

様々な鉄道車両の車体固有振動モード特性の比較

相田 健一郎* 富岡 隆弘 瀧上 唯夫 (鉄道総研)

谷口宏次 今岡憲彦 (東急車輛)

Comparison of vibration mode characteristics of various railway vehicles

Ken-ichiro AIDA*, Takahiro TOMIOKA, Tadao TAKIGAMI (Railway Technical Research Institute)
Koji TANIGUCHI, Norihiko IMAOKA (Tokyu Car Corporation)

This paper describes the modal vibration characteristics of a Shinkansen, a limited express and a commuter vehicles. Stationary excitation tests are carried out for each vehicle to identify the modal vibration characteristics. Effects of carbody structure (carbody-shell length and material, etc.) and sub-structure members (interior panels, seats and under-floor equipments, etc.) on the vibration characteristics of carbody are discussed. As a result, it is found that the carbody structure has largely affected the vibration shapes. And it is also found that an internal or under-floor equipments give significant effect on the natural frequencies and modal damping ratios.

キーワード：車体曲げ振動，固有振動モード，車体構造

(Bending vibration of carbody, Natural mode of vibration, Carbody structure)

1. はじめに

鉄道車両の車体弾性振動，特に上下方向の曲げ振動は，振動乗り心地の観点から，その低減が重要であり，様々な車両において対策が求められている。鉄道車両の車体寸法，構体材料は様々であり，また編成列車内においても，中間車両・先頭車両や電動車・付随車等の差異があるなど，車両の構造は多岐に及ぶことから，車体の振動特性を一概に説明することは困難である。したがって様々な車両に対して効果的な曲げ振動低減策を実施するためには，多数の実車体の振動特性データを取得し，振動特性の把握・分類を行うことが重要であるといえる。

筆者らはこれまでに「高速車両（浮上式鉄道車両と新幹線車両）」と「通勤形車両（ステンレス鋼製）」の車体弾性振動の特徴を示す⁽¹⁾とともに，通勤形車両を対象に「ステンレス鋼製車両とアルミニウム合金製車両」および「中間車両と先頭車両」の車体振動特性の比較を行うなど⁽²⁾，軽量化・構造簡素化が進んだ近年の鉄道車両の車体弾性振動特性調査を続けてきた。また構体への各種部材取付による車体振動特性の変化に着目し，完成車両のみならず，構体状態の振動特性を述べているが⁽³⁾，その際の車体支持条件が営業時と異なる支持条件（枕はり位置盤木支持）であったことから，これまでに構体状態と完成車両における車体振動特性の特徴を

営業時と同じ車体支持条件で比較した結果は明らかとはなっていないかった。

本報では，新幹線車両と通勤形車両の車体振動特性に加え，これまでに報告事例のなかった特急形車両の車体振動特性を調査した結果を示し，それらの比較を述べる。また営業車両と同等な車体支持条件（空気ばね支持）のもと，車両製作途中の構体状態における車体振動特性を調査したので，同一車両の完成車両の比較と合わせて報告する。

2. 車体固有振動モード特性の同定

(2.1) 対象車両

本報では，アルミニウム合金製の「新幹線車両」と「特急形車両」およびステンレス鋼製の「通勤形車両」の計 3 種類の車両（完成車両）を対象に，車体振動特性として重要な固有振動モード特性の比較を行う。表 1 に対象車両の主な車体

表 1 対象車両の車体構造の主要諸元

対象車両	新幹線車両	特急形車両	通勤形車両
車種	中間電動車	中間電動車	中間付随車
構体材料	アルミニウム合金 (ダブルスキン構造)	アルミニウム合金 (ダブルスキン構造)	ステンレス鋼
車体長さ	24.5 m	20.0 m	19.5 m
側出入口 (片側)	2 扉	2 扉	4 扉

構造の諸元を示す。いずれの車両も車体の前後方向でおおむね対称な構造の車両とした。また特急形車両については、同一車両の車両製作途中の「構体状態」も対象として取り上げ、完成車両との比較を述べる。

〈2・2〉車体定置加振試験による振動モード同定

車体の固有振動モード特性を調べるため、表1に示した各車両を対象に定置加振試験を実施した。定置加振試験では、車体の床下に据付けた動電形加振器により加振棒を介して車体を上下に加振して、車体に取り付けた加速度センサにより振動加速度の測定を行った。なお各車両の定置加振試験における加速度の測定位置・測点数は同一ではないものの、いずれの試験においても、立体構造物としての車体振動が表現可能となるよう、車体の床、屋根、側の各面に複数箇所の測定点を設けている。

本報では得られた測定データから、線形予測モデルによるモード解析を行い⁽⁴⁾、5～20Hzの周波数帯域で同定される車体固有振動モード特性を対象とした。

〈2・3〉固有振動モード同定結果

図1から図4にそれぞれ、新幹線車両、特急形車両、通勤形車両、特急形車両（構体状態）の車体固有振動モード同定結果を示す。

振動形状図における細線は、変形前の車体形状、太線は振動しているときの車体の曲げ変形形状を表し、△記号は車体前位側を示している。振動形状図下部の記号* - mnはモードの区別、続く Hz を付した数字は固有振動数を表しており、文字*は屋根と床の車体中央断面における位相関係を表し、Sは同相、Aは逆相、Zは位相の区別がつかない場合を示している。文字*に続く2桁の数字mnは、mが屋根の腹の数、nが床の腹の数を表し、腹の数が判断つかない場合は0としている。また文字*がJの場合は車体断面のせん断変形を伴うモードを表し、続く数字は側り部分における腹の数を表

している。なお振動形状の区別が不確かなモードについては記号* - mnの後に#を付している。

3. 固有振動モード特性の比較

〈3・1〉様々な鉄道車両の固有振動モード

図1～3に示す3車両（完成車両）の固有振動モード特性の特徴を述べ、それらの比較を行う。

図1に示す新幹線車両では、モードS-11、S-22のように、床と屋根の変形形状が同形態で振動する、「一本はりの曲げ振動」とみなせる振動形状を示すモードがみられるが、それに加えて、床と屋根で変形位相が異なったり、振動の腹の数が異なる形状を示すモードを有するなど、車体を一本のはりとして表せるものは全体の一部に過ぎないことがわかる。

図2の特急形車両に着目すると、モードJ-1、S-11など新幹線車両でみられたモードと同等な振動形状を示すモードも存在する。しかし図1と2では共通でないモードがみられることなどから、同じアルミニウム合金製の車体であっても、その振動形状は一樣ではない様子が本比較例から明らかとなった。両者で同等な振動形状を示すモードJ-1、S-11の固有振動数を比較すると、いずれも特急形車両の方が高い値を示している。モードJ-1では0.3Hz程度だが、モードS-11では約2.5Hzもの差異があることから、両者の構造の違い（車体長さ等）は断面方向の変形に比べ、車体長手方向の変形モードに対しての影響が大きいものと推測される。

次に図3の通勤形車両に着目すると、新幹線車両、特急形車両でみられたモードJ-1は確認されるが、モードS-11のようなはりとして表せる振動形状を示すモードは通勤形車両ではみられなかった。代わりにモードZ-10、Z-20、Z-30などの、床の変形に対して屋根の変形が相対的に大きいモードを多く有している。また、通勤形車両と特急形車両の固有振動数に着目すると、特急形車両よりも、通勤形車両の方が総

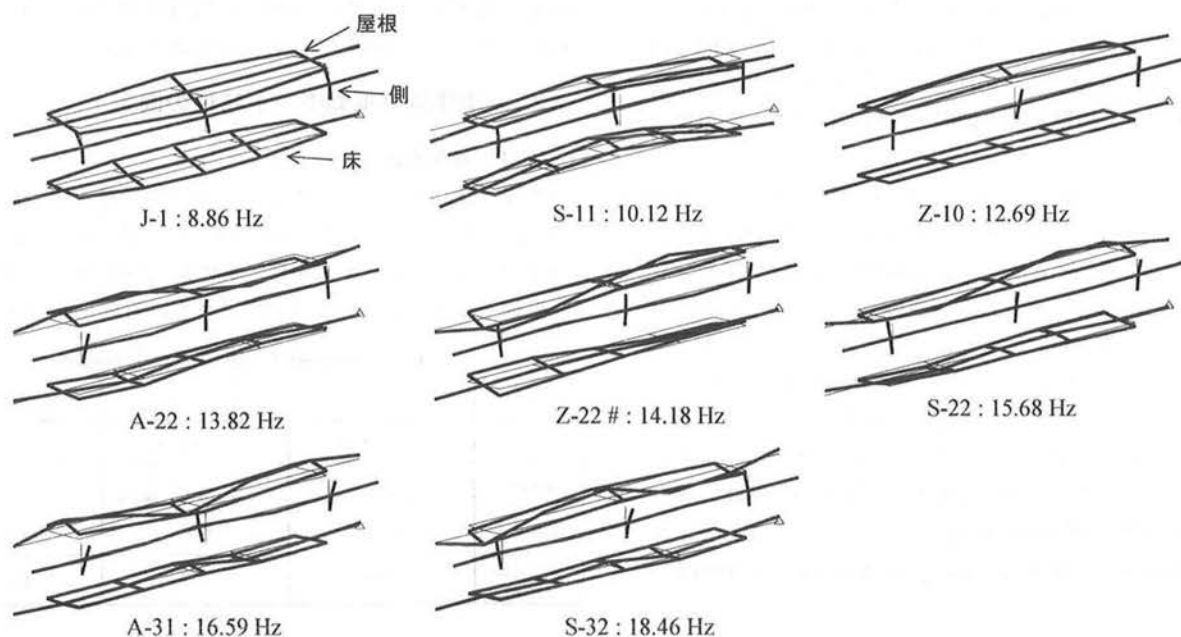


図1 新幹線車両の固有振動モード

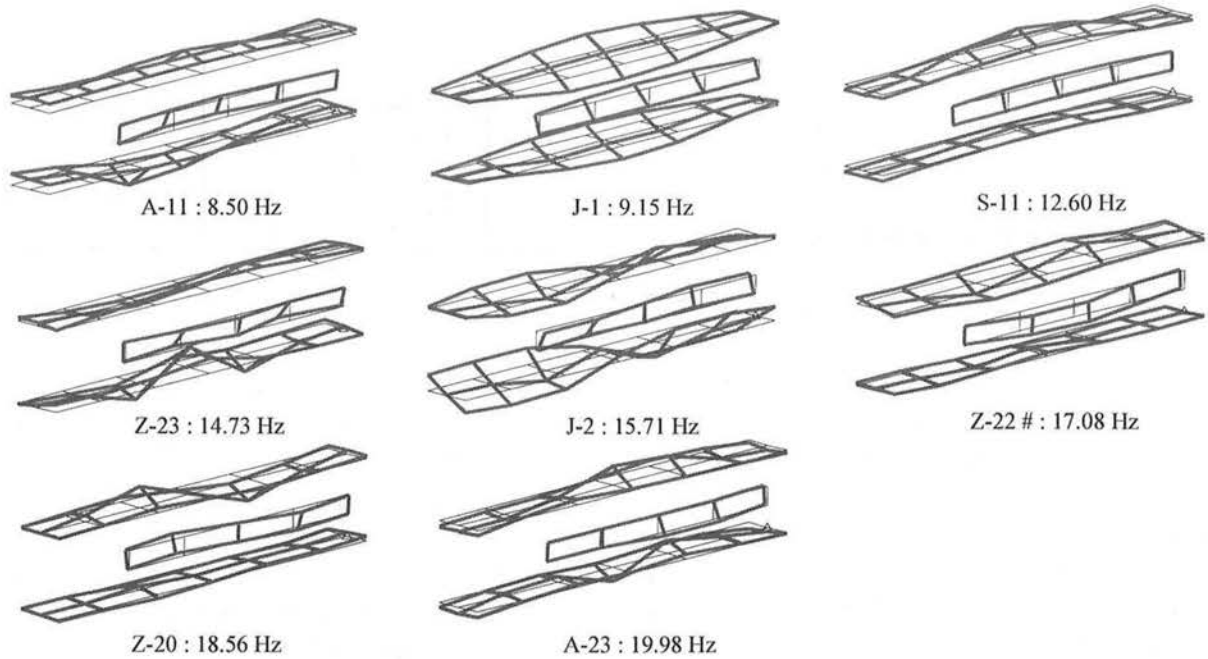


図 2 特急形車両の固有振動モード

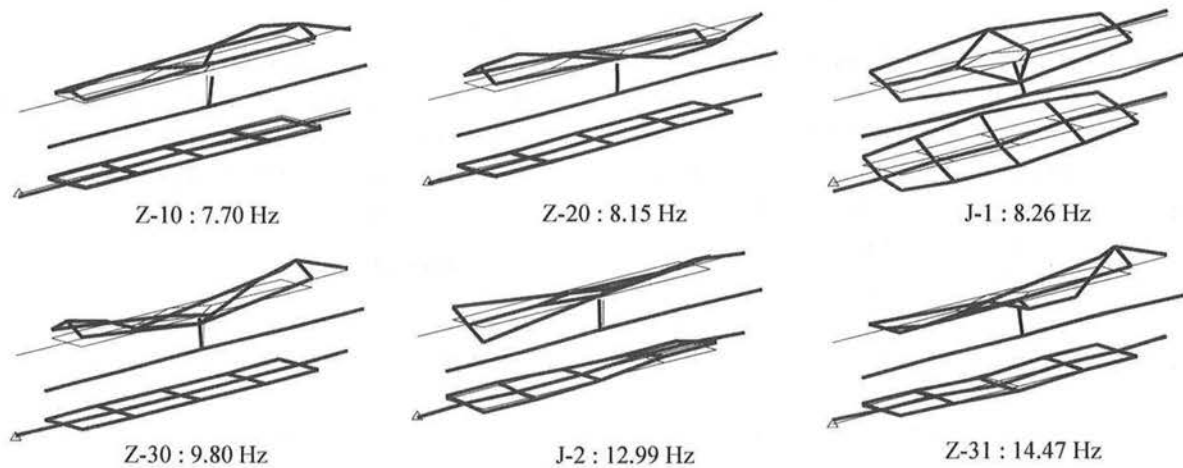


図 3 通勤形車両の固有振動モード

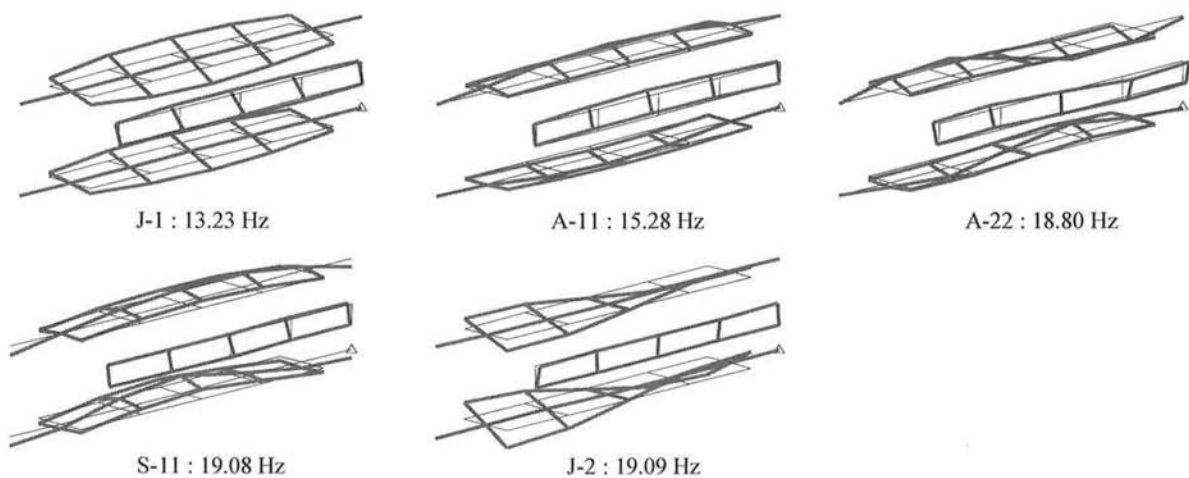


図 4 特急形車両（構体状態）の固有振動モード

じて低い値を示していることがわかる。両者では電動車・付随車の違いがある等、通勤形車両は特急形車両に比べ車両質量が小さいことから、固有振動数では質量効果に比べ剛性効果による影響が強く表れたといえる。両者の構造の違いである構体材料やそれに伴う車体構造（製造法）に起因するものであると推測される。

〈3・2〉構体状態と完成車両の固有振動モード比較

特急形車両を対象に構体状態と完成車両の固有振動モード特性の比較を行う。ここでは振動形状、固有振動数に加え、モード減衰比の比較も行う。

図4の構体状態の振動形状に着目すると、床と屋根の変形位相が異なるモードもあるが、いずれのモードも床と屋根の振動の腹の数が同一で、車体前後で対称的な振動形状を示している。完成車両の振動形状と比較すると、モードJ-1、J-2、S-11、A-11が両者で共通してみられるが、完成車両ではこれらの他に、モードZ-23など、床と屋根の振動の腹の数が異なるモードがみられる。また、例えば完成車両のモードA-11では、床の振動の腹の位置が中心部より若干オフセットしているなど、床下機器設置によると考えられる影響もみられる。これらの結果より、構体状態と完成車両では、必ずしも同一の振動形状を示すとは限らないこと、また同等な振動形状を示すモードであっても、振動の腹の位置が若干異なる様子がみられることなどが明らかとなった。

構体状態と完成車両で、同等な振動形状を示すモードの固有振動数とモード減衰比の比較を表2に示す。固有振動数では、いずれのモードも、構体状態よりも完成車両の方が低い値を示し、モードJ-1、J-2では3、4Hz程度、モードS-11、A-11では6Hz以上の差異がみられた。また、モード減衰比に着目すると、構体状態のモード減衰比は0.1～1.2%と極めて小さく、構体状態と完成車両を比較した場合、いずれのモードも完成車両の方が高い値を示していることから、構体状態から完成車両になる過程で車体に取り付けられる内装品や機器類が、車体減衰能向上に寄与していることが明らかとなった。

4. まとめ

本報では3車種（新幹線車両、特急形車両、通勤形車両）の固有振動モード特性を示し、車体振動特性の比較を行った。また特急形車両を対象に、営業車両と同じ車体支持条件のもと、完成車両と同一車両の構体状態における車体振動特性を調査した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 新幹線車両と特急形車両（アルミニウム合金製車体）では、車体を一本のはりとして表現できるモードを有することがわかった。ただし、そのような振動形状を示すモードは全体の一部に過ぎないことが確認された。
- (2) 通勤形車両（ステンレス鋼製車体）では、新幹線車両・特急形車両でみられた一本のはりとして表現できるモードはみられず、床の変形に対して屋根の変形が相対的に大きいモードを多く有する特徴がある。構体材料やそれに伴う車体構造（製造法）の違いが振動形状の特徴の違いに

表2 特急形車両の固有振動モード特性の比較

	構体状態		完成車両	
	固有振動数	モード減衰比	固有振動数	モード減衰比
A-11	15.28 Hz	0.6 %	8.50 Hz	2.0 %
J-1	13.23 Hz	0.1 %	9.15 Hz	4.0 %
S-11	19.08 Hz	1.2 %	12.60 Hz	4.7 %
J-2	19.09 Hz	0.4 %	15.71 Hz	4.7 %

大きく寄与しているといえる。

- (3) いずれの車両においても、車体断面のせん断変形を伴うモード（モードJ-1）がみられたことから、このモードは現行の鉄道車両の車体構造上、普遍的に生じるモードであると考えられる。
- (4) 特急形車両の振動形状は、構体状態ではいずれのモードも床と屋根の振動の腹の数が同一で、車体の前後で対称的な形状を示す特徴がみられた。それに対して完成車両では床と屋根の振動の腹の数が異なるモードがみられたことなどから、構体状態と完成車両では、必ずしも同一の振動形状を示すとは限らないことが明らかとなった。
- (5) 構体状態と完成車両で、同等な振動形状を示すモードの固有振動数を比較すると、完成車両の方が低く、またモード減衰比は総じて完成車両の方が大きい。これらの差異は構体と完成車両の違い、すなわち内装、腰掛等の車内設備や床下機器等の客室外設備の有無に起因するものであることから、内装品や機器類は、質量効果のみならず、車体減衰能向上効果を有することを確認した。

5. おわりに

様々な鉄道車両の車体固有振動特性を調査することにより、車体構造と車体弾性振動の関係性が徐々に明らかとなってきた。鉄道車両の実走行中に生じる車体弾性振動は加振条件に依存するため、固有振動モード特性だけでは着目すべき制振対象は特定できないものの、この情報をもとに、それぞれの車両構造等に応じた振動低減策を実施することが、振動乗り心地向上への最善アプローチであると考え、今後も引き続き、系統的な調査を行っていきたいと考えている。

なお本報で示した結果の一部は、鉄道総合技術研究所と東急車輛製造の共同研究の一環として行ったものである。

車体定置加振試験実施にあたり、御理解、御協力いただいた関係各位に深く感謝申し上げます。

文 献

- (1) 瀧上、富岡：「最近の鉄道車体の固有振動モード特性」、鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2002)講演論文集, pp.451-454, (2002)
- (2) 相田、富岡、瀧上：「車体構造の違いによる在来線車両の車体固有振動モード特性の比較」、鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2007)講演論文集, pp.143-146, (2007)
- (3) 富岡、瀧上、下澤、ほか3名：「鉄道車両の振動特性測定試験（構体への各種部材取付による車体振動特性の変化）」、日本機械学会関東支部第8期総会講演会講演論文集, No.020-1, pp.453-454, (2002)
- (4) 富岡、瀧上、相田：「鉄道車両の振動モード解析への線形予測モデルの適用」、日本機械学会論文集(C編), Vol.75, No.753, pp.1295-1303, (2009)