

# 電動パワートレインの騒音・振動に関する フロントローディング型品質保証

岡本 匡平\*

## 抄 録

近年、自動車業界はカーボンニュートラル実現に向けた世界的潮流の中で急速に電動化が進展している。パワーユニットが内燃機関からモータへ置き換わることで車両の静粛性は飛躍的に向上した。一方でその結果、これまでエンジン音にマスキングされていた微小な音や振動が、乗員に知覚されやすくなるという新たな課題が顕在化している。本稿では、当社が初めて本格的に開発した電動パワートレインを対象に、騒音・振動現象の未然防止と卓越した静粛性を実現するために構築したフロントローディング型品質保証のアプローチについて述べる。

## 1. はじめに

従来、当社でのエンジン車向けトランスミッションの騒音（Noise）・振動（Vibration）（以下「NV」という。）に関する品質保証は、車両から割り付けられたNV目標値に基づき筐体やギヤを設計し、パワートレイン単体で達成度を確認するアプローチが主流であった。内燃機関という大きな起振源を持つ環境下では、この方法で十分にNV品質を保証できていたため、車両を用いたNV評価は問題が顕在化した後の原因特定や再現試験が主たる目的となっていた。

しかし、電動パワートレインでは内燃機関という起振源がなくなるため、これまで問題にならなかった微小なNV現象も乗員に知覚される可能性が高まる。当社の電動パワートレインはギヤボックスに加えて、モータとインバータを一体化した構造であり、これらの部品固有の振動や周辺部品との共振など、NV発生源は多岐にわたる。問題が顕在化した後に個別対処する従来型アプローチでは、開発終盤での大幅な設計修正や対策品追加が発生し、コストと期間の両面でリスクが大きい。そこで我々は、Fig. 1に示すように、開発初期から潜在的な課題を能動的に抽出・対策するフロントローディング型品質保証プロセスを構築・適用した。

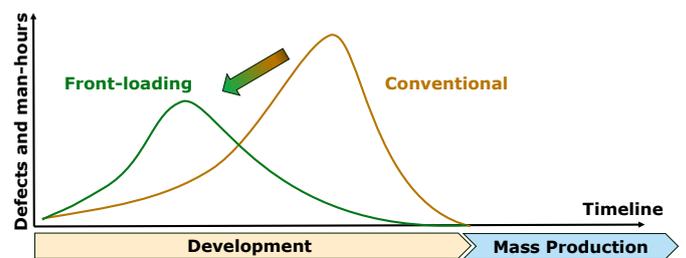


Fig. 1 Difference of conventional and front-loading

## 2. フロントローディング型NV品質保証プロセスの構築

### 2.1 品質機能展開によるNV発生要因の体系的分析

NV現象は複数要因が複雑に絡み合って発現するため、個別対処では根本的な解決が難しい。そこで我々は、顧客要求品質を機能部品の特性へ展開し、因果関係を体系的に整理する目的で品質機能展開（Quality function deployment, 以下「QFD」という。）を用いた。具体的には以下の手順で、開発部門を中心としたチームで因果関係を整理した。

- ① 顧客要求品質「不快な音や振動がないこと」を、具体的に想定されるNV現象へ分解。
- ② 各NV現象に目標値を設定。
- ③ 各NV現象に影響を及ぼす機能部品の品質特性を抽出。
- ④ 品質表を用いて顧客要求品質と品質特性の関連度を評価。
- ⑤ 品質特性を具体的な管理特性値へ展開。

\* コーポレート品質保証部

Sample of QFD results (Differs from the actual results)

Customer requirements	① NV defects	② Target	③ Allocated component characteristics	④ Sensitivity	⑤ Parameter
No noise that stand out from the background noise	Thumping noise when acceleration	$\Delta L \leq 20\text{dB}$	Shaft outer Diameter	By sensitivity line	$\Phi 50 + 0.500$
			Press-fit start shape	By sensitivity line	In drawing
			Bearing play	By sensitivity line	—

Fig. 2 Sample of the results by QFD

これによりFig. 2に示すように管理特性値を机上検討で抽出した。その妥当性を車両で検証するため、後述のフィジカル検証を計画した。

### 2.2 フィジカル検証早期導入の必要性

電動パワートレイン搭載車両は、内燃機関という大きな起振源がなくなることで、微小なNV現象も乗員に知覚される可能性が高まる。加えて、NV現象は電動パワートレイン単体ではなく、車体への伝達経路、周辺部品の共振、車室内音響特性など複合的要因により発現する。そのため、机上検討のみで乗員の知覚レベルを正確に予測することは極めて困難である。顧客が真に体験する品質を保証するには、開発初期から最終製品である車両を用いたフィジカル検証が不可欠である。そこで、QFDにより抽出した懸念点の検証に加え、予測困難なNV現象そのものの発見を目的とし、完成車を用いた大規模フィジカル検証を品質保証プロセスの基軸に据えることとした。実際のフィジカル検証の風景をFig. 3に示す。

### 2.3 NV現象を漏れなく検出する走行パターン設計

潜在課題を漏れなく検出するためには、顧客が遭遇する、市場で想定されるあらゆる使われ方を網羅した走行パターンの設計が必要である。そこで本検証では、QFDからNV現象の発生メカニズムを想定し、電動車特有のNV懸念領域も評価可能な走行パターンを設計した。具体的にはFig. 4に示すように、従来の基本的な走行パターンに加えて、モータノイズ・ギヤバックラッシュノイズなどの検出を目的とした、急発進・急加速のような加速度のコントロール、回生ブレーキの強弱を頻繁に切り替える走行、微小なトルク変動などを盛り込んだ。また、都市部・高速道路・渋滞状況・山道走行などの市場で想定される様々な走行環境条件も意図的に設定し、単一条件では検出が困難なNV現象も評価できるよう配慮した。

さらに、時間や試作台数の制約がある中で効率性を重視し、複数条件を1つの走行パターンに内包させることで、限られた評価リソースでも走行距離と時間を最小限に抑えつつ、NV現象を漏れなく検出可能な網羅的走行パターンを実現した。



Fig. 3 Physical verification

List the conditions		Combine conditions for efficiency
E.g.,) Condition	E.g.,) Driving pattern	
Speed	Maintain 60km/h	-40Nm deceleration after maintaining 60km/h
Torque	Maintain +80Nm	
Temperature	Drive with 35°C over	Full throttle with 35°C over
Throttle vol.	Keep 25%	Step on the accelerator quickly with 10% gradient
Gradient	Brake at 10% slope	
Acceleration	Slow acceleration	
Deceleration	Deceleration with e-Pedal	
Steering	Full steering	
Shift	Shift D to N while driving	
Special	Repeat acceleration and deceleration with extremely low torque	

Fig. 4 Part of the driving pattern

### 3. フロントローディングアプローチの適用結果

フロントローディング型品質保証体制を適用した結果、机上検討では想定できなかったNV懸案を数十件抽出した。これらは全て開発初期に確認・対策が施されたため、開発終盤での手戻りは発生しなかった。

Fig. 5は、あるNV現象について、乗員の知覚 (1) → 車両振動 (2) → パワートレイン単体の振動 (3) → 部品特性値 (4) の4階層で分析し、これを一連の因果構造として可視化した例である。以下、象限毎に説明する。

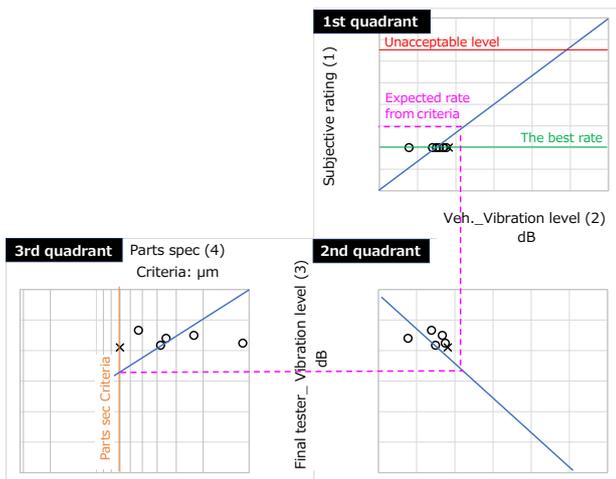


Fig. 5 Analysis results of acquired data

第一象限では、官能評点=乗員の知覚レベル (1) と車両で測定した振動値 (2) との関係を示した。乗員の知覚レベルを評点として数値化している。当該NV現象は乗員の知覚に至らず、全て最高評点であった。そのため、乗員の知覚レベルと車両振動との間に相関関係は確認できなかった。

第二象限では、車両で測定した振動値 (2) とF/T (Final tester：製造工程での台上NV保証設備) で測定した振動値 (3) の関係を示した。車両振動値とF/T振動値の間には正の相関がみられた。これは、車載状態での振動値がF/T結果、すなわち電動パワートレイン単体での振動挙動を反映していることを示している。

第三象限では、F/Tで測定した振動値 (3) とQFDで求めた部品特性値 (4) の関係を示した。F/T振動と部品特性値の間に相関関係は確認できなかった。当該NV現象は部品特性値の管理によって振動レベルが一定の低水準に抑制されており、周辺振動に埋もれているためであると考えられる。

以上より、車両全体の振動レベルに対して電動パワートレイン起因の振動レベルは相対的に十分小さく、車載環境では他の振動に埋没したため、第一象限が示すようにNV現象が乗員に知覚されず、顕在化しなかったと解釈した。

部品特性値から設定した感度線に基づき、乗員の知覚レベルを推測した。破線で示すように、部品公差上限の電動パワートレインで評価しても、乗員の知覚閾値を下回ることが示唆された。また、部品公差上限品である最悪仕様のパワートレインで測定したデータをFig. 5に×で示した。実際に、規格上限のパワートレインでも乗員の知覚に至らなかったことをフィジカルで検証した。

#### 4. 考察

部品特性値・パワートレインの振動・車両振動・乗員の知覚レベルを一貫した因果構造として整理することで、部品スペックから乗員の知覚レベルを推定するプロセスを確立した。これにより設計段階におけるNV目標値の妥当性検証が可能になったと考える。

また、車両でのフィジカル検証を基軸に据えたフロントローディング型品質保証により、開発初期でのNV課題抽出と早期対策が可能となり、開発終盤での設計変更によるリスクを大幅に低減できた。特に、電動パワートレインのようにNV発生源が多岐にわたる製品において、本手法の有効性が示されたといえる。

#### 5. 結論

本アプローチにより、開発段階で潜在的な品質課題を徹底的に抽出・対策し、結果として当社初の本格的な電動パワートレイン開発においてNV不具合ゼロでの立ち上げを実現した。

また、本手法は部品・パワートレイン・車両・乗員の知覚の因果関係を体系的に評価できる汎用性を有し、他製品への水平展開においても有効である。

#### 6. まとめ

今後の展望として、本活動で蓄積した膨大な車両評価データをさらに詳細に分析・データベース化し、NV現象の予測精度の向上を図る。また、より少ない評価工数で高精度のNV品質保証を実現する解析手法の確立を進め、開発リードタイムの短縮・コスト低減・品質向上に貢献していく。

#### ■ 著者 ■



岡本 匡平