

新幹線パンタグラフ舟体の揚力特性変化メカニズムの解明

光用 剛* 池田 充** 佐藤 祐一*

Clarification of Lift Force Variation Mechanism of a Pantograph Head of Shinkansen

Takeshi MITSUMOJI Mitsuru IKEDA Yuichi SATO

It is important for the Shinkansen pantograph head to have suitable aerodynamic lift force characteristics. Moreover, it is also necessary that the lift force variation due to the wear of the contact strip is within the allowable range. So far, the relation between the flow field around the pantograph head and the lift force characteristics has not been clarified. Therefore, the development of the pantograph head has been promoted in the wind tunnel test by trial and error. In this study, the lift force variation mechanism of the pantograph head is clarified by applying wind tunnel tests and CFD analysis.

キーワード：パンタグラフ、舟体、揚力特性、圧力分布、CFD 解析

1. はじめに

走行中に高速の気流にさらされる新幹線のパンタグラフには揚力が作用する。パンタグラフの構成部材のなかでも、舟体はパンタグラフの揚力特性に対する寄与が大きい部材であることが知られており、架線とパンタグラフとが適切な接触力を維持して安定的にしゅう動するためには、舟体に作用する揚力を常に適切な値に維持することが必須である。一方で、舟体に作用する揚力は対向風の風速や風向の変化、すり板の摩耗に伴う形状変化などの影響を受けて変化する。このような背景から、新幹線パンタグラフ用の舟体には、すり板摩耗や風向変化が生じた際の揚力変化量が極力小さくなるような断面形状¹⁾のものが選定されているが、断面形状の選定は主として風洞試験において試行錯誤的に実施されている。そのため、舟体周りの流れ場と揚力の関係については物理的な現象理解が十分ではなく、すり板摩耗などによって舟体の揚力が変化するメカニズムを明らかにするとともに、そのメカニズムに基づいて舟体の揚力特性を安定化するための方策を明確化することが望まれている。

そこで、本研究では舟体の揚力特性にとって重要なすり板摩耗に着目し、風洞試験およびCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析の両面から舟体周りの流れ場と圧力分布および揚力の関係を把握し、すり板摩耗によって揚力が変化するメカニズムの解明および揚力安定化のための方策の検討を行った。

2. 風洞試験およびCFD解析の概要

本研究で解析対象とした舟体は、新幹線用パンタグラフの代表的な舟体断面形状のうちの一つを模擬する形状とした。具体的には、矩形断面の舟体の上部に、前後角部に面取りを施した矩形すり板を取り付けた形状とした。

2.1 風洞試験

風洞試験は鉄道総研大型低騒音風洞（開放型計測部、吹出口寸法3m×2.5m、最大風速400km/h）において実施した。供試体として圧力測定用の静圧孔を設けた舟体模型を製作し、これを新幹線用実機パンタグラフに搭載して試験に供した。舟体模型の静圧孔は、図1に示すようにまくらぎ方向の中心断面（以下、中心断面と記す）と、そこから200mm偏倚した断面（以下、200mm偏倚断面と記す）の2断面に設け、各断面において舟体全周にわたって静圧孔を配置した。ただし、中心断面のうち舟体底面の舟支え金具への接続箇所については、

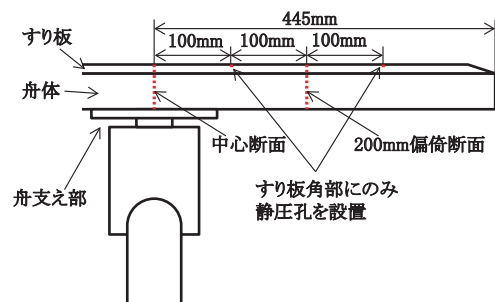


図1 舟体模型の静圧孔設置位置
(赤点線部が静圧孔設置断面)

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

** 鉄道力学研究部

特集：鉄道力学

静圧孔を省略した。また、舟体表面圧力のまくらぎ方向の分布を把握するため、中心断面から 100mm および 300mm 偏倚した断面のすり板角部近傍(後述する図4(c)の点 (D) 近傍位置)にも静圧孔を設けた。

風洞試験においては、圧力測定と同時にロードセルを用いたパンタグラフ揚力測定を実施した。以下、本稿に示す風洞試験結果は全て、標準作用高さ、なびき条件(上流側に中間ヒンジが位置する向き)、舟体迎角およびパンタグラフ迎角がともに 0° の条件下において得られた結果を示している。

2.2 CFD 解析

CFD 解析では、舟支え部を含まない 200mm 偏倚断面における圧力分布測定結果に基づき、二次元定常 CFD 解析を実施した。ここで、解析対象を 200mm 偏倚断面とした理由は以下の通りである。図2は風洞試験において得られた上流側のすり板角部近傍の圧力の、まくらぎ方向の分布を描画したものである。同図より、すり板角部近傍の圧力はまくらぎ方向偏倚が 0mm から 100mm の領域で変化している一方、まくらぎ方向偏倚が 100mm を超えるとほぼ一定値となることがわかる。中心断面付近においては舟支え部によって舟体周りの流れが影響を受けていると考えられるが、本試験で用いたパンタグラフについては、舟支え部の影響が及ぶ領域は、舟体中心からまくらぎ方向に± 100mm 程度の領域に限られることがわかる。そこで、本論文では舟体周りの流れがまくらぎ方向に一樣とみなせる 200mm 偏倚断面の流れ場に注目することとした。

CFD 解析は ANSYS 社製汎用流体解析ソルバである Fluent ver.14 を使用し、舟体周りの二次元定常流れ場解析を実施した。計算要素数は各ケースで約 6 万要素である。乱流モデルには高レイノルズ数流れを対象とした乱流モデルである k-ε Realizable モデルを使用し、CFD 解析において得られる圧力分布が、風洞試験で得られた 200mm 偏倚断面の圧力分布と可能な限り一致するように、計算格子および計算パラメータを調整した。

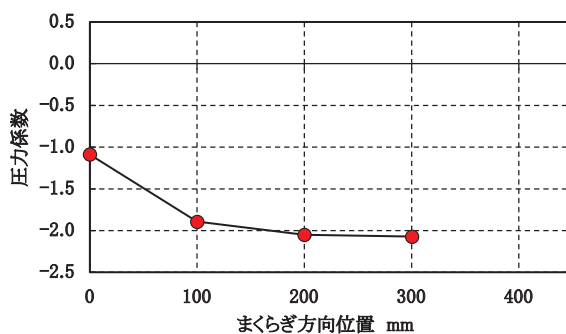


図2 すり板角部近傍の圧力のまくらぎ方向の分布 (風洞試験, すり板新品, 風速 300km/h)

3. 舟体の揚力変化メカニズムと安定化方策

3.1 舟体周りの流れ場と圧力分布の概略

はじめに、最も基本的な条件であるすり板新品条件における風洞試験・CFD 解析結果を例に、舟体周りの流れ場と圧力分布の概略について説明する。図3に風洞試験で得られた風速 300km/h における舟体表面圧力分布測定結果を示す。図3の横軸は静圧孔のレール方向位置を舟体のレール方向幅で無次元化した値を記しており、原点は舟体中心、レール方向位置が負の値となる側が上流側である。また、図3の (A) (C) (D) の位置は後述する図4(c)に図示している位置に相当している。図3より、200mm 偏倚断面の舟体底面側については圧力係数が上流側から下流側までほぼ一定値となっているのに対し、舟体上面側では、中心断面、200mm 偏倚断面ともに舟体前縁部 (A) からすり板角部 (D) にかけて圧力分布が大きく変化している様子が確認できる。

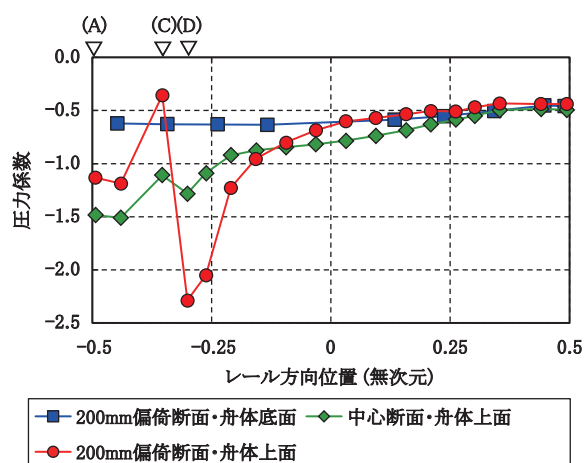


図3 風洞試験による舟体表面圧力測定結果 (すり板新品, 風速 300km/h)

図4は風速 300km/h における CFD 解析結果のうち、200mm 偏倚断面において圧力分布が大きく変化した舟体上面側の前縁部近傍を描画したものである。なお、図4に示す CFD 解析結果は、図5に示すように風洞試験結果と圧力分布がよく一致していることを確認している。図4(c)の流線図を図4(a)(b)と対比させて参照すると、舟体周りの流れ場はおおよそ以下のような流れ場となっていることがわかる。舟体の上面側の流れは、まず、舟体前縁角部 (A) において剥離し、その後すり板前縁の面取り部の基部付近 (B) に再付着してすり板の面取り部 (C) に沿って流れた後、角部 (D) を大きく剥離することなく回りこんですり板上面に沿って流下している。流れが角部 (D) を回り込む際、角部近傍において流速が増加し (図4(a))、これにより大きな圧力低下が生じている (図4(b))。

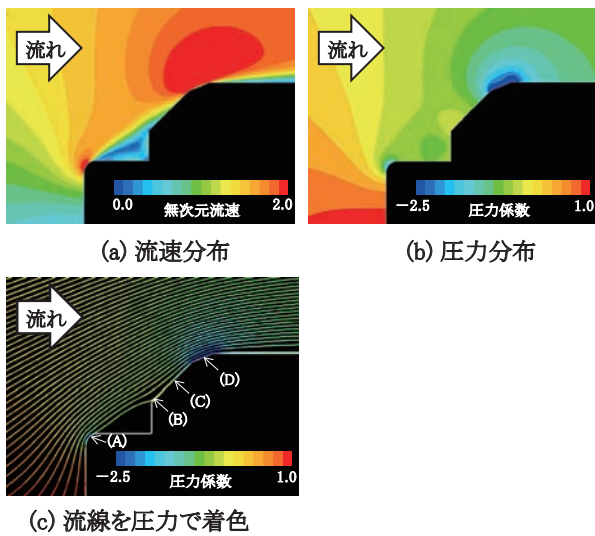


図4 CFD解析による舟体まわりの流れ場
(すり板新品, 風速 300km/h)

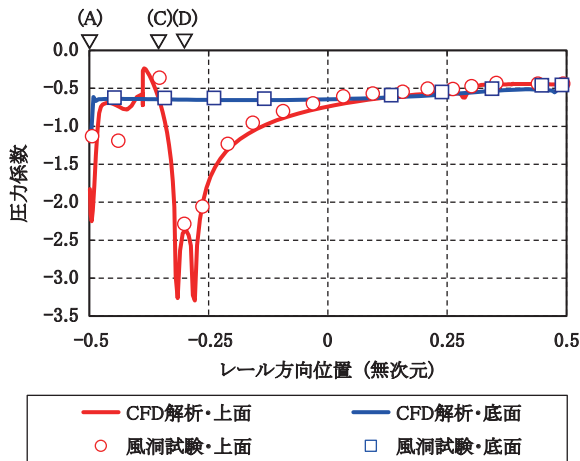


図5 風洞試験結果と CFD 解析結果の圧力分布の比較
(200mm 偏倚断面, すり板新品, 風速 300km/h)

一方、中心断面については、図3に示したように200mm 偏倚断面ほど大きな圧力低下が生じていない。これは舟支え部の影響であると考えられる。なびき条件の場合、舟支え周辺から舟体に向かって流れが吹き上げられる状態となっており、舟体角部(A)で剥離した流れの再付着点がすり板角部(D)に近くなるとともに、角部(D)において流れが大きく剥離する状態となり、流速増加による圧力低下が生じにくくなったと考えられる。

なお、舟体底面側については、CFD 解析結果から上流側の舟体底面角部で剥離した流れが再付着することなく下流側へ流下している流れ場が得られた。また、風洞試験結果からは、すり板の摩耗条件による圧力分布の大きな変化はないことが確認された。以上のことから、本研究で解析対象とした舟体については、主として上流側のすり板角部に発生する大きな負圧によって揚力が発生

しており、かつ、舟体底面側はすり板の摩耗条件による揚力変化に対して寄与していないと考えられるため、以後の議論では舟体の上面側の流れに着目した比較、考察を行うこととする。

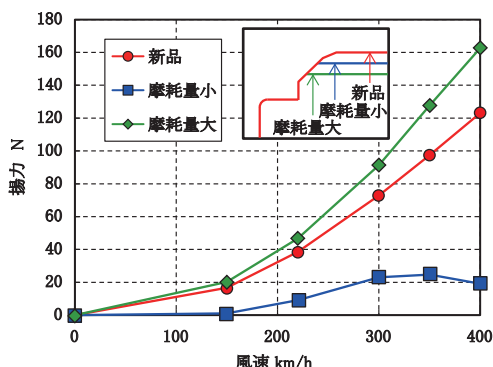
3.2 すり板摩耗時の揚力変化と流れ場の関係

前節で示した舟体に対して、すり板が摩耗した場合の揚力特性および舟体表面圧力の測定結果を図6に、これに対応するCFD 解析結果を図7に示す。なお、風洞試験におけるすり板摩耗は、すり板の厚みをまくらぎ方向に一様に一定量だけ減じて模擬した。これは、中心断面と200mm 偏倚断面とで舟体断面形状を同一にするためである。したがって、風洞試験におけるすり板摩耗状態は実際の車両の摩耗状態とは必ずしも同じではない。すり板摩耗量は摩耗量小と摩耗量大（摩耗量は摩耗量小の2倍）の2通りを設定した。いずれの摩耗状態についても、すり板のしゅう動面は水平で、かつ、角部は鋭利になるようにすり板模型を加工している。揚力特性の比較図(図6(a))より、すり板摩耗量小の場合にはすり板新品の場合と比べて揚力が低下しており、かつ、風速が350km/hを超えると風速増加に対して揚力が減少することがわかる。一方、この状態からさらにすり板摩耗が進行した摩耗量大の場合には、すり板新品状態とはほぼ同等の揚力が生じている。

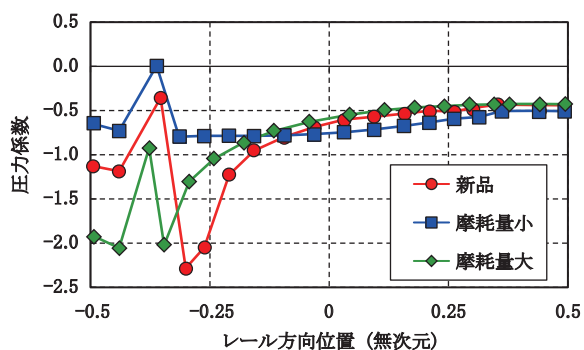
このような違いが生じた要因について、舟体表面圧力分布測定結果およびCFD 解析結果を基に検討する。圧力分布測定結果(図6(b))から、揚力低下が生じた摩耗量小の場合には、すり板新品および摩耗量大の場合に見られるようなすり板角部近傍における大きな圧力低下がみられないことがわかる。図7のCFD 解析結果では、摩耗量小の場合のみ、すり板角部において流れが大きく剥離しており、すり板新品や摩耗量大の場合に見られるような、すり板角部における顕著な圧力低下が生じていない(図7(b))。この差異が生じた理由については次のように考えることができる。本研究で対象とした舟体の場合、上流側のすり板面取り部の傾斜に沿ってすり板角部に向かう流れが流下する際に、すり板の残厚が厚いほどすり板表面から離れた領域の流体もすり板の面取り部の傾斜に沿って流下方向を変える、すなわち、すり板の面取り部の傾斜方向に沿う方向に運動量を持つようになると考えられる。したがって、摩耗量小の場合のようにすり板残厚が厚い場合には、すり板角部近傍の流体の運動量の方向がすり板面取り部の傾斜に沿う方向に揃った状態ですり板角部に達するため、すり板角部の形状変化に流れが追従できずに剥離を生じやすくなると考えられる。一方、摩耗量大の場合には、すり板残厚が薄く、摩耗量小の場合ほど、すり板角部近傍の流体の運動量の方向がすり板面取り部の傾斜に沿った方向に揃わない状

特集：鉄道力学

態ですり板角部に達するため、流れが角部の形状変化に追従し易くなり、大規模な剥離を生じることなく角部に沿うように流下したと考えられる(図7(c))。なお、上記のメカニズムによると、すり板新品時には摩耗量小の場合と同様に大規模な剥離を生じる事になるが、すり板新品時にはすり板角部に追加の面取り処理が施されているため、流れの剥離が生じにくい状況となっていると考えられる。

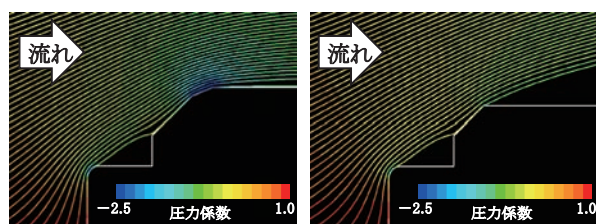


(a) 揚力測定結果



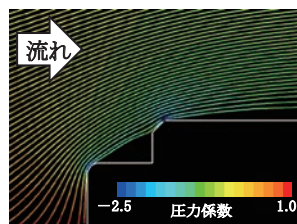
(b) 圧力分布 (200mm偏倚断面, 風速300km/h)

図6 すり板摩耗時の揚力および舟体表面圧力測定結果 (風洞試験, 迎角 0°)



(a) すり板新品 (図3(c)を再掲)

(b) 摩耗量小



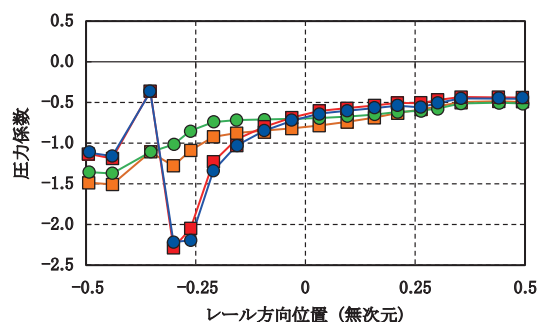
(c) 摩耗量大

図7 すり板摩耗時の CFD 解析結果 (風速 300km/h)

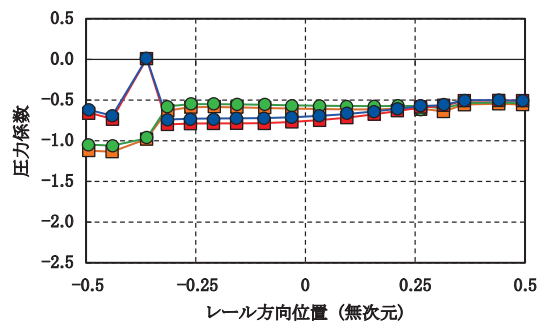
3.3 揚力と圧力分布の風速依存性

図6(a)の揚力測定結果からは、すり板新品および摩耗量大の場合は風速増加に対して単調に揚力が増加しているのに対し、摩耗量小の場合には風速増加に対して揚力が減少することが確認された。本節ではこれらの差異が生じた要因について検討する。図8はすり板新品および摩耗量小の2条件について、風速300km/hと風速400km/hの舟体上面側の圧力分布を比較したものである。一般に、舟体周りの流れ場が十分に乱流化している場合には、流れ場のレイノルズ数依存性が小さく、舟体表面の圧力係数の分布および揚力係数は風速によらず一定となり、揚力は風速の二乗に比例して増加する。

しかし、図8においては、すり板新品、摩耗量小の場合ともに、風速増加に対して圧力分布が僅かに変化していることがわかる。ただし、すり板新品の場合は、風速増加に対して中心断面では圧力が僅かに上昇する一方で、200mm 偏倚断面においては圧力が僅かに低下している(図8(a))。これらの寄与が相互に相殺した結果、すり板新品においては舟体の揚力係数自体は大きくは変化せず、風速増加に対して単調に揚力が増加したものと考えられる。一方、摩耗量小については、風速増加に対して中心断面、200mm 偏倚断面ともに圧力が僅かに上



(a) すり板新品



(b) すり板摩耗量小

図8 高風速域の舟体表面圧力分布の変化 (舟体上面側)

昇しており（図 8 (b)），その結果，風速増加に対して揚力が減少したものと考えられる。実際に，図 8 に示した舟体表面圧力を積分し，図 2 を参考に舟体のまくらぎ方向中心±100mm の領域には中心断面の圧力分布を，それ以外の領域には 200mm 偏倚断面の圧力分布を適用して揚力係数の変化量を算出したところ，すり板新品の場合の変化量は +0.01 と小さい一方，摩耗量小の場合の変化量は -0.04 と大きく減少しており，上記の推測を裏付ける結果が得られている。

このように，揚力が風速に対して単調に増加するような場合においても，流れ場にレイノルズ数依存性を有している場合があり，流れ場および舟体表面圧力分布の風速依存性を把握しておくことは，舟体の設計において重要であると言える。

3.4 すり板摩耗状態と揚力の関係

3.2 節で説明したメカニズムに基づく，すり板の摩耗量が小さい場合でも，すり板の角部やしゅう動面の状態が異なると，すり板角部近傍における流れが変化する可能性が考えられる。そこで，すり板の摩耗状態が揚力特性に及ぼす影響についてさらに検討を行った。

図 9 はすり板摩耗量を摩耗量小としたうえで，図 7 (b) の場合とは異なる摩耗状態を設定した場合の揚力測定結果および CFD 解析結果を示している。本検討においては，すり板摩耗状態としてすり板角部が丸まった状態を模擬するため，すり板角部にすり板新品時と同様の追加面取り処理を施した場合（水平・角部面取り）および，

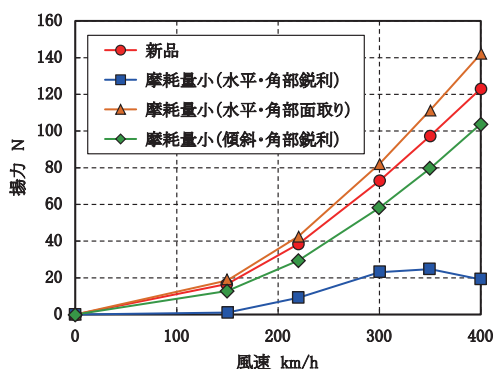
すり板角部は鋭利とし，すり板が斜めに摩耗した状態を模擬するため，しゅう動面を下流側に向かって斜め上方に傾斜させた場合（傾斜・角部鋭利）の 2 通りの条件を設定した。図 9 (b) (c) より，いずれの摩耗状態においてもすり板角部における流れの剥離は生じておらず，風洞試験で得られた揚力もすり板新品時と同程度の値となっていることがわかる（図 9 (a)）。

以上のことから，すり板摩耗時の揚力低下は，すり板摩耗量小の場合のようなある一定の摩耗量の状態において，すり板の角部が鋭利に摩耗した場合に生じると結論づけることができる。また，しゅう動面が下流側に向かって斜め上方に傾斜している場合のように，角部において流れが回り込む角度が小さくなると，流れの剥離が抑制される傾向があることもわかる。

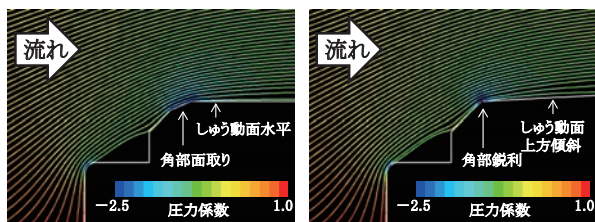
3.5 揚力安定化のための方策の検討

本研究で対象としたような，すり板角部において流れが回り込む際に生じる負圧によって揚力が発生している舟体形状については，すり板摩耗によってすり板角部で流れの大きな剥離が生じた場合に，揚力特性が大きく変化することがわかった。そこで，これらの知見を踏まえて，舟体の揚力特性を安定化するための方策の検討を行った。

本検討では舟体角部からすり板角部にかけての流れに着目し，舟体の角部形状と流れ場の関係について調査した。図 10～図 11 に，すり板摩耗量小の場合（図 7 (b)，以下，本節では標準形状と記す）に対して，舟体角部の条件を変更した場合の揚力測定結果および CFD 解析結果を示す。試験条件としては，舟体角部の円弧状に加工された部分の曲率半径を，標準形状よりも拡大した条件（円弧寸法拡大），円弧状の加工を省略した条件（円弧加工省略），および一部の営業車で実施されている対策を参考に，舟体角部の位置を上流側かつ上方に変更した条件（円弧位置変更）の 3 通りの条件を設定した。これらの図を参照すると，円弧寸法拡大については，標準形状の場合（図 11 (a)）と比べて舟体角部における流れの剥離が抑制され，すり板面取り部における流れの再付着点がすり板の基部側に移動している。しかし，この状態においてはすり板角部での流れはかえって大きく剥離する状態となっており（図 11 (b)），標準形状に対してすり板角部付近の圧力が上昇する結果，揚力が減少している。反対に，円弧加工省略については，標準形状よりも舟体角部において流れが大きく剥離し，すり板面取り部の流れの再付着点が上方側に移動した結果，すり板角部における流れの剥離が抑制されている（図 11 (c)）。これにより，標準形状よりもすり板角部における圧力が低下して揚力が増加している。ただし，この条件についてはすり板面取り部の流れの再付着点がすり板角部に近くなるため，すり板がさらに摩耗した場合に，中心断面付



(a) 揚力測定結果(風洞試験)



(b) 水平・角部面取り

(c) 傾斜・角部鋭利

図 9 すり板の摩耗状態と揚力・流れ場の関係
((b) (c) は風速 300km/h における CFD 解析結果)

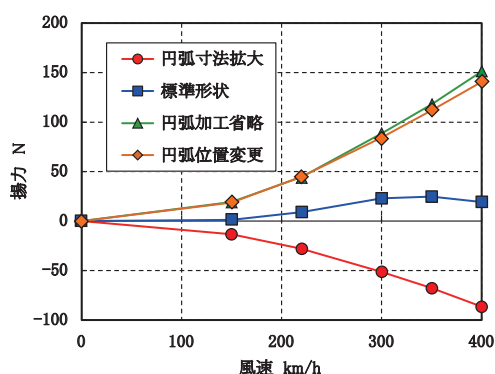


図10 舟体角部の形状変更による揚力特性の変化 (風洞試験, すり板摩耗量小)

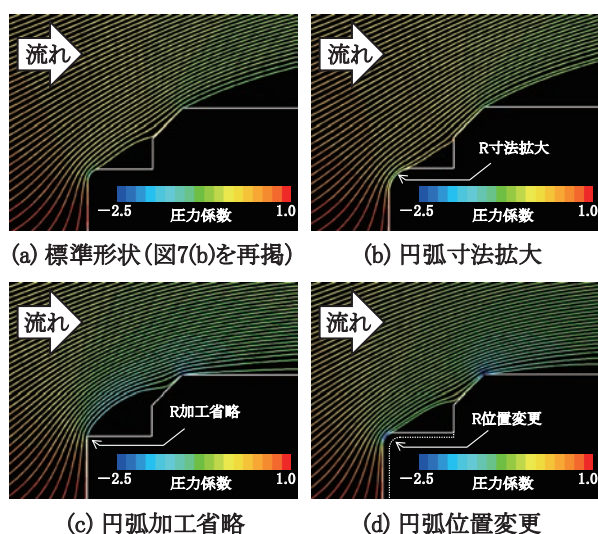


図11 舟体角部の形状変更による流れ場の変化 (CFD解析結果, 風速300km/h, すり板摩耗量小)

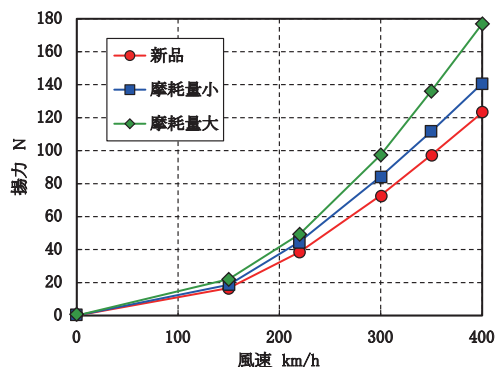


図12 R位置変更の場合の揚力特性 (風洞試験)

近ですり板に流れが再付着しなくなることが確認されており、摩耗が進行すると標準形状と同様に揚力低下が生じることがわかった。最後に、円弧位置変更については、舟体角部からすり板面取り部にかけての流れ場は標準形状の場合と比べて大きな差はないものの、すり板角部における流れの剥離が抑制されており、すり板角部において圧力低下が生じて標準形状よりも揚力が増加している

(図11(d))。図12は舟体角部の円弧位置変更を行った形状について、すり板新品および摩耗時の揚力特性を比較したものである。図12と図6(a)を比較すると、円弧位置変更を実施した場合、標準形状よりもすり板摩耗による揚力変化量が小さく、安定した揚力特性が得られていることが確認できる。

以上のように、本研究で解析対象とした舟体は、すり板角部における流れの状態に着目し、舟体角部の形状を調整するなどして、舟体角部からすり板にかけての流れを変化させることで、すり板角部における流れの剥離とそれに伴う揚力変化を抑制し、揚力特性を安定化できることがわかった。

4. まとめ

本研究では、すり板摩耗に伴うパンタグラフ舟体の揚力変化メカニズムについて、風洞試験およびCFD解析の両面から現象解明を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 本研究で解析対象とした舟体については、舟支え部の影響が及ぶ領域は舟体中心から±100mm程度の領域である。
- (2) 本研究で解析対象とした舟体は、上流側のすり板角部を流れが剥離せず回り込む際に大きな負圧が生じて揚力が発生している。
- (3) 揚力が風速に対して単調に増加している場合でも、舟体周りの流れ場および圧力分布にレイノルズ数依存性を有している場合がある。
- (4) 本研究で解析対象とした舟体は、すり板が摩耗してすり板角部で流れの剥離を生じると、揚力が減少する。ただし、この揚力減少はすり板の摩耗状態が特定の条件となった場合に生じる。
- (5) 本研究で解析対象とした舟体の場合、舟体角部の形状を調整するなどして流れの剥離を抑制することで、揚力特性が安定化される。

これらの結果より、上流側のすり板角部における流れの状態が揚力安定化のための着目点として挙げられ、すり板摩耗などによって、すり板角部における流れの状態が大きく変化しないことが、揚力安定化にとって重要であると結論づけられる。今後は、本研究で得られた知見を舟体の開発に活用したいと考えている。

文献

1) 室渦寛之, 池田充 ほか: 高速用パンタグラフ舟体まわりの二重極音源分布の可視化, 可視化情報学会論文集, Vol.25, No.6, pp13-20, 2005