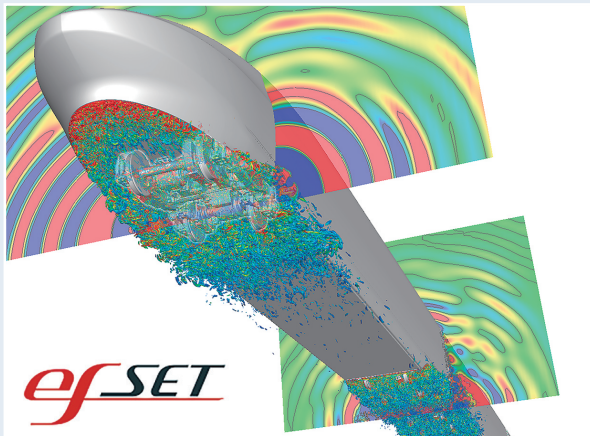


「より速く」を実現する高速車両の開発

Development of High-speed Trains that Deliver “More Speed”



佐々木 隆①	Takashi Sasaki
越智 章生②※	Akio Ochi
上野 陽亮③	Yosuke Ueno
佐野 淳④※	Atsushi Sano
吉田 直弘⑤*	Naohiro Yoshida
畑 晋一郎⑥	Shinichiro Hata
富澤 雅幸⑦	Masayuki Tomizawa

ますます高速化が求められる鉄道車両において、低騒音化と耐衝突構造の開発が重要である。このためには、騒音発生や衝突の現象をシミュレーションで精度よく再現して、事前検証を十分に行うことが必要である。

今回、当社で開発している高速車両において、「京」を用いた空力騒音解析とFEMを用いた衝突解析により、これらの現象を再現することに成功した。これにより、高速車両の開発を加速させていく。

In meeting customers' demand for faster trains, developers must also focus on achieving noise reduction and developing a crashworthy structure. To this end, it is vital that the generation of noise and crash events are accurately reproduced in simulations, and that these are used to perform thorough validation in advance.

Recently, we succeeded in reproducing these phenomena in the development of a high-speed train currently underway at Kawasaki. This was achieved through aeroacoustic simulations using the K computer and crash analyses using the finite element method (FEM). These technologies are expected to further accelerate the development of high-speed trains.

まえがき

ビジネス、観光において移動時間が大幅に短縮されることで経済活動をより活性化させ、さらなる経済成長をもたらす効果が期待できる。このような中、日本のみならず世界各地の鉄道においても、より速い車両への要望が高まっている。

1 背景

近年の新幹線の高速化や海外における高速鉄道導入機運の高まりの中で、「より速く」を実現するための課題は大きく低騒音化と耐衝突の二つであると言っても過言ではない。

騒音は、主にパンタグラフと車両下部において発生する。さらなる速度向上に伴い、速度の約6乗に比例して増大する空力音の寄与が、速度の約3乗に比例する転動音と比較して大幅に増大するようになる。

これまでに海外仕様のパンタグラフの騒音特性把握と風試結果との比較による解析精度の検証¹⁾を重ねてきた。定性的にピーク周波数がよく一致することは確認できたが、格子の解像度不足により音圧レベルの定量的な予測には課題があった。さらに、海外では新幹線のような専用軌道や防音壁が必ずしも設置されていないことや、欧州では台車

側カバー無しもしくはハーフカバーが主流であることなどから、車両下部からの騒音の寄与がパンタグラフに対して圧倒的に大きいという背景がある。しかし、これまで車両下部音の空力騒音解析は、音源である台車部の詳細モデル化が困難であったこと、実際の編成長さ（3両以上）での大規模解析は、これまでの計算機資源ではほぼ不可能であったことから実施されてこなかった。

そこで、スーパーコンピュータ「京」を利用することで、パンタグラフから発生する空力騒音については、定量的予測精度の改善を目指し、高速車両下部から発生する空力騒音については、先進的な大規模非定常CFD（数値流体力学）解析によって予測する研究を始めている。

一方、耐衝突構造の開発については、海外の鉄道車両では、規格・法令および仕様書で所定の耐衝突強度要求に準拠することが求められている。その典型的な例として、欧州の耐衝突強度要求に関する規格EN15227では車両同士の衝突において所定生存空間の確保や衝突時の減速度制限が求められている。また、米国では連邦規定（CFR：the Code of Federal Regulation）において、高速鉄道を想定した最高速度201km/h以上354km/h未満の鉄道車両でも車両同士の耐衝突強度要求が追加される見通しである。

鉄道車両メーカーは、これらの要求を満足することの実証が求められる。しかし、実際の編成長さでの衝突試験は、

経済的にも物理的にも実施が困難である。そのため、上述した規格のシナリオに沿った衝突解析とその精度の実証試験により耐衝突性能を証明するプロセスが認められている。以上のことにより、数値シミュレーションを用いた衝突解析は車両の耐衝突性能を実証する上で重要な技術となっている。

2 「京」を用いた空力騒音解析

(1) 当社独自の解析手法

解析ソフトは、当社開発のCFDソフト「Cflow」である。「Cflow」は、複雑形状への適合性を高めた格子作成手法と、空力騒音の直接解析のために数値的な減衰が非常に小さい解析手法を取り入れている。すでに、「京」への移植を完了し、数千コア並列計算までリニアな計算速度向上を達成するなど超大規模解析に対応した並列化が行われている。当初は航空機の空力性能評価を主目的に開発されたソフトであったが、近年では鉄道車両向けにトンネル微気圧波やすれ違いなどに対応した新機能を搭載し、当社製品への適用範囲の拡大を図っている²⁾。

(2) パンタグラフの空力騒音解析

解析対象のパンタグラフを図1(a)に示す。計算格子は、従来より格子解像度が高い4.1億セルで、使用した「京」の計算資源は2,048コア(256ノード)である。なお、解析条件は風洞試験条件に合わせて一様流速度300km/hとした。

渦が含まれる領域を抽出するため、中心断面での渦度分布(瞬時値)を図1(b)に示す。破線で囲んだ碍子(がいし)の後流渦が細かく捉えられていることが確認できる。

図2に遠方観測点(パンタグラフから側方に25m離れた位置)における音圧レベルの比較結果を示す。今回の解析結果では、これまで定量的に予測できていなかった2つのピーク周波数(160Hz, 315Hz)を含む125~800Hzでの音圧レベルが、風洞試験による測定結果に、より近づいた。

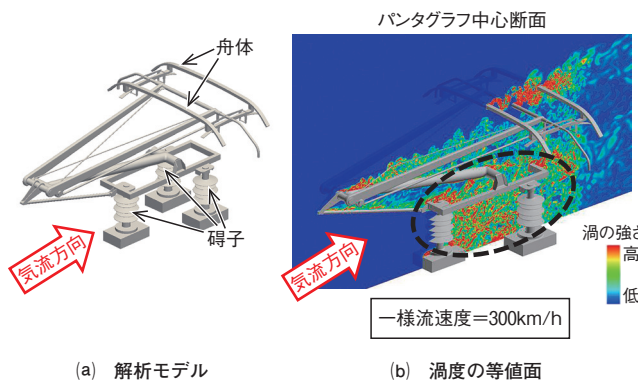


図1 パンタグラフの空力騒音解析
Fig.1 Aeroacoustic simulation of a pantograph

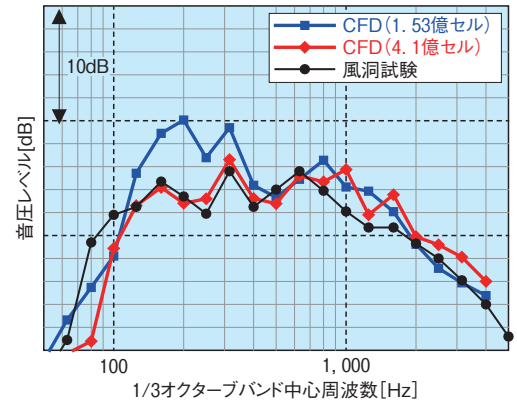


図2 遠方観測点における音圧レベルの比較結果
Fig.2 SPL at a far-field observation point

1 kHz以上の高周波においても、これまで以上に解析精度が改善された。格子解像度の向上により、音圧レベルの定量的予測精度を改善することができた。

(3) 「efSET」の車両下部空力騒音解析

(i) 解析条件

解析対象は、当社オリジナル高速車両「efSET」の先頭車、中間車、後尾車の3両編成とし、図3の「詳細台車部拡大」に示すように、前方1.5両分の軸ハリ式高速台車³⁾を詳細に模擬した。台車カバーは、一番先頭のみフルカバー(カバー有り)、残りは全てハーフカバー(カバー無し)とした。解析モデルの大きさは実車スケールとし、先頭車長は26.4m、車間部は0.5mである。

計算格子は8.32億セルと1.69億セル(台車カバー有無の効果確認用)の2種類作成した。渦を捉えるため、車部と車間部に細かい格子を配置し、音波の伝播を捉えるために

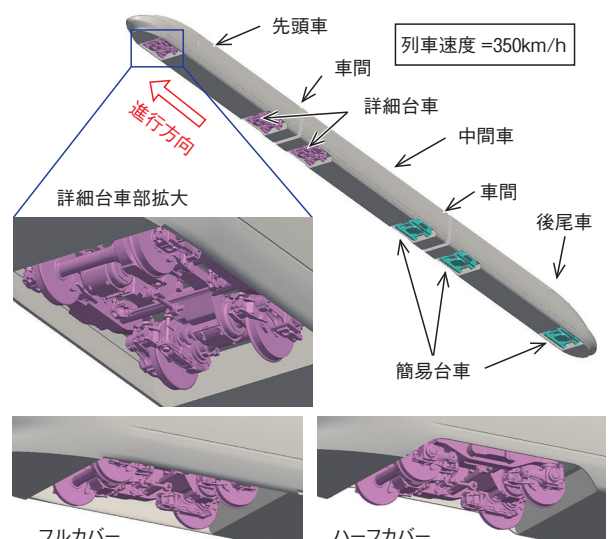


図3 解析モデル
Fig.3 Computational model (bogie)

車体の上方や側方には比較的細かい格子を配置した。なお、解析条件は列車速度350km/hとし、実際の走行状態を模擬している。8.32億セルの計算では「京」の8,192コア(1,024ノード)を使用した。

(ii) 解析結果

渦が含まれる領域を抽出するため、渦度の等値面(瞬時値)を図4に示す。先頭部ではスカートのエッジから強い渦が発生している。また、台車部は全体的に乱れた流れ場になっており、先頭車と中間車の車間部でも台車部全体から細かい渦が発生しているのが分かる。しかしながら先頭部の台車から発生する渦に比べると、先頭車後方台車や中間車前方台車から発生する渦は弱くなっている。また、車体下面の車間部からも渦が生成されているが、従来の解析では格子の解像度不足により渦の生成は見られなかった。

先頭部の車体と台車表面における400Hzの圧力変動分布を図5に示す。スカートのエッジから剥離した流れが再付着する車体下面での変動が大きくなっている。また、台車カバー外側表面や台車キャビティ部後方の変動も大きくなっているのが分かる。さらに、台車キャビティ前縁部から発生した剪断層にさらされる台車の各部位(車輪や機器類)の圧力変動が大きくなっており、全体的に台車部の広い範囲から空力騒音が発生していることが予想される。

バンドパスフィルター処理を施して、100Hzの圧力変動を抽出して可視化したレール上面の高さ位置における結果を図6に示す。ここで、赤・青の距離が短いものは流体運

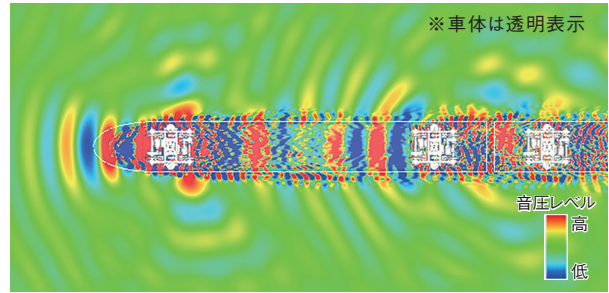


図6 バンドパスフィルター処理による圧力変動(100Hz)
Fig. 6 Filtered pressure fluctuation at 100Hz

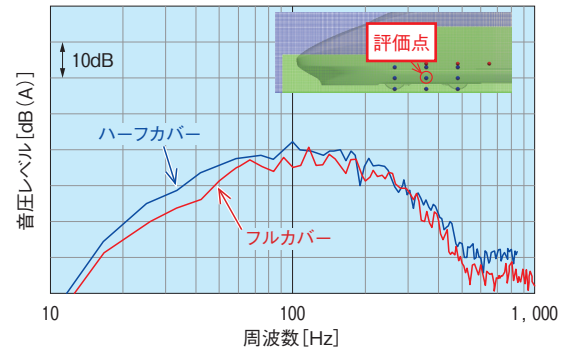


図7 近傍場における音圧スペクトルの比較結果
Fig. 7 SPL at a near-field observation point

動による変動圧力波を表し、赤・青の距離が長いにじんだ色調のものが外部領域への音波の伝播を表している。台車部からの放射音は側方に指向性を持っていることが分かる。

最後に、欧州ではハーフカバーもしくはカバー無しが主流のため、台車カバー有無の効果も確認した。台車カバーの効果を確認するため、一番先頭の台車をハーフカバーとした。近傍場の音圧スペクトルによる比較を図7に示す。その結果、フルカバー化によって全周波数帯で騒音レベルが下がり、オーバーオール値で2.4dB(A)低減できることが解析により確認できた。台車部の詳細なモデル化、大規模な解析が可能となり、台車カバーの騒音評価に適用できるようになった。

3 FEM(有限要素法)を用いた衝突解析

(1) 「efSET」耐衝突構造の実証試験

当社では、「efSET」の要素技術としてEN15227およびCFRに適合できる耐衝突構造の開発³⁾を行ってきた。「efSET」ではさまざまな要求仕様に対応するべく、衝突エネルギーを吸収する区画と乗員生存区画を明確に分け、衝突エネルギー吸収要素をモジュール化するコンセプトで耐衝突構造を開発した。本構造における耐衝突性能を解析によって実証できれば、当社にとって海外向け高速車両受注への大きな競争力となる。そのため、海外仕様での衝突

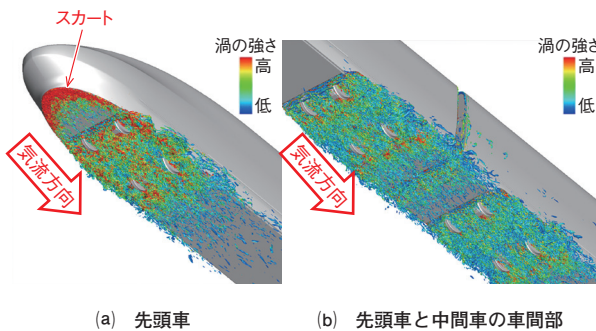


図4 渦度の等値面
Fig. 4 Isosurface of vorticity magnitude

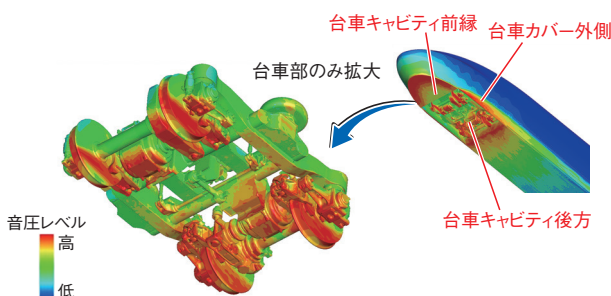


図5 車体と台車表面における400Hzの圧力変動分布
Fig. 5 Surface distributions of SPL at 400Hz

エネルギー吸収部位の分配を検討した上で衝突エネルギー吸収要素と先頭構造を製作し、解析検証用の実証試験を実施した。実証試験では、衝突エネルギー吸収要素が取り付けられた先頭構造を剛壁に固定し、想定される衝突エネルギーを持った衝突台車を図8のように60km/hの速度で衝突させた。

(2) 実証試験結果

本構造では、衝突時に衝突エネルギー吸収要素のみが変形して衝突エネルギーを吸収し、生存区画が保護される必要がある。図9の衝突後の変形比較図から、試験・解析ともに、上記コンセプト通りの衝突後挙動を示しており、満

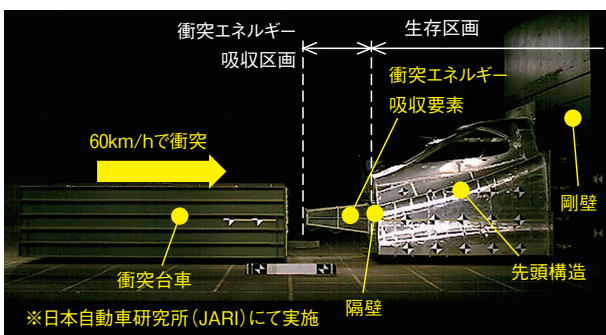


図8 耐衝突構造の実証試験
Fig. 8 Crash test

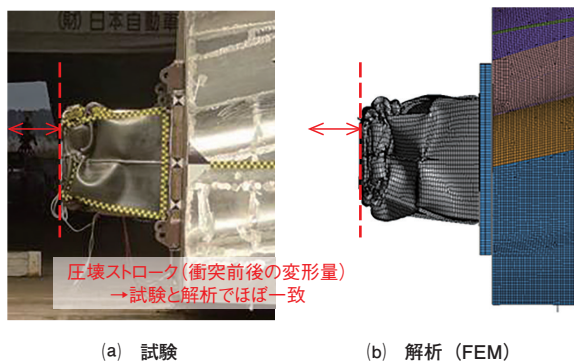


図9 衝突エネルギー吸収要素の衝突後変形図
Fig. 9 Deformation diagram

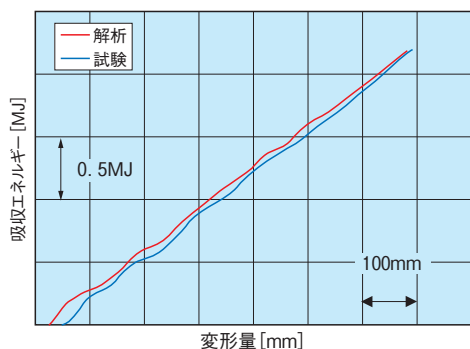


図10 吸収エネルギー-変形量線図
Fig.10 Absorbed energy diagram

足な耐衝突性能が得られた。また、衝突エネルギー吸収要素の変形状態や圧壊ストロークは事前に実施した解析結果ともよく一致した。さらに、図10に示す衝突エネルギー吸収要素の衝突エネルギー吸収量の比較から、解析と試験がほぼ一致することが確認できた。

あとがき

「京」を用いた空力騒音解析では、自社開発のCFDソフト「Cflow」を、高速車両のパンタグラフおよび自社開発の「efSET」車両下部から発生する空力騒音に適用し、大規模解析を実施した。今後、解析精度の一層の向上を図るとともに、車両下部から発生する空力騒音に対して、遠方場の騒音評価と支配的な部位を特定することで発生源そのものに対する有効な低騒音化対策の検討を行う。

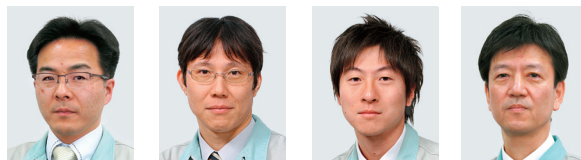
また、FEM (有限要素法) を用いた衝突解析については、実証試験結果から、耐衝突性能を精度よく再現できることが実証された。

今後は、さらにこれらの解析技術を高度化させていき、高速車両の開発を加速させていく。

本稿のうち「空力騒音解析」の結果は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものであり (課題番号: hp140057, hp150059)、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 佐々木ほか: “高速鉄道車両の非定常流れ場に適用した自社開発CFDソフトの精度検証”, 第20回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2013) 講演論文集 (2013)
- 2) 上野, 田島, 越智, 佐々木: “「京」による高速鉄道車両の下部空力騒音解析及びトンネル突入解析”, 第29回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (2015)
- 3) 栗山ほか: “海外対応新型高速鉄道車両「efSET」”, 川崎重工業技報, No.170, pp.10-15 (2010)



佐々木 隆 越智 章生 上野 陽亮 佐野 淳



吉田 直弘 畑 晋一郎 富澤 雅幸