

AC Trainにおける連節構造の採用

島宗 亮平* 菊地 隆寛* 野元 浩* 大澤 光行*

次世代の通勤・近郊型車両を目指して開発を行ったAC Trainは、JR東日本の通勤・近郊型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、2種類の連節方式について開発を行った。2002年2月より走行試験を開始し、走行安全性について問題が無いことを確認し、今後は、連節構造の改善などにより連節方式としての完成度を高めていく予定である。

キーワード：AC Train、連節構造、連節台車、連節車体、走行安全性

1 はじめに

JR東日本では次世代の通勤・近郊型車両を目指したAC Train試験車（E993系）の開発を行った。この車両はJR東日本の通勤・近郊型車両としては初の連節方式を採用している。連節方式¹⁾とは、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、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。我国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。

AC Trainでは、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種類の連節構造の開発を行った。本報では、連節編成の概要、連節台車・連節車体の構造および走行試験について報告する。

2 連節編成の採用

連節方式を採用する一般的な理由として、連結器の緩衝装置が不要となり前後振動の低減による乗り心地の向上、客室を台車から遠ざけて配置できることによる車内環境の改善、また、オール二階建て車両では二階部分の長さを大きく確保できることによる床面積増加などが挙げられる¹⁾²⁾。

AC Trainでは上記の理由以外に、連節方式を採用することにより、編成当たりの機器数の削減による車両価

格の低減および軽量化、車体幅の拡大などによる乗車スペースの拡大といった効果をねらった。

従来のボギー車両の場合、台車数は車体数×2台必要となる。一方、連節方式では、車両の連結部に台車を配置するため、編成単位では車体数+1の台車数とすることができる。例えば、現在首都圏で一般的に用いられている列車は、車体長20mの車両を10両連結した約200mの編成となっている。これを連節方式で構成すると、13mの車両を14両連結して同様の編成長を得ることができる。この場合、台車数を4台削減することが可能となる（図1参照）。

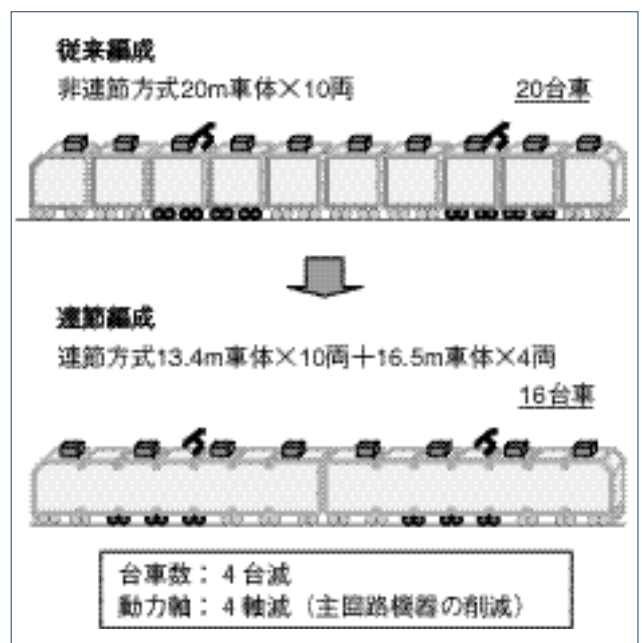


図1：連節方式による台車数の削減



図2：AC Trainの編成構成

また、列車を加速するための駆動力は、レール上を車輪が転がりながら力を伝える粘着力を利用している。この粘着力は式(1)で表される。

$$F = \mu \cdot W \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 μ は粘着係数、 W は軸重である。この式からは、粘着力は車輪やレールの表面状態の影響を受ける粘着係数によっても変動するが、基本的には軸重の値に支配されていることがわかる。最近の車両は車体の軽量化が進み、軸重が小さくなっていることから駆動力を大きくすることが難しくなっている。一方、連節方式では、編成当たりの台車数が少なくなるため、1軸当りの軸重は従来車より大きくなり、粘着力を大きくすることが可能である。この結果、動力軸数、電動車数(主回路機器数)の削減を図ることが可能となる。

また、後述のように、車体幅の拡大と連節部の貫通路の活用により、ボギー車と比較して乗車スペースの拡大を図ることができる。

なお、AC Trainの連節方式は、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種類の連節構造を採用している。図2にAC Trainの編成を示すが、1・2号車間および2・3号車間が4点空気ばね支持方式、3・4号車間および4・5号車間が2点空気ばね支持方式となっている。6台車のうち電動車は2台でMT比率は1:2と

している。

連節方式では、中間の連節台車が車両の連結部に配置される。編成の分割は通常行わないが、主制御器の位置や、工場において車両を分離する際の順序を明確にするための区分けが必要であることから、各車体と前位寄台車を1組とすることとし、偶数向きの制御車のみ(クハE992)台車を2つ持つこととした。後述するが、2方式の連節方式とも奇数向き先頭車(クハE993)側の車体が上に載る構造であり、車体と台車の関係とも合致した組み合わせである。

3 連節台車の構造

3.1 台車概要

両端の先頭台車を除いた中間台車に連節台車を配置している。連節台車は、2点空気ばね支持方式の連節構造に対応した2点空気ばね支持方式連節台車(以下2点支持連節台車と称す)と、4点空気ばね支持方式の連節構造に対応した4点空気ばね支持方式連節台車(以下4点支持連節台車と称す)の2種類である。

3.2 2点支持連節台車

(1) 構造の概要

左右に2個の枕ばねを使用した連節台車は、我国の連

節車両で多く採り入れられており、枕ばねをインダイレクトマウント方式³⁾として車体を側受で支持する方式が一般的である。今回、AC Trainで採用した2点支持連節台車は、摺動部の廃止によるメンテナンス性の向上および軽量化をはかるためボルスタレス方式としている。空気ばねを受ける車体側の枕ハりは、連節部分に一方の車体から張り出すよう設けている。この枕ハ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てあり、空気ばねを枕ハりのさらに下へ配置する必要があることから、台車枠側ハりを大きく屈曲させた形状として空気ばね上面高さを830mmに低減している（図3参照）。

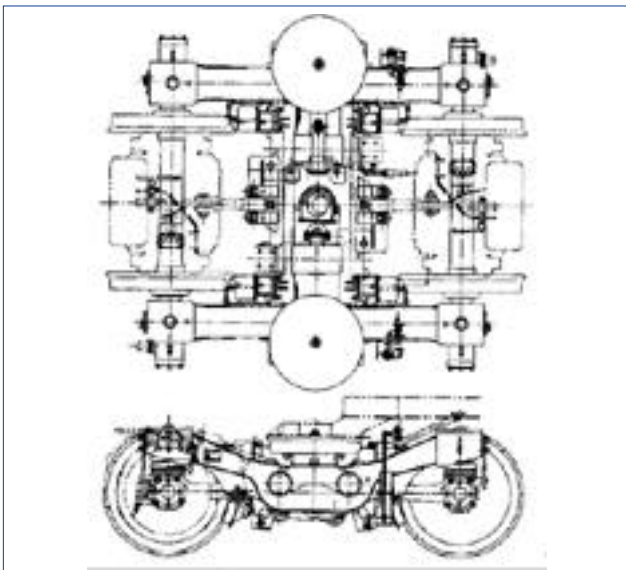


図3：2点支持連節台車

(2) 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強化に処している。

表1：基礎ブレーキ装置の比較

	AC Train	E231系
電動台車	踏面ブレーキ ・シリンダφ165[mm]×4 ・テコ比3.5	踏面ブレーキ ・シリンダφ152[mm]×4 ・テコ比3.2
付随台車	踏面ブレーキ ・シリンダφ127[mm]×4 ・テコ比2.8	踏面ブレーキ ・シリンダφ114[mm]×4 ・テコ比1.5
	ディスクブレーキ ・ダイヤフラムφ220[mm]×2 ・テコ比2.4	ディスクブレーキ ・ダイヤフラムφ200[mm]×2 ・テコ比2.4

(3) 空気ばね左右間隔の拡大

前項の荷重やブレーキ力の増加が必要になるのと同様に、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。

(4) DDMの取付け

AC Trainは直接駆動式主電動機（以下DDMと称す）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4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。

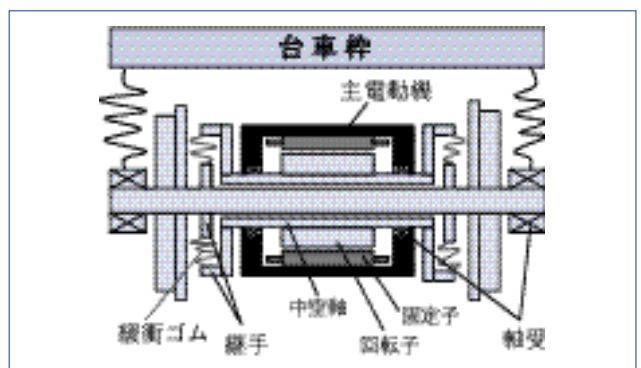


図4：DDMの取付け

なお、DDMが反力によって回転するのを防止するため、モータ外郭と台車枠横ハリ間を一本リンク状の反力受棒で水平方向に接続している。

また、当社における従来の通勤車両は主回路の接地を歯車装置に設けた接地ブラシで行っているが、DDM方式の場合には車輪間に接地ブラシの取付けスペースが無いいため軸端接地装置を採用している。

(5) 車体への取付け (図5 参照)

2点支持連節台車の上に枕ハリを持つ方の車体(下側車体)を載せ、枕ハリ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。枕ハリ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)に取付けている連結装置を嵌合してボルトで固定する。連結装置には球面軸受が内蔵されており、ここを節として2車体間の運動を許容している。

従来のボルスタ付台車による連節構造の場合、1車体は心皿と側受による4~6点支持となるが、本構造の場合は空気ばねと連結装置による3点支持となる。

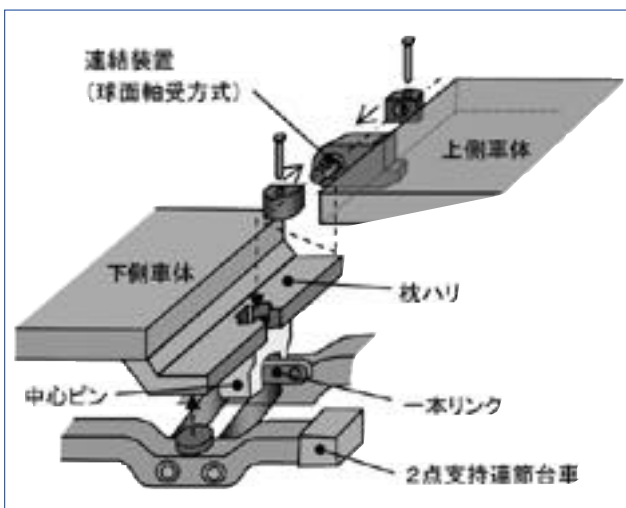


図5：2点支持連節台車の取付け

3.3 4点支持連節台車

(1) 構造の概要

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6参照)。空気ばねやレベリングバルブ(以下LVと称す)といった空気ばね関係の部品が増えるが、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。我国における4点支持方式の実績は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・近郊電車用としては初の適用である。

以下に4点支持連節台車で特徴的な内容を示すが、台車強度・ブレーキ装置の強化、DDMの取付けに関しては2点支持連節台車と同様である。

(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はかり840mmとした。

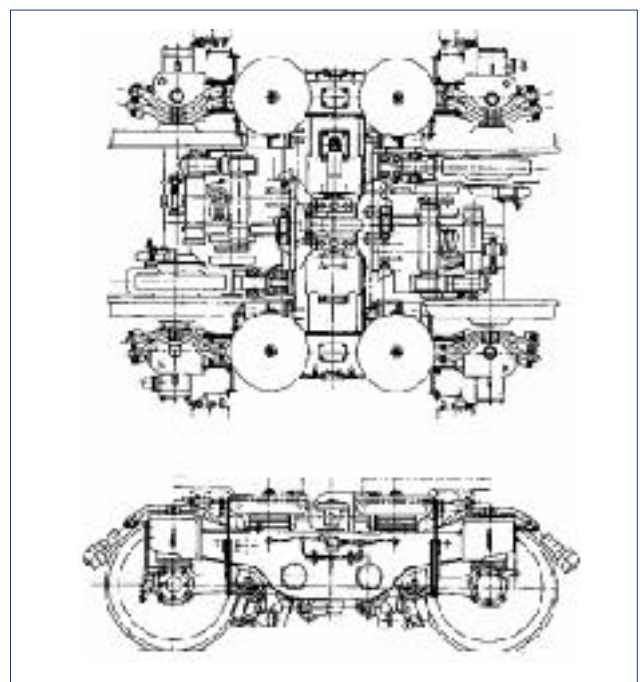


図6：4点支持連節台車

(3) 空気ばねの連通機構および高さ制御

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。

(4) 車体への取付け (図7参照)

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。連結装置には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。本構造の場合、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、基本的には連結装置が上下方向の荷重を負担することはない。

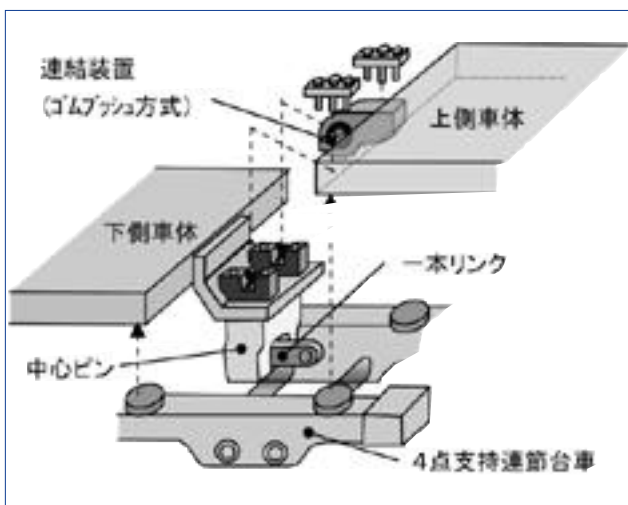


図7: 4点支持連節台車の取付け

4 連節車体の構造

4.1 車体幅の拡大

通勤・近郊型車両において重要な課題の1つに混雑率の緩和がある。AC Trainでは連節構造を活かして室内スペースの拡大を図っている。

AC Trainでは台車の中心間隔を、車両限界を規定した際の標準である13,400mmとすることで車体幅を車両限界の最大値となる3,000mmまで拡大した。

曲線部において、台車間の車体は曲線の内側に寄り、台車より外側の車体は曲線の外側にはみ出す。(図8参照)

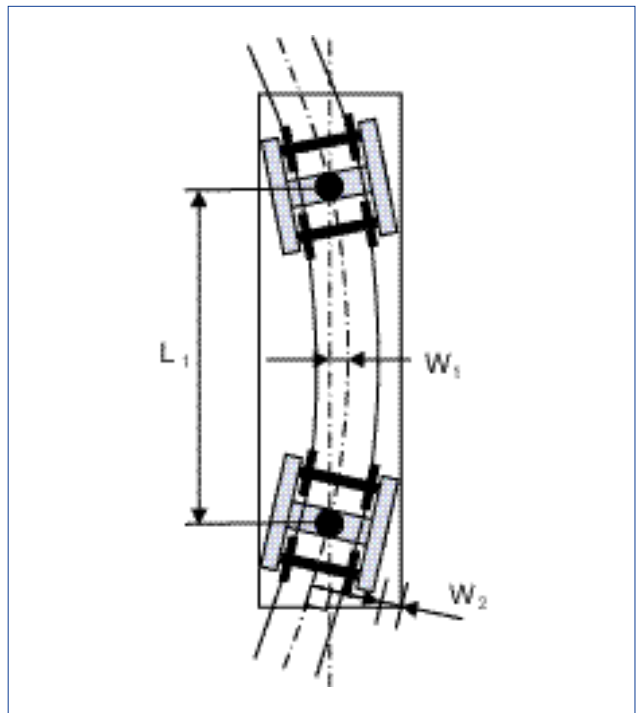


図8: 曲線における偏倚

これは、式(2)及び(3)で表すことができる。

$$W_1 = R - \sqrt{(R - D)^2 - (L_1/2)^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$D=R - \sqrt{R^2 - (L_0/2)^2}$$

$$W_2 = \{ (R+B/2 - W_1)^2 + (L_2/2)^2 \}^{1/2} - R - B/2 \dots (3)$$

- L₀ : 固定軸距離
- L₁ : 台車中心間距離
- L₂ : 車体長
- B : 車体幅
- R : 曲線半径
- W₁ : 曲線内方への偏り
- W₂ : 曲線外方への偏り

車両限界は直線上で定義されるが、曲線においては上記偏倚を考慮して拡大することとしており、式(2)(3)のような厳密式ではなく式(4)に示す近似式を用いていた。

$$W = \frac{22500}{R} \dots \dots \dots (4)$$

W : 偏倚量 (mm) R : 曲線半径 (m)

これは、車体幅3,000mm、台車中心間距離13,400mmの車両における偏倚量を近似した式であり、台車間距離13,400mmとすることにより、車両限界における最大幅である3,000mmが可能となる理由である。

現在のボギー構造の通勤・近郊電車の車体長19,500mmであるが、台車中心間距離を13,400mmとしても車端寄の偏倚が大きく、車体幅を3,000mmとすることはできない。連節式では、先頭車を除き外方への偏倚がないので、これを考慮する必要がなく、AC Trainでは3,000mmの車体幅としている。なお、先頭車では、先頭部分を別構造の車体としており、先頭側を絞る形状とすることで外側への偏倚に対応している。

4.2 貫通路の構造

連節方式では連結部に台車があるため、車両が曲線を通過する際にも前後の車体は連結部を中心に回転するだけで左右方向に変位差が生じることはない。そこで、連結部分も乗車スペースとして活用できるよう工夫を行っ

た。貫通路を立席スペースとして使用できるよう、貫通路の幅を極力拡大するとともに、2種類の安定感ある床構造とした連結部を設けた。

(1) ターンテーブル式

ターンテーブル式は、連結部を中心として回転する円盤を置き、両側の車体から図9に示すリンク機構で中立位置を保つ方式である(図10参照)。床面とターンテーブルの変位角度は、車体同士の相対角度の半分とすることができる。この方式は2点空気ばね支持方式の箇所に適用した。

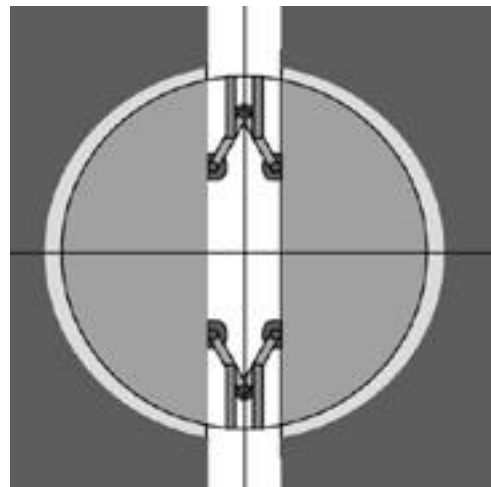


図9 : ターンテーブル式のリンク機構



図10 : ターンテーブル式

(2) 半円式

半円式は、半円状の板を片側の車体に固定する方式である。この方式は、変位角度はターンテーブル方式の倍となるが、連結構造の簡素化をはかることができる(図

11参照)。また、ホ口の内側にはパネルを設け、お客様が寄り掛かっても安全な構造としている。この方式は4点空気ばね支持方式の箇所に適用した。



図11：半円式

両方式とも連結部に立ってもあまり違和感はないなどの意見を多く見受けるが、今後、連続曲線区間などの条件で評価・確認を行う予定である。

4.3 連節部の配線

車両にはさまざまな回路の引き通し線があるため、車両間にケーブルを渡して電気回路を継ぐ必要がある。連節方式の場合は連結部に台車があるため、ボギー車両で採用されているような連結部下部のスペースを利用する方式は困難である。そこで、AC Trainでは以下の方式で車間渡しを行っている。

(1) 妻間を渡す方式

貫通路の両側の妻間にケーブルを渡しているが、連結面の間隔が400mmと狭いため、S字形に配線を渡すことにより対処している。この方式は2点空気ばね支持方式の箇所に適用した。

(2) 台車内を渡す方式

台車側ハリ内部の空間を活用してケーブルを通す方式で、側ハリ内部には電線トイを設けている。この方式は4点空気ばね支持方式の箇所に適用した。



図12：妻間渡し（左）と台車内渡し（右）

5 走行試験

5.1 試験概要

AC Trainの走行安全性を確認するため、下記のとおり走行試験を実施した。

試験期間

2002年2月18日～3月15日

試験線区

川越・埼京線 指扇～赤羽間

試験速度

最高速度 120km/h

曲線通過速度 基本の速度 + 15km/h

測定内容

先頭台車（TR916）、2点支持連節台車（DT957）、4点支持連節台車（DT958）について新連続方式によるPQ測定を行い走行安全性の確認を行った。3種類の台車とも修正円弧踏面のため脱線係数の目安値は0.95とした。

5.2 試験結果

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まで指扇～赤羽間の全線にわたり、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。

また、2点支持連節台車および4点支持連節台車はDDMを履いているが、著大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。これは継手の緩衝ゴムが効果的に作用しているためと考える。

走行安全性の結果例として、R=800m、C=95mmの曲線における脱線係数と速度の関係と横圧最大値と速度の関係を図13に示す。

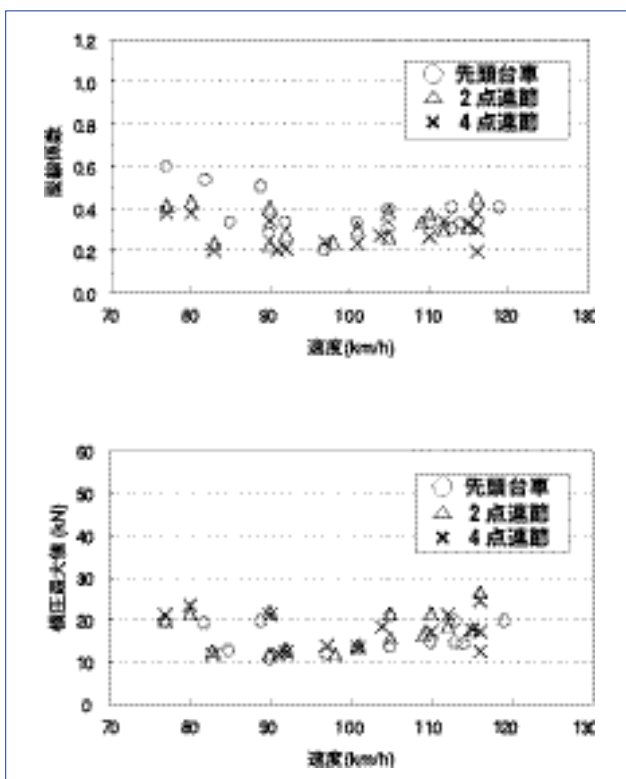


図13：脱線係数および最大横圧 (R=800、C=95)

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種類の連節構造について開発を行った。

走行試験により、最高速度120km/h、曲線通過速度基本の速度+15km/hまでの走行安全性を確認した。

今後は、試験データの詳細な解析を進めるとともに、試験結果に基づく連節構造の改善をはかり連節方式としての完成度を高めていく予定である。

6 おわりに

JR東日本では、次世代の通勤・近郊型車両として連節方式によるAC Trainの開発を行った。以下に本報の内容をまとめる。

AC Trainは、機器数の削減による車両価格の低減および軽量化、車体幅の拡大などによる乗車スペースの拡大をはかるため、連節方式を採用した。

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)佐藤芳彦：世界の高速鉄道、グランプリ出版、1998.4
- 3)例えば鉄道車両のダイナミクス、日本機械学会編、電気車研究会、1994.12