

連節構造を支える台車の開発 (4点支持台車と2点支持台車の開発と試験結果)



島宗 亮平* 森山 淳*

次世代の通勤・近郊形車両を目指して開発を行ったAC Trainは、JR東日本の通勤・近郊形車両として初の連節方式を採用している。これに伴い、走行性能や連節部構造の比較を行うため、4点支持連節台車、2点支持連節台車の2種類の連節方式について開発を行った。走行試験による評価の結果、両台車とも走行安全性に問題ないこと、4点支持連節台車は出口部緩和曲線で乗り上がり脱線に対しても有利であることを確認した。また車両によって乗客数の極端な差がある場合を想定し、偏荷重の条件を設定した走行安全性の測定試験を行い、走行安全性について通常のボギー台車と変わらないことを確認した。乗り心地については現行E231系と同等以上であり、更なる乗り心地向上に向けた見通しも得ることができた。

●キーワード：AC Train、4点支持連節台車、2点支持連節台車、走行安全性、偏荷重

1 はじめに

JR東日本では、次世代の通勤・近郊形車両を目指したAC Train試験車（E993系）の開発を行った。この車両は旅客サービスの向上及びライフサイクルコストの削減のため、JR東日本の通勤・近郊形車両としては初の連節方式を採用している。車体を2台の台車で支える一般的なボギー車両と異なり、連節方式¹⁾では、車両の連結部に台車を配置して前後の車両を支える方式である。日本での主な採用例としては小田急電鉄の特急電車（ロマンスカー）、江ノ島電鉄、広島電鉄などがあり、当社では1993年に開発した新幹線高速試験車（953形：STAR21）で採用している。

これまでの連節台車は、枕ばねをインダイレクトマウント方式²⁾として側受で車体を支持する方式が一般的である。これに対しAC Trainでは、摺動部の廃止によるメンテナンス性の向上と軽量化をはかるため、連節台車はボルスタレス方式とした。走行性能や連節部構造の比較を行うため、2点空気ばね支持方式および4点空気ばね支持方式の2種類の連節台車の開発を行った。本稿では、この連節台車の概要と構造、走行試験で得られた走行安全性の測定結果、車両によって乗客数に極端な差が生じたことを想定した偏荷重条件における走行安全性の結果、及び乗り心地の結果について述べる。

2 AC Trainで試行した連節台車の概要

AC Trainでは2種類の連節台車を試行した。図1に両方式の概要、表1に主要諸元、図2に編成図を示す。図1(a)は4点空気ばね支持方式（以下4点支持方式と称す；形式はDT958およびTR915）連節台車、図1(b)が2点空気ばね支持方式（以下2点支持方式と称す；形式はDT957およびTR914）連節台車である。DT957およびDT958は直接駆動式主電動機（DDM）に対応した電動台車である。

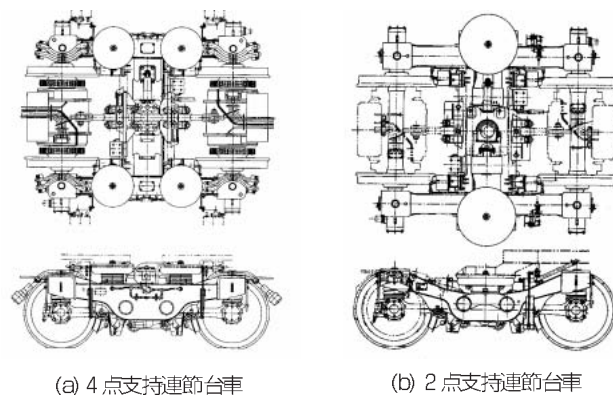


図1：AC Trainで試行した連節台車

表1：AC Train台車 主要諸元

		TR 9 1 6 (第1台車)	TR 9 1 4 (第2台車)	DT 9 5 7 (第3台車)	DT 9 5 8 (第4台車)	TR 9 1 5 (第5台車)	TR 9 1 7 (第6台車)
支持装置	車体	ボルスタレス 空気バネ 支持方式 先頭台車	ボルスタレス 2点空気バネ支持方式 連節台車		ボルスタレス 4点空気バネ支持方式 連節台車		ボルスタレス 空気バネ 支持方式 先頭台車
	軸箱	軸はり式					
最高運転速度 (km/h)		1 2 0					
曲線通過速度		列車運転速度表の「基本のオ」					
軸距 (mm)		2100					
軸受中心距離 (mm)		1700					
車輪直径 (mm)		φ 860					
駆動装置				DDMまたは 並行カルダン式駆動装置 (歯車比 6.69)			
車軸軸受		110密封複式 円錐ころ軸受 (JT14C)	120密封複式円錐ころ軸受 (JT26X)				110密封複式 円錐ころ軸受 (JT14C)
基礎 ブレーキ 装置	方式	踏面併用1軸1ディスク方式		踏面片押方式		踏面併用1軸1ディスク方式	
	踏面	アジャスタ付 ブレーキ ユニット φ114×4	アジャスタ付 ブレーキ ユニット φ127×4	アジャスタ付 ブレーキ ユニット φ165×4		アジャスタ付 ブレーキ ユニット φ127×4	アジャスタ付 駐車ブレーキ ユニット φ114×4
	ディスク	ブレーキダイ ヤフラム φ220×1 φ140×1 (弱め軸)	ブレーキダイ ヤフラム φ220×2			ブレーキダイ ヤフラム φ220×2	ブレーキダイ ヤフラム φ220×1 φ140×1 (弱め軸)
ブレーキ 倍率	踏面	1.5	2.8	3.5		2.8	1.5
	ディスク	2.4	2.4			2.4	2.4

2.1 連節台車の共通内容

本項では4点支持方式と2点支持方式の共通な内容について述べる。また、4点支持台車の特徴的な内容については22項で、2点支持台車の特徴的な内容については23項で説明する。

(1) 連節化による台車強度・ブレーキ装置の強化

AC Trainでは編成当りの台車数が少ないため、1つの台車が負担しなければならない荷重やブレーキ力が増加する。従って、車輪、車軸、軸ばね、台車枠はいずれも最大軸重16t対応とした。また、基礎ブレーキは、当



図2：AC Train編成図

社における従来の通勤車両と同様に、電動台車は踏面ブレーキ方式、付随台車は踏面ブレーキ併用の1軸1ディスク方式としながら、ブレーキ軸数の減少に対して表1に示すようシリンダ・ダイヤフラム径およびテコ比を増大してブレーキ力の増大に対処している。

(2) DDMの取付け

A C TrainはDDMを採用しているため、電動台車はDDMの取付けに対応した構造としている。図3に示すように、ロータの回転運動をモータ両端の継手を介して直接車軸へ伝える。なお、DDMを取付けるとバネ下質量が増加して走行安全性への悪影響が懸念されるが、継手に緩衝用のゴムを挿み込むことにより走行安全性の劣化を防止している。またDDMが自ら回転することを防ぐ目的で、反力受けを設けている。

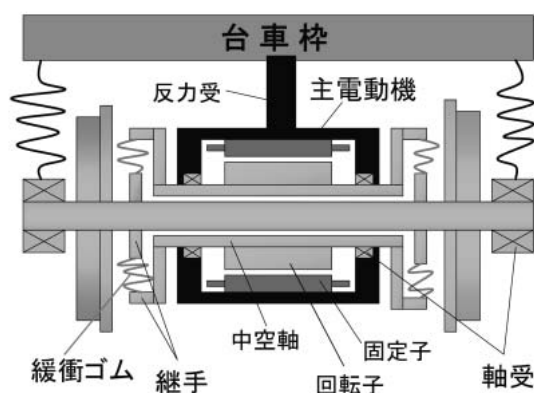


図3：DDMの取り付け

2.2 4点支持方式連節台車

4点支持方式の連節台車は、1台車当たり4個の空気ばねを持ち、連節部両側の車体を2個ずつの空気ばねでそれぞれ支持する方式である（図1(a)）。空気ばねやレベリングバルブ（以下「LV」といった空気ばね関係の部品が増えるが、後述の2点支持方式にみられる車体間に張り出した枕梁は不要となることから車体側の構造を簡素化することができる。4点支持連節台車は、海外においてはドイツ鉄道の通勤・近郊形車両ET423をはじめ、いくつかの採用例が見られる。一方、日本での実績は953形新幹線高速試験車の一部で試用されたのみであ

り、通勤・近郊形電車用としては初の適用である。

(1) 連節構造と中心ピン

連節部の構造を図4に示す。4点支持連節台車の上に中心ピンを持つ方の車体（下側車体）を載せ、中心ピンと台車間をけん引用の一本リンクで結合する。中心ピンの上部には連結装置の受けがあり、ここにもう一方の車体に取り付けられた連結装置を載せボルトで固定する。上側車体の連結器体には緩衝ゴムが圧入されており、ここを節として2車体間の運動を許容している。本台車の場合、それぞれの車体を支持する空気ばねで各車体の荷重を負担するため、常時この連結装置が上下方向の荷重を負担することはない。この方式では、空気ばねが端バリの直下に配置できるため、端バリの相手側車体へのせり出しは必要なく、車体端部を比較的簡単な構造とすることができる。構体と台車を合わせて比較すると、構造が簡素であることと、軽量化が図れる等の利点がある。

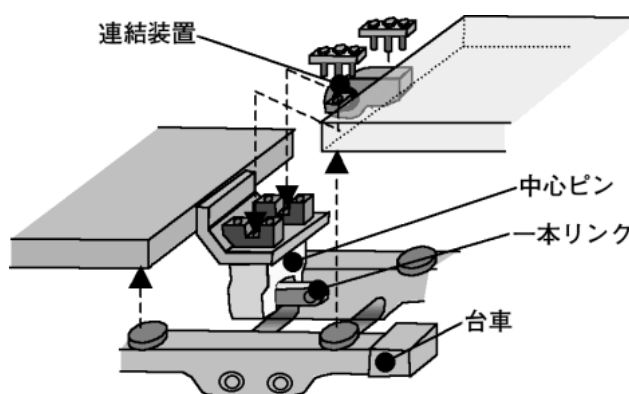


図4：連節部の構造（4点支持方式）

(2) 空気ばね前後間隔

4点支持連節台車の場合、空気ばねの前後間隔が輪重バランスや乗り心地へ影響を及ぼすとみられるため、空気ばね前後間隔の設定が重要となる。本台車では、これらの影響を極力低減するため、連結面間距離400mmを構成できる範囲で極力短縮を図り840mmとした。

(3) 空気ばねの連通機構および高さ制御

車体の満車時及び空車時に対して車体床面高さを一定

に保持する空気ばねの高さ制御は、各空気ばねごとに行う。従って、各空気ばねにLVを設けている。

空気ばねが万一パンクした際に輪重アンバランスの発生を防止するため、従来台車の連通機構と同様に左右方向の空気ばねを差圧弁を介して接続するとともに、前後方向についても差圧弁による連通機構を設けている。従って、台車内の何れか一箇所の空気ばねがパンクして空気ばね間に大きな圧力差が生じた場合には、当該台車内の全ての空気ばねの空気が抜け輪重アンバランスの発生を防止する。

2.3 2点支持方式連節台車

AC Trainで採用した2点支持連節台車は、連節車体間の中央位置でボルスタレス台車の空気バネ荷重を受ける構造とするため、空気バネを受ける車体側の枕はりには、一方の車体から連節部へ張り出す形としている。この枕はりは急曲線通過時に連結する相手の車体との干渉を避けるため、車体下面より低い位置に設ける必要がある。空気ばねは、枕はりのさらに下へ配置する必要があるため、台車枠側を大きく屈曲させて空気ばね上面高さを830mmに低減している（図1(b)）。

(1) 連節構造

車体への取り付け状況を図5に示す。2点支持連節台車の上に枕梁を持つ方の車体（下側車体）を載せ、枕梁中央部から出ている中心ピンと台車との間をけん引用の一本リンクで結合する。枕梁中央部の上面には連結装置の受けがあり、ここにもう一方の車体（上側車体）に取り付けている連結装置を嵌合してボルトで固定する。連結

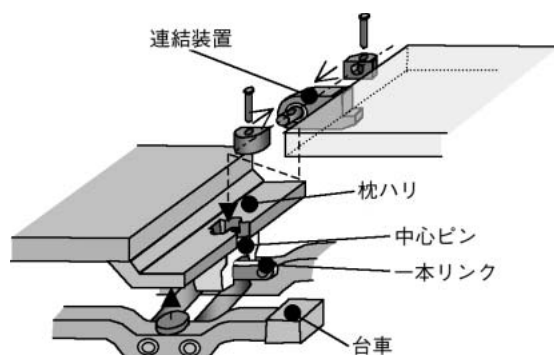


図5：連節部の構造（2点支持方式）

装置には回転方向の運動も考慮して球面軸受が内臓されており、ここを節として2車体間の運動を許容している。このため本台車の場合、1車体の支持は空気ばねと連結装置による3点支持となる。

(2) 空気ばね左右間隔の拡大

前項で述べたとおり、本方式では車体支持が3点支持となるため、1台車が負担するロール方向の剛性についても大きくする必要がある。空気ばね上下剛性の増大はロール剛性を大きくできるが、乗り心地面で不利となるため空気ばね左右間隔を1980mmと拡大してロール剛性の増大をはかっている。

3 走行試験結果

走行安全性、乗り心地に関する走行試験は、評価に必要な適度な曲線半径が存在すること、当社の近年の新造車両の標準である最高速度120km/hでの試験が可能であること等の理由から、埼京・川越線指扇～赤羽間、及び東北本線大宮～宇都宮間において実施した。試験速度は最高速度120km/h、曲線通過速度は基本速度+15km/h（埼京・川越線）、+5km/h（東北本線）とした。

3.1 走行安全性

(1) 一般の円曲線における測定結果

脱線に対する安全性は、最高速度120km/h、曲線通過速度基本の速度+15km/hまで、全線に渡り脱線係数0.95以下・動的輪重減少率80%以下であり、問題はなかった。横圧最大値についても各曲線の目安値を超過した箇所はなかった。曲線半径800m、カント95mmの曲線における脱線係数および横圧最大値と速度の関係を図6に示す。走行安全性の各項目とも目安値の超過はなく、走行安全性に問題が無いことを確認した。DDM方式を採用した電動台車についても、著大な輪重・横圧の発生など走行安全性への悪影響はみられなかった。これはDDM継手に設けられた緩衝ゴムが効果的に作用しているためと考える。

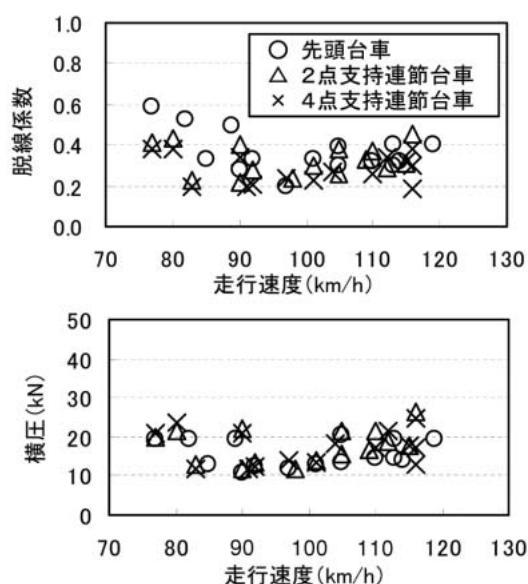


図6：走行安全性測定結果
($R=800\text{m}$, $C=95\text{mm}$)

(2) 緩和曲線走行中の輪重減少の状態

図7は、緩和曲線通過中の輪重減少の状況を、通常のボギー車と4点連節支持方式で比較したものである。ボギー車では、カント量の変化により車両内では1対角の空気ばね荷重が減少し易く(①)、台車内では1対角の輪重が減少し易く(②)なるため、①②が重なった箇所では輪重抜けが大きくなる傾向がある。一方4点支持連節台車では、①と②の重なる箇所がないことから、ボギー車に比べて輪重抜けを抑制する効果が期待できる。図8に、緩和曲線走行中の曲線外軌側空気ばね荷重と軸ばね荷重について、シミュレーションでボギー車と4点支持連節

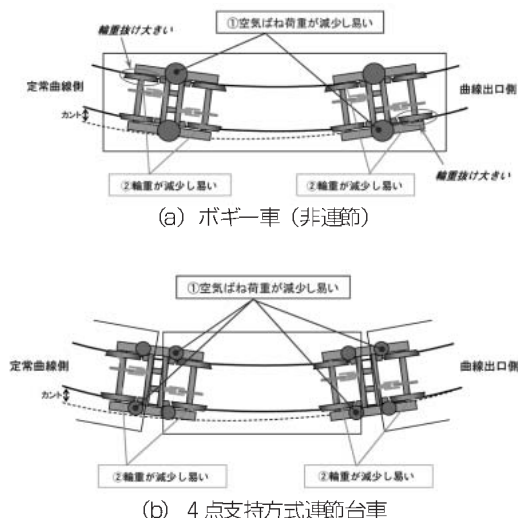


図7：輪重減少の比較

台車を比較した例を示す。ボギー車の場合、緩和曲線通過時に空気ばね荷重が減少するため、軸ばね荷重の減少量も大きくなる。一方4点支持連節台車の場合、緩和曲線中では空気ばね荷重が増加するため、軸ばね荷重の減少量は小さくなることから解かる。

図9は、曲線半径405m、カント105mmの曲線を48km/hで走行した際の外軌側輪重について先頭台車、2点支持連節台車および4点支持連節台車を比較した走行試験結果である。これより、出口緩和曲線における4点支持連節台車の輪重抜けが少ないことがわかる。これは図7、8で検討した4点支持連節台車の輪重抜けを抑制する効果によるものと考えられる。

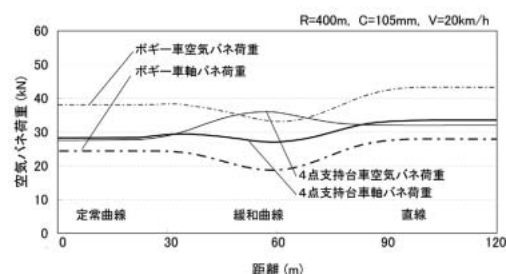


図8：空気ばね荷重と輪重の比較（シミュレーション）

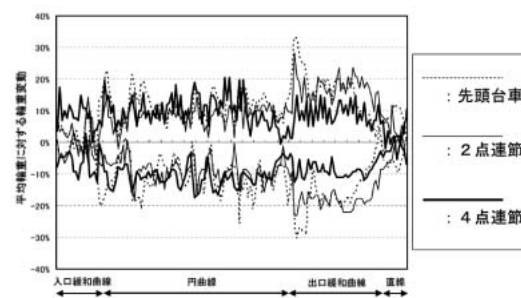


図9：緩和曲線走行中の輪重の比較

(3) 偏荷重時の走行安全性

車両によって極端に乗客数に差がある場合においても走行安全性が確保されていることを確認するため、荷重が偏った時の走行安全性を検証した。事前にシミュレーションによる検討を行ない、脱線に対する安全性を検証した上で走行試験を実施した。

i) シミュレーション結果

シミュレーションは、連節編成を3両編成としてモデル化したもの、及びボギー車の2種類について行なった。

モデルの概要を図10に示すが、シミュレーションにおいては、連節編成における満車と空車の条件を、図10に示す4通りについて計算を行なった。

曲線半径300mでの脱線係数・横圧のシミュレーション結果を図11に示す。図より、

- ・4点連節台車の前後軸重が偏荷重となる「空満空」及び「満空満」の条件においても、走行安全性は「全空車」及び「全満車」の条件と差はない。
- ・横圧は、全空車が低く全満車が高い。4点連節台車の前後軸重が偏荷重となる空満空および満空満の条件は、全空車と全満車の間となる。

以上から、車両によって荷重の差がある場合においても、走行安全性に顕著な差が現れないことを確認した。

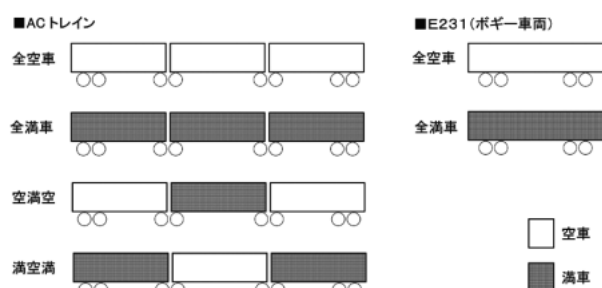


図10：偏荷重シミュレーションの計算モデル

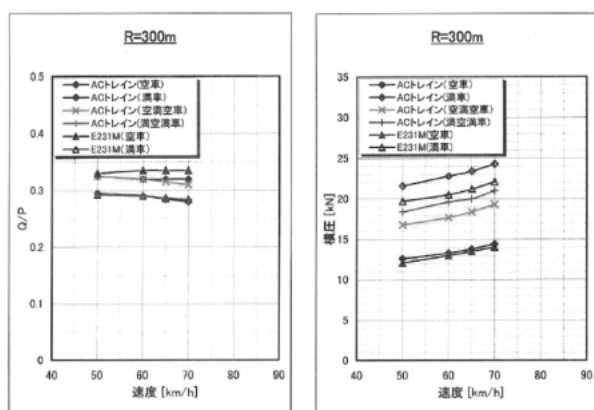


図11：シミュレーション結果

ii)走行試験

偏荷重の走行試験は、車内に錘を搭載し、その搭載位置を替えることにより、前後軸の軸重差がある条件を設定した。

実際の錘の搭載状況を図12に、荷重設定条件を図13に示す。荷重条件Aは3号車（図13の左側）が極端に重い場合、荷重条件Bは2号車（図13の右側）が極端に重い



図12：荷重搭載状況



図13：前後偏荷重の設定条件

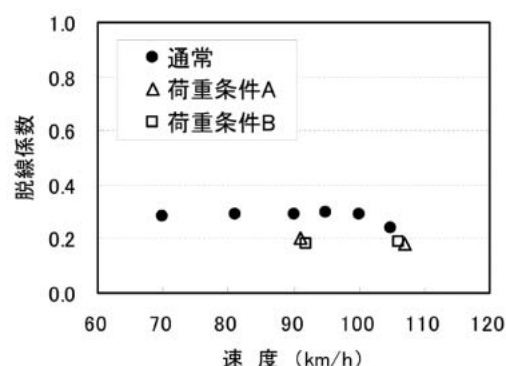


図14：前後偏荷重試験結果

場合であり、3号車側の輪軸でPQ測定を行なった。走行試験結果を図14に示す。いずれの荷重条件においても、脱線係数は測定した速度範囲において0.2程度であり、荷重が増となった分、脱線係数は小さくなる結果となった。

3.2 乗り心地

4点支持連節台車、2点支持連節台車、及びボギー車の例として209系500代で測定を行なった、各速度域における乗り心地レベルの測定結果を図15に示す。乗り心地は、4点支持連節台車が209系500代の台車上とほぼ同等、2点支持連節台車が209系500代より良好な結果となった。連節車ではボギー車のような車端のオーバーハング

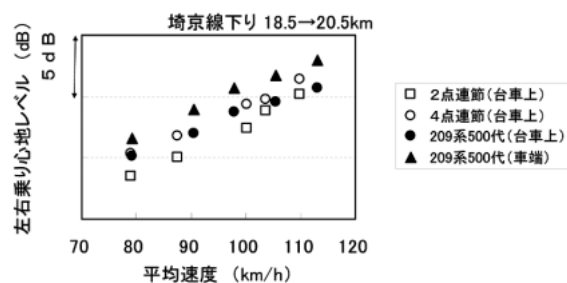


図15：乗り心地測定結果

がないため、ボギー車の車端部で見られるような乗り心地の悪い箇所はなくなっている。

4点支持連節台車については、更なる乗り心地の向上を目指し、左右動ダンパの特性改善、ヨーイングを強制的に抑制した条件による試験等を行っており、軸バネ支持剛性の見直し等を図ることにより、乗り心地を2点支持台車と同等程度とする見通しを得ることができた。

4 おわりに

AC Train用としてボルスタレス方式とした2種類の連節台車（2点支持方式および4点支持方式）の開発を行った。走行試験により両連節台車とも良好な走行安全性結果が得られていることを確認した。また、緩和曲線における輪重抜けに対して、4点支持連節台車の有効性を確認した。

今後は、試験の結果得られた乗り心地改善策について、既存のAC Trainを用い、実施効果の評価・検証を行なう。

参考文献

- 1) 久保田博：鉄道用語事典，グランプリ出版，1996,4
- 2) 鉄道車両のダイナミクス，電気車研究会，(1994)，p56