

台車キャビティの隅部丸み付けによる 台車部空力音の低減メカニズムに関する数値解析

兔内 龍也* 宇田 東樹*

Numerical Analysis on Mechanism of Aerodynamic Noise Reduction in Bogie Area
by Rounding Corners of Bogie Cavity

Tatsuya TONAI Toki UDA

Aerodynamic noise radiated from running high-speed trains is attracting attention from the environmental point of view. Bogie areas are known to be the main sources of the aerodynamic noise. Rounding the four corners of the bogie cavity has been proposed as a measure to reduce bogie aerodynamic noise, and wind tunnel tests have confirmed its effectiveness. However, detailed flow fields around bogie area have not been identified and the mechanism of noise reduction by such measures remains unclear. In this study, numerical analyses on the flow field near the bogie area were conducted to investigate the changes in the flow field caused by the proposed measure and to discuss the reduction mechanism.

キーワード：高速鉄道，台車部，空力音，騒音低減，数値流体力学

1. はじめに

鉄道車両の高速走行時に発生する空力音は沿線環境における課題の一つとなっている。この空力音は、走行速度が増加するにつれて、環境基準評価点における全体騒音への寄与が大きくなり、営業列車の速度向上などの際に沿線騒音が環境基準を超過する原因となる可能性がある。また、空力音の100Hz以下の低周波成分や20Hz以下の超低周波成分（圧力変動）は、建具のがたつきや心理的な圧迫感を発生させることがあり、沿線の住環境に影響を与える可能性がある。

新幹線の高速走行時に発生する空力音の主な発生源の一つは台車部とされる。台車部から発生する空力音（以下、台車部空力音）が全体騒音に対して占める割合は、320km/h走行時には約3割とされ、360km/hまで増速した場合には約4割まで増加すると試算されている¹⁾。営業列車の速度向上を行うためには、台車部空力音を低減させる必要がある。

台車部空力音を低減させる方法として、地上設備側への対策と車両側への対策が考えられる。コスト面を考慮すると、車両側への対策を実施する方が望ましい。車両側への対策として、跳ね上げ材や台車キャビティの隅部丸み付けなどのように台車部の形状を変更する対策が提案されており、風洞試験によってその効果が確認されている²⁾。しかし、台車部空力音が低減するメカニズム（以下、低減メカニズム）については明らかにされていない。

低減メカニズムを明らかにすることで、台車部空力音の低減対策の深度化が期待できる。

本研究では、台車部空力音の低減対策による低減メカニズムを明らかにすることを目的とし、数値シミュレーションを実施した。本報告では、風洞試験で有効性が確認された隅部丸み付け形状を解析対象として、隅部丸み付け形状の有無による流れ場の変化を調査し、低減メカニズムについて考察した。第2章で隅部丸み付け形状の概要、第3章で数値シミュレーションによる低減メカニズムの解析についてそれぞれ述べる。

2. 隅部丸み付け形状

隅部丸み付け形状の概要を図1に示す。隅部丸み付け形状は、台車キャビティ（台車を格納するための直方体形状の空間）の四隅を埋めて丸みを付けた、台車部空力音に対するシンプルな低減対策である。台車部における安全性やメンテナンス性を損ねず実車に搭載可能な形状

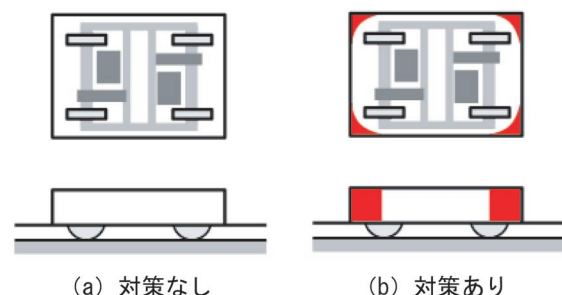


図1 隅部丸み付け形状

* 環境工学研究部 騒音解析研究室

として提案されたいくつかの低減対策のうちの一つで、それらの中で最も実用化の可能性の高い形状である。丸み付け部の半径は、実車寸法で700mmである。

台車部空力音の低減に対する隅部丸み付けの有効性は、過去に複数回にわたって実施された風洞試験で確認されている²⁾。表1は隅部丸み付けによる空力音の変化量である。過去の風洞試験の結果を空力音と圧力変動のそれぞれに対する代表的な周波数で整理したものであり、値が小さいほど空力音が低減されていることを表す。

しかしながら、風洞試験により有効性が示されている一方で、隅部丸み付けによる台車部空力音の低減メカニズムの詳細は明らかになっていない。この理由として、台車部付近の流れ場全体の情報を実験的に取得することが困難であることが挙げられる。すなわち、台車部付近の流れ場は非常に複雑であり、また、台車キャビティ内が狭隘であるため流れ場を乱さずに流速、圧力分布等を測定することが非常に難しく、風洞試験や現車試験で流れ場に関する多点計測を実施することが難しいということが理由となる。台車部付近の流れ場全体の情報を取得し、隅部丸み付けなどの台車部空力音低減対策を実施した場合の流れ場の変化から低減メカニズムが明らかになれば、低減対策の更なる深度化が期待される。

一般的な空力音の低減メカニズムとして、流速の低減と渦運動の変化の2点が考えられる。1点目の流速の低減は、空力音のパワーが流速の6-8乗に比例するため、流速を低減すれば空力音の低減につながることに由来する。2点目の渦運動の変化は、空力音源が渦の非定常運動であることに由来する。隅部丸み付けにおいては、大きな流速の変化は期待されず、渦運動の変化による空力音の低下によるところが大きいと考えられる。次章では、隅部丸み付けによる渦運動の変化について着目し、解析をすすめる。

3. 数値流体力学に基づく低減メカニズムの解析

隅部丸み付け対策による台車部空力音の低減メカニズムを明らかにするには、数値シミュレーションの活用が有効であると考えられる。本章では、非定常3次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式に対する、数値流体力学に基づく数値シミュレーションにより、台車部付近の流れ場を解析した結果と考察について述べる。

3.1 解析モデル・解析条件

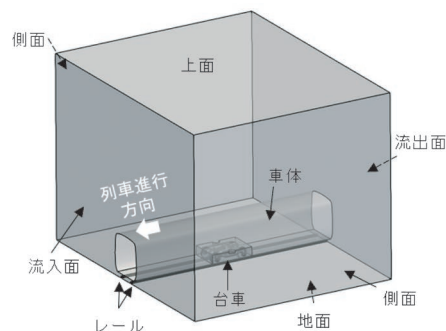
図2に解析モデルを示す。解析対象は実車同様の寸法の車体と車体中心部に設けられた1つの台車部である。解析領域は直方体領域であり、その中に台車が一つ設けられた一様断面の車体とレールが含まれる。台車は計算コスト削減のため、台車部空力音に影響を与える主要構

成要素のみを抽出した形状とし、台車枠、輪軸、主電動機、歯車装置、空気ばねを模擬した構造で構成した。台車キャビティは直方体を基本形状とし、台車キャビティの両側面に側カバー（フルカバー相当）がある形状とした。計算は基本形状と隅部丸み付け形状の2ケースについて実施した。

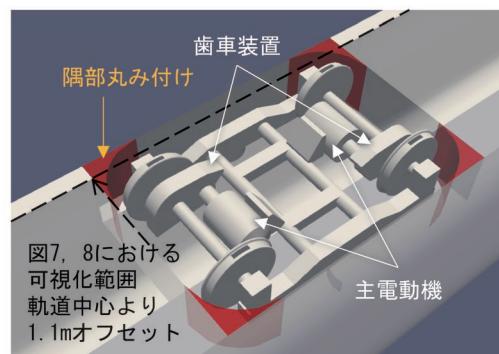
図3にレール方向に垂直な断面（台車中心位置）における計算格子生成時のドメイン、および境界線上の最大格子間隔を示す。車両床下の領域においては最大格子間隔が12.5mmであり、軌道中心から遠ざかるにつれて最大格子間隔を拡大させた。空間を伝わる音波の最大周波数は、最大格子間隔の値を用いて以下のように推定できる。空間的な音波の伝搬の解像にあたり一波長あたり8点程度の格子を確保する必要があるため、車両床下においては3.4kHz（ $= 340\text{m/s} \div (12.5\text{mm} \times 8)$ ）以下の音波を解像できると考えられる。同様に、軌道中心から2.7m離れた位置（最大格子間隔75mm）では550Hz（ $= 340\text{m/s} \div (75\text{mm} \times 8)$ ）程度の音波まで解像できると考

表1 隅部丸み付けによる台車部空力音の変化量 (単位 dB)²⁾

圧力変動 [Hz]			空力音 [Hz]			
< 16	25	50	250	500	1000	2000
-0.8	-0.1	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	0.1

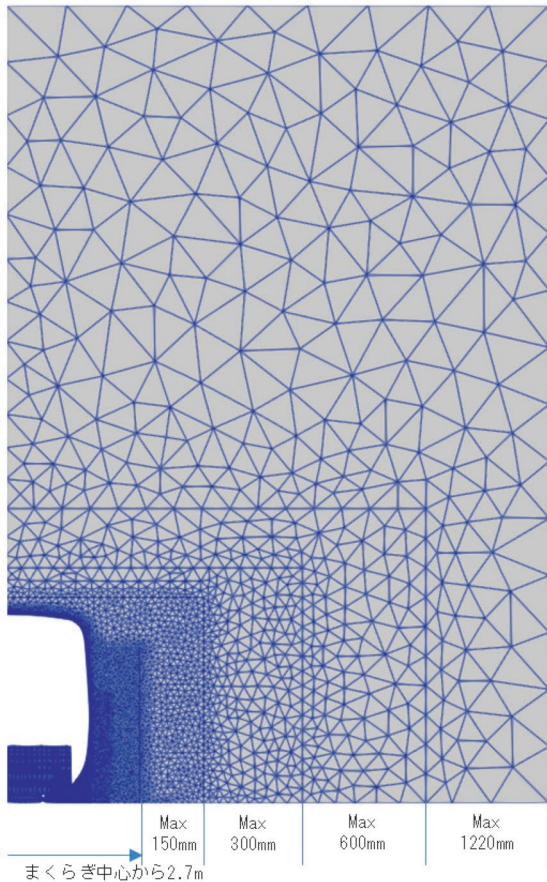


(a) 解析領域全体

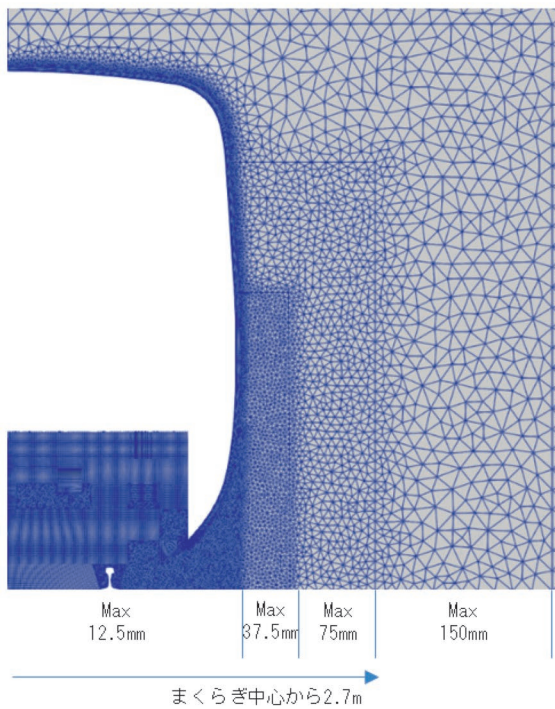


(b) 台車部付近

図2 解析モデル



(a) 解析領域全体



(b) 車体付近

図3 計算格子生成時のドメインと境界線上の最大格子間隔

えられる。

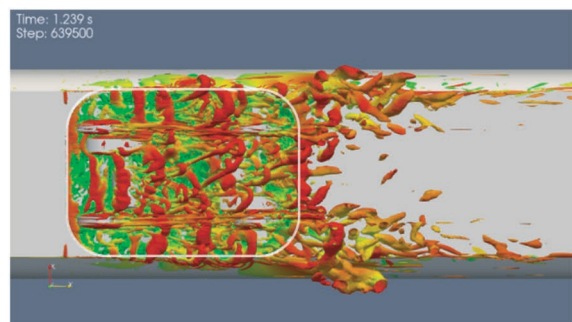
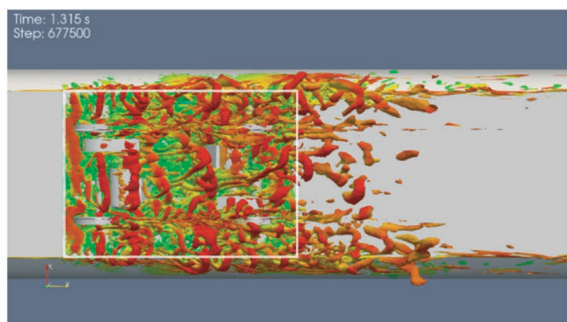
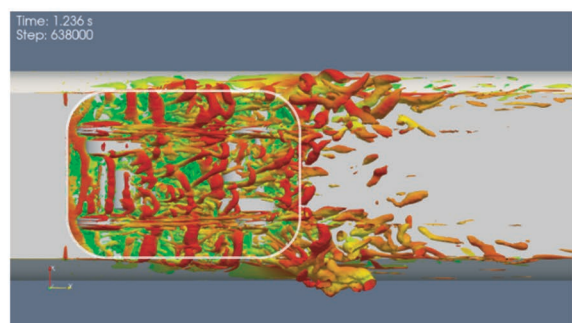
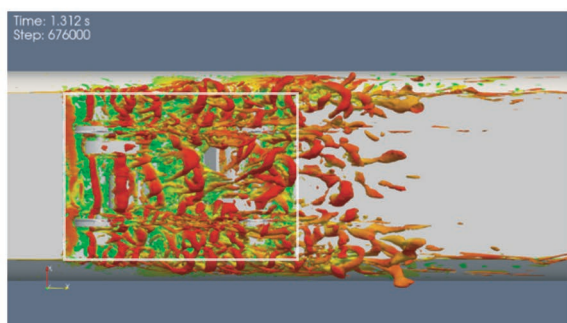
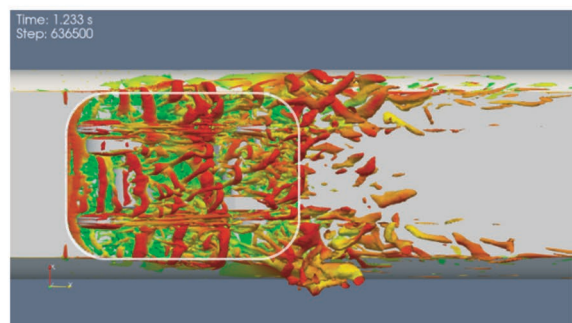
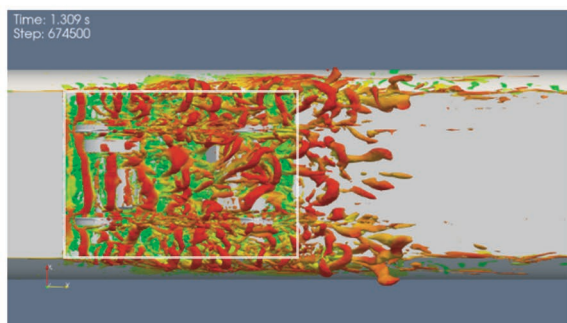
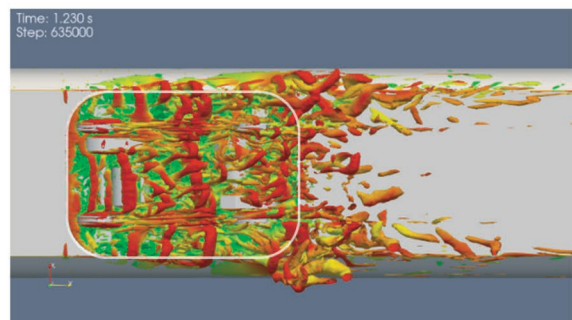
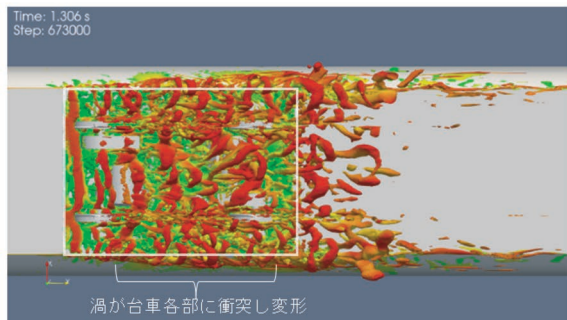
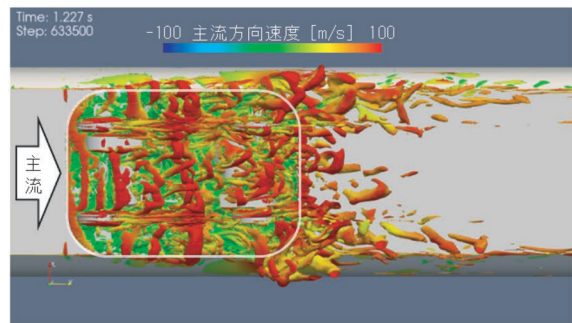
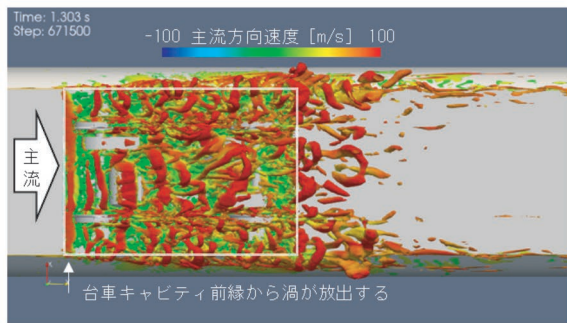
計算条件は、360km/h (= 100m/s) で走行する列車を想定して設定した。主流マッハ数が0.3程度であるため、支配方程式は圧縮性 Navier-Stokes 方程式とした。乱流モデルには LES (Large Eddy Simulation) を使い、サブグリッドスケールモデルは標準 Smagorinsky モデルを用いた。運動方程式に関して、移流項の離散化スキームは2次精度中心差分と1次精度風上差分を混合比8:2 (一部5:5) とし、時間積分法はCrank-Nicolson法を適用した。流入条件として、流入面に対して垂直に、解析領域内部に向かって一定速度100m/s、流出条件として、流出面で一定圧力 $1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ をそれぞれ与えた。固体表面上では Spalding 則を適用し、地面とレールには主流と同じ向きに移動速度100m/s、輪軸には100m/s 走行時相当の回転速度をそれぞれ与えた。地面とレールの移動や輪軸の回転は風洞試験では再現が困難な条件であるため、この点においても数値計算を実施する利点がある。解析領域の遠方境界となる上面と側面には Free Slip 条件を適用した。時間刻み幅は $2 \times 10^{-6} \text{s}$ とした。

3.2 台車部付近の流れ場

本節では、台車部付近の基本的な流れ場として、基本形状と隅部丸み付け形状の2ケースで共通している傾向について述べる。ここでは、Q値に基づく渦の可視化結果と、台車表面上の圧力変動のRMS (Root Mean Square, 実効値) を示す。Q値は速度勾配テンソルの第2不変量を表し、正のQ値は渦の強さを表す^{例えぼ3)}。正のQ値に対して等値面を描くことで、渦の分布を可視化することができる。

図4に台車部付近の渦の分布の時系列変化(3ms刻み)を示す。 $Q=10,000$ の等値面を描画して渦の分布とした。全体的な傾向として、渦が台車キャビティの前縁から放出され、主流に沿って移流する様子が見える。放出される渦はまくらぎ方向に長い横渦であり、100Hz程度の放出周波数(後述)で周期的に放出される。放出された渦は時間経過とともに下流に向かって移流し、台車各部(車輪、主電動機、歯車装置など)に衝突して変形する。その後、台車キャビティの後縁に到達するまでに渦は変形を繰り返し、台車キャビティの後縁を通過した後に、次第に渦が消失する。上記の傾向は基本形状、隅部丸み付け形状ともに共通している。一方、各図を詳細に比較すると、側カバー付近の渦の分布に違いが見られる。これらについては次節で詳しく述べる。

図5に基本形状の台車キャビティ前縁の軌道中心位置で取得した速度変動の各方向成分のパワースペクトル密度を示す。約100Hzのパワースペクトル密度において、主流方向速度 v と鉛直方向速度 w にはピークが認められる一方で、まくらぎ方向速度 u にはピークが認め



(a) 基本形状

(b) 隅部丸み付け形状

図4 台車部付近の渦の分布の時系列変化 (Q=10,000, 主流方向速度で色付け, 3ms 刻み)

られない。このことから、約 100Hz の v と w の周期的な速度変動は、台車キャビティの前縁から放出される横渦に起因するものと推測される。

図 6 に基本形状の台車表面上の圧力変動の RMS を示す。ここでは平均速度に基づく表面上流線も併せて示している。各統計量は 0.2 秒間で算出した。圧力変動の RMS が大きい箇所が台車表面上に局所的に出現しており、①上流側の主電動機、②下流側の主電動機、③下流側の歯車装置、④下流側の車輪、⑤台車キャビティ後端、⑥側カバー端部、⑦台車枠（実車の下流側軸箱位置に相当）に局在している。流線を見ると、これらの位置ではよどみ点となっていることがわかり、移流する渦が衝突する位置であると考えられる。なお、圧力変動の RMS が大きくなっているこれらの位置は、過去の風洞試験^{4) 5)}で確認された台車部空力音の発生箇所と概ね一致している。

一方で、必ずしもよどみ点で圧力変動の RMS が大きくなっているわけではない。すなわち、上流側の車輪や、上流側の歯車装置の表面上にもよどみ点がみられるが、これらの位置においては圧力変動の RMS は大きくない。これらの位置は、台車キャビティ前縁から放出された直後の渦が衝突する位置であると考えられる。

以上の傾向を総合的に考慮すると、空力音が発生する

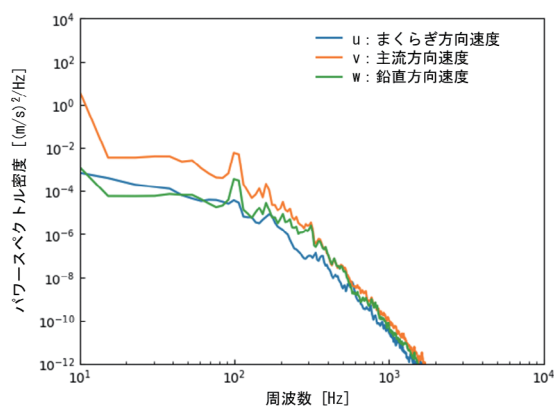


図 5 速度変動のワースペクトル密度(台車キャビティ前縁の軌道中心位置で取得)

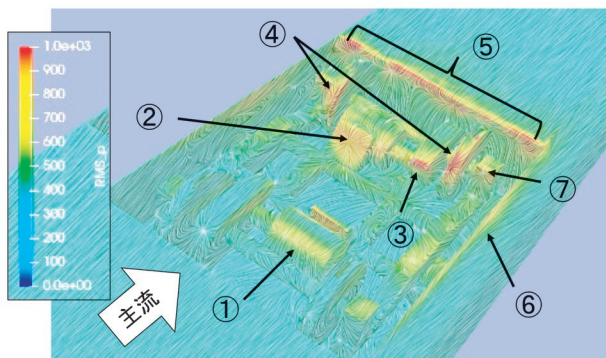


図 6 圧力変動の RMS (単位 Pa)

箇所は、一度台車各部等との衝突などによって乱れた渦が、再度台車各部に衝突している箇所と考えられる。

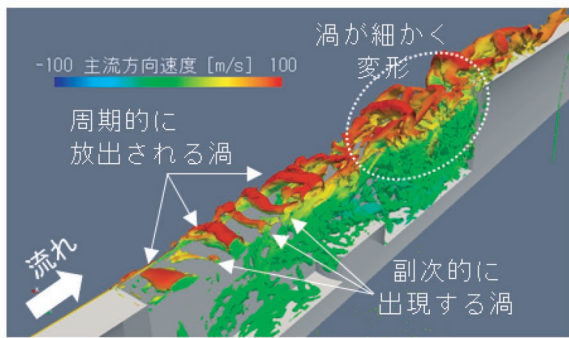
3.3 隅部丸み付けによる流れ場の変化

隅部丸み付けを実施した時の渦の運動の変化は側カバー付近に現れた。そこで、図 7 に $Q=10,000$ とした時の側カバー付近における瞬時渦分布の比較を示す。可視化範囲は、図 2(b) に示す軌道中心面から 1.1m オフセットした位置における断面である。図 7(b) の隅部丸み付け形状においては、上流側隅部から周期的に放出される渦が、比較的その形状を保ったまま下流に移流していることがわかる。一方で、図 7(a) の基本形状においては、上流側の隅部から周期的に放出される渦に加えて、それらの渦の間に副次的に出現する渦が存在する。副次的に発生する渦の個数は、周期的に放出される渦の間に 1 つか 2 つである。どちらの形状においても、隅部から周期的に放出される渦の間隔は概ね等しいため、副次的に発生する渦が存在する基本形状の方が、隅部丸み付け形状に比べて渦同士の間隔が狭くなる。このため、基本形状においては渦同士の干渉が生じ、結果として下流側隅部付近で渦が細かく変形していると考えられる。隅部丸み付けを実施した場合には、渦の副次的な発生、およびそれに伴う渦の変形を抑制する効果があると考えられる。

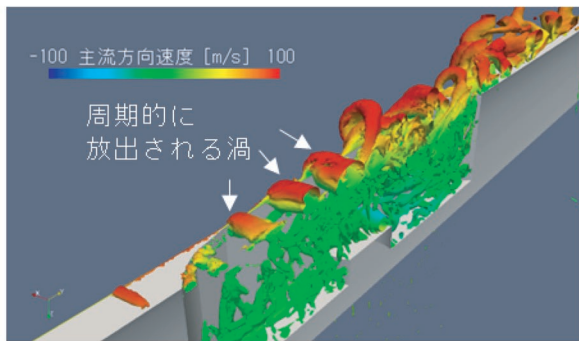
より強い渦の分布を見るために描画する Q 値をさらに増加させ、 $Q=250,000$ とした時の側カバー付近における瞬時渦分布を図 8 に示す。図 8 の各形状における渦分布は図 7 に示した渦分布とそれぞれ同時刻のものであり、図 8 の方がより渦芯に近いところが描画されている。図 8(a) の基本形状においては、上流側の隅部付近で渦が存在する一方で、図 8(b) の隅部丸み付け形状においては上流側の隅部付近に強い渦が存在しないことがわかる。このことから、隅部丸み付けを実施した場合には、上流側隅部から放出される渦の強さを低減させる効果もあると考えられる。

3.4 隅部丸み付けによる台車部空力音の低減メカニズムに関する考察

3.2 節で、一度乱れた渦が台車各部に衝突して空力音が発生すること、また、3.3 節で隅部丸み付けによって、側カバー付近の渦の変形が抑制されること、隅部から放出される渦の強さが低減することが考えられた。これらを併せて考慮すると、側カバー付近を移流する乱れた渦は台車部の下流側の隅部に衝突して空力音源となっている可能性が考えられ、ここで発生する空力音が隅部丸み付けによって低減されると推測される。このため、隅部丸み付けによって渦の変形が抑制されることで下流側の隅部に衝突する渦の乱れが低減し、結果として台車部空力音の低減に貢献しているものと考えられる。

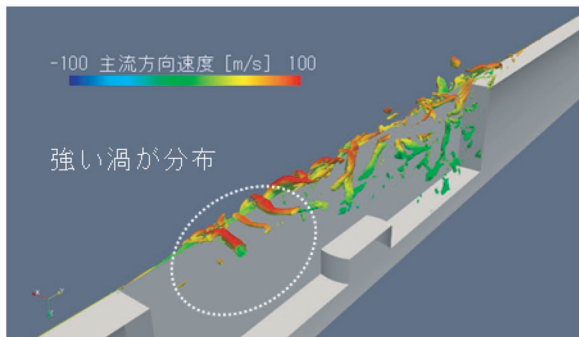


(a) 基本形状

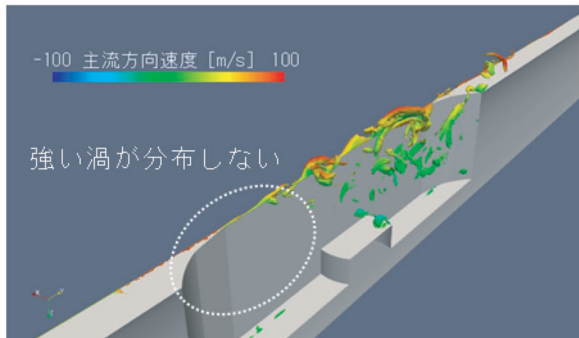


(b) 隅部丸み付け形状

図7 瞬時渦分布の比較 (Q=10,000, 主流方向速度で色付け)



(a) 基本形状



(b) 隅部丸み付け形状

図8 瞬時渦分布の比較 (Q=250,000, 主流方向速度で色付け)

4. まとめ

台車部空力音の低減対策の一つである台車キャビティの隅部丸み付け形状に対して、低減メカニズムを明らかにするために数値解析を実施した。台車部付近の流れ場の基本的な事項として、台車キャビティの前縁から、まくらぎ方向に長い横渦が周期的に放出され、主流に沿って、台車各部に衝突して変形を繰り返しながら移流し、最終的に台車キャビティの後縁を通過した後に次第に渦が消失することがわかった。この渦の放出周波数は100Hz程度であった。また、台車表面上の圧力変動のRMSが大きくなっている位置が、過去の風洞試験によって得られた台車部空力音の音源分布と概ね一致していることが確認された。さらに、隅部丸み付けによって、側カバー付近の渦の変形が抑制されること、隅部から放出される渦の強さが低減されることが確認された。上記を併せて考慮すると、下流側の隅部が音源となって発生している台車部空力音が、隅部丸み付けによって低減されていると考えられる。

文献

- 1) 飯田雅宣：高速化のための沿線環境の評価・対策, RRR, Vol.72, No.7, pp.44-47, 2015
- 2) 公益財団法人鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果 (2022年度) 26. 高速走行する列車における台車部空力音・圧力変動の低減対策: <https://www.rtri.or.jp/rd/seika/2022/3-26.html> (参照日: 2023年12月14日)
- 3) 日野幹雄: 乱流の科学—構造と制御—, 朝倉書店, 2020
- 4) 宇田東樹, 北川敏樹: 音響透過板を用いた台車部空力音の測定および評価手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.3, pp.29-34, 2020
- 5) 宇田東樹, 北川敏樹: 鉄道車両の台車部空力音に関する音源探査手法および低騒音対策の検討, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.888, p.20-00025, 2020