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)

鈴木昌弘^{*1}, 新井紀夫^{*2}, 前田達夫^{*1}

Numerical Simulation of Flow Around Train (2nd Report, Unsteady Aerodynamic Force on Tail Car)

Masahiro SUZUKI, Norio ARAI and Tatsuo MAEDA

It was recognized that the vibration amplitude of the tail car is greater, especially in a tunnel, than that of the other cars in a high-speed train. Though it has been noted that the aerodynamic force has some effect on the vibration of the train, few studies have been conducted and little knowledge has been gained. In this study, to clarify the aerodynamic effect on the train, a three-dimensional unsteady incompressible Navier-Stokes simulation was executed. Flows around the train both in an open section and in a tunnel section were simulated. Unsteady flow separation on the rear nose, which results in fluctuation of the yawing moment of the tail car, was obtained. In the tunnel section, it was proven that the tunnel wall causes flow separation to be asymmetric and the expansion of the effective cross-sectional area of the flow between the tunnel wall and the train along the rear nose increases the pressure fluctuation. These factors result in the greater vibration in the tunnel section. We also presented a modified shape of the rear nose, which restrains flow separation and reduces the yawing moment fluctuation.

Key Words: Computational Fluid Dynamics, Three-Dimensional Flow, Separation, Railway, Viscous Flow, Unsteady Flow, Flow-Induced Vibration

1. 緒 言

新幹線の左右振動加速度の測定により、後尾車両は他の編成位置の車両より大きく揺れることが報告されている⁽¹⁾。その振動は、左右並進成分に対してヨーイング成分が顕著であり、トンネル区間で激しくなる。その原因として、軌道狂い(レールのゆがみ)、蛇行動(列車が水平面内を蛇のようにくねって走行する自励振動)、空気力等が考えられているが、特にトンネル内の振動については、トンネル壁が存在するという特殊な境界条件のため、空気力の影響が大きく関与していると思われる。第1報⁽²⁾では、後尾車両振動に対する空気力の見積もりにおける数値シミュレーションの有効性と可能性を示した。本論文では、第1報で採用した数値シミュレーションを用い、後尾車両に加わる非定常空気力を求め、その左右振動への寄与を明らかにすることを目的とする。特に流れ場の構造を分析することにより、非定常力の働くメカニズムを解明し、ヨーイング成分を減少させる車両形状を提案する。

2. 数値シミュレーション

数値計算法は、第1報に詳しく述べたので、ここでは簡単に記す。トンネル走行中の列車が圧力波に遭遇しておらず、そのまわりの流れが準定常的となった状態を仮定すると、非圧縮性流体としての扱いができる。したがって、支配方程式として、三次元非定常非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用いた、MAC法にしたがって数値計算を行った。非線形項にKawamuraらの提案した三次精度風上差分⁽³⁾を用いた。その他の空間微分は二次精度中心差分で近似し、時間積分はオイラーの陰解法を採用した。時間ステップは、0.001とした。

計算に用いた列車形状は、300系(のぞみ形)新幹線車両を参考にした(図1)。列車の長さは、2.5両編成があるが、連結部の凹凸は省いてある。また、台車などの凹凸も一切省略してある。したがって、列車は先頭から後尾まで切れ目のない滑らかな形状であるが、後尾車両に加わる空気力を求めるため、後ろから1両相当分を後尾車として扱った。明かり区間(非トンネル区間)とトンネル区間それぞれについて、列車まわりの流れを計算した。トンネルの形状は、山陽新幹線のトンネルをモデルにして、簡略化した。地面とトンネル

* 原稿受付 1995年6月15日。

^{*1} 正員、(財)鉄道総合技術研究所 (〒185 国分寺市光町2-8-38)。

^{*2} 正員、東京農工大学工学部 (〒184 小金井市中町2-24-16)。

Fig. 1 Grid system

壁は、列車に対して相対運動している。格子点数は、明かり区間で約108万点、トンネル区間で約94万点となる。

実車のレイノルズ数は、レール面から列車屋根部までの距離 L を基準として 10^7 のオーダーに及ぶが、ここでは、ほぼレイノルズ数 10^5 以上で抵抗係数が一定となつた報告⁽¹⁾ および計算精度を考慮し、レイノルズ数は 10^5 とした。境界条件は以下のとおりである。列車表面では $u=0$ 、流入境界と地面およびトンネル壁面では、 $(u, v, w)=(1, 0, 0)$ 。流出境界、および明かり区間での上方・側方境界の速度は外挿した。明かり区間での上方境界は $p=0$ 、それ以外は $\partial p / \partial n \approx 0$ とした。

3. 結果と考察

3.1 後尾車両に加わるヨーイングモーメント

後尾車両に加わる圧力と摩擦応力を積分して、ヨーイングモーメントを求めた(図2)。トンネル区間でのヨーイングモーメントは明かり区間に比べ、激しく変動していることがわかる。無次元時間 $t=20 \sim 71.2$ の区間(標本点間隔 $\Delta t=0.05$)について、それぞれのヨーイングモーメントのパワースペクトルを求めると、さらにはつきりする(図3)。明かり区間・トンネル区間とも無次元周波数 $0.2 \sim 0.3$ 以下の低周波成分が大きい。トンネル区間のパワースペクトル値は明かり区間に比べ、1けた上回っている。明かり区間ではピーク値は現れないが、トンネル区間では、無次元周波数 0.1 のあたりにわずかなピークが認められる。報告されている実車試験での後尾車両(0系, 100系, 100N

Fig. 2 Time histories of the yawing moment of the tail car

Fig. 3 Power spectra of the yawing moment of the tail car

系新幹線)の振動数は、 $1.2 \sim 1.4$ Hz (220 km/h 走行時)である⁽¹⁾。本計算結果の無次元周波数 0.1 を300系新幹線の全高 3.65 m を用い、列車速度を 220 km/h にして有次元化すると 1.7 Hz となる。実車と計算モデルは、車両形状が違うために単純な比較は困難であるが、計算値は実車試験での値に割合近いものとなる。これは、本シミュレーション結果の有効性を裏付けるものであると考えられる。

3.2 後流構造と表面圧力変動 まず、無次元時間 $t=20 \sim 70$ を平均した流れ場を用いて、後尾車両の後流の構造を調べた。図4に流れ方向に垂直な断面上の総圧分布図を示す。後尾車両を後方斜め上から見た図である。明かり区間において、左右の側面の流れが後端部で回り込み、1対の後ひき渦を形成していることがわかる。自動車の後方に現れる1対の後ひき渦と同じものと思われる。自動車においては、リヤウィンドウ傾斜角が 30° 前後(臨界形状)のときに、この渦が最も強くなることが知られている⁽⁴⁾。本列車モデルも、左右対称面上で形状変化が始まる点と先端部を結ぶ線の傾斜角は約 30° となっているため、同様の後ひき渦が発生しているものと思われる。この一対の後ひき渦

Fig. 4 Total pressure distributions on different cross sections

は、高速列車のような高レイノルズ流れにおいて、左右の渦の対称性が崩れ、時間的に変動することが容易に推測される。自動車の臨界形状の後流構造においても、左右交互に流出する渦の存在が報告されている⁽⁵⁾。実際に、高速列車の後尾車両から約 30 m ほど後ろの位置で発生するおよそ 2 Hz 程度の交番渦が、煙による可視化により観察されている⁽⁶⁾。計算においては、計算格子の粗さにより、十分に後方まで渦が解像できず、拡散されてしまい、明確な左右交互の渦は観察できなかったが、この交番渦と本計算によって得られた後引き渦との関連が推測される。トンネル区間においては、後引き渦はトンネル壁の影響を受け、左右対称にはならず、明かり区間のような明確な一対の後引き渦は認められない。

次に、列車表面近くの水平断面の流れに注目する。図 5 に、車両高のほぼ半分のところの水平断面上の総分布図を示す。図 4 と同様に、無次元時間 $t = 20 \sim 70$

Fig. 5 Total pressure distributions on a horizontal surface at a half height of the train

を平均した流れ場を用いている。明かり区間については、後尾部の形状変化が始まるあたりから、流れがはく離している。完全な左右対称になっていないのは、平均をとる時間が短かったためである。トンネル区間では、トンネル中央側の列車側面ではなく離位置は、ほぼ明かり区間のものと同じであるが、トンネル壁側ではトンネル中央側よりも早くはく離が始まっている。これには二つの要因が考えられる。第 1 の要因は、後端部の形状変化に伴い、流路が拡大されるが、その拡大率が壁面までの距離が短いトンネル壁側のほうが大きくなるためである。第 2 の要因は、トンネル壁側の列車側面上の境界層の厚さが厚いことによる。計算結果で、トンネルの壁側と中央側の境界層の厚さを列車速度の 99.7% の位置で比較してみる。図 5 の水平断面上で後端部から $2L$ の位置において、それぞれ $0.03L$, $0.02L$ となっている。すなわち、トンネル壁側の列車表面近くは、流速が小さいために、はく離しやすくなっていると考えられる。しかし、第 1 報において述べたように本計算では、列車中間部の乱流境界層の発達とはえられていない。実車において、トンネル走行中の列車の側面にどのような乱流境界層が発達するかは、興味あるところであるが、測定例はほとんどない。また、トンネル走行中の長い列車の側面の流れは、相対速度を有する偏心二重円筒間の乱流としてモデル化できるが、そのような実験はほとんど行われておらず、理論的接近も困難である。相対速度のない場合、Jonsson らの実験結果⁽⁷⁾があり、広いかんげき

(a) Surface flow patterns

(b) Pressure distributions

Fig. 6 Surface flow patterns and pressure distributions on the tail car (Open section)

側に比べ、狭いかんげき側の速度こう配が小さくなっており、本計算と同様の傾向を示している。以上のような現状を踏まえると、実際にトンネル走行中の列車側面に発達する境界層については、さらに検討される必要があるが、トンネル壁の影響により、列車側面の境界層の様相が左右でかなり異なっている可能性は推測される。

列車形状は、角部がなく、おだやかな曲率をもっているため、これらははく離位置は非定常なものになり、それに伴い表面圧力も変動していることが容易に想像できる。後尾部の非定常な表面流線と表面圧力分布の様子をアニメーションにして、観察した(図6, 7)。前方から後方に向けて、表面流線のパターンが移動していき、それに伴い圧力分布が変動していく様子がとらえられた。トンネル区間の圧力は、表面摩擦力に打ち勝って空気が流れるために、後方に行くに従って下がる。したがって、図7の圧力分布図は、等値線間隔はそ

のままだが、等値線のレベルは、図6より下げている。表面流線は、はく離、再付着、さらに二次はく離等、複雑な表面近傍の流れ場の様子を示している。圧力分布も表面流線の変化に対応して、低圧部、高圧部が現れている。この圧力分布は、平均場でその非対称なはく離パターンが認められたトンネル区間というに及ばず、明かり区間においても左右非対称であり、これがヨーイングモーメントを発生させている。アニメーションから概算したところ、側面上の圧力分布は明かり・トンネル区間とも無次元時間1.2~1.3前後の周期で変動していた。トンネル区間では、列車後尾部において流路の拡大があり、それに伴って圧力の上昇がある。そのため、後尾部の表面圧力も明かり区間に比べ、大きな変動が生じている。さらに、明かり区間よりさらに左右非対称が顕著になった圧力分布は、トンネル区間におけるヨーイングモーメント変動の増加の原因となっていると推測される。

Fig. 7 Surface flow patterns and pressure distributions on the tail car (Tunnel section)

3・3 ヨーイングモーメント変動の低減法 3・2節の結果を基に、トンネル区間でのヨーイングモーメント変動を減少させる車両形状について考察する。ヨーイングモーメント変動は、車両側面でのはく離位置の変動と、その結果生じる左右の圧力差の変動がおもな原因となっている。したがって、その対策として、はく離位置を固定するか、またははく離自体を避ける方法が考えられる。はく離位置を固定する方法として、はく離を誘起させたいところに、適当な突起等をつけるという考え方がある。しかしこの場合、はく離位置の固定はできても、いったんはく離した流れが再付着を起こす可能性があり、再付着点の変動に伴う圧力変動も予想される。突起の形状、大きさ、位置には、レイノルズ数に対する依存性があると思われ、それを決定するのは困難である。また、車両限界(列車が走行時に、地上施設に触れないように定められた車両断面形状の最大寸法)からの規制もある。さらに、上りと下りで双

方向に運行される新幹線の場合、後尾車両は、先頭車両にもなるので、空力騒音の観点から見ても、先頭部に突起をつけるという考え方は、現実的でない。そこで、ここでは、突起にこだわらず、もう一つの方法がある、はく離をなるべく避けるような形状そのものについて考える。車両側面でのはく離を生じさせないようにするためには、側面の形状は平らにする必要がある。また、流路の急激な拡大に伴う著しい圧力上昇が、大きな圧力変動を伴うはく離を生じさせる原因になっていると考えられるので、後端部での車両断面積変化率を小さくする。この二点が、一つの候補として挙げられる。上記の条件に合うような車両形状の一例を図8に示す。側面から見た形状は、元の形状と同一であるが、上面から見ると、先端に向かって絞り込みがない。列車進行方向に垂直な各断面は、長方形に近くなっている。この形状は、側面が平らになっており、またその断面積変化率が元の形状よりも先端を除いて緩やかに

Fig. 8 A modified nose shape, which decreases the yawing moment fluctuation

なっている。この車両形状を後尾車両としてもつ列車のまわりの流れをトンネル区間について計算した。第1報で報告したように、中間車上の格子を多少疎に配置しても、後尾車でははく離には大きく影響がでない。したがって用いた格子は、中間車上の格子を元の形状に対する計算に用いた格子より間引き、646, 800点とした。先頭車は、後尾部での流れに与える影響を同一にするために、元の形状を用いている。計算条件は、元の形状に対するものとすべて同一である。計算結果から、無次元時間 $t=20 \sim 45.6$ の区間(標本点間隔 $\Delta t=0.05$)について、後尾車両のヨーイングモーメントのパワースペクトルを求めた(図3)。元の形状と比べヨーイングモーメントのパワースペクトルがそのピーク値において約1/5に減少しているのがわかる。 $t=45.6$ における表面流線と圧力分布の様子を図9に示す。トンネル中央側、壁側の両側面で、大きなはく離は生じていない。わずかに、上面と側面との境付近で開放形はく離線⁽⁹⁾の形成が認められる。このはく離に伴う圧力変動は大きくないと思われるが、さらに、このはく離を抑えるには、列車とトンネルの断面積比を小さくし、後端部での流路拡大による圧力上昇を小さく

(a) Surface flow patterns

(b) Pressure distributions

Fig. 9 Surface flow patterns and pressure distributions on the modified rear nose (Tunnel section)

すればよいと考えられる。また、何らかの境界層制御(境界層の吸込み、吹出しなど)の方策も考えられよう。

4. 結 論

列車まわりの非定常流の数値シミュレーションを行い、トンネル区間での後尾車両のヨーイングモーメント変動をとらえた。流れ場の解析から、ヨーイングモーメント変動の原因は、はく離位置の変動、それに伴う圧力の変動によるものであることが判明した。トンネル区間でははく離パターンの非対称性と流路の拡大による圧力上昇と相まったはく離に伴う大きな圧力変動により、明かり区間に比べ大きなヨーイングモーメント変動が起こることがわかった。

以上の観点から、ヨーイングモーメントの変動を抑えるような車両形状を提案した。すなわち、流路の急激な拡大を防ぐために、断面積変化率を緩やかにし、

また側面を平らにして側面ではなく離を抑えるようにした形状である。この形状を後尾車両にもつ列車まわりの流れをトンネル区間において計算し、後尾車両のヨーイングモーメントの変動が元の形状と比べ大幅に減少することを確認した。

本論文は、後尾車両からのはく離に関してのみの考察であり、実際の車両においては、中間車両での乱流境界層の発達とそれに伴う列車に加わる空気力があり、さらに、車両自体の運動も存在するので、大規模乱流を伴った流体関連振動としての扱いが必要になる。また、ヨーイングモーメントを低減する形状については、先頭部形状として見た場合、断面積変化率を緩やかにするという点でトンネル微気圧波低減法⁽⁹⁾と一致する。また、列車風(列車通過時に巻き起こる風、ホーム上の乗客や保線作業員の安全問題に重要である)や、対向列車とのすれ違い時に相手列車に及ぼす圧力変動を低減する形状⁽¹⁰⁾とも合致するが、さらに空力騒音や機構的な面からも検討する必要があること

はいうまでもない。現在、現車試験を実施中であり、今後風洞試験なども経たうえて、より深い現象の理解と対策法を探っていく予定である。

文 献

- (1) 日本機械学会編, 鉄道車両のダイナミックス, (1994), 37-38, 電気車研究会.
- (2) 鈴木昌弘・ほか2名, 機論, **62**-594, B(1996), 162-168.
- (3) Kawamura, T., ほか2名, *Fluid Dyn. Res.*, **1**(1986), 145-162.
- (4) 農沢隆秀・ほか1名, 機論, 58-556, B(1992), 3578-3583.
- (5) 農沢隆秀, 機論, **60**-575, B(1994), 2365-2370.
- (6) 小濱泰昭・ほか12名, 高速列車まわりの流れの計測, 第23回乱流シンポジウム講演論文集, (1991), 125-131.
- (7) Jonsson, V. K. and Sparrow, E. M., *J. Fluid Mech.*, **25** 1(1966), 65-86.
- (8) 巽編, 乱流現象の科学, (1986), 403-404, 東京大学出版会.
- (9) 松村豪・ほか3名, 列車先頭部形状とトンネル内圧縮波の研究, 機講論, No. 930-49 (1993-8), 492-494.
- (10) 井門敦志・ほか2名, 鉄道総研報告, **7**-7(1993), 59-66.
- (11) 井門敦志・ほか2名, 鉄道総研報告, **9**-1(1995), 37-42.