

車両設計におけるフロントローディング —WMATA7000 を例として—

Front Loading of Rolling Stock Design – WMATA7000 as a Case Study



稲垣 譽① Homare Inagaki
遠矢 裕二② Yuji Toya
田中 友絵③ Tomoe Tanaka
加村圭市郎④ Keiichiro Kamura
矢野 弘⑤ Hiroshi Yano
江崎 秀明⑥ Hideaki Ezaki

鉄道車両の設計において、要求性能は時代と共に高度になっている。一方で、鉄道会社の既存設備に合わせて車両を設計する必要があり、しかも短納期になってきている。これらの傾向は当社が2010年に受注したワシントン首都圏交通局向けWMATA7000においても顕著であり、このため、フロントローディングとしてプロジェクト開始当初から、設計リソースを集中投入し、高度な要求を満たす全体最適設計を遅延なく短期間で行うことができた。

Over the years, performance requirements of rolling stock design have become increasingly demanding. At the same time, the design of railway vehicles must be tailored to the existing facilities of railway companies, and manufacturers are increasingly asked to deliver on a short lead time. These trends were clearly evident in the project signed with the Washington Metropolitan Area Transit Authority (WMATA) in 2010 for WMATA7000. To meet the high requirements, Kawasaki front-loaded design resources from the early stages of the project, which enabled it to achieve total optimization of design and delivery on a short lead time without delay.

まえがき

鉄道車両の要求性能は、安全性、快適な室内環境、運転操作性など、時代と共に高度化している。一方で、鉄道会社の既存設備との関係上、スペースや重量など制約条件が数多くあり、その要求仕様は鉄道会社ごとに大きく異なる。また、納入までの期間は短期化する傾向にある。

そこで、車両設計においては、要求性能と制約条件など相反する設計事項を満足させつつ、プロジェクト全体が遅延なく進むように、プロジェクト当初に十分な設計リソースを投入する「フロントローディング」で全体最適設計を行い、開発・設計期間を短縮することが有効である。

1 鉄道車両設計におけるフロントローディング

鉄道車両のプロジェクトの大まかな流れは、設計、材料・部品購入、試作車製作、試作車による各種試験を経て、量産車の製作となる。もし設計遅延が生じると、プロジェクト全体の進行が遅れたり、設計が未完了のまま次のステップを進めて後から手戻りとなる可能性がある。手戻りは、さらなるプロジェクトの遅れや品質の低下を招く。

これに対して、フロントローディングは、初期工程（フロント）に重点を置いて集中的に資源を投入し（ローディ

ング）、問題点を早期把握して開発プロセスを円滑に進め、納期短縮、品質向上、不要コストの極小化を目指すものである。ここでは、WMATA7000での事例を示す。

2 WMATA7000の概要と設計課題

WMATA (Washington Metropolitan Area Transit Authority : ワシントン首都圏交通局) は、ワシントンDCを中心に、メリーランド州、バージニア州にまたがる6路線にて鉄道を運営しており、1000系から6000系の6種の約1,300両の車両を保有している。1000系から6000系は運用開始時期がそれぞれ異なるものの、併結営業運転ができるように互換性が取られ、デザイン的にも統一されている。

当社は、これらの車両の置き換え、および増備の新型車両として7000系を748両受注した。7000系は、ステンレス構体（従来車はアルミ製）、屋上一体型空調ユニット、イーサネット車内ネットワーク、車内表示器の拡充、車内外デザインの新規性など、WMATAとしての新たな試みが要求されており、新規車両としての大きな期待を背負っている。主要諸元を表1に示す。

WMATA7000の課題を以下に示す。

- ・当社にとってWMATAは新規顧客であり、車両のサイズ、要求される条件（強度、騒音、乗り心地など）、

表1 WMATA7000 主要諸元
Table 1 Main specifications of WMATA7000

車種		A Car, B Car
主要寸法	全長 [mm]	22,860 (75 feet)
	車体最大幅 [mm]	3,092 (10 feet 1-3/4 inches)
	最大屋根高さ [mm]	3,302 (10 feet 10 inches)
	床面高さ [mm]	1,016 (40 inches)
最高速度 [km/h]		120 (75 mph)
加速度 [km/h/s]		4.5 + 0.3 - 0.0 (2.8 + 0.2 - 0.0 mph/s)
減速度 [km/h/s]		4.8 ± 0.3 (3.0 ± 0.2 mph/s) (常用) 5.1 (3.2 mph/s) (非常)
構体材料		ステンレス, 低合金高張力鋼
集電方式		DC700V, 第三軌条
ブレーキ		発電・回生ブレーキ付空気ブレーキ, 駐車ブレーキ
台車		ボルスタ付空気バネ台車 (インボード台車) 軸箱支持: 積層ゴム
側引戸		両開き, 戸袋式, 片側3扉, リアモータ式ドアオペレータ
空調ユニット		屋上一体搭載型
車内ネットワーク		ETN (イーサネット), TCN (MVB, WTB)

路線の条件, 車両に搭載される設備など, 各種条件を WMATA に合わせて全体最適すること

- ・既存設備に合わせる必要がある一方で, 機能向上に向けて既存車に比べ搭載機器が増えたため, 機器機装スペースの確保と軽量化を図ること
- ・短納期のため, 受注から約1年半で詳細設計を完了すること

3 WMATA7000でのフロントローディング

2章の課題に対応するため, 以下のようにフロントローディングを進めた.

- ・通常, 設計各課に分かれている担当者を一ヶ所に集め, 集中的に設計
- ・開発主体である車両カンパニーだけではなく, 各種のキー技術を保有する本社技術開発本部もプロジェクト当初から参画
- ・受注後, 初期段階のみならず入札段階から設計リソースを投入し高度な技術要求に応え, 軽量化・省スペース, 短納期, 低価格とするべく対応
- ・検討に時間がかかり後工程にも影響の大きい, 構体構造, 耐衝突性, 薄型床構造, 空調システム, 騒音・振動, 台車走行性能, 台車強度, 電気品システムを重点的に検討
- ・開発初期段階から, 製造を見据えたコンカレントエンジニアリング (設計と生産計画の工程を同時並行して行う手法) も重視
- ・新素材・新構造の開発, シミュレーションの高度化による新たな開発手法の導入により, 設計検討における省力化・最適化

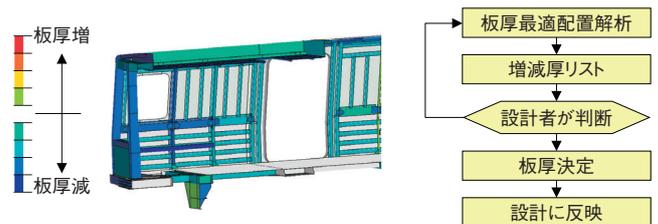
(1) 構体構造検討 (最適化計算)

車両の設計では常に軽量化が重要な課題となる。従来, 構体構造の設計では設計者が過去の実績や経験を基に部材の板厚や形状を決め, 解析で強度的に余剰な箇所や不足する箇所を見極めて, 板厚や形状を修正, 再度解析するというのを何回も繰り返す必要があった。

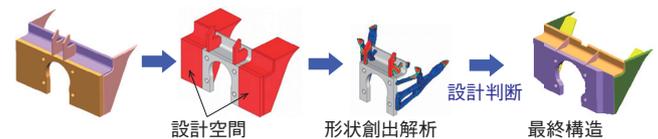
今回, 板厚と形状の最適化計算ソフトを使用し, その結果として得られる板厚増減リストや最適形状を利用することで, 従来繰り返し行っていた板厚・形状修正と解析を減らすことができた (図1)。さらに, 早期に構体設計が完了したことで, その後の部品取付設計に速やかに着手できた。

(2) 構体構造検討 (衝突)

北米では, 高度な耐衝突設計が要求される。衝突エネルギーの吸収, 衝突による先頭車両の変形の際のサバイバル空間の確保, 脱線, 乗り上げなどの各種条件を満足させるため, 衝突解析で設計の妥当性を検討・評価した (図2)。



(a) 構体板厚最適化



(b) 連結器受け形状最適化

図1 構体構造検討 (最適化計算)

Fig. 1 Investigation of carbody structure (optimization analysis)

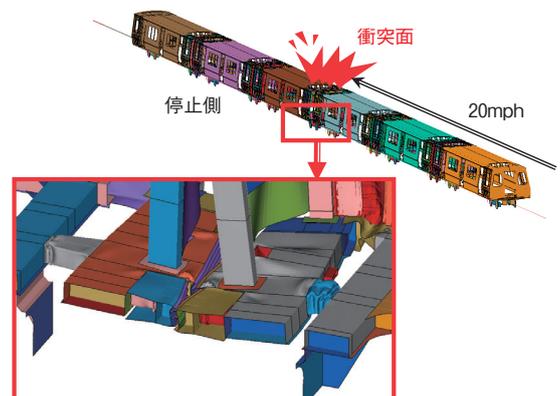


図2 構体構造検討 (衝突)

Fig. 2 Investigation of carbody structure (crash analysis)

さらに、衝突エネルギー吸収要素の圧壊試験や台枠構造の衝突試験を実施して解析結果を検証し、設計に反映した。以上の取り組みにより早期に耐衝突構造の設計が決まり、遅延なく構体製作を開始できた。

(3) 薄型床構造

WMATA7000は床下スペースに制約があり、床下機器、配管・配線スペースを確保するためには、床構造の薄型化が必要であった。さらに、床構造が決まってから、床下機器や配管・配線の設計を行うため、早期に床構造を確定させる必要があった。一般的には、床構造を薄くすることで剛性強度、耐火性、断熱性は不利になるが、これらの要求性能を満足しつつ床厚さを薄くできる薄型コルゲート床構造を新規に開発し、床下機器、配管・配線のための艤装スペースを確保できた(図3)。

(4) 空調システム

(風量最適化, 車内温度最適化, 低騒音化)

空調ユニットの性能や天井スペースに合わせ規定風量を満足するようダクト設計を行うとともに、空調温度分布の適正化、低騒音化を両立させる必要がある。WMATA7000では空調ユニットをメンテナンス性に優れた屋上一体型としたが(従来車は屋上・床下セパレート型)、車両の大きさは既存車と同じであるため天井の極めて限られたスペースに、空調ユニットとダクトを配置する必要があった。

そこで、CFD(数値流体力学)解析によるシミュレーションを駆使して、空調ダクト風量配分最適化、車内温度分布適正化、流路最適化、低騒音化について設計検討した(図4)。空調システムでは、気候試験室における実車試験で最終評価を行う。その時点で不具合が発覚すると、他の箇所の設計・製造にまで影響を与える恐れがあるが、早期のシミュレーションにより大きな手戻りの発生を防止できた。

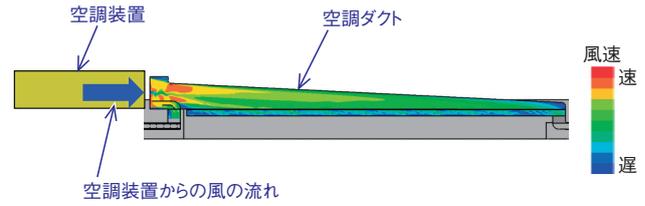


図4 空調システム検討(風量分布)
Fig.4 Investigation of HVAC system (air distribution)

(5) 車内騒音

車内騒音は、車両搬入後に現地での測定結果で判定される。その時点で仕様値に入らないと再設計となり、納期などに影響が生じる。そこで、騒音を事前に検討するシミュレーションをSEA法(Statistical Energy Analysis:統計的エネルギー解析)により実施した(図5)。レールの影響による台車周囲の転動音がシミュレーションの入力として必要となるため、既存車で測定を行い、そのデータを用いた。車両完成後の測定では要求値以内であり、手戻りなどは発生しなかった。

(6) 車体設計(運転室設計)

運転室の設計においては、人間工学(Ergonomics)に基づき、さまざまな体格の運転士に対応して機器操作性、前方視野の確保を考慮する必要がある。従来、2次元図面上でその検証を行っていたが、確認できる範囲に限界があった。WMATA7000では3次元モデルを用いて、運転士の体型の違いを考慮した詳細な稼働範囲、視野の検証を行った(図6)。シミュレーションの活用により実物大模型の製作前に細部を確認することで、設計期間を短縮でき、また視覚的に確認しやすくなったため客先から早期承認を得ることができた。

(7) 台車(走行シミュレーション)

台車の設計では、必要な走行性能が確保できていること、走行安全性が確保できていることを、設計段階であらかじめ走行シミュレーションで確認しておく必要がある。評価項目・条件が多岐にわたるが、このシミュレーション結果

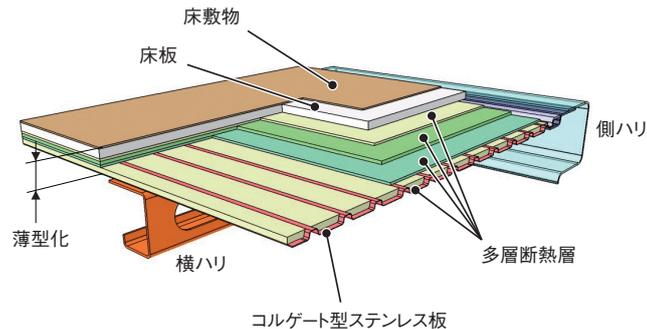


図3 床構造検討
Fig.3 Investigation of floor construction

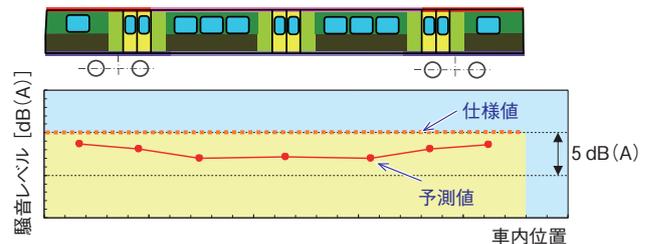


図5 車内騒音検討
Fig.5 Investigation of interior noise

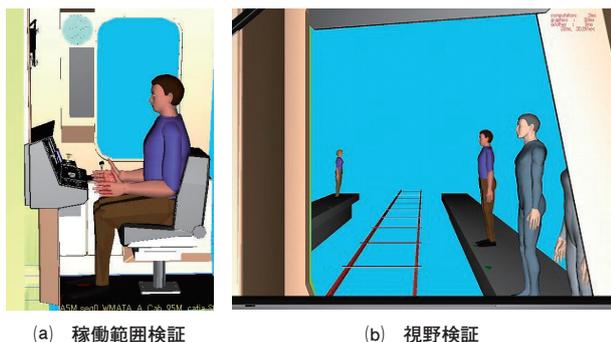


図6 車体設計（運転室）
Fig. 6 Carbody design (cab)

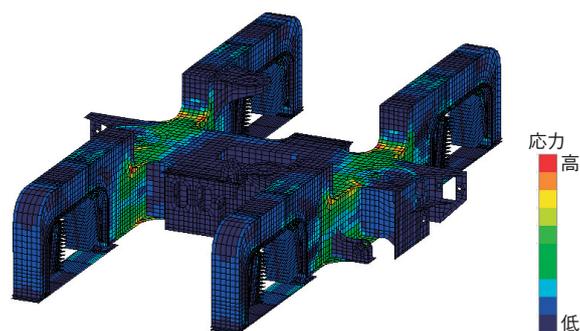


図8 台車設計（強度検討）
Fig. 8 Bogie design (strength investigation)

を受けて台車の詳細設計を行うため、プロジェクト初期段階に、効率的に実施する必要がある。それぞれの組み合わせ条件について多数のシミュレーションを効率的に実施し、台車の設計に反映させた（図7）。

(8) 台車（強度検討）

台車には、各種の荷重が作用する。安全性確保のためには、さまざまな荷重組み合わせの全てについて、静的強度・疲労強度を精査する必要がある。各荷重を組み合わせで強度を計算し、その結果から板厚を最適化するシステムを新規に開発し、WMATA7000の設計台車枠および枕バリの設計に活用した（図8）。これにより構造部材の強度と軽量化を両立し、設計期間の短縮ができ、後工程にスムーズに進めた。

(9) システム設計

WMATA7000ではネットワークや車内情報システムなど、既存車より搭載機器が追加され、要求機能も高度になっている。機器の仕様が後から変わると、機器を搭載する設計も見直しとなる。このため、プロジェクト当初から機器メーカーと集中的に討議し、システム設計担当と機器取付設計を行う車体・艤装・台車設計担当の間で密に検討しながら設計を進め、手戻りを減らすことができた。

(10) コンカレントエンジニアリング

客先仕様を満たす設計ができたとしても、製造が困難な設計となっていた場合は製造時に問題が生じ、設計のやり直しを招く。そこで、プロジェクト当初から工作部門と製作性を協議するコンカレントエンジニアリングを行った。

あ と が き

当社での車両設計におけるフロントローディングの取り組みについて、WMATA7000を例に述べた。プロジェクト当初から設計リソースを投入することにより、短い時間で大きな手戻りのない設計ができた。また、全体最適化を目指す上でも、非常に効果的であった。さらに、新たに開発したシミュレーション技術なども省力化、最適化に大きく寄与した。現在検討を進めている他事業者向けの新形式車両も含めて、今後も本手法を適用し、ますます高度化する要求に応じていきたい。

なお、WMATA7000は設計の後、試作車製作、各種試験を経て、2015年4月より営業運転に投入された。現在、量産車の製作、納入が行われている。

末筆ながら、設計初期段階からご協力いただいたWMATA関係各位、機器メーカーに感謝します。

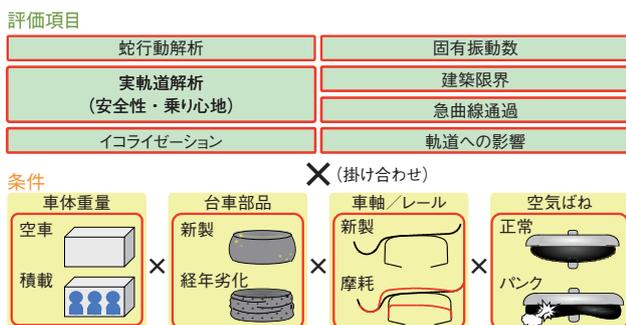


図7 台車設計（走行シミュレーション）
Fig. 7 Bogie design (running simulation)



稲垣 誉



遠矢 裕二



田中 友絵



加村圭市郎



矢野 弘



江崎 秀明