起因すると考えられ、蛇行流れが発達するには床下の流速を低

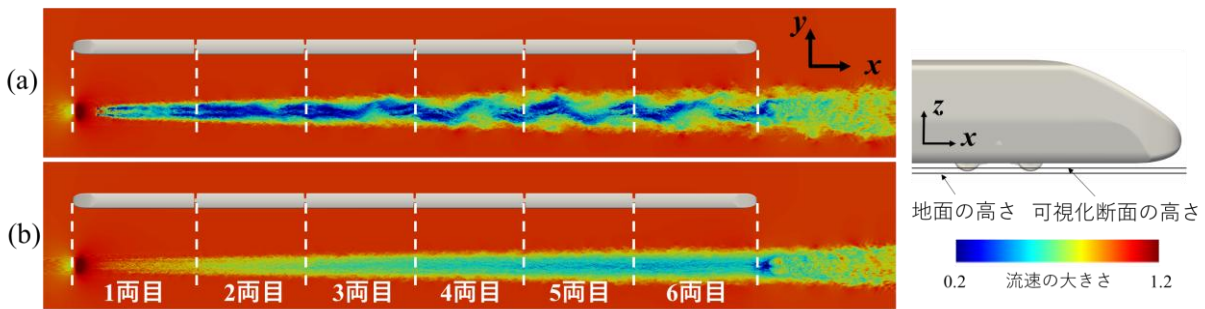


図6 車両床下中心高さの断面の瞬間流れ場 (a)台車形状；(b)平滑形状

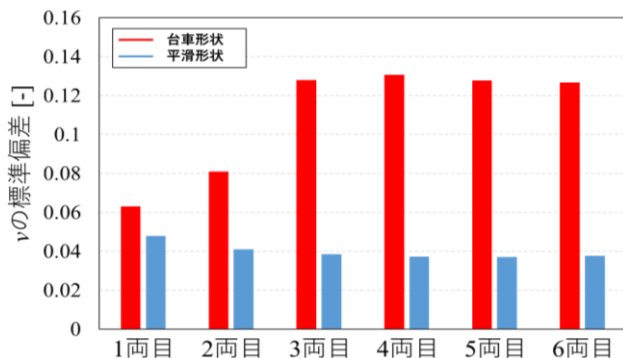


図7 車両床下中心高さの車両中心位置における左右方向流速の標準偏差

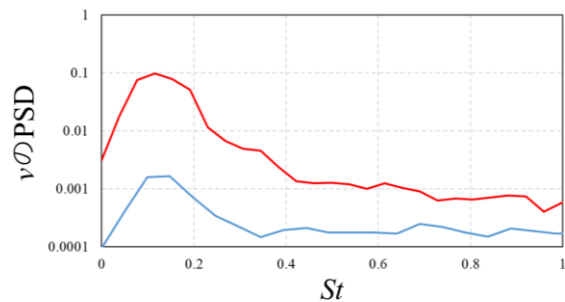


図8 6両目の車両床下中心高さの車両中心位置の左右方向流速のPSD

く保つ機構が必要である。台車とキャビティ部は車両床下の隙間部の流速低下を生じる凹凸として作用し、これらが下流まで配置されることで床下の流速が低く維持され、蛇行流れが発達する。次節では、蛇行流れの有無による変動空気力の違いを示す。

3.2.2 最後尾車両の変動空気力

本節では、最後尾車両における変動空気力の増加に対し、蛇行流れが及ぼす影響を調査する。台車形状と平滑形状の後尾部は同一形状であり、両ケースに後尾部の形状の違いの影響は含まれない。ただし、平滑形状では車体にキャビティ部が存在せず、台車形状と異なる点に注意する。車体に作用する空気力は車体表面圧力を積分し、代表面積 (1m²) と、動圧 (ρU_{∞}^2 , ρ : 空気密度) で無次元化をして算出した。したがって、台車形状と平滑形状の空気力には、キャビティ内部の圧力の違いが反映されるが、キャビティ部に起因した横方向の空気力の影響は十分に小さいことを確認した。

図9に、台車形状と平滑形状において各車両に作用する変動空気力を示す。平滑形状では、先頭車両から5両目までは変動空気力が小さくなり、6両目で増加した。図7の蛇行流れの強さとの関係に着目すると、先頭から5両目にかけて変動空気力が小さくなるのは、蛇行流れが発達していないためと考えられる。最後尾車両の6両目における変動空気力の増加は、図10(b)の後尾部の表面圧力係数のRMS分布が示すように、後尾部での圧力変動に起因する。一方で、台車形状では、1両目から3両目にかけて蛇行流れが発達するため、変動空気力も同様に増加した。3両目以降は蛇行流れが十分発達して準定常となるため、変動空気力も一定となり、最後尾車両において大きく増加した。両ケースで5両目から6両目にかけて変動空気力が増加したが、表1に示す通り、台車形状ではその増加量が1.7倍程大きくなる。これは、蛇行流れが発

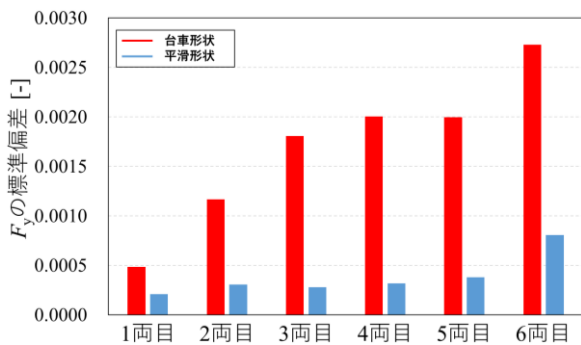


図9 左右方向力の標準偏差

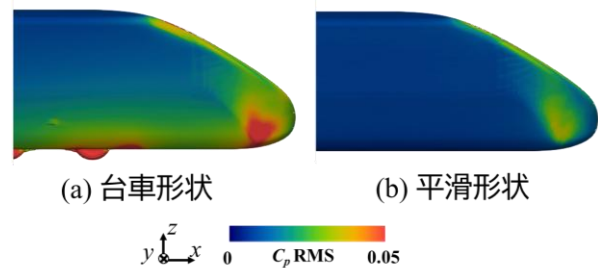
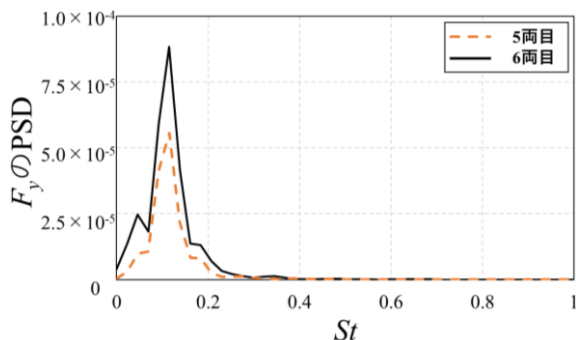


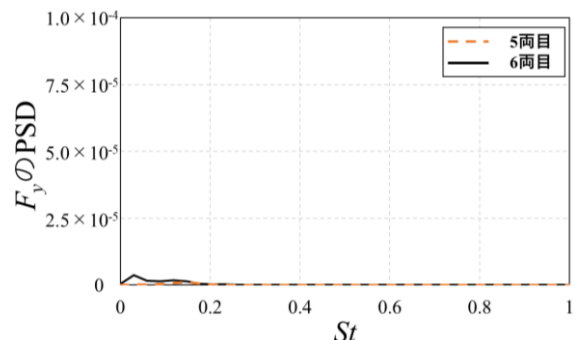
図10 車両表面の圧力係数分布の標準偏差

表1 最後尾車両の変動空気力の増加量と平滑形状に対する台車形状の増加率

	台車形状	平滑形状
F_y の標準偏差の増分	7.3×10^{-4}	4.3×10^{-4}
平滑形状に対する台車形状の増加率	1.7	



(a) 台車形状



(b) 平滑形状

図11 5両目と6両目の左右方向の空気力のPSD

達する場合には、後尾部の形状に起因した最後尾車両の変動空気力が強化されることを示す。

5両目と6両目の変動空気力の差異を詳細に調査するため、 F_y のPSDを図11に示す。台車形状では $St=0.1$ 付近にピークが観測された。これは、図8に示す蛇行流れの周波数と一致しており、5両目から6両目にかけてピークの大きさが増加した。平滑形状においても、 $St=0.1$ 付近のPSDの値は5両目から6両目にかけて増加した。しかし、台車形状と比較するとピークの大きさは著しく小さかった。この結果は、図9で見られた傾向と一致しており、蛇行流れが $St=0.1$ 付近の変動空気力を増幅することを示唆する。

3.2.3 位相平均流れ場

蛇行流れと変動空気力の関係を調べるため、6両目の F_y が極大値をとる位相平均流れ場を図12に示す。可視化した断面は車両床下中心高さ($z=0.02$)であり、上、中、下段がそれぞれ流速の大きさ、横方向流速、圧力係数を示す。車両の位置は半透明で示した。速度場の可視化結果から、蛇行流れの構造が明瞭に抽出されており、変動空気力と蛇行流れが同期した現象だとわかる。断面内の圧力係数は左右非対称な分布となり、車両側面下部においても同様の分布が移流することで、変動空気力が生じる。特に、後尾部付近では、後尾部の局面に沿って流れが加速されるため負圧が強まり、左右非対称な圧力分布がより顕著となる。同じ位相平均流れ場について、後尾部において生じる左右非対称な圧力係数分布を図13に示す。赤線は $C_p = -0.1$ の等高線を、白線は $C_p = -0.2, -0.3, -0.4$ の等高線をそれぞれ示す。右側面(y 正方向)では、赤い等高線が台車付近まで広がり、低圧領域($C_p \leq -0.1$)が広範囲に分布する。一方で、左側面(y 負方向)では、低圧領域が縮小し、後尾部先端付近の圧力係数が高まり、圧力係数の左右非対称性が強まる。このように、3次元的な後尾部形状まわりの流れに蛇行流れが作用することで、後尾部における左右非対称な圧力分布が強まり、最後尾車両において変動空気力が増加する。

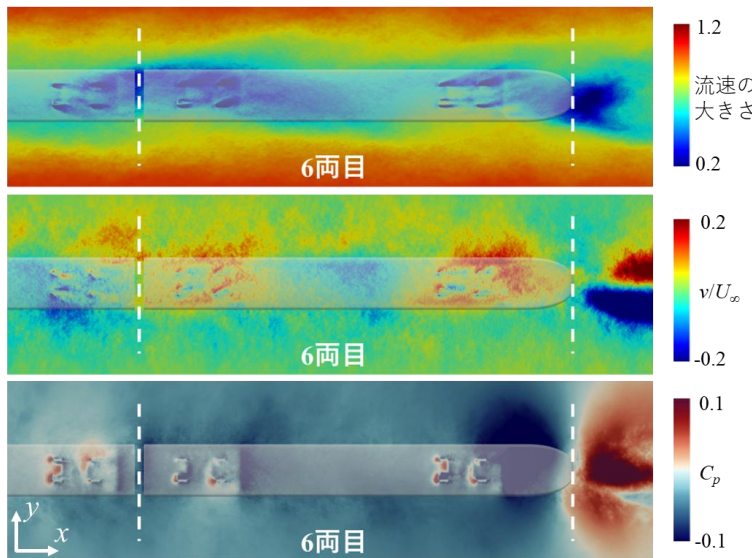


図12 最後尾車両の車両床下中心高さの流れ場 (横方向の空気力が極大となる位相で平均)

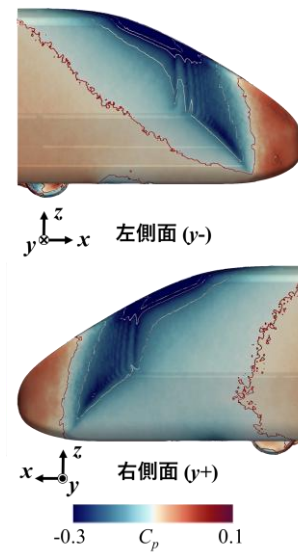


図13 後尾部の左右非対称な圧力係数分布

3.3 モード解析手法の適用

前節では、スペクトル解析や位相平均法を用い、蛇行流れと変動空気力の関係を調査した。本節では、2.4節に示したモード解析手法を用いて流れの変動成分を抽出し、蛇行流れと変動空気力の関係を考察する。

3.3.1 車両床下の流れ

車両床下中心高さの2次元断面内の流れ場について、モード解析により抽出された v の変動成分を位相

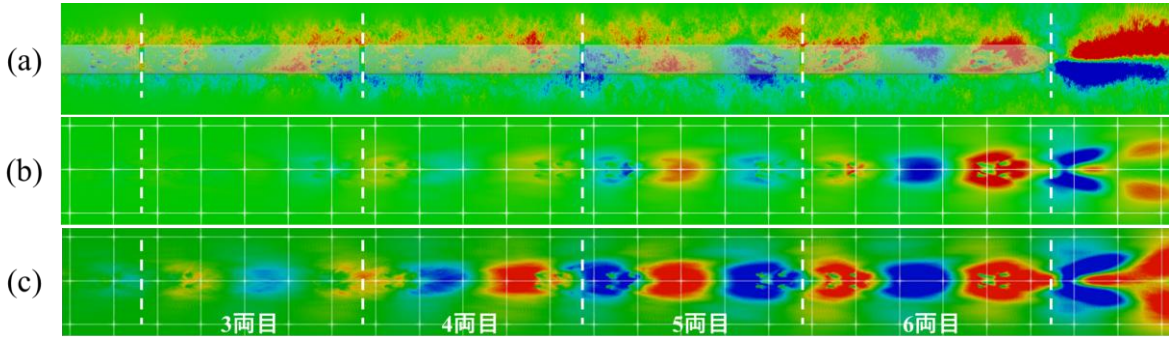


図 14 床下流れの位相平均場とモード解析結果 (y 方向の流速と対応する成分を表示)
 (a)位相平均場；(b)POD 解析，第 1 モード；(c) DMD 解析， $St = 0.109$ のモード

平均場とともに図 14 に示す。モード解析の入力データには、速度 3 成分 (u, v, w) を含む 2000 枚の 2 次元断面の瞬時場を用いた。POD 解析を実施した結果、流れ場への寄与度を表す固有値は、第 1 モードと第 2 モードで特に大きくなり、支配的な流れの変動成分が抽出された (2 つのモードを組み合わせると、移流モードが表現される)。抽出された POD の第 1 モードの v の成分は位相平均場とよく対応しており、蛇行流れが車両床下で支配的な流れの構造であることが示された。ただし、高次のモードの固有値も無視できない大きさであることを確認しており、車両床下の流れが様々な変動を含む複雑な流れであることがわかる。特定の周波数の変動成分を抽出できる DMD 解析を実施した結果、POD の第 1 モードに対応するモードとして、 $St=0.109$ のモードが抽出された (図 14(c))。抽出された DMD モードの周波数は、図 8 の蛇行流れのピーク周波数と良好に一致しており、モード解析により車両床下で支配的な蛇行流れの周波数を特定することができた。POD モードや DMD モードは、流れ場の空間的な変動を明瞭に示しており、蛇行流れの波長の推定や、蛇行流れが空間的に発達する様子を把握できる。

3.3.2 最後尾車両まわりの流れ

本節では、後尾部まわりの 3 次元空間の流れ場に対するモード解析結果を示す。モード解析の入力データには、速度 3 成分と圧力 (u, v, w, p) を含む多数の 3 次元空間の瞬時場を用いた。POD 解析を実施した結果、2 次元断面の解析結果と同様に、第 1 モードと第 2 モードの固有値が大きく、支配的な変動成分となった。図 15 に、POD の第 1 モードと対応する DMD モードの圧力の変動成分を、台車形状と平滑形状について示す。図中の赤と青の成分は、それぞれ正と負のモードを示し、圧力が高い部分と低い部分に対応する。台車形状の POD の第 1 モードでは、支配的な変動として左右非対称な圧力が抽出された。また、対応する DMD モードの周波数は蛇行流れの周波数に近く、後尾部まわりの流れで支配的な変動成分が、蛇行流れにより引き起こされることが示された。左右非対称なモードは、床下から後尾部の先端にかけての領域と、屋根上から下流にかけて斜めに伸びる領域で顕著である。前者は、後尾部の車両側面に圧力変動を生じ、変動空気力に大きく寄与する。後者は、屋根上から伸びる逆回転する渦対の変動に関係しており、渦対が蛇行流れにより左右に揺さぶられることを示す。一方で、平滑形状の POD の第 1 モードでは、変動成分は車両後流の低い位置に集中しており、車両側面付近には分布しない。また、対応する DMD モードの周波数は、図 8 の平滑形状でわずかに観測された蛇行流れの周波数とは異なり、蛇行流れが後尾部まわりの流れにおいて支配的ではないことがわかる。また、圧力のモードは左右対称に分布するため、変動空気力は小さいと推定される。以上から、空間的なモード解析を実施することで、蛇行流れの有無による後尾部まわりの流れの変動成分の明確な違いを抽出することができた。

モード解析により得られた図 15(a)の圧力の変動成分を、後尾部の車両表面付近で抽出した結果を図 16 に示す。車両の左右の側面で圧力のモードの正負が反転するため、左右方向の空気力が生じる。このモード

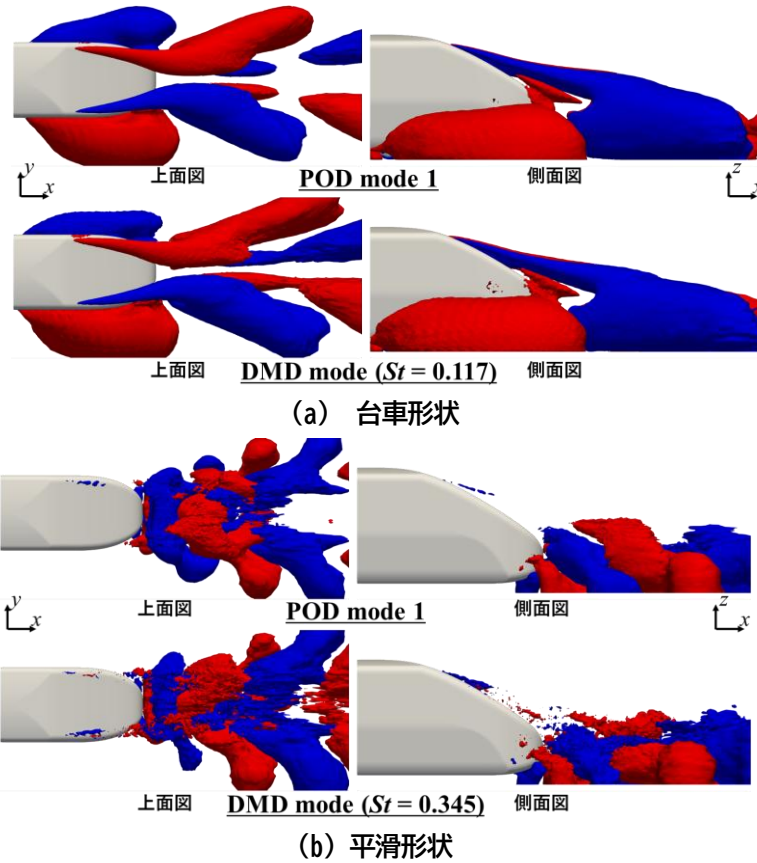


図 15 後尾部まわりの流れの空間的な変動成分 (POD モードおよび DMD モードの圧力成分を表示)

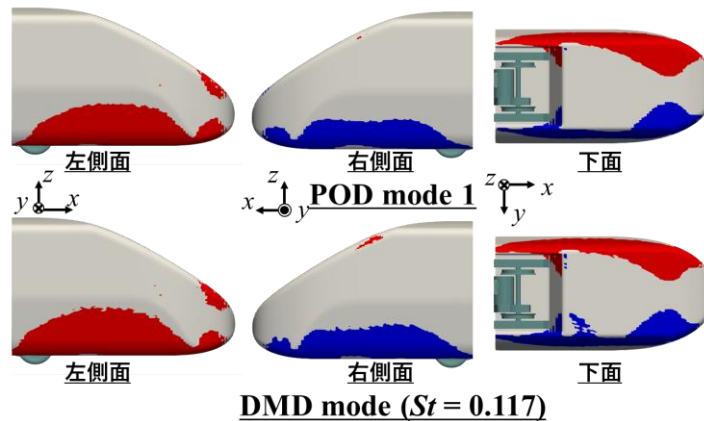


図 16 車両の後尾部の表面付近における圧力の変動成分

は時間的に変動して正負が左右で反転し、逆向きの空気力が生じる。この変動が繰り返されることで変動空気力が生じる。車両表面の圧力変動は、後尾部の側面下部や先端付近で大きくなり、図 13 の位相平均で得られた結果と一致した。モード解析で得られた変動成分は、平均流れ場と組み合わせることで流れ場を再構築することができる。そこで、モード解析で得た多数の DMD モードから流れ場を再構築し、それぞれのモードにより後尾部に生じる変動空気力の大きさを再度算出した。変動空気力の計算に使用した領域は、図 16 に示す後尾部周辺である。台車形状と平滑形状の結果を図 17 に示す。それぞれの DMD モードは異なる周波数となるため、横軸に St をとりモード毎に変動空気力を示した。図 17(a)で最大の変動空気力を生じる DMD モード ($St = 0.117$) は、図 15(a)で示した最も支配的となる変動成分のモードに対応する。変動

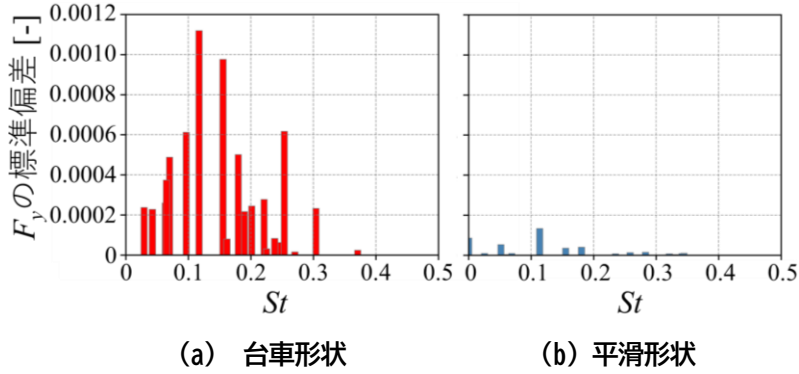


図 17 DMD モードと平均場から再構築した流れから算出した変動空気力

空気力が大きくなる DMD モードの周波数は、 $St=0.1-0.25$ の範囲に広く分布しており、後流が複雑に変動することを示す。一方で、平滑形状の後流で支配的となる DMD モード（図 15(b)の $St = 0.345$ のモード）は、図 17(b)に示すようにほとんど空気力を生じない。蛇行流れに対応した $St = 0.1$ 付近のモードでわずかに変動空気力が増加するが、平滑形状の空気力は全体的に非常に小さい。後尾部まわりのモード解析により、蛇行流れと同期した、変動空気力と密接に関係する流れの変動成分を抽出することができた。得られた変動成分は、流れの空間的な変動を明瞭にし、非定常現象に対する理解を深めることができる。

4. まとめ

本研究では、6 両編成車両モデルの車両床下の隙間部に生じる蛇行流れと、最後尾車両の変動空気力との関係を調査するため、LES 解析を実施した。位相平均法やモード解析手法により流れ場で支配的な変動を抽出し、蛇行流れとの関係を考察した。得られた知見を以下にまとめる。

- ・最後尾車両における変動空気力の増加は、編成全体の車両床下を平滑化した車両モデル（平滑形状）と比較して、台車形状でより顕著である。前者では蛇行流れが発達しないが、後者では最後尾車両において十分発達するため、蛇行流れにより最後尾車両の変動空気力が増幅されることが示された。
- ・位相平均流れとスペクトル解析により、最後尾車両の変動空気力と蛇行流れが同期した現象であり、最後尾車両のまわりに左右非対称な圧力変動が生じることを示した。特に、後尾部の先端付近では、3 次元形状の影響で負圧が強まり、圧力の非対称性が顕著となる。
- ・モード解析により、車両床下の隙間部の流れは蛇行流れが支配的であることを解明し、その周波数は蛇行流れのスペクトル解析のピーク周波数と一致することを示した。後尾部まわりの流れにおいては、蛇行流れが発達する場合は、蛇行流れに同期した左右非対称な変動により変動空気力が増加するが、蛇行流れが発達しない場合は、より高い周波数の左右対称な変動が支配的となるため、変動空気力が小さくなる。

本研究では、車両床下に発達する蛇行流れと最後尾車両の変動空気力の関係性を解明した。鉄道車両の蛇行流れに関する研究は少ないが、蛇行流れは編成車両まわりの非定常現象や車両床下の流れに強い影響を及ぼす。今後は、編成車両まわりの様々な空力現象に対し、蛇行流れが及ぼす影響を調べていく計画である。

文 献

- 1) 鈴木昌弘：トンネル内走行時の車両に加わる空気力，鉄道総研報告，Vol.14，No.9，pp.37-43，2000
- 2) 鈴木昌弘，中出孝次，井門敦志：トンネル内車両動揺の車両形状変更による低減方法，鉄道総研報告，Vol.22，No.5，pp.45-50，2008
- 3) 中出孝次，佐久間豊，梶島岳夫：トンネル走行時の鉄道車両動揺に関わる変動空気力の発生メカニズム（単純形状の鉄道車両モデルにおける大規模流れ構造のLES），日本機械学会論文集，Vol.87，No.893，2021，DOI: 10.1299/transjsme.20-00366
- 4) 中出孝次，井門敦志，梶島岳夫：台車を含む鉄道車両モデルにおける車両床下の蛇行流れ（実形状の鉄道車両モデルにおける大規模流れ構造のLES），日本機械学会論文集，Vol.87，No.894，2021，DOI: 10.1299/transjsme.20-00398
- 5) Sakuma, Y., Nakade, K., Suzuki M., “An experimental investigation on the large-scale meandering flow structure causing FIV of high-speed trains running in tunnels,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.254, 105899, 2024.
- 6) 鈴木昌弘，新井紀夫，前田達夫：列車まわりの流れの数値シミュレーション（第2報，後尾車両に加わる非定常空気力），日本機械学会論文集（B 編），vol. 62，No. 595，pp. 229-235，1996
- 7) 福西祐，小林陵二，小濱泰昭，米井彰宏：高速列車後流のタフト法による解析，ながれ，Vol.13，pp.52-27，1994
- 8) 小濱泰昭：高速車両における渦とその制御，可視化情報，Vol.13，No.51，pp.32-36，1993，DOI: 10.3154/jvs.13.236.
- 9) Schulte-Werning, B., Heine, C., Matschke, G., “Unsteady wake flow characteristics of high-speed trains,” *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, Vol.2, pp.332–333, 2003.
- 10) Bell, J.R., Burton, D., Thompson, M.C., Herbst, A.H., Sheridan, J., “Flow topology and unsteady features of the wake of a generic high-speed train,” *Journal of Fluids and Structures*, Vol.61, pp.168-183, 2016.
- 11) Muld, T., Efraimsson, G., Hennigson, D.S., “Wake characteristics of high-speed trains with different lengths,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.228, No.4, pp.333-342, 2013.
- 12) Kobayashi, H., “The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow,” *Physics of Fluids*, Vol.17, 045104, pp.045104-1–12, 2005.
- 13) Abe, T. and Nakade, K., “Numerical study of relationship between the meandering flow beneath the underbody of trains and fluctuating aerodynamic force of a tail car,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.265, 106173, 2025.