



# 新幹線用空気ばねの開発の歴史

## History of Air Spring Development for Shinkansen Trains

北田 秀樹

Hideki Kitada

空気ばねは、空気の圧縮性や流動抵抗を応用した柔らかく、減衰性能を有するサスペンションである。空気ばねが鉄道用に採用され60年程経過するが、この技術が現在のように発展を続けてきたのは、新幹線車両に採用され、その高速化に伴う様々な技術課題に適應すべく研究開発が進められてきたことによると言える。高速化に伴う環境影響軽減のため、車両が大幅に軽量化され、台車においてもボルスタが廃止された軽量ボルスタレス台車が採用された。これに伴い、空気ばねの機能も大きく変更になった。また曲線通過速度向上のために、水平方向の非線形特性機構の開発や空気ばねを利用した車体傾斜システムへの適用等、航空機への対抗のために速度向上や乗り心地改善の面で空気ばねが大きく貢献してきた。一部の路線では更なる高速化の検討も進められており、320km/hを超える速度でも安全・快適に走行出来るよう、今後も技術開発が進められる。

Air springs are part of a soft damping suspension system that provides both softness and damping characteristics by utilizing the compressibility and flow resistance of air. They were first used on railways about 60 years ago. The subsequent and continuous advancement of air spring technology is a result of the incorporation of air springs into Shinkansen trains and the acceleration of R&D activities in overcoming various challenges associated with increasing train speeds. To lessen the environmental impact of high-speed trains, the weight of each car was reduced dramatically, particularly through the adoption of bolster-less bogies. With this and other technological innovations, the functions of air springs also changed remarkably. To make the Shinkansen competitive with aircraft by increasing both speed and ride quality, various new functional units were developed. Such units include the horizontally nonlinear air suspension system and the car-body tilting system with built-in air springs that enables trains to travel at higher speeds on curved tracks. A project aimed at further increasing train speed has been launched for several train lines. We will continue our R&D efforts to develop air springs that will enable trains to run safely at speeds exceeding 320 km/h while providing a truly comfortable ride.

キーワード：空気ばね、新幹線、鉄道車両、台車、枕ばね

## 1. 緒言

空気ばねは、気体（空気）の圧縮性や流動抵抗を応用した柔らかく、減衰性能を有するサスペンションである。

1940年代には米国で長距離バス用途として一般的に使用され始め、1950年代には鉄道車両用でも採用されるようになった。一方、日本では戦後の高速台車振動研究会以降の研究開発成果の集大成として開発されたDT23形台車<sup>(1)</sup>（151系）に、三段ペローズ型空気ばね（以下ペローズ型）が採用になり、柔らかな上下特性による乗り心地向上とレベリングバルブによる車高調整の機能で、空気ばねが鉄道車両用台車の重要部品として位置付けられるようになった。

鉄道車両の台車には、車輪（輪軸）と台車枠の間に装備される1次ばねと、台車部と車体の間に装着され車体支持機構を構成する2次ばねが装備されている。空気ばねは、2次ばねとして採用され、スイングハンガー方式（DT23形台車）では上下運動を受け持つためのものであった。

初代「0系」新幹線から空気ばねが採用されると、新幹線のその後の台車構造の変遷や空気ばねに要求される追加機能等台車設計技術の展開に応じて、空気ばね機能も多様化

され、また多くの方向の運動も受け持つようになった。新幹線開業以来50年が過ぎ、210km/hからスタートした最高速度も、車両の軽量化、高性能化により現在では320km/hにまで向上され、また様々な車両の運動制御技術の発展で快適な乗り心地も確保されている。

本稿では、新幹線車両の新技術開発に適應するために、台車の重要保安部品に位置付けられている空気ばねの技術開発が、どのように展開されてきたかについて記述する。

## 2. 空気ばねについて

空気ばねは、空気の圧縮性や管路を流れる際の流動抵抗を応用し、柔らかく且つ減衰性能を持たせることが可能なサスペンションである。空気ばねの概念図及び振動モデルを図1に示す。概念図により機構を説明する。ダイヤフラム、外筒と内筒で囲まれた本体容積が上下動で圧力変動が生じ、内部の空気がオリフィスを通することで、ばね及び減衰作用が発生する。空気ばねの振動モデルに示す「 $k_1$ 」は空気ばね本体室（内容積部分）の剛性、「 $k_2$ 」は有効受圧面

積変化の剛性、 $[N]$  は本体と補助空気室の容積比を表わし、 $[Nk_1]$  は補助空気室の剛性、 $[C]$  は絞りによる減衰係数となる<sup>(2)</sup>。従って、補助空気室容積やオリフィス径を変更することで、上下方向ばね定数の低剛性化や減衰性能の調整が可能となり、使用目的や要求される機能・性能に応じ、様々な特性の空気ばねが設計される。またレベリングバルブを用いて、空気の給排気を行うことで、支持荷重に因らず空気ばね高さを一定にコントロールできることも特長のひとつである。

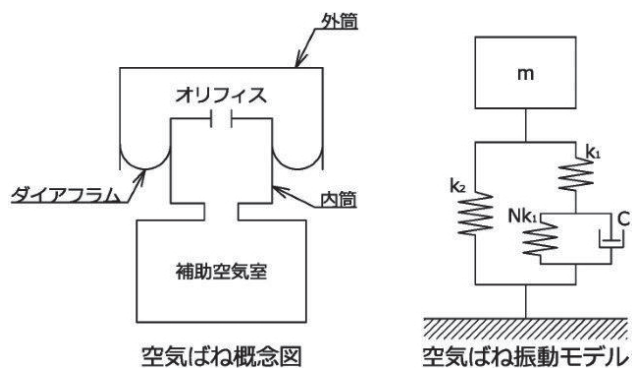


図1 空気ばねの概念図と振動モデル

は、台車と車体の相対変位が空気ばねの水平方向反力で復元(センタリング)されることになり、水平方向にもばね特性に優れた空気ばねを開発することが課題となった。

### 3-1 特殊ダイアフラム型空気ばねの開発

開発当初は、当時一般的であったペローズ型のペローズを改良し復元力を持たせたもので評価された。構造が図3に示すように上下の座板に三つ山のペローズを組み込んだ構造であるため、水平方向剛性の大部分はペローズの膜剛性に依存している。従って、水平方向の荷重—変位特性に於いてヒステリシスが大きいため、ばね定数の振幅依存性が大きく且つ復元性能が悪いという結果になった。また、取り付け高さの変動によっても、水平方向のばね定数が著しく変化する等不安定要素もあった。

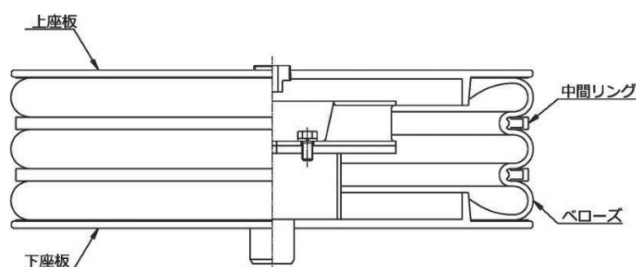


図3 三段ペローズ型空気ばね

## 3. 初代「0系」新幹線への挑戦

最高速度200km/h以上での高速走行を目指した初代新幹線の台車(図2)には、水平方向の揺れを緩衝するゆれまくら装置を省略し、まくらばり(ボルスタ)の上に直接空気ばねを搭載し車体と接続する、簡素で軽量なダイレクトマウント方式の車体支持機構の採用が決まった<sup>(3)</sup>。

この台車では、空気ばねは上下方向に加え水平方向のばね特性も要求されることになった。特に水平方向に関して

一方、当社と住友金属工業(株)(現新日鐵住金(株))で開発した特殊ダイアフラム型空気ばね(以下、ダイアフラム型)は、図4に示すように外筒と内筒の壁の間にダイアフラムを挟み込んだ構造をしているので、この壁から得られる空気反力が水平方向の剛性の主成分となる。また、上下・水平方向のばね定数は、この壁の傾き角で制御することが可能な構造であった。基本特性についてペローズ型と比較すると、①上下方向ばね定数は補助空気室容積が同じ場合柔

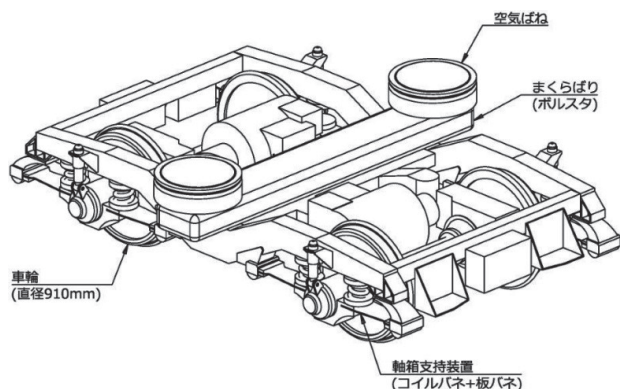


図2 ダイレクトマウント台車

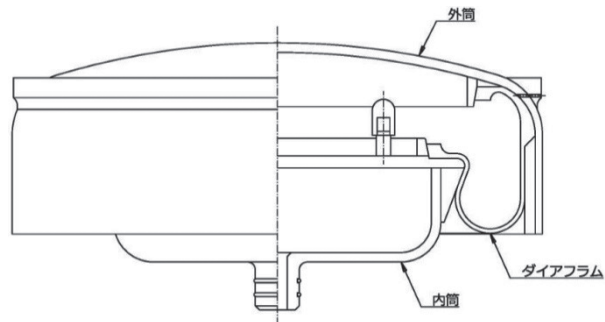


図4 特殊ダイアフラム型空気ばね

らかく、②水平方向ばね定数の主成分は空気反力であり安定した復元力が得られることが特長であった。水平方向の反力と変位の関係を測定した結果を図5に示す。ダイヤフラム型はヒステリシスが小さく、また大きな反力を有していることがわかる。

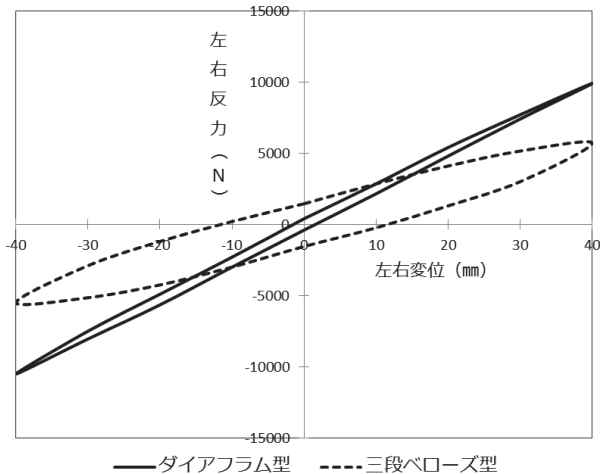


図5 水平方向反力-変位線図

日本国有鉄道（現JR）の走行試験結果では、ベローズ型は車両の横変位や振動特性上致命的な欠陥が解消されず採用が見送られ、ダイヤフラム型の採用が決定した<sup>(4)</sup>。

ダイヤフラム型の詳細設計においては、分解・組立が容易でメンテナンス性に優れたセルフシール型のダイヤフラムを採用された。また、金具の構成部品が多いことによる重量面のハンディについては、全ての金具構成部品にアルミ合金材料を使用し軽量化が図られた。

尚、この0系新幹線台車（DT200形）構造の基本設計は、200系新幹線台車（東北・上越：DT201形）、100系新幹線台車（東海道・山陽：DT202形）まで踏襲され、新幹線用ボルスタレス台車が実用化されるまで、このダイヤフラム型の基本設計が採用された。

#### 4. 新幹線車両の高速化・軽量化への取組

1980年代に入ると、更なる高速化の研究開発が進められた。空気ばねについても、高速走行における乗り心地改善や環境対応のための車両軽量化を鑑み、①ばね定数の低剛性化と乗り心地改善、②軽量ボルスタレス台車用空気ばね等に関する研究開発が行われた。

##### 4-1 ばね定数の低剛性化

0系新幹線の乗り心地改善の検討<sup>(5)</sup>において、水平方向ばね定数の低剛性化が乗り心地に及ぼす影響を調査する研

究が始まり、オリジナルの0系空気ばねの構造を基本にし、ダイヤフラム壁面に傾斜を設け空気反力を低減した3/4剛性品（DT201形台車対比）、及び積層ゴムを直列に配し積層ゴムの柔らかな横剛性を応用した1/2横剛性品を試作し、現車試験用として供試した結果、水平方向の低横剛性化は乗り心地改善に効果があることが確認された。0系新幹線のモデルチェンジ車として登場した100系新幹線の最高速度は230km/hに向上されるため、乗り心地向上を目的に内・外筒の壁面傾斜を設けた3/4剛性品で量産化された。

##### 4-2 軽量ボルスタレス台車

新幹線が航空機に対抗するためには、東京-新大阪間を2時間30分で結ぶ必要があるとされ、そのためには新幹線の最高速度を270~300km/hに向上させる必要があった。速度向上の課題として、沿線の騒音・振動等環境への適合性や乗り心地の確保という課題があった。最高速度220km/hで走行する0系の軸重16ton（車重64ton）に対し、騒音や振動レベルを0系走行時並み以下に維持し、最高速度270km/hで走行するためには、軸重を11.3ton以下に削減する必要があった<sup>(6)</sup>。そのためには、車体や台車の構造まで踏み込んだ検討が必要であり、車体材質のアルミ合金化と台車の軽量化構造が計画された。台車の軽量化については、まくらばり（ボルスタ）の廃止、中空車軸、小径車輪等の軽量化案が採用されたボルスタレス台車（図6）を新幹線で初めて採用することとなり、台車重量の約3割削減の目途付けができた<sup>(7)</sup>。

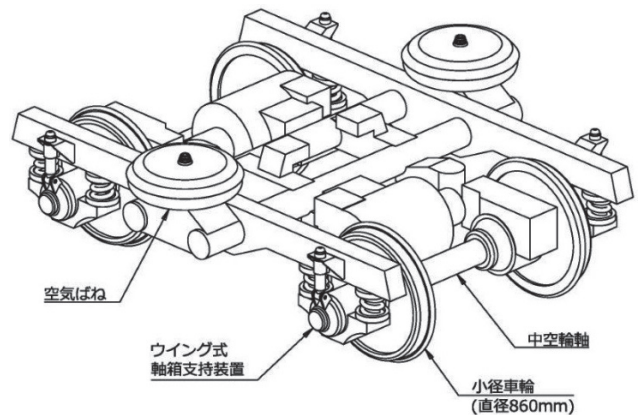


図6 ボルスタレス台車

##### 4-3 ボルスタレス台車用空気ばねの開発

従来のボルスタ台車は、ボルスタと台枠の間で曲線に追従して回転し、曲線を通過できる構造である。しかしボルスタレス台車の場合、±100mm以上の大きな水平変位が許容できる空気ばねで車体を直接支持し、曲線を通過す

際には、空気ばねが水平方向に大きく変位することで、台車が車体に対し安定した旋回ができるような構造にしている。

空気ばねにとっては、許容水平変位 $\pm 100\text{mm}$ 以上という新たな機能が仕様に追加され、機能・性能・耐久面での検証が進められた。また、水平変位が大きい空気ばねには、締結式ダイヤフラムの使用例が多かった。ところが、新幹線用空気ばねにはこれまでセルフシール方式のダイヤフラム型が採用されていたので、本ボルスタレス台車用空気ばねについても、車両検修時のメンテナンス作業で、従来と取り扱いが大きく変わらないように、セルフシール方式が必須条件であった。

ダイヤフラム型と積層ゴムを組合せ、積層ゴムにも水平変位の一部を負担させることで、大変位が許容できる構造とした。また、その影響で水平方向のばね定数も柔らかくなり、100系新幹線の約60%まで低剛性化された空気ばね(図7)が開発された。また特徴的なのは、1981年頃に鉄道技術研究所(現(財)鉄道総合技術研究所)で研究された可変オリフィス(線形絞り)<sup>(2)</sup>が採用され、上下方向の減衰特性に関しても、入力振幅に依らず安定的な減衰力が得られる減衰機能が付与されたことである。

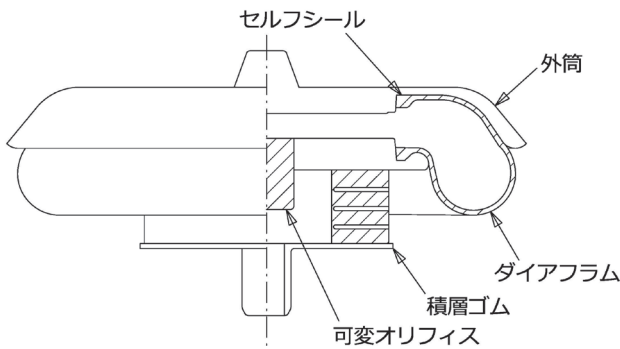


図7 ボルスタレス台車用空気ばね

このように多くの新しい技術が盛り込まれた300系新幹線(「のぞみ」)は、東海旅客鉄道(株)(以下JR東海)にて、最高速度 $270\text{km/h}$ 、東京-大阪間を最短2時間30分で運行された。またこの車両は、西日本旅客鉄道(株)(以下JR西日本)でも採用された。尚、以降の新幹線車両は、全てボルスタレス台車が採用されている。

## 5. 速度向上への対応

平成に入ると東京-博多間の長距離移動において陸路と空路の間で顧客獲得競争が次第に激しくなり、JR東海及びJR西日本の両社では、航空会社に対抗して、速度向上を目

指したポスト300系新幹線の開発を進めることになり、次世代の新幹線関連技術の実証実験をするために、JR東海は「300X」、JR西日本は「WIN350」を製作し、高速走行試験が実施された。

JR西日本は、この実験の成果をもとに、最高速度 $320\text{km/h}$ を目指した500系新幹線の開発に注力した。同様にJR東海でも試験結果をもとに、車内の居住性や乗り心地の改善に加え、山陽新幹線区間の最高速度を $270\text{km/h}$ から $285\text{km/h}$ へ向上することを目標に700系新幹線の車両開発に着手した。

空気ばねに関しては、曲線通過速度向上時の乗り心地向上の検討課題として、左右動ストッパの干渉や車体傾斜機構への空気ばね適用があった。曲線で速度向上を行った場合、超過遠心力で車体が曲線の外側に移動し、左右動ストッパ当たりが発生していた。この干渉により、人体に感じる加速度が増加し、快適性が損なわれていた。

### 5-1 非線形空気ばねの開発

曲線では傾き(高低差)を設けて、遠心力により車体が曲線の外側に倒れる力と、傾きにより重力で車体が内側に倒れる力が相殺するよう設計されている。左右のレールの高さの差をカントの値で表現し、曲線半径と走行速度でこの値が設定される(図8)。

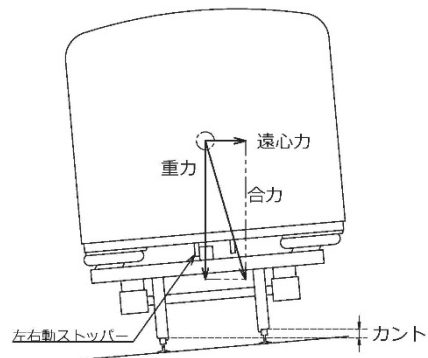


図8 カントと車両に印加される遠心力

設定速度以上で曲線を通過する場合は超過遠心力が発生し、車体が曲線の外側に移動する。この移動量を建築限界内に制限するため、車体と台車との間にストッパを設けている。この遠心力を空気ばね反力で受け止めることができれば、ストッパ当たりが防止できる。空気ばねの水平方向のばね定数は、乗り心地の観点より柔らかく設定されているため反力は小さいが、図9に示すような非線形の特性を付与できれば、遠心力相当の反力を空気ばねで確保できる。

通常直線走行時の左右変位領域は低剛性且つ線形特性を有し、左右変位の増加につれてばね定数が高まり、台車の

左右動ストップに当たることなく、車両の左右変位を空気ばね反力で保持する機能を有した空気ばねの開発が必要となった。

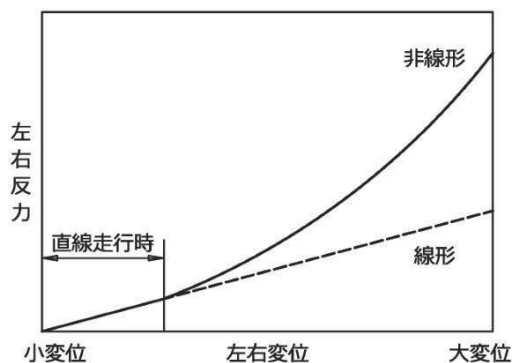


図9 左右方向「非線形特性」

この課題を解決するために、図10に示すように左右方向積層ゴム制限ストップと外筒スカートが取り付けられ、小変位時は柔らかなばね定数を示し、左右変位が増加すると図11のように積層ゴム制限ストップが作用し剛体化、且つダイアフラムが外筒スカートに接触し空気反力が増加する仕組みである。また、前後方向については制限ストップ間隔が広く且つスカートもないため、台車旋回時は柔ら

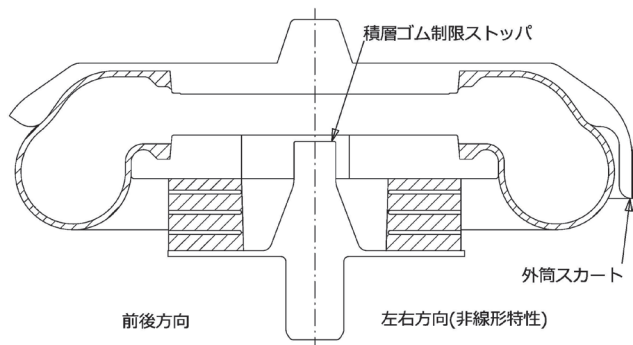


図10 非線形空気ばねの構造

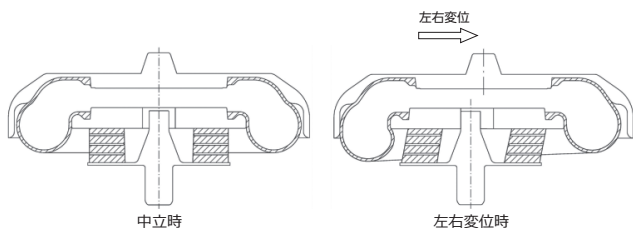


図11 非線形空気ばね

かなばね特性が確保できている。

1993年から、当社はこの問題を解決する手段をJR東海と共同で開発にあたった。本技術に関する知財権は、当社とJR東海の共同出願したものであった<sup>(8)</sup>。現車走行試験で本技術の有効性を確認し、700系の量産車で採用に至った。

非線形化の技術により、走行速度を上げカント不足の状態でも曲線通過しても、ストップ当たりがなく快適性が確保される。尚ストップ間隔は建築限界に抵触しない範囲で拡大され、空気ばね左右変位量を増やすことで高反力値を確保している。

この技術は、多くの新幹線車両に採用され、新幹線用空気ばねの基本構造技術となった。

## 5-2 車体傾斜による速度向上

日本の新幹線区間における輸送時間短縮には、曲線通過速度の向上が必要となる。快適性を維持しながら、安全に曲線通過速度の向上を図るためには、超過遠心力の人体への負荷を軽減することによる快適性の向上と左右動ストップ当たり防止対策を両立させる必要があった。

2005年になると、東海道区間の曲線を270km/hで通過可能となる新型車両の開発が行われた。カント量を変更することなく速度向上を行うためには、図12に示すようなカント不足を補う車体傾斜機構を台車に付与する必要があった。但し、振り子型台車は機構の複雑化と重量増で新幹線には向かず採用は見送られ、空気ばねストローク片上げ方式のリフト機能を活用した車体傾斜システムが採用され、2007年7月1日からN700系として高速化営業運転を開始した。最大傾斜角は1°に設定された<sup>(9)</sup>。

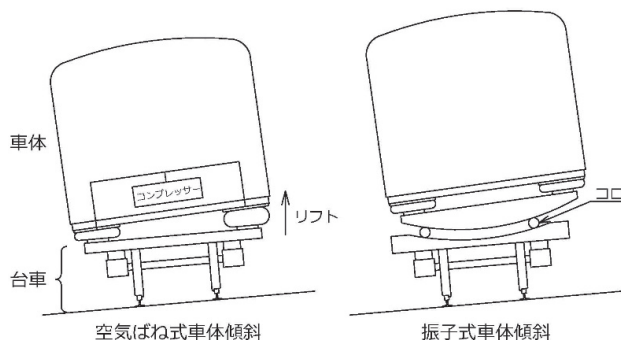


図12 車体傾斜による曲線通過

また、第2次高速化としてN700系の改良型であるN700A系電車が投入されており、285km/hで曲線走行ができるよう改良されているが、空気ばねについては前述の非線形特性の反力値を更に向上させている。

一方JR東日本でも、2006年頃より「FASTEC360<sup>(10)</sup>」と呼ばれる新幹線高速試験電車で、速度向上、信頼性、環境

適合、快適性等の評価が行われ、量産車であるE5系及びE6系新幹線にも前述の非線形空気ばねが設計、採用されている。更に、N700系同様に、空気ばねストローク片上げ方式の車体傾斜にも対応している。

## 6. 結 言

本稿では、新幹線開業以来進化を続けている車両技術開発に対応した空気ばねの新技术開発の展開について述べてきた。機構・構造設計中心の展開となっているが、今後は制御技術も組み入れたシステム化が進み、更なる走行速度の向上、信頼性確保、環境への適合性、快適性改善等が進められるなかで、新しい課題に対する対応が求められる。

また、新幹線用空気ばねの技術開発は、日本固有の狭い国土に展開された高速鉄道が持つ様々な課題に対応してきた歴史であるが、日本の新幹線が世界に展開される上で、今後直面するであろう種々の課題に対応するための有益な解決手段となることを期待している。

### 参 考 文 献

- (1) 石毛真、「ボギー台車」、RRR Vol. 70 No.6、pp. 23-31 (June 2013)
- (2) 小柳志郎、「空気ばね防振系の最適設計法」、日本機械学会論文集 (C編) 49巻439号 (March 1983)
- (3) 岡本勲、秦広、「車両のキーテクノロジー」、RRR Vol. 71 No.10、pp. 8-13 (October 2014)
- (4) 横山輝義、加藤清之輔、「車両用空気ばね」、住友電気第82号、pp.113-122 (October 1963)
- (5) 佐々木皓一、「新幹線電車の乗り心地改善」、日本機械学会論文集 (C編) 57巻539号 (July 1991)
- (6) 高井秀之、「新幹線を実現したキーテクノロジーと今後の研究開発」、RRR Vol.71 No.10 (October 2014)
- (7) 岡崎正人、平石元実、「高速・軽量化車両」、日立評論 VOL.73 (March 1991)
- (8) 上林賢治郎、北田秀樹、「空気ばね」、特願平6-155970 (July 1994)
- (9) JR東海Webpage、N700, N700A Home Page
- (10) 小笠原稔、「次世代新幹線の研究開発の方向性とFACTECH360」、JR EAST Technical Review-No.15、pp. 16-27 (Spring 2006)

### 執 筆 者

北田 秀樹 :フェロー  
ハイブリッド製品事業部

