

風洞試験におけるパンタグラフの空力音・揚力同時測定手法

環境工学研究部 騒音解析
研究員 末木健之

1. はじめに

高速鉄道で使用されるパンタグラフには、空力音の低減と揚力特性の向上が同時に求められている。これらの検証を行うには、風洞試験による検証が非常に有用な手段であり、古くから行われてきた。

従来、風洞試験でパンタグラフ揚力を測定するには、図1に示すようにワイヤでパンタグラフを中腰姿勢にする必要があったが、ワイヤ取り付け治具等の影響により流れが変わり、パンタグラフ揚力が変化してしまう場合がある。また、パンタグラフの空力音を測定する場合には、ワイヤや治具から発生する騒音の影響を受けるため、騒音を正しく測定するためにはワイヤを取り外して別途測定を行う必要がある。そのため、パンタグラフ揚力と空力音の同時測定は困難であった。そこで、これらの問題を解決するために、ワイヤを使用せずにパンタグラフ揚力と空力音を同時に測定可能な手法を考案し、ワイヤや治具の影響が無い分、従来よりも実際の走行状態に近い条件で空力音・揚力を測定することを可能とした。本発表では、この測定手法と効果について紹介する。

2. パンタグラフ揚力測定方法

図2にワイヤを使用した従来のパンタグラフ揚力測定方法（以下、ワイヤ方式）の概略を示す。ワイヤ方式では、ワイヤで舟体または舟支え部分とロードセルを結び、空気が作用している状態でのワイヤの張力を測定することによりパンタグラフ揚力を測定している。このワイヤ方式ではワイヤやワイヤの取り付け治具が存在するため、その影響が懸念される。

ワイヤ方式に対し、ワイヤを使用せずに測定する方法（以下、新方式）では、パンタグラフの主軸周りのモーメントを利用して測定する。図3に新方式の概略を示す。新方式では、パンタグラフの主軸と台枠等の固定可能な部材とを治具で結合する。パンタグラフに空気が作用すると主軸周りのモーメントが変化し、治具へ伝わる力が変化する。そ

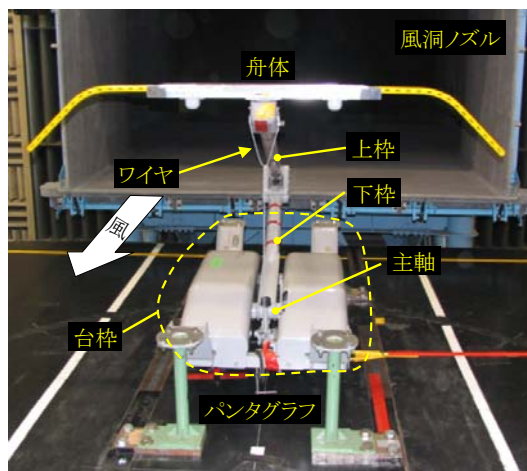


図1 パンタグラフの風洞試験の様子 (ワイヤを用いた測定)

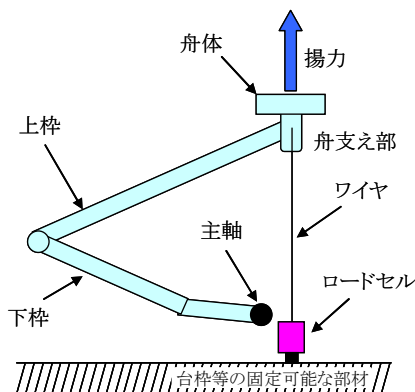


図2 ワイヤ方式の概略図

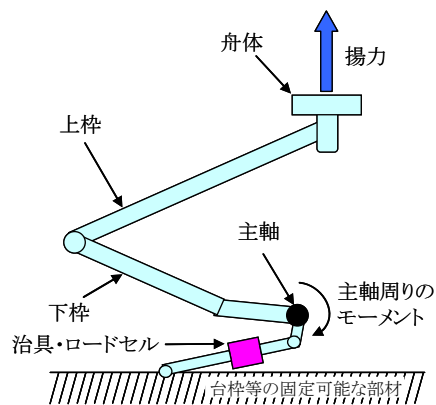


図3 新方式の概略図

の力を、例えばロードセルで測定することによりパンタグラフ揚力が得られる。この新方式の特徴は、ワイヤやワイヤ取り付け治具が一切無いため、実際の走行状態に近い状態での風洞試験が可能となることである。

3. 出力の線形性と周波数特性

3.1 出力の線形性

パンタグラフ揚力を測定する際には、ロードセルから得られた出力（電圧）に校正係数を乗じてパンタグラフ揚力を得ている。この校正係数が荷重に対して非線形であると複雑な演算が必要になるため、線形であることが望ましい。

パンタグラフが標準作用高さの状態において、舟体中央位置に錘を載せ、その時のロードセルの出力電圧を測定した。図4にその結果を示す。図4より、荷重に対し出力電圧は線形であることが確認できた。

3.2 周波数特性

あらゆる周波数においてパンタグラフ揚力を正しく測定出来るのであれば、変動分も正しく評価することが可能であるが、測定系によっては周波数特性が異なり過大評価や過小評価となる場合がある。新方式とすることにより現状のワイヤ方式より大幅に過大評価や過小評価とならないか検討するために、パンタグラフを加振し、舟体へ与えた加振力（入力）と検出されたパンタグラフ揚力（出力）の周波数特性を求めた。入力波形は0~200Hzの擬似ランダム波を用い、パンタグラフは標準作用高さとした。求めた周波数特性を図5に示す。

ワイヤ方式の場合、3Hz付近まではゲインは概ね良好であるが、6Hz付近にピークを持つ。これは、ワイヤの剛性や舟体、枠の質量から決まる固有振動数である。また、10Hz付近より高い周波数では徐々にゲインが小さくなる。これは、周波数が高くなるとワイヤを介すことで振動が絶縁され、舟体の振動が伝わらなくなるためである。また、位相は4Hzを境に悪化する。

新方式の場合、3Hz付近まではゲインは概ね良好であるが、4.5Hz付近でピークを持つ。これは、主軸を固定したパンタグラフの固有振動数である。また、18Hz付近より高い周波数では急激にゲインが小さくなる。これは、枠等により振動が絶縁され、舟体の振動がロードセルに伝わらなくなるためである。また、位相は4Hzを境に悪化する。したがって、新方式では平均値と3Hz程度までの変動成分の評価が可能であり、ワイヤ方式と同程度の精度となる。

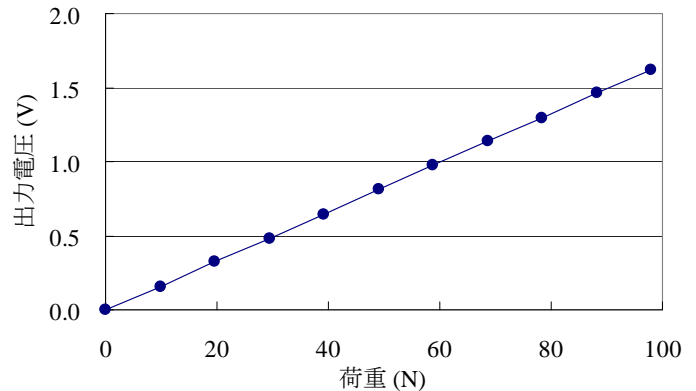
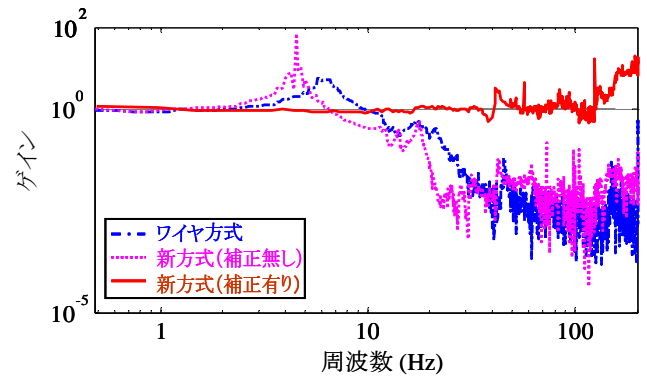
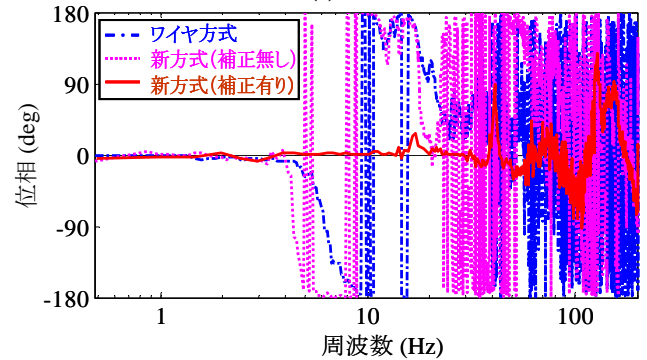


図4 荷重に対するロードセルの出力電圧



(a)ゲイン特性



(b)位相特性

図5 周波数特性

3.3 慣性力補正

前節で述べた新方式の周波数特性によると、3Hz を越えるとパンタグラフ揚力は過大評価または過小評価することになり、特に 4.5Hz 付近の固有振動数成分は、パンタグラフ揚力の測定結果に慣性力として観測され、その影響は大きい。そこで、新方式の測定精度を高めるため、舟体の加速度（例えば舟体に加速度計を取り付けて測定）から慣性力を推定することにより、以下に示す式でパンタグラフ揚力を補正することとした。

$$F_L = F + m\ddot{z} \quad (1)$$

ここで、真のパンタグラフ揚力を F_L 、ロードセルで測定された力を F 、等価質量を m 、舟体の上下方向加速度を \ddot{z} としている。等価質量 m は振動系の等価的な質量であり、検証に用いたパンタグラフの場合、等価質量は $m=18.6\text{kg}$ である。

この等価質量を用いてパンタグラフ揚力を慣性力で補正した周波数特性の結果を、前節で述べた図 5 に示す。図 5 より固有振動数成分は無くなっていることがわかる。さらに 40Hz までゲイン、位相ともに改善されることがわかる。したがって、新方式の特徴である実際の走行状態に近い状態での測定に加え、慣性力補正を行うことにより測定精度を高めることが可能である。

4. 風洞試験

4.1 パンタグラフ揚力

標準作用高さの新幹線用シングルアームパンタグラフを対象として鉄道総研の大型低騒音風洞（米原風洞）にて風洞試験を行い、パンタグラフ揚力をワイヤ方式、新方式の両方で測定した。なお、シングルアームパンタグラフは進行方向によって特性が異なる⁽¹⁾が、ここでは反なびき（紙面左側を進行方向として「>」）方向の結果について述べる。

図 6 にワイヤ方式と新方式（慣性力補正無し・有り、以下補正無し・有りと略記）の平均値および標準偏差の測定結果を示す。ただし、慣性力補正は標準偏差のみに寄与するため、平均値については補正無し・有りの区別はない。図 6 より、パンタグラフ揚力の平均値はワイヤ方式と新方式ではほぼ同等の結果となった。標準偏差については、新方式（補正無し）ではワイヤ方式より少し低く、新方式（補正有り）ではワイヤ方式の半分程度の結果となった。この差は後述するスペクトルの差によるものである。

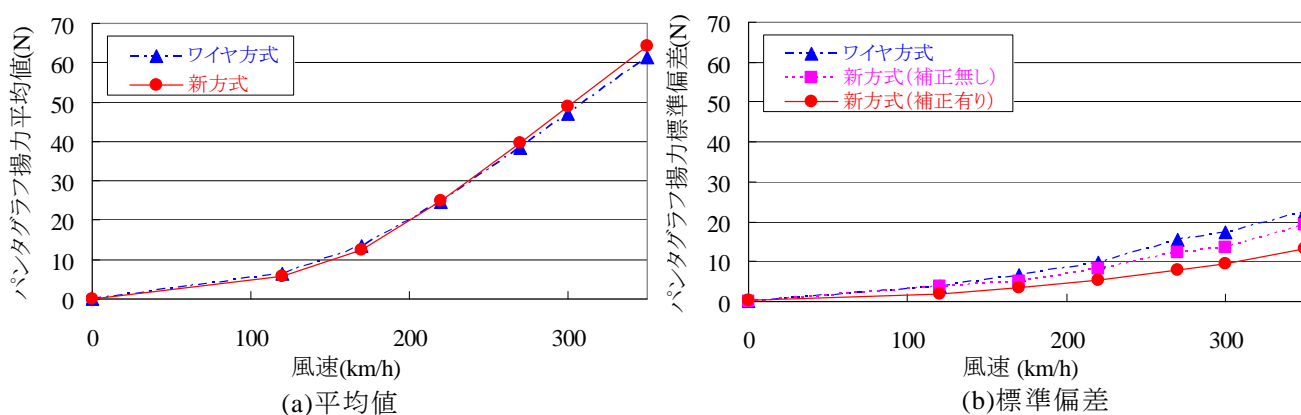


図 6 パンタグラフ揚力測定結果（平均値と標準偏差）

図 7 に風速 300km/h におけるパンタグラフ揚力のパワースペクトル密度を示す。ワイヤ方式、新方式（補正無し）ともそれぞれ 6Hz 付近、4.5Hz 付近にパンタグラフ揚力のピークが認められるが、これらは図 5 に示したそれぞれの方式に現れる固有振動数とほぼ一致し、新方式（補正有

り)では存在しないため、実際には4.5Hz付近や6Hz付近には揚力変動のピークは存在しないと考えられる。また、どの方式であっても11Hz付近にピークが存在するため、実際の揚力変動のピークを捉えていると考えられるが、ワイヤ方式については新方式(補正無し・有り)に比べ、ピークの周波数が若干異なり、その大きさも小さい。ワイヤ方式と新方式の異なる点はワイヤやワイヤ取り付け治具の存在のみであるため、これらにより空力的な現象が変化した可能性が考えられ、新方式は実際の現象をより正しく測定出来ると考えられる。さらに、新方式(補正有り)では補正前に比べ4.5Hz付近のピークが無く、12Hz付近以上のパワースペクトル密度も大きいことから、新方式+補正により実際の現象をより正しく高精度で測定が可能になったと考えられる。

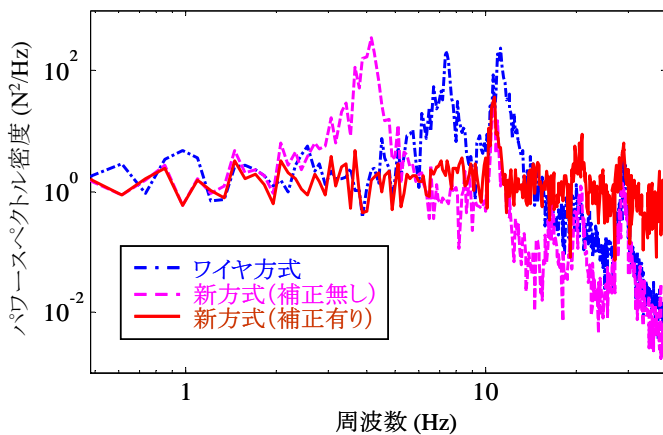


図7 パンタグラフ揚力測定結果
(パワースペクトル密度、300km/h)

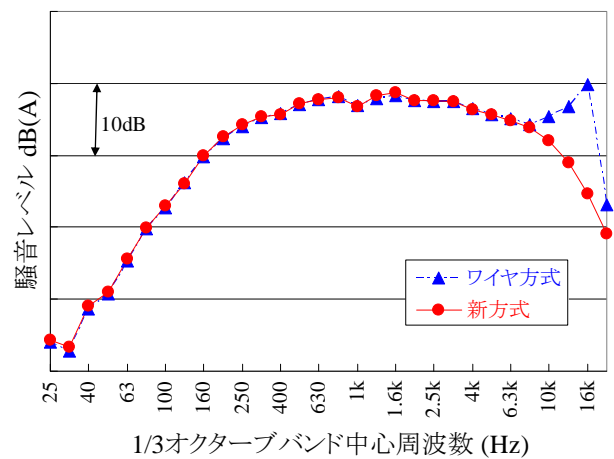


図8 空力音測定結果(300km/h)

4.2 空力音

パンタグラフ揚力と同時にパンタグラフから発生する空力音を、ワイヤ方式、新方式それぞれについて測定した。空力音は、無指向性マイクロホンを用いて舟体上面と同じ高さで、舟体中心からまくらぎ方向へ5m離れた位置に設置して測定した。

図8に1/3オクターブバンド分析を行い、周波数重み特性Aを施した測定結果を示す。この結果は、反たびき、標準作用高さ、風速300km/hの測定結果である。

測定結果より、ワイヤ方式では10kHzバンド以上にワイヤから発生する顕著なエオルス音が観測されるが、新方式ではワイヤを使用していないためにこの音は発生しない。したがって、空力音の測定においても実際の走行状態に近い新方式の方がより正確な結果が得られる。

5. まとめ

パンタグラフの風洞試験において、ワイヤを使用しないことで流れに影響を及ぼさずに、パンタグラフ揚力と空力音を同時に、かつ、精度良く測定できる手法を考案し、従来よりも実際の走行状態に近い条件で空力音・揚力を測定することを可能とした。

本手法はどのような形式のパンタグラフに対しても適用可能であり、応用範囲を今後拡大していきたいと考えている。また、本手法を元にパンタグラフの姿勢が常に変動しているような状況における空力音測定、揚力測定も可能であり、実使用条件に近い状態における空力音、揚力特性を明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- (1)末木,池田,風洞試験におけるパンタグラフ揚力の新しい測定法の開発,第12回鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail'05)講演論文集,pp41-44,2005