N700 系新幹線電車と その省エネルギー効果について*

Series N700 Shinkansen Train and Its Effect of Energy Saving

坂上 啓**
Kei SAKANOUÉ

Key words

series N700 shinkansen train, energy saving, running resistance, regenerative brake, body inclining system

1. はじめに

JR 東海と JR 西日本では、平成 14 年 6 月より次世代の東海道・山陽新幹線直通用車両として、N700 系新幹線電車（以下、「N700 系」という）の共同開発を行ってきた。平成 17 年 4 月からは、JR 東海が発注した量産先行試作車（Z0 編成）による走行試験を実施して性能を確認し、量産車の仕様を決定した。N700 系量産車は、最新の技術を導入した新しいサービスを開始するとともに、お客様の多様なニーズに対応した「さらに快適な車内空間」を提供できる車両としている。

また、東海道新幹線は、環境優位性に優れた高速輸送機関であり、N700 系新幹線電車はこの特性をさらに向上させ、車体の平滑化、回生ブレーキの拡大、車体傾斜システムなどの新技術を採用し、初代新幹線の 0 系車両に比べて、220 km/h から 270 km/h に速度向上したにもかかわらず△32% の省エネルギー化を実現している。N700 系は、700 系の 270 km/h 走行と比べても△19% の省エネルギーを実現しており、新幹線の環境優位性を極めた車両である。

以下、平成 19 年 7 月 1 日から営業運転を開始した N700 系量産車の概要とその省エネルギーを実現した新技術について述べるとともに、それぞれの効果について考察する。

2. N700 系車両の概要

2.1 開発コンセプト

N700 系は、「東海道・山陽新幹線として最新・最速・

最良・省エネルギーの車両」をキーワードとして 700 系をベースにあらゆる点で進化させた車両であり、以下の基本コンセプトに基づいて開発された。

- (1) 東海道・山陽新幹線として最速のハイテク車両
- (2) さらに車内快適性の向上
- (3) 環境への適合を図るとともに、より省エネルギー化を実現

なお、今回の新形式車両は 700 系をベースにさらに進化させたものであり、700 系の進化系、発展系であることから、「ニュー 700 系」、「ネクスト 700 系」の意味を込め、形式名は N700 系とした（図 1）。

2.2 東海道・山陽新幹線として最速のハイテク車両

N700 系の最大の特徴は、日本の新幹線として初めて車体傾斜システムを導入したことである。東海道新幹線は本線路での曲線半径は基本的に 2500 m 以上としており、その後に建設された新幹線よりも曲線半径が小さい。そのため、最高速度は 270 km/h であるが、この半径 2500 m の曲線では最高速度よりも 20 km/h 低い 250 km/h に落として走行している。したがって、到達時間を短縮するには曲線通過速度を向上することが有効である（図 2）。

半径 2500 m の曲線を 270 km/h で走行するには 1° 程度の傾斜で十分であるため、N700 系では空気ばねに圧縮空

*原稿受付 平成 21 年 10 月 27 日

**東海旅客鉄道株式会社新幹線鉄道事業本部車両部車両課（東京都千代田区丸の内 1-9-1）

坂上 啓

1990 年東京工業大学大学院理工学研究科機械工学修了。工学博士（新潟大学）。専門は新幹線車両の設計・開発。

図 1 N700 系新幹線電車

図2 車体傾斜による曲線通過速度の向上

図3 車体傾斜システム概要

気を供給することにより車体を傾斜させるシンプルな方式を採用した。この方式は、基本的に台車の構造を変更する必要がなく実績ある構造を踏襲でき、軽量化の観点からもメリットが大きい。基礎的な開発を進めるとともに、最終的にはこれと並行して開発されてきた ATC のデジタル化（以下、「新 ATC」）、制御伝送などのデジタル制御技術と組み合わせることにより、信頼性の高い装置を用い、かつ故障に対する冗長性の高い 2 重系のシステム構成とし、N700 系用の車体傾斜システムとして完成した（図 3）。新 ATC、制御伝送装置、車体傾斜制御装置、電磁弁装置、空気ばね高さ検知機能付自動高さ調整装置から構成される。

また、起動加速度は 700 系の 1.6 km/h/s に比べて大幅に向上し、2.6 km/h/s とした。これにより、最高速度に至る時分も大幅に短縮することができた。なお、最高速度は、東海道 270 km/h、山陽 300 km/h である。

これらの曲線通過速度の向上や起動加速度の向上と新 ATC による時分短縮効果により、東京～新大阪間で最大 5 分の時間短縮が可能となり、東京～博多間でも最速の車両である。

2.3 さらに車内快適性の向上

N700 系では曲線部の速度向上と最高速度の向上を図っ

無段階方式(比例電磁式リリーフ弁) 多段階方式(電磁弁切替方式)

図4 セミアクティブ制振制御装置の比較

ている。一般的に速度を向上すると、乗心地や車内静粛性等の快適性が悪化するが、N700 系では最新の技術を導入することにより、快適性もさらに向上させた車両とした。

乗心地については、700 系で実績のある非線形空気ばねや車体間ダンパに加え、新しく開発した高性能セミアクティブ制振制御装置を全車両に搭載し、左右方向の振動を抑制している。N700 系のセミアクティブ制振制御装置は、700 系の「電磁弁切替による他段階切替方式」に対して、「比例電磁式リリーフ弁による無段階制御」を採用し、無段階に減衰力を制御できるようにした（図 4）。これにより、状況に応じた最適な制御力が得られ、振動の減衰・絶縁性能を向上している。なお、パッシブ時（システム無通電時、フェール時）には、700 系左右動ダンパと同程度の減衰力特性が得られるようにしている。また、リリーフ圧（リリーフ荷重）を制御する方式であり、アンロード弁が 2 つあり車体速度に対応して常に片側をアンロードする方式であるため、制御にあたってピストン速度は不要となり、ストロークセンサの廃止が可能となった。ストロークセンサおよびストロークセンサボードが不要となり、低コスト化と軽量化を実現している。その他、高速 CPU の採用によりサンプリング間隔を短くし、さらに高次のフィルタ構成を可能とし、高度できめ細かい演算を実現している。CPU の演算能力は 700 系用の CPU に対して約 7 倍となっている。その他、トンネル/明かり区間の線路データマップとモニタから得られる地点情報から、走行中の区間がトンネル区間であるか、明かり区間であるかを判別し、それに応じて最適な制御パラメータを選択するようにしている。

また、新 ATC（東海道区間）の採用による一段ブレーキ化と、車体傾斜システムによる 270 km/h での等速走行区間の拡大による加減速頻度の減少により、前後方向の乗心地も改善し、さらに乗心地の向上を図った。全車両間には、新たに車体間ロールダンパを設置し、ロール方向の一層の乗り心地向上も図っている。

車内静粛性については、客室に加え、デッキも含めた静

図5 台車スカート，全周ホロ

粛性向上を図った。構体では、700 系より採用している遮音性の高いダブルスキン構体を妻構体や台車上部の床などにも拡大した。また、車両間には新開発した全周ホロを鉄道車両として初めて導入するとともに、床構造には低騒音床を採用した。その他、主電動機の動力を伝達する装置である歯車形たわみ軸継手（以下、「WN 継手」）については新型の歯型形状の採用と歯車中心間距離の拡大によりバックラッシュを低減した「低騒音 WN 継手」を採用し（普通車：11 両）、平板形たわみ軸継手（以下、「TD 継手」）については搭載車両を拡大した（グリーン車：3 両）。なお、WN 継手を搭載している車両については、静音型一本リンク（以下、「静音リンク」）を採用した。これは、惰行時に WN 継手のバックラッシュに起因して発生する車内騒音を防止するため、一本リンクを介して台車から車体に伝わる振動エネルギーを一本リンク内部に入れている粒状体の運動エネルギーに変換し、粒状体どうしの摩擦や側壁と粒状体との摩擦により振動を低減させるものである。また、騒音低減のため、歯車装置の固有振動数と歯車のかみ合い周波数の一致による共振を常用速度域から外すよう、歯車装置の歯数、モジュールの最適化を図った。

2.4 環境への適合

トンネル微気圧波については、先頭形状部の断面積分布がポイントとなるが、この断面積分布の最適化にあたっては、「遺伝的アルゴリズム：Genetic Algorithm」(GA)を用いて、最適化を行った。GA は生物の進化の過程を模擬し、あらゆる答えの候補の中から最適解を自動的に抽出する計算手法であり、航空機の主翼形状などを空力的に最適化する際に用いている。以上の手法で解析した結果、車体断面積を 700 系より小さくするとともに、先頭車の車両長を 700 系と同じとし、先頭部長さを 10.7 m (700 系は 9.2 m) にした、上記の制約条件を満たしつつ、トンネル微気圧波も現状を維持する先頭形状を開発した。

車外騒音については、これまでの現車試験結果から、総合音への寄与度が大きいことが分かっている部位を中心に、N700 系では対策を実施している。

車間空力騒音を低減するために、全車間に全周ホロを設置し、平滑化を行っている。この全周ホロは、強靱かつ柔軟という二つの特徴を併せもった特殊材料を用いた一体伸縮型の全周ホロで、高速鉄道車両としては初めての採用である（図 5）。台車部の転動音、空力音等の低減のために、

図6 シングルアームパンタグラフとガイシカバー

図7 車体傾斜の状態監視

台車スカートを全台車に設置している。この台車スカートには、軽量高剛性の CFRP を採用し、軽量化とともにリサイクル性向上も図っている（図 5）。

屋根上の構成は 700 系と同様に、シングルアームパンタグラフとガイシカバーおよびパンタグラフ舟体部からの空力音等の遮音を目的とした二面側壁を設けている（図 6）。屋上機器ぎ装を効率化することによるガイシカバーキャビティ部のサイズの縮小、カバー全体の小型化や、パンタグラフの枠組み形状の改良により、低騒音化を図っている。

2.5 その他（車内サービス、車両状態監視）

N700 系では、無線 LAN によるインターネットが使用可能である。車内インターネットシステムについては、車内に無線 LAN のアクセスポイントを設置するとともに、デジタル化する列車無線を利用して、列車から LCX ケーブルに情報伝送し、地上側に新設するインターネット接続装置を介して ISP（インターネットサービスプロバイダ）に接続することにより、高速走行中も使用可能なインターネット環境を実現している。なお、車内インターネットは、平成 21 年春から東海道区間においてサービスを開始している。

また、各装置の動作状況については、N700 系全編成に対して状態監視システムによりチェックしている。以下に車体傾斜での例を示す。

運転速度や車高指令値、空気ばね高さなど、車体傾斜装

図8 走行抵抗の比較

置の動作状況に関連するデータは、車両に搭載されているモニタ装置からSS無線を介して、地上側のサーバに自動的に伝送される。サーバに格納されたデータは、地上端末の解析装置により毎日解析を実施し、全編成の車体傾斜の動作状況の健全性を検証している。動作状況のモニタ例を図7に示す。この状態監視システムにより、車体傾斜装置に発生する故障の予兆検知や編成間での動作状況の比較などが可能になった。

3. N700 系の省エネルギー技術

3.1 走行抵抗低減

先ほど紹介したように、N700系では、沿線環境対策としてトンネル微気圧波の低減や、車外騒音対策として空力特性を向上させている。具体的には、空力特性に優れた先頭形状、車間の平滑化のため全周ホコを、台車部の平滑化のため台車スカートを全車に装備という内容がある。その他、客室窓ガラスや屋根上・床下の徹底した平滑化も行った。その結果、空気抵抗を大幅に低減でき、現車試験結果より、走行抵抗がN700系では700系に比べて速度270 km/hで△20%以上低減している（図8）。

3.2 回生ブレーキの有効活用

N700系は電動車（M車）14両、付随車（T車）2両の14M2Tの構成とした。これにより、常用ブレーキはT車での負担をなくし、すべてM車の回生ブレーキで負担することが可能となり、付随車のダイナミックブレーキとして100系から採用してきた渦電流ブレーキ装置（ECB装置）を廃止した。つまりN700系では車両の運動エネルギーを無駄なく回生することが可能となった。以下に700系とN700系の各号車のブレーキ負担率を示す（図9）。

3.3 車体傾斜システムによる定速走行

N700系は日本の新幹線として初めて車体傾斜システムを採用した。このシステムにより、曲線走行時に車体を内軌側に1度傾斜させることで、乗り心地を維持しながら曲線通過速度の向上が可能となった。東海道区間ではこれまでR2500の曲線を250 km/hに減速して走行していたが、N700系では270 km/hで走行する。これにより、加減速

図9 常用ブレーキの負担率比較

表1 シミュレーション条件

	性能	走行抵抗	車体傾斜	回生
ケース1	N700系	N700系	あり	N700系
ケース2	N700系	700系	あり	N700系
ケース3	N700系	N700系	あり	700系
ケース4	N700系	N700系	なし*	N700系
ケース5	700系	700系	なし	700系

*ケース4は走行時分をケース1～3に合わせるように最高速度を向上して計算した。

図10 走行シミュレーション結果

頻度を減少させ、エネルギー損失を抑制している。

4. N700 系の省エネルギー効果に関する考察

これまで示してきたN700系の省エネルギー技術の効果を検証するために、以下のケースを設定し、シミュレーションにより消費電力量を比較する。

車両の条件として、以下の5ケースを設定した。ケース1は現行のN700系、ケース2はN700系で走行抵抗を700系としたもの、ケース3はN700系で回生ブレーキを700系相当としたもの、ケース4はN700系で車体傾斜をなくしたもの、ケース5は参考として現行700系を示した。

走行条件は東京～新大阪の「のぞみ走行」とした。最高速度は270 km/hとしたが、ケース4については、単に車体傾斜をなくすと、到達時間が長くなる。このため到達時間がケース1～3と合うように最高速度を上げてシミュレーションを行った(表1)。

各ケースについて消費電力量のシミュレーションを行った。ケース1を100とした結果を図10に示す。

図10より、現行のN700系であるケース1を基準として、省エネルギー技術の寄与等を考察すると次のようになる。

- ① 走行抵抗低減の寄与：△21% (1-100/126: ケース2)
- ② 回生ブレーキ拡大の寄与：△2% (1-100/102: ケース3)
- ③ 車体傾斜システムの寄与^{*1}：△7% (1-100/107: ケース4)
- ④ 700系との省エネ比較：△19% (1-100/123: ケース5)

さらに省エネルギー化について車種ごとに比較すると、速度向上に伴い、主回路機器の出力は700系から約30%向上したにもかかわらず、東海道区間では電力消費量を19%低減した。初代新幹線0系と比較すると、速度が220 km/h から270 km/h と50 km/h も向上しているにもかかわらず32%低減、仮に同じ220 km/h 走行とした場合には49%低減させており、大幅な省エネルギー化を実現している(図11)。

5. ま と め

N700系は21世紀の東海道・山陽新幹線を担う新型新幹線車両として「最新・最速・最良の車両」を目指し、小

図11 車種別電力消費量の比較

牧研究施設等で開発してきた最新技術を結集した車両となっている。数々の最新技術の導入により、上質な快適性、多様なサービスを実現しており、省エネルギー面についても、700系より到達時分を短縮しながらも、消費電力量△19%を達成した。当社では、このN700系を平成23年度までに80編成導入することを決めており、他の輸送機関に対し環境優位性をさらに高めることとしている。今後も地球環境にとって優れた高速鉄道を維持発展させていきたい。

参 考 文 献

- 1) 臼井俊一、則直久：東海道・山陽新幹線直通用次世代車両「N700系」量産車の概要(1)、鉄道車両と技術、131(2007)2。
- 2) 伊藤一、中倉康喜、和田哲也、福井広道：東海道・山陽新幹線直通用次世代車両「N700系」量産車の概要(2)、鉄道車両と技術、132(2007)30。
- 3) 上野雅之、鳥居昭彦、萩原善泰、加藤宏和：N700系新幹線電車の省エネルギー効果に関する考察、J-RAIL2007、(2007)533。
- 4) Y. Nakakura and K. Hayakawa: THE BODY INCLINING SYSTEM OF THE SERIES N700 SHINKANSEN, STECH '09, (2009) 112。

*1 “③車体傾斜システムの寄与”は、最高速度を変化させ、時分を同等と仮定した場合の考察であり、ランカーブを同等とした場合の寄与とは異なる。