

博士論文（要約）

横風下の鉄道車両に作用する空気力ならびに
空気力評価手法に関する研究

野口 雄平

1. 序論

近年の鉄道車両の軽量化および高速化により、強風下における鉄道車両の安全性評価の重要性が高まっている。安全性評価を高精度に行うには、車両が風から受ける力を適切に評価することが必要であり、車両に加わる空気力評価を目的とした風洞実験が過去に多数行われている。しかしながら、車両に加わる空気力と流れ場との関係性については研究が乏しく、地上構造物により車両に加わる空気力が変化するメカニズムは十分に調べられておらず、横風下の車両の空力特性に関して依然不明な点が多い。また、現在では静止した車両模型を用いた風洞実験によって、横風下を走行する車両に加わる空気力を推定しているが、車両走行が横風下の車両の空力特性に及ぼす影響について十分には明らかにされておらず、静止模型を用いた風洞実験により、横風下を走行する車両に加わる空気力を評価することに対する妥当性は十分には示されていない。

本論文では、地上構造物の影響と走行状態の影響を加味した横風下の鉄道車両の空力特性の解明を目的に、数値流体解析を用いて横風下の車両に加わる空気力と流れ場との関係性を明らかにするとともに、風洞実験を再現する数値流体解析を実施し、空気力を評価する際の実験要件を示したうえで、現在、標準的に実施している静止車両模型を用いた風洞実験の妥当性について検証した。

2. 地上構造物が空気力係数に及ぼす影響の整理

本章では、過去の風洞実験で得られた空気力係数について整理し、横風下の鉄道車両の安全性評価の枠組みにおいて極めて重要な知見である、地上構造物により空気力が変化することを示し、横力係数 C_s が増大する条件を明確にした。風向角 β が90度の場合と、幅広い風向角の場合とに分けて結果を整理し、先頭車両、中間車両ともに単線橋りょう、複線高架橋において桁高の大きい場合に横力係数が風向角によらず増大することを示した。幅広い風向角において、中間車両の場合には $C_s(\beta)/C_s(90^\circ)$ の値はおおむね $\sin^2(\beta)$ と一致するのに対し、先頭車両の場合には $C_s(\beta)/C_s(90^\circ)$ の値は $\sin^2(\beta)$ を上回ることから、先頭車両の場合には三次元的な流れ場となり、風向角90度とは異なる流れ場となることが予期されることを示した。また、先頭車両の盛土の場合には、風向角減少に伴う横力係数の減少度合いが、他の地上構造物と比べて緩やかであり、風向角50度、30度の場合に、単線橋りょうや複線高架橋の条件と比較して $C_s(\beta)/C_s(90^\circ)$ が増大することを示した。

3. 風向角90度における横風下の車両空力特性に関する数値流体解析

本章では、風向角90度における横風下の鉄道車両の空力特性の解明を目標に、鉄道車両を簡略化して正方形角柱とし、形状を簡略化した高架橋および盛土と正方形角柱とを組み合わせる系で、系統的かつ網羅的なLESを実施した。高架橋の条件では、隙間がごく小さい場合には、正方形角柱と高架橋とを一体とみなした形状に相当する抗力係数を示すが、隙間が広がるとbase bleed effectにより抗力係数および変動揚力係数が急激に減少するととも

に、偏り流れの影響が大きくなることを示した。偏り流れの生じる領域では、正方形角柱の抗力係数は流れの偏る方向に依存する。また、流れの偏る方向は、高架橋の桁高により決定されるため、正方形角柱の抗力係数は、高架橋の桁高に依存することを示し、以上の一連の解析により、風向角90度において、地上構造物により中間車両に加わる空気力が変化するメカニズムを明らかにした。

4. 幅広い風向角における横風下の車両空力特性に関する数値流体解析

本章では、幅広い風向角における横風下の鉄道車両の空力特性の解明を目標に、鉄道車両を簡略化してアスペクト比7の有限長正方形角柱とし、形状を簡略化した高架橋、盛土、平地と有限長正方形角柱とを組み合わせた系で、風向角90度、60度、50度、40度において解析を行った。また、第2章で示した実形状車両模型を用いた風洞実験で得られた横力係数の特徴的な傾向が、本章で実施したLESによって得られる横力係数にも見られ、横風下の鉄道車両の空力特性を考えるにあたり、有限長正方形角柱によるモデル化が妥当であることを示した。桁高の大きい単線高架橋、複線高架橋においては横力係数が風向角によらず増大した。この理由は、風向角90度においては、車両床下を抜ける流れに偏りが生じ、車両風下側の圧力が低下するためであり、風向角90度から風向角が小さくなるにつれて、流れの三次元性が強まっていき、風向角60度以下では、車両風下側の三次元的な渦構造に対して高架橋が影響を及ぼし、車両風下側の車両長手方向に伸びる渦が、地面無しの場合と比べて強まるためであることを示し、風向角によって異なる流れのメカニズムにより空気力が増大することを明らかにした。盛土の条件では、車両底面の隙間が狭い場合に、風向角60度と50度で車両風下側の流れの構造が大きく変化することで、他の地上構造物と比較して $C_s(\beta)/C_s(90^\circ)$ が大きくなることを示した。以上、第3章、第4章より、既往の風洞実験で見いだされた特定の地上構造物により車両に加わる空気力が増大する理由に対して、幅広い風向角にわたり、流れ場の観点から合理的な説明を加えることができた。

5. 風洞実験を模擬した数値流体解析と空気力係数評価法に関する検討

本章では、横風下の車両の空気力を評価する際に必要な風洞実験の要件を明らかにすることを目標に、盛土上の車両を対象とした風洞実験を再現する数値流体解析を行った。風洞実験を再現するLESにより、風向角50度の場合には、盛土模型風上側の側端部において縦渦が生じ、縦渦が計算領域中央まで伸びることにより車両風下側の流れ場に影響を及ぼすことを明らかにした。また、風向角50度における横力係数は、盛土単独のLESから得られた車両設置位置における盛土風下側の静圧と似たトレンドを持つことから、盛土模型風上側の側端部から生じる縦渦が原因となり、空気力係数の評価精度が悪化することを明らかにした。盛土単独の流れ場についてLESを実施し、風向角50度における盛土周りの流速場および圧力場に関して、盛土模型風上側の側端部付近では、風洞側壁の影響により縦渦が生じ、プラントルの独立原理は成立しないが、側端部から離れた場所では、乱れのない一様流の

条件，乱流境界層の条件ともに独立原理が近似的に成り立つことを示した．風向角50度において独立原理が成り立つための盛土側端部からの長さは，一様流の場合で盛土高さの16倍，乱流境界層の場合で盛土高さの12倍であることが分かった．

以上の解析により，静止模型を用いた風洞実験において，盛土模型風上側の側端部で生じる縦渦の影響を受けない箇所，即ちプラントルの独立原理が盛土上の流れ場において近似的に成り立つ箇所に車両模型を設置することが，空気力係数を評価する際の実験要件であることを示した．

6. 横風下を走行する車両に関する数値流体解析と空気力係数評価法の妥当性

本章では，車両走行が横風下の車両の空力特性に及ぼす影響を明らかにするために，風向角55度において横風下を走行する車両モデルに対して数値流体解析を行った．静止基準座標系の領域に設置したスパイアにより乱流境界層を生成し，車両モデルに固定した移動基準座標系の領域に気流を流入させることで，車両模型走行装置を用いた風洞実験を再現するLESを実施した．平地上の車両モデルに対して，LESによって得られた車両表面圧力は，静止条件，走行条件ともに実験値とよく一致することを確認し，解析の妥当性を示した．平地条件および盛土条件ともに，空気力係数は，揚力係数を除き，乱流境界層中を走行する場合と乱流境界層中で静止する場合とで同程度となり，車両周りの流れ場についても走行の有無によらず，おおむね一致することを示した．揚力係数については，床下面の圧力分布に走行による影響が表れるため，走行条件と静止条件で差異が生じたが，LESで得られた揚力係数の差は軽微であり，走行の有無による揚力係数の違いが風下レール周りのローリングモーメント係数に及ぼす影響は小さいことが分かった．

以上より，車両周りの流れ場に大きな影響を及ぼす盛土条件であっても，第5章に示した実験要件を満たし，盛土上の流れ場においてプラントルの独立原理が近似的に成り立つ箇所に静止車両模型を設置する場合には，乱流境界層下で盛土上を走行する車両に加わる空気力を，乱流境界層中の静止車両模型を用いた風洞実験により評価可能であることを明らかにした．最後に，静止車両模型を用いた風洞実験に関して，先行研究に基づく知見および本研究で得られた成果をもとに，横風下を走行する車両に加わる空気力を評価する際の実験要件を示し，既往の風洞実験が実験要件を満たすことを確認した．

7. 結論

鉄道車両モデルと代表的な地上構造物を模擬したモデルとを組み合わせた系で網羅的かつ系統的に数値流体解析を実施し，空気力と流れ場との関係性を示し，今まで明確でなかった地上構造物により空気力が変化するメカニズムを流れ場の観点から明らかにした．また，風洞実験を再現する数値流体解析を実施し，空気力の評価精度を悪化させる要因を特定し，その影響範囲を定量的に把握することで，静止模型を用いた風洞実験で満たすべき実験要件を示した．さらに，横風下を走行する車両モデルに関する数値流体解析を実施し，

静止モデルを用いた条件との比較を行い，本研究で示した実験要件を満たせば，得られる空気力係数や流れ場に対して，車両走行が及ぼす影響は小さいことを明らかにし，既往の風洞実験の妥当性を示した．これらの結果は，鉄道車両の安全性評価の観点から重要であり，横風下の鉄道車両の安全性評価の枠組みの中で，空気力の把握における基礎となる成果である．