

鉄道総研報告

第37巻 第7号

2023年7月

論文

- 車両** イントメッセント系難燃剤を用いた鉄道車両用腰掛材料の難燃性向上
..... 豊原匡志, 山中翔, 伊藤幹彌 (1)
- 車両** 歯車装置軸受へのつば付き円筒ころ軸受の適用
..... 高橋研, 鈴木大輔, 岡村吉晃, 永友貴史 (9)
- 車両** 横風に対する車両の安全性評価に用いる車体左右振動加速度の推定法
..... 金元啓幸, 日比野有 (17)
- 車両** **施設** 新幹線列車の通過時の軌道面流れを再現した地上側敷設物の飛散に関する風洞試験
..... 井上達哉, 中野高志, 井門敦志 (27)
- 車両** **電気** 蓄電池電源車の構想と編成電車への給電手順
..... 小笠正道 (35)
- 施設** **電気** バラスト軌道の道床加速度計測の無線化
..... 栗田いずみ, 流王智子, 岩澤永照, 河野昭子 (43)
- 運転** 大都市圏における鉄道輸送サービスと沿線居住意向の関係
..... 渡邊拓也, 深澤紀子, 奥田大樹, 鈴木崇正 (51)

解説

- 車両** **電気** 電気車と電力設備の協調に関する関連規格と要件
..... 仲村孝行, 赤木雅陽, 廿日出悟 (59)

イントメッセント系難燃剤を用いた 鉄道車両用腰掛材料の難燃性向上

豊原 匡志* 山中 翔* 伊藤 幹彌**

Improvement of Flame Retardancy of Seat Cushion Materials for Railway Vehicles Using Intumescent Flame Retardant

Tadashi TOYOHARA Sho YAMANAKA Mikiya ITO

In order to further improve the flame retardancy of seat materials in railway vehicle, the authors investigated to apply new flame-retardant to it. During the selection stage of flame retardants, their attention was focused on intumescent flame-retardants. The intumescent flame-retardant expands and produces char foam during burning state, and the produced char foam plays a role of protect shield against rapid flame spread. Various test pieces using the flame-retardants were prepared to confirm their characteristics. As a result of the cone calorimeter fire tests, it was found that insertion of a resin containing intumescent flame-retardants into the existing seat cushions can improve the flame retardancy.

キーワード：列車火災，燃焼試験，車両用材料，コーンカロリメータ燃焼試験，イントメッセント系難燃剤

1. はじめに

日本の鉄道車両は、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」および同省令の解釈基準により安全基準が規定され、燃焼性に関する基準も同省令等で定められている¹⁾。燃焼性を評価する試験法としては、タバコの火などの小火源を想定したアルコールランプによる鉄道車両用材料燃焼性試験（以下、車材燃試）が規定され、試験結果から、不燃性、極難燃性、難燃性、緩燃性、可燃性と燃焼区分が決定される。そのうえで、壁面、天井用部材等是不燃性、腰掛表地や床材は難燃性というように、使用部位により適用される燃焼区分が規定されている。車材燃試はこれまで、鉄道車両の火災に対する安全確保に貢献してきた。

しかし、近年では、ガソリン等に基づいた従来の想定を超える大きな熱量を有する火源（以下、大火源）が材料に負荷される事例が発生している。こうした動向に対し、鉄道総研では、国内で使用実績のある鉄道車両用材料に対して、大火源下を想定したコーンカロリメータ燃焼試験（以下、CCM試験）²⁾、実物大の特急車両用腰掛の燃焼試験³⁾などの各種評価を行ってきた。その結果、鉄道車両に使用される材料のうち腰掛材料が激しく燃焼していることを確認した³⁾。また、腰掛に使用されるクッションなどの高分子系の腰掛材料は1脚あたり約6kg⁴⁾使用されており、比較的質量が大きいことから、燃焼時の寄与も大きいと考えられる。

そこで、本研究では、鉄道車両用の腰掛材料の更なる難燃性の向上のため、近年開発されてきた、従来の難燃剤よりも難燃性が高い、イントメッセント系難燃剤⁵⁾（以下、IFR系難燃剤）の適用を検討した。本検討では、まず、IFR系難燃剤を配合した樹脂（以下、IFR配合樹脂）の燃焼特性をCCM試験によって確認した。次に、腰掛材料へのIFR配合樹脂の適用方法として、IFR配合樹脂を腰掛材料に挿入した際の燃焼挙動を把握した。

2. 試験条件および試験内容

2.1 CCM試験の概要

CCM試験は大火源を想定した燃焼試験であり、ISO5660-1に規定された試験方法である。試験の特徴として、円錐形ヒータで輻射熱を加えて試験体を燃焼させ

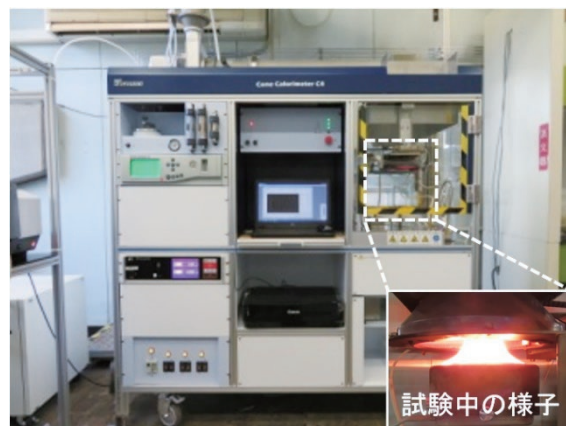


図1 CCM試験装置の外観

* 材料技術研究部 防振材料研究室

** 事業推進部 事業企画課

実際の燃焼時の熱発生量や煙の生成量等を定量的に評価できるものである（図1）。CCM試験は、国内の建築材料や海外の鉄道車両等でも評価試験の一つとして実施されている。また、2003年に韓国で発生したテグ市営地下鉄放火事件を受けて、2004年に解釈基準が改正された国内省令においても、地下鉄・新幹線等旅客車の天井材に対してCCM試験が導入されている。

2.2 試験片

CCM試験の試験片寸法は、縦100mm×横100mmで、厚さは50mm以下の実厚を用いることが規定されている⁶⁾。そこで、試験片寸法はこの値とした。

2.2.1 樹脂の試験片

各種難燃剤による燃焼特性の比較のため、IFR配合樹脂の試験片を作製するとともに、従来の汎用的な難燃剤であるマグネシウム系難燃剤（以下、Mg系難燃剤）および臭素系難燃剤（以下、Br系難燃剤）を配合した樹脂でも試験片を作製した。配合する基材となる樹脂はポリプロピレンを用いた。また、比較のために難燃剤を配合しない試験片（以下、0%）も作製した。

Mg系難燃剤は、難燃剤由来の有毒ガスが発生しないが、難燃剤を多量に添加する必要があるため樹脂としての物性低下や比重が増加する。Br系難燃剤は、発熱を抑制できるが、燃焼時に煙や有毒ガスが多量に発生する。一方、IFR系難燃剤は、樹脂の燃焼時に難燃剤が発泡することで、断熱効果およびガスの拡散防止により、燃焼を抑制する特徴がある⁵⁾。

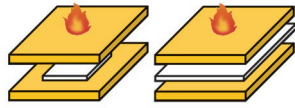
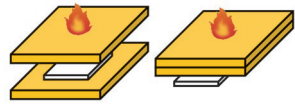

各種難燃剤を配合した樹脂の試験片は厚さ2mmの板状とした。試験片における難燃剤の配合は、Mg系難燃剤が60%（以下、Mg60%）、Br系難燃剤が20%（以下、Br20%）、IFRが8~60%（以下、IFR8%~60%）とした。なお、IFR30%、IFR40%およびIFR60%は、別途、車材燃試を実施し、難燃性判定であることを確認している。

2.2.2 樹脂と腰掛材料を組み合わせた試験片

IFR配合樹脂の腰掛材料への適用に向け、腰掛のクッション材料として使用される詰め物を対象に、前述した樹脂と詰め物を組み合わせた試験片を作製し、燃焼特性を評価した。作製した試験片条件の概要を表1に示し、試験片の外観のイメージを図2に示す。

表1に示すように、条件A~Cの3条件で樹脂に詰め物を挿入した。試験に用いた詰め物は、汎用的に使用されている製品であり、車材燃試で難燃性を取得済みのウレタン系クッション材である。製品としての詰め物の厚さは10mmであり、実際の車両の腰掛では、本製品を複数枚積層して使用する。積層した詰め物の厚さは車種ごとに異なるが、数十mm程度である。今回の試験では、前述したように、CCM試験の試験片厚さが規格において50mm以下と規定されているため、表1に示すよう

表1 試験片条件の概要

条件A		樹脂の大きさによる違いを評価
条件B		樹脂の挿入位置による違いを評価
条件C		難燃剤の種類・配合量による違いを評価

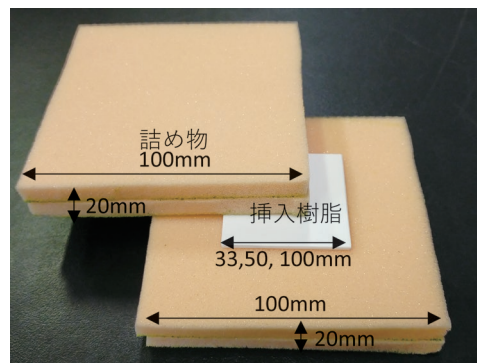


図2 試験片のイメージ

に、厚さ2mmの樹脂を挿入した場合でも全体の厚さを50mm以下とする必要がある。このため、CCM試験では、詰め物を4枚積層させて厚さ40mmの試験片とした。以下、試験条件の詳細を記述する。

・条件A（樹脂の大きさ）

条件Aに挿入する樹脂は、前項で示す樹脂のうち、車材燃試などの結果から、最も難燃性が高いと想定されるIFR60%とした。挿入するIFR60%の寸法について、厚さは2mmとし、大きさは100mm角に加え、50mm角、33mm角でも実施した。異なる大きさで試験を実施した理由として、CCM試験では100mm角で同じように設計することとされているが、同材料を実際に詰め物に適用する際には全面への配置だけでなく、一部場所への重点的な配置も考えている。そのため、挿入量による影響も評価した。

・条件B（樹脂の挿入位置）

条件Bでは、樹脂の挿入位置による影響を評価するため、厚さ40mmの詰め物の中間（厚さ20mm部分）に挿入する条件と底面に挿入する場合の2条件で燃焼挙動を比較した。挿入する樹脂は、IFR60%とし、樹脂の大きさは100mm角と50mm角とした。

・条件C（樹脂の難燃剤の種類・配合）

条件Cでは、2.2.1項で述べた樹脂に配合する難燃剤の種類および配合量による影響を評価した。

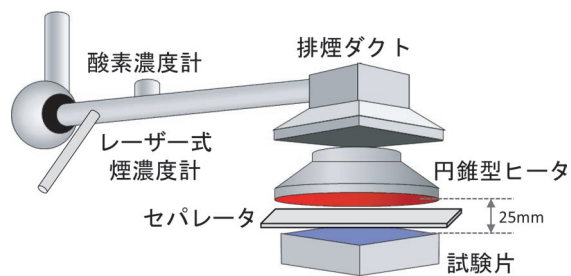


図3 CCM試験概要

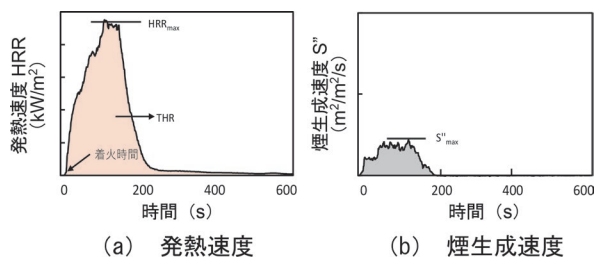


図4 CCM試験の試験結果のイメージ

(本図は説明用のため各グラフ縦軸の数値は省略した)

2.3 試験方法

CCM試験では、前述した試験片をステンレスホルダーに固定し、図3に示すように、円錐型ヒーター直下25mmの位置に設置した。試験開始とともに、ヒーターと試験片の間に設置されたヒーターの熱を遮断するセパレータが移動し、試験片への加熱が始まる。

同時に、試験片上方10mmの位置で電気火花を発生させ、加熱によって試験片から生じる可燃ガスに引火させた。試験時間は加熱開始後10分以上とし、試験片の消火まで試験を継続した。試験は3回以上実施し、その結果の平均値を測定結果とした。

試験の際、試験片に負荷させる輻射熱量は50kW/m²とした。ここで、欧州における鉄道車両の火災防護規格における詰め物の燃焼試験では、試験片に負荷させる輻射熱量を25kW/m²としている⁷⁾が、本検討では大火源を想定し、詰め物が激しく燃焼している際の燃焼性を把握するため、50kW/m²とした。なお、輻射熱量25kW/m²でも試験を実施したが、同一条件でも着火時間のばらつきが数十秒～数百秒と大きく、正確な評価が困難であった。

CCM試験における評価項目は、測定結果から着火時間、最大発熱速度（以下、 HRR_{max} ）、総発熱量（以下、 THR ）および最大煙生成速度（以下、 S''_{max} ）とした。試験結果から得られる評価項目のイメージを図4に示す。図4(a)に示すように、発熱速度の測定結果から、着火時間、 HRR_{max} および THR を求めた。なお、省令¹⁾におけるCCM試験の評価時間を参考に、600秒までの値で評価した。また、本試験において、発熱速度は酸素消

費法により求めた。これは、燃焼によって物質の単位質量当たりの発熱量が物質ごとに大きく異なるのに対して、燃焼により消費される酸素量を基準とすると、物質の種類に依存せず、酸素1kgあたり13.1MJとほぼ一定の値を示すことを利用したものである⁸⁾。煙生成速度は、前述の発熱速度と同時測定が可能であり、試験片の燃焼に伴って生じる煙（微粒子）が排気ダクト内を通過する際に生じるレーザー光の透過度変化から煙の発生量を評価する。評価項目は、図4(b)に示す S''_{max} とした。

3. 試験結果

3.1 樹脂の試験片の試験結果

樹脂の試験片の試験結果の概要を表2に示す。また、例として、IFR60%の試験状況を図5に示す。

着火時間に着目すると、0%では15秒程度で着火するのに対して、Mg60%は42秒、Br20%は34秒であり、0%よりも遅くなる傾向が見られた。一方、IFR配合樹脂の着火時間は15～22秒であり、0%と同程度または汎用的な難燃剤を配合した樹脂よりも早く着火した。これは、難燃剤の特徴として、IFR系難燃剤が着火を早める代わりに難燃剤を発泡させて試験片を覆うことで、樹脂に負荷される輻射熱量を低減させ、燃焼拡大を抑制する設計としているためである。そのため、IFR配合樹脂は汎用的な難燃剤に比べて着火時間が早まるものの、後述するようにその他の評価項目の結果から総合的に判断すると十分な難燃性を有するものと考えられる。

HRR_{max} に着目すると、0%が最も高く935kW/m²となり、激しく燃焼した。次に、IFR8%、Br20%、IFR15%の順となった。それに対して、 HRR_{max} が大きく低減されたのは、Mg60%およびIFR30%～IFR60%であった。IFR配合樹脂の場合は、前述のように燃焼拡大を抑制する設計とした効果が発揮されたものと考えられる。特に、IFR30%はMg60%より難燃剤の添加量が少ないにもか

表2 樹脂の試験片の試験結果

樹脂の種類	着火時間	HRR_{max}	S''_{max}	THR
	s	kW/m ²	m ² /m ² /s	MJ/m ²
0%	15	935	11.8	60
Mg60%	42	246	3.4	57
Br20%	34	490	30.3	36
IFR8%	21	498	8.0	66
IFR15%	15	349	6.3	57
IFR30%	22	129	1.8	42
IFR40%	18	103	1.1	37
IFR60%	19	61	1.2	10



図5 IFR60%の試験状況

かわらず、 HRR_{max} を低減できることが確認され、効果が高い難燃剤であると考えられる。

S''_{max} に着目すると、Br20%が最も高く、0%、IFR8%およびIFR15%が同程度で続いた。Br20%の S''_{max} が最も高かった要因として、これは同難燃剤の特徴であるが、 HRR_{max} を低減できる一方で、燃焼時に臭素が酸素の取り込みを阻害し、不完全燃焼させるため、その結果として煙の生成が増加したと考えられる。一方、 S''_{max} が大きく低減されたのは、Mg60%、IFR30%、IFR40%およびIFR60%であった。Mg60%とIFRを多く含むIFR配合樹脂で S''_{max} が大きく低減した理由は、 HRR_{max} と同様に燃焼拡大が抑制された効果と考えられる。

THR に着目すると、0%、Mg60%、IFR8~15%で高く、IFR60%が最も低くなった。これは、評価時間の600秒の範囲で、0%やMg60%はほとんど燃焼した一方、Br20%やIFR30%~IFR60%では600秒を超えても燃焼が継続したためと考えられる。

樹脂の試験片に対するCCM試験の結果、IFR60%の着火時間への効果は小さいものの、IFR系難燃剤の発泡により自己消火性が発揮され、 HRR_{max} だけでなく、発熱速度の経時変化も他の試験片よりも大きく抑制できた。このように、IFRを30%以上配合した樹脂は、他の難燃剤を配合した樹脂よりも優れた難燃性を示した。特にIFRを60%配合した場合、着火後、速やかに自己消火するとともに、発熱速度の経時変化も他の試験片と比較して抑制できたことから、優れた難燃性を示すと考えられる。

3.2 樹脂と腰掛材料を組み合わせた試験片の試験結果・条件A（樹脂の大きさ）

条件Aにおける試験前後の試験片の外観を図6に、試験結果の概要を表3に示す。なお、以下、樹脂を挿入しない条件を条件Xとする。

図6下段の燃焼後の外観が示すように、樹脂を挿入した場合の燃焼後の外観は、黒色固体の残渣が見られた。また、樹脂が大きいほど、同残渣が大きいことがわかった。これは、樹脂の面積が大きいほど燃焼時に発泡するIFRが多量に存在するためと考えられる。

表3に示す着火時間に着目すると、いずれの試験片においても、着火時間は5~6秒と同程度であった。これは、円錐型ヒーター近くの詰め物が最初に着火したためであり、挿入した樹脂の影響ではなく、燃焼がほぼ同じ

	なし (条件X)	33mm角	50mm角	100mm角
燃焼前				
燃焼後				

図6 条件AのCCM試験前後の試験片の外観

表3 条件Aにおける試験結果

樹脂寸法	着火時間	HRR_{max}	S''_{max}	THR
mm	s	kW/m ²	m ² /m ² /s	MJ/m ²
条件X	6	490	4.4	61
33	5	483	5.4	66
50	5	288	4.3	72
100	6	208	4.0	24

タイミングで始まったことを意味している。

HRR_{max} に着目すると、樹脂を挿入しない条件Xが490kW/m²であるのに対して、33mm角の試験片を挿入した場合は483kW/m²とほぼ同程度であった。一方、50mm角および100mm角の試験片を挿入した場合は、それぞれ288kW/m²、208kW/m²となり、条件Xよりも大幅に低減した。

S''_{max} はいずれも、同程度であった。これは、 S''_{max} は詰め物の燃焼時に一定の煙が発生し、IFR配合樹脂により燃焼を抑制させても、最大値としては低減できなかったためと考えられる。

THR に着目すると、33mm角、50mm角の樹脂を挿入した場合には、樹脂が大きくなるほど大きくなった。これは、IFR60%が40%の樹脂と60%のIFR系難燃剤で構成されていることから、可燃物である樹脂の量が増加したためと考えられる。なお、100mm角では大幅に低減しているが、評価時間の600秒以内では燃焼が抑制されたためと考えられる。

・条件B（挿入位置の違いによる試験結果）

樹脂の挿入位置による燃焼特性の影響を評価するため、同一条件の樹脂を中間および底面に挿入した場合の試験結果を表4に示す。

着火時間はいずれの樹脂条件、挿入位置でも5~6秒とほぼ同程度であった。これは、条件Aにおける理由と同様と考えられる。

HRR_{max} に着目すると、基準となる条件Xでは490kW/m²であり、条件Bの中で最も高かった。一方、IFR60%の寸法を50mm角とし、中間に挿入した場合の HRR_{max} は条件Xより40%程度低減し、底面に挿入

表4 条件Bにおける試験結果

樹脂条件	挿入位置	着火時間	HRR_{max}	S''_{max}	THR
		s	kW/m ²	m ² /m ² /s	MJ/m ²
条件X		6	490	4.4	61
50mm角 IFR 60%	中間	5	288	4.3	72
	底面	6	377	4.3	71
100mm角 IFR 60%	中間	6	208	2.4	24
	底面	5	267	2.4	35

した場合の HRR_{max} は条件Xより20%程度低減した。さらに、IFR60%の寸法を100mm角とし、中間に挿入した場合の HRR_{max} は条件Xよりも60%程度低減し、底面に挿入した場合の HRR_{max} は条件Xに対して45%程度の低減であった。

S''_{max} に着目すると、中間と底面の場合で同程度と考えられた。こちら、 S''_{max} は詰め物の燃焼時に一定の煙が発生し、IFR配合樹脂により燃焼を抑制させても、最大値としては低減できなかったためと考えられる。

THR に着目すると、IFR60%の寸法が50mm角の場合は、挿入箇所が中間と底面の場合で値は同程度であった一方、100mm角の場合は、中間の方が小さかった。50mm角では、可燃物である詰め物および挿入した樹脂の重量が同程度であり、すべての可燃物が燃焼した結果、同程度の値となったと考えられる。一方で、100mm角では、評価対象の600秒以内に消火せず、燃焼が継続したため、より燃焼が遅延した中間の条件の方が、低減したと考えられる。

以上、本試験結果において HRR_{max} に着目すると、IFR配合樹脂を底面よりも中間に挿入の方が難燃性の効果が高いと考えられる。

・条件C（難燃剤の違いによる試験結果）

前述の条件A及び条件Bの結果から挿入する樹脂の大きさを50mm角、挿入位置を中間とし、樹脂に配合する難燃剤の違い及び添加量による影響を評価した。

条件Cの試験前後の試験片の外観状況を図7に、試験結果を表5に示す。

図7下段の燃焼後の外観が示すように、Mg60%を挿入した条件では、燃焼後の残渣である白色固体が残っていたが、その他の条件では黒色固体の残渣またはすべて燃焼していた。表5に示すように、着火時間は、条件Aなどと同様、中間に挿入した樹脂に関係なく、上層の詰め物が着火時間に影響したためすべて同程度であった。

HRR_{max} で比較すると、条件Xが490kW/m²であり、Mg60%を挿入した場合と同程度であった。一方、0%やBr20%の場合は条件Xよりも高い値を示した。IFR配合樹脂を挿入した場合、IFR8%では条件Xと同程度であったが、IFR15%~60%の場合は、IFRの配合量の

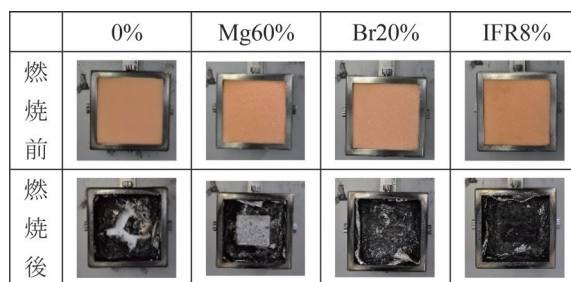
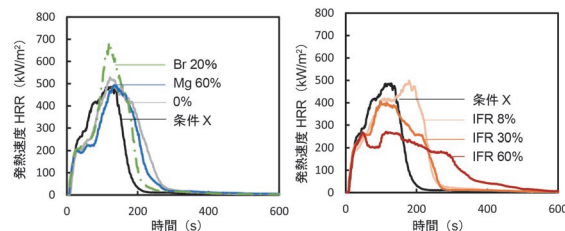


図7 挿入する難燃剤の種類による試験前後の外観

表5 条件Cにおける試験結果

樹脂の種類	着火時間	HRR_{max}	S''_{max}	THR
	s	kW/m ²	m ² /m ² /s	MJ/m ²
条件X	6	490	4.4	61
0%	5	552	6.2	82
Mg 60%	5	496	4.6	75
Br 20%	5	675	12.9	75
IFR 8%	5	489	6.7	81
IFR 15%	5	439	6.0	80
IFR 30%	5	416	6.1	76
IFR 40%	5	333	5.0	74
IFR 60%	5	288	4.3	72



(a) 比較試験結果 (b) IFRの配合割合

図8 条件Cにおける発熱速度の経時変化

増加に伴って HRR_{max} が低減した。特に、IFR60%を挿入した場合は、条件Xと比較して HRR_{max} が40%程度低減した。

S''_{max} で比較すると、条件Xでは4.4m²/m²/sであったのに対して、Br20%を挿入した場合は12.9m²/m²/sと増加した。これは難燃剤の特性によるものと考えられる。また、その他についてもIFR60%を除き、若干の増加が見られた。

THR で比較すると、条件Xでは61MJ/m²であったのに対し、樹脂の試験片を挿入した場合はいずれの条件でも72~82MJ/m²となり、増加した。これは、挿入する樹脂が難燃剤と樹脂により構成されており、樹脂部分が燃焼したこと、また評価時間の600秒以内に燃焼したために THR が大きくなったと考えられる。

最後に、条件Cにおける発熱速度の経時変化を図8

に示す。図8(a)に示すように、Mg60%の挿入によって燃焼をわずかに遅延できる効果があったものの、全体的な燃焼挙動としてはほとんど変化が見られなかった。また、Br20%を挿入した場合、初期の燃焼を若干遅延できる効果があるものの、後半の燃焼では条件Xより激しく燃焼した。これは、Br20%の難燃剤が消費された後、詰め物とともに挿入した残りの樹脂が激しく燃焼したためと考えられる。

次に、図8(b)に示すように、IFR配合樹脂を挿入した場合、IFR8%を挿入した場合に条件Xと比較して燃焼を遅延できる効果があったものの、その後の燃焼挙動は同程度であった。その一方で、IFRの配合量を増やすにつれて、 HRR_{max} は減少し、全体的な燃焼を抑制することがわかった。これは、挿入した樹脂のIFRが発熱によって発泡し、樹脂および燃焼中の詰め物を覆うことで、酸素や輻射熱を遮断し、燃焼を抑制できたものと考えられる。また、条件Xと比較して、詰め物が急激に燃焼せず、徐々に燃焼していることから、IFR配合樹脂を挿入することにより、構成した詰め物の全体の燃焼拡大を抑制できる可能性があると考えられる。

以上、条件Cの結果より、詰め物の燃焼抑制に対して、樹脂を遮蔽板のように詰め物に挿入することや挿入する樹脂板材に難燃剤が含まれることが有効ではなく、IFR配合樹脂が燃焼時に発泡することで詰め物全体に負荷される輻射熱量が抑制されることが有効であることがわかった。ただし、着火時間については、いずれの場合においても試験開始から30秒程度までに着火した。これは、40mmの詰め物のうち、いずれの条件においても上層の20mmは同じ構成の詰め物であり、同部分が最初に燃焼するために、いずれの試験条件においても同様の結果が得られたものと考えられる。

3.3 試験結果のまとめ

CCM試験の結果より、着火時間は試験条件によらず同程度である一方、 HRR_{max} で評価すると、IFR配合樹脂を挿入することで、腰掛材料に使用される詰め物の燃焼を抑制することがわかった。また、挿入するIFR配合樹脂の寸法は大きく、挿入する位置は中間とし、IFRの配合量を増やすことにより燃焼抑制の効果が高まることがわかった。

4. まとめ

鉄道車両用の腰掛材料の更なる難燃性の向上のため、難燃性の高いIFR系難燃剤に着目し、同難燃剤を配合したIFR配合樹脂を適用する手法を検討した。手法として、腰掛材料である詰め物に挿入した条件でCCM試験により燃焼特性を評価した。CCM試験では、比較の

ため各種難燃剤を配合した樹脂を詰め物に挿入したものを試験片とし、樹脂の大きさ、詰め物への挿入位置、配合量をパラメータとして試験を実施した結果、以下のことがわかった。

- (1) IFR系難燃剤を含む各種難燃剤の燃焼性能を比較評価するため、各種難燃剤を配合した樹脂でCCM試験を実施した。その結果、IFR配合樹脂は、汎用的な臭素系難燃剤やマグネシウム系難燃剤よりも優れた難燃性を示すことを確認した。
- (2) 詰め物に挿入するIFR配合樹脂の大きさによる影響では、50mm角程度でも燃焼を抑制できるものの、100mm角など寸法が大きい方が抑制効果も大きいことがわかった。また、挿入位置は、詰め物の底面よりも中間に配置する方が燃焼を抑制する効果が高いことがわかった。
- (3) 難燃剤の種類による影響では、IFR配合樹脂を用いた場合、樹脂を挿入しない条件や汎用的な難燃剤の配合した条件と比較して燃焼抑制の効果が大きいことがわかった。これは、IFRの特徴である着火時に難燃剤が発泡することで、周囲の燃焼挙動が抑制されたものと考えられる。

以上、IFR配合樹脂を詰め物に挿入することにより、腰掛材料としての燃焼を抑制することがわかった。今後は、同構造を活かして、実物大の評価を検討する予定である。

謝辞

本研究における樹脂の検討の実施にあたり、株式会社ADEKAには共同研究により多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文献

- 1) 国土交通省「鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準」第8章第5節第83条
- 2) 山中翔, 豊原匡志, 伊藤幹彌: 大火源下における鉄道車両用材料の燃焼性の検討, 鉄道総研報告, Vol.32, No.10 pp.5-10, 2018
- 3) 高野純一, 石突光隆, 山内雄記, 山中翔, 豊原匡志: 鉄道用腰掛燃焼試験とFDSによる再現解析の実施, 第26回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2019)講演論文集, No.S-6-4-4, pp.538-541, 2019
- 4) 経済産業省製造産業局繊維課・帝人ファイバー株式会社「軽量クッション材の開発」評価用資料: https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H20/081110_fiber/fiber08-6-4.pdf (参照日: 2023年1月24日)
- 5) 米沢豊, イントメッセント系難燃剤の進歩, 難燃剤・難燃

- 化材料の最前線, CMC 出版, pp.90-96, 2015
- 6) ISO 5660-1:2015/Amd 1:2019 Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement) — Amendment 1.
- 7) EN45545-2:2020 Railway applications—Fire protection on railway vehicles part 2 : Requirements for fire behavior of materials and components.
- 8) Hugget, C.: Fire and Materials, No.4, pp.61-65,1980.

歯車装置軸受へのつば付き円筒ころ軸受の適用

高橋 研* 鈴木 大輔* 岡村 吉晃*
永友 貴史**

Application of Cylindrical Roller Bearings with Ribs to Gear Units of Railway Vehicles

Ken TAKAHASHI Daisuke SUZUKI Yoshiaki OKAMURA
Takafumi NAGATOMO

Helical gears are commonly used in the gear units of railway vehicles in Japan, and a bearing type used for the gear units is a tapered roller bearing. In order to prevent seizure of bearings, this study examined the use of cylindrical roller bearings with ribs that allow a certain degree of axial displacement of inner rings and outer rings, and compared its performance with that of a conventional structure using tapered roller bearings through various rotating tests. The results showed that the temperature rise immediately after the start of rotation and torque of the pinion shaft are lower in cylindrical roller bearings with ribs than those in tapered roller bearings, through the rotation tests using an actual gear unit.

キーワード：機械要素，トライボロジー，歯車装置，小歯車軸受，円すいころ軸受，円筒ころ軸受

1. はじめに

鉄道車両（電車）の歯車装置の小歯車軸受として、はすば歯車と組み合わせて国内で一般に用いられている円すいころ軸受では、損傷防止のために適切なエンドプレイ値（EP 値：歯車を支持する 2 個の軸受の組合せ内部すきま）の管理が欠かせない。これまでに、初期 EP 値が小さく雰囲気温度が低いほど回転中の EP 値の減少量が大きくなり焼付きが懸念されること¹⁾²⁾、EP 値が減少して軸受が焼付く際には 150~200kN ものアキシャル荷重が軸受に作用すること³⁾などが明らかにされている。

このような焼付きを防止するために、内輪と外輪の軸方向の変位を一定程度許容できる円筒ころ軸受を用いる方法が考えられる。近年では、円筒ころ軸受とやまば歯車を組み合わせた構造の適用検討例や採用例⁴⁾⁵⁾がある。やまば歯車のはすば歯車と異なり、かみ合いによるアキシャル荷重（軸方向の力）が発生しないことから軸受の負担を低減できる利点があるものの、歯車の高い製造技術や精度が必要となってコストが増加することや歯幅寸法が増加することなどから、全ての歯車装置にこれを適用することは難しい。一方、はすば歯車と、内輪と外輪の両方につばを設けた円筒ころ軸受（つば付き円筒ころ軸受）を組み合わせる構造も提案されている⁶⁾。従来の円すいころ軸受ではアキシャル荷重の一部を軸受の転がり接触部で負担するのに対し、この構造ではアキシ

アル荷重の全てを軸受のつばと端面とのすべり接触部で負担することに加え、上記 2 種類の軸受では軸受内部の潤滑油の挙動が異なると考えられ、軸受のトルクや発熱といった特性に影響すると考えられるが、それらを比較して検討した例はない。そこで、本研究ではつば付き円筒ころ軸受を採用した小歯車支持構造（試作構造）を試作し、回転試験により円すいころ軸受を採用した従来構造と性能を比較した⁷⁾。

2. 小歯車支持構造および試験軸受

2.1 小歯車支持構造

一般的な鉄道車両の歯車装置の構造を図 1 に示す。歯車装置は車軸に取り付けられ、歯車箱吊り装置によって台車枠に懸架される。歯車装置の減速機構は、小歯車と大歯車の 2 個のはすば歯車で構成される。小歯車軸には、小歯車を挟んで左右にそれぞれ小歯車軸受が取り付けられており、歯車箱に対して小歯車軸を支持している。また、車軸には、大歯車を挟んで左右にそれぞれ大歯車軸受が取り付けられており、車軸に対して歯車箱を支持している。歯車箱の底部にはギヤ油が貯められる。このギヤ油が大歯車の回転により各軸受と歯車にはねかけられ、潤滑される。なお、図 1 中に矢印 CW で示した回転方向を正転（モータ側から見て小歯車軸が時計回り）、矢印 CCW で示した回転方向を逆転とする。正転と逆転とでは小歯車軸受部へのギヤ油のかかり方が異なり、逆転の方が油溜まりからの距離が短く、直接的に給油される。

試験に供した小歯車支持構造を図 2 に示す。(a) が円

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

** 元 材料技術研究部 潤滑材料研究室

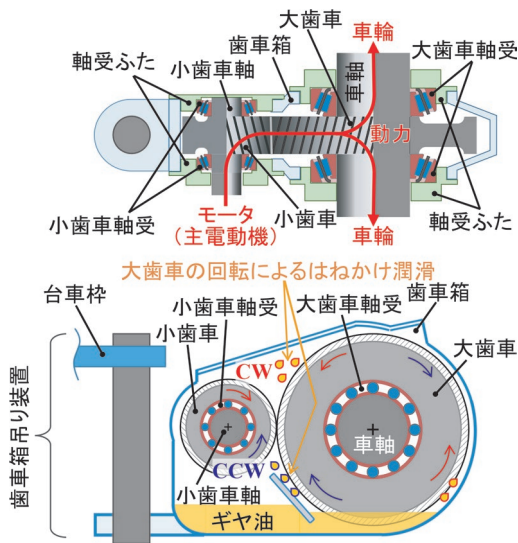
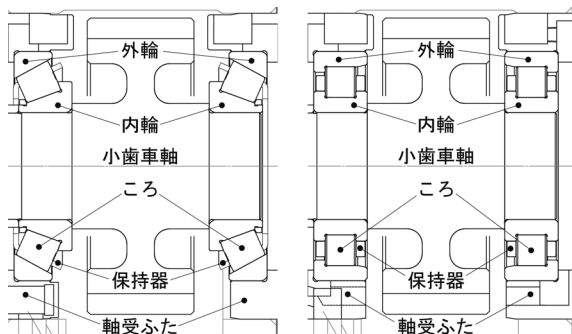


図1 歯車装置の構造



(a)円すいころ軸受 (b)つば付き円筒ころ軸受

図2 試験に供した小歯車支持構造

すいころ軸受による従来構造，(b)がつば付き円筒ころ軸受による試作構造の断面図である。図における軸受の機内側（歯車側）の端面を正面，機外側の端面を背面と呼ぶ。

これらは，いずれも3.1節で述べる試験装置に，軸受ふたと小歯車軸の変更のみにより互換性をもって取り付けることが可能である。

2.2 試験軸受

使用した小歯車軸受の諸元を表1に示す。軸受の内部すきまは，軸受ふたと歯車箱との締結面に挿入するシムの厚さを調整することにより決定される。また，これにより小歯車軸が軸方向に移動できる変位がEP値である。円すいころ軸受ではEP値が増加するとアキシャルすきまに連動してラジアルすきまも増加するため，軸受の疲労寿命の低下や振動の増大を招く懸念があり，上限値は比較的小さい。一方，円筒ころ軸受ではEP値の増加がラジアルすきまに影響しないため，上限値を拡大できる。

表1 試験に供した小歯車軸受の諸元

	円すいころ軸受	つば付き円筒ころ軸受
外径	150mm	150mm
内径	70mm	70mm
組立幅	38mm	35mm
ころ数	15	13
基本動定格荷重	167000N	158000N
上限EP値	0.12mm	0.30mm

3. 実機歯車装置における回転試験

2章で述べた小歯車支持構造を実機歯車装置に取り付けて回転試験に供し，両者の性能を比較する。1章で述べたように雰囲気温度が低いほど軸受の焼付きが懸念されることから，低温時の性能に着目する。ここでは歯車装置をほぼ無負荷で回転させるため，軸受に実荷重が作用する条件を再現することはできないが，歯車装置の温度変化に伴うEP値の変化や低温時のギヤ油の挙動を実機相当とした条件での性能を調べることを目的としている。はじめに，一般的な冬季の車両走行を考慮した条件として，雰囲気温度が比較的低い約10℃において，回転試験（風冷試験）を行う。次に，より低温での車両起動直後における軸受の過渡的な状態を考慮した条件として，-15～-20℃での回転試験（低温起動試験）を行う。

3.1 試験装置

試験装置を図3に示す。本装置は実物の歯車装置を供試体として，その小歯車軸をモータで回転させる構造である。供試歯車装置は，2.1節で述べた一般的な歯車装置であり，歯車箱の材料はアルミニウム合金，小歯車の材料は合金鋼，大歯車と軸受ふたの材料は炭素鋼である。歯車箱近傍には，送風機が設置される（図中では省略）。

低温起動試験を行う場合には送風機を用いず，供試歯車装置に図4に示す冷却装置を設置する。本装置は，断熱カバーで構成した冷却槽内の歯車装置に液化炭酸ガスを噴射することにより歯車装置を冷却する。図4中の断熱カバーは下部のみ設置されている状態であるが，冷却時には上部と合わせ，車軸，小歯車軸，配管の貫通部を除いて歯車装置をほぼ完全に遮蔽する。

回転試験中には，各部の温度，および小歯車軸（モ-

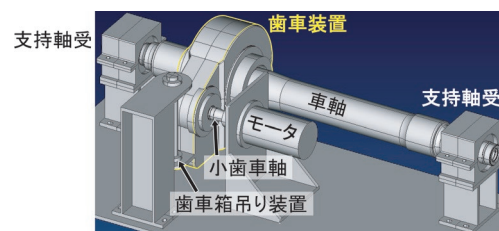


図3 歯車装置回転試験機

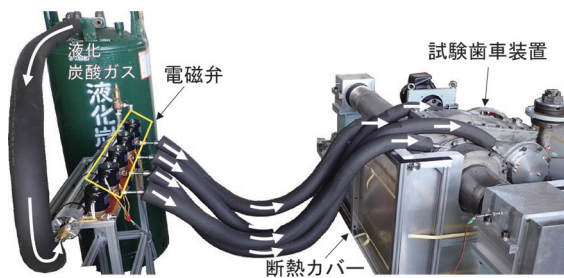


図4 冷却装置

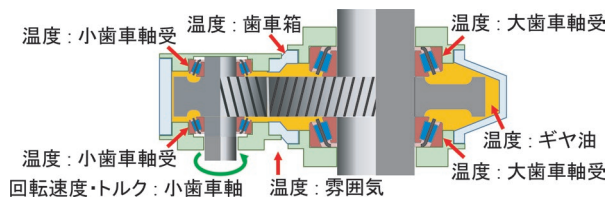


図5 測定項目および測定箇所

タ)の回転速度とトルクを測定する(図5)。温度の測定箇所は、小歯車軸受2個の外輪外径面、大歯車軸受2個の外輪外径面、歯車箱の表面、ギヤ油、雰囲気であり、いずれもT型熱電対により測定される。小歯車軸の回転速度は光電式回転検出器により測定される。小歯車軸のトルクはモータの電流値から演算された値が取得される。

3.2 試験条件および試験方法

試験条件を表2に、小歯車軸の回転パターンを図6に示す。回転開始後の加速域では、315sで 6000min^{-1} まで加速する。これは一般的な高速車両で約 320km/h の速度に相当する。組立時(20℃)のEP値は従来構造で0.11mm、試作構造で0.21mmである。歯車装置の雰囲気条件は、3.1節で触れたように、風冷試験においては送風機による風冷(回転試験中、常時10m/s)、低温

表2 試験条件

回転方向	正転, 逆転
回転パターン	図6参照
潤滑油	ギヤ油 粘度指数: 105 動粘度: $9.9\text{mm}^2/\text{s}$ (100℃), $78.7\text{mm}^2/\text{s}$ (40℃)
油量	2.95L

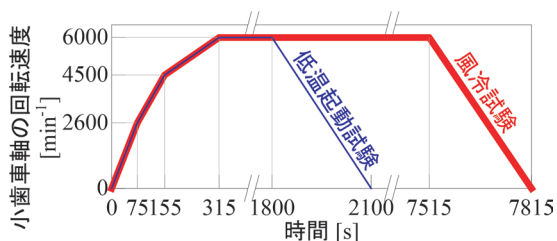


図6 回転パターン

起動試験においては冷却装置による冷却(回転開始前のみ)とした。なお、両試験で回転パターンの前半は同一であるが、低温起動試験においては、回転開始から1800sから減速して2100sで停止し、試験終了とする。

3.3 試験結果および考察

3.3.1 風冷試験

風冷試験における各部の温度と小歯車軸のトルクを図7に、回転開始から1800sまでの軸受外輪の10sあたりの温度上昇を図8に示す。それぞれ、(a)が正転、(b)が逆転での結果を示す。ここではモータ側の小歯車軸受をPM、反モータ側の小歯車軸受をPWと表記する。

初めに、正転の場合の結果について述べる。回転開始から約600s間のPM外輪およびPW外輪の温度上昇は、試作構造が従来構造に比べて緩やかである(図7(a))。これは、従来構造では歯車箱と小歯車軸の熱膨張の違いによりEP値が組立時と比べて $0.05\sim 0.06\text{mm}$ 程度減少し¹⁾⁸⁾、軸受の負荷圏が広がった結果、軸受内部での転がり粘性抵抗による発熱が増加するのに対し、試作構造ではEP値が変化しても負荷圏が大きくは変化しないためと考えられる。10sあたりの温度上昇の最大値は、試作構造(PM側: $0.5\text{K}/10\text{s}$, PW側: $0.5\text{K}/10\text{s}$)が従来構造(PM側: $1.2\text{K}/10\text{s}$, PW側: $1.3\text{K}/10\text{s}$)より低い(図8(a))。歯車箱とギヤ油の温度は、軸受の温度ほど構造の違いによる明確な差は見られないが、回転開始から約900s間の温度上昇は従来構造の方が急激である。いずれの構造においても小歯車軸のトルクは回転開始直後に大きい、その後は約1800sにかけて徐々に低下する。これは、回転開始直後のギヤ油は低温で粘度が高く、大歯車によるギヤ油のかくはん抵抗と軸受内部でのギヤ油のかくはん抵抗や転がり粘性抵抗が大きいためと考えられる。なお、トルクは、試作構造が従来構造に比べて低い(図7(a))。この理由としては、前述のように従来構造では歯車箱と小歯車軸の熱膨張の違いによりEP値が減少し、軸受の負荷圏が広がった結果、軸受内部での転がり粘性抵抗が増加することや、円すいころ軸受において発生する、回転による圧力差により軸受の背面側から正面側へ潤滑油を引き込む力⁹⁾により、軸受内部のギヤ油が増加してかくはん抵抗が増加したことが考えられる。

次に、逆転の場合の結果について述べる。逆転の場合、回転開始から約3000s以降に従来構造において各部の温度、特にギヤ油の温度が急激に上昇する。そのため、ギヤ油の温度が100℃に達した時点で試験を終了した。これは、図1に示したように、逆転の方が正転に比べて油溜まりから軸受までのギヤ油の流路の距離が短く、ギヤ油の温度が上昇して粘度が下がった際に、正転の場合よりも多くのギヤ油が歯車のかみ合い部で円周方向から

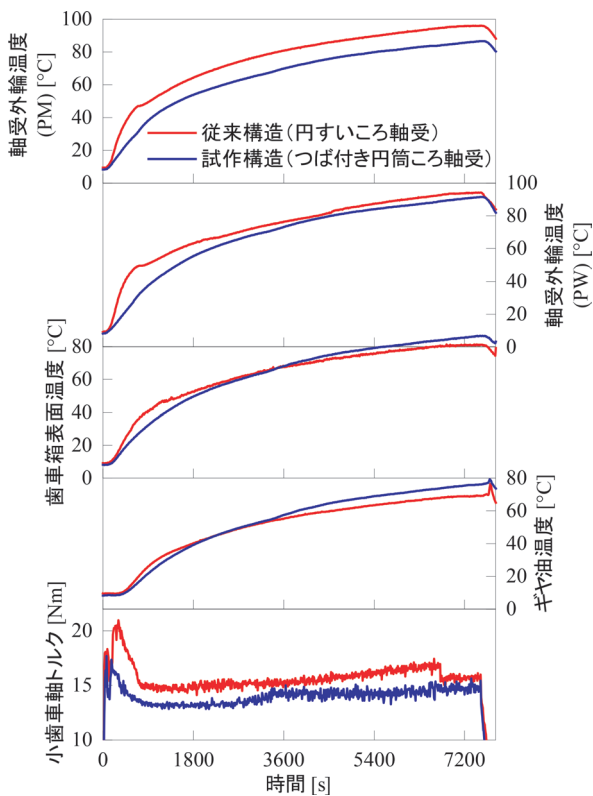


図7(a) 風冷試験における歯車装置の温度とトルク (正転)

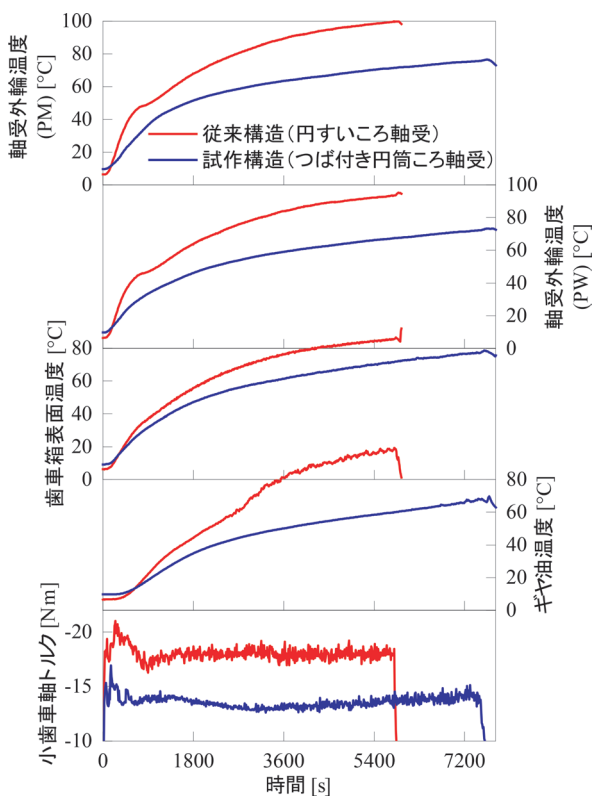


図7(b) 風冷試験における歯車装置の温度とトルク (逆転)

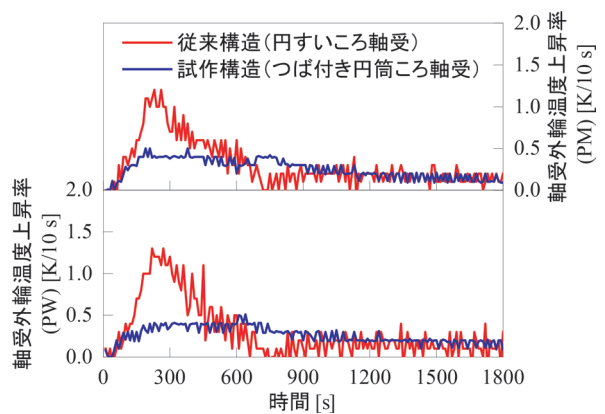


図8(a) 風冷試験における軸受の温度上昇率 (正転)

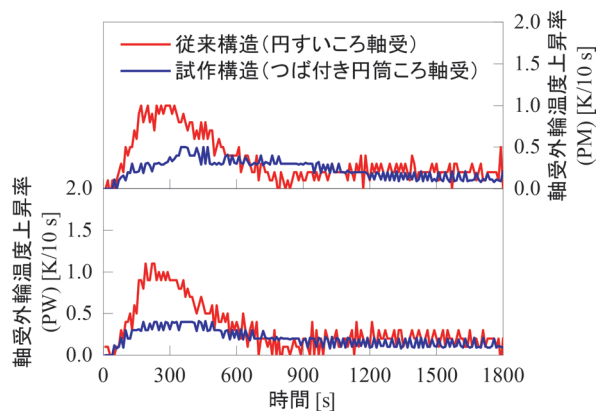


図8(b) 風冷試験における軸受の温度上昇率 (逆転)

軸方向にその流れを変化させ、直接的に軸受の正面側にはねかけられるためと考えられる。さらに、円すいころ軸受では上述のように軸受内部で背面側から正面側へのギヤ油の流れが生じているため、はねかけられたギヤ油の流れと軸受内部のギヤ油の流れが対向・衝突して、軸受内部に滞留するギヤ油量が増加してかくはん抵抗や転がり粘性抵抗が増加することも温度上昇の理由と考えられる。回転開始から約600s間のPM外輪およびPW外輪の温度上昇は、試作構造の方が従来構造に比べて緩やかである(図7(b))。それにともない10sあたりの温度上昇の最大値も、試作構造(PM側:0.5K/10s, PW側:0.4K/10s)が従来構造(PM側:1.0K/10s, PW側:1.1K/10s)より低くなっている(図8(b))。また、トルクは、試作構造が従来構造に比べて低い(図7(b))。これらの構造による違いの理由は、いずれも上記の正転の場合と同じである。

3.3.2 低温起動試験

低温起動試験における各部の温度と小歯車軸のトルクを図9に、軸受外輪の10sあたりの温度上昇を図10に示す。それぞれ、(a)が正転、(b)が逆転での結果を示す。

初めに、正転の場合の結果について述べる。回転開始から約600s間のPM外輪およびPW外輪の温度上昇

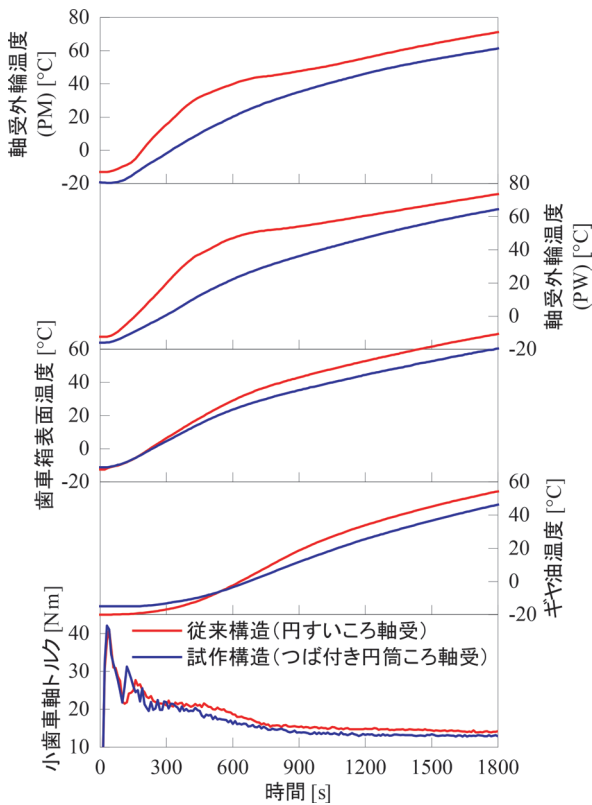


図9(a) 低温起動試験における歯車装置の温度とトルク (正転)

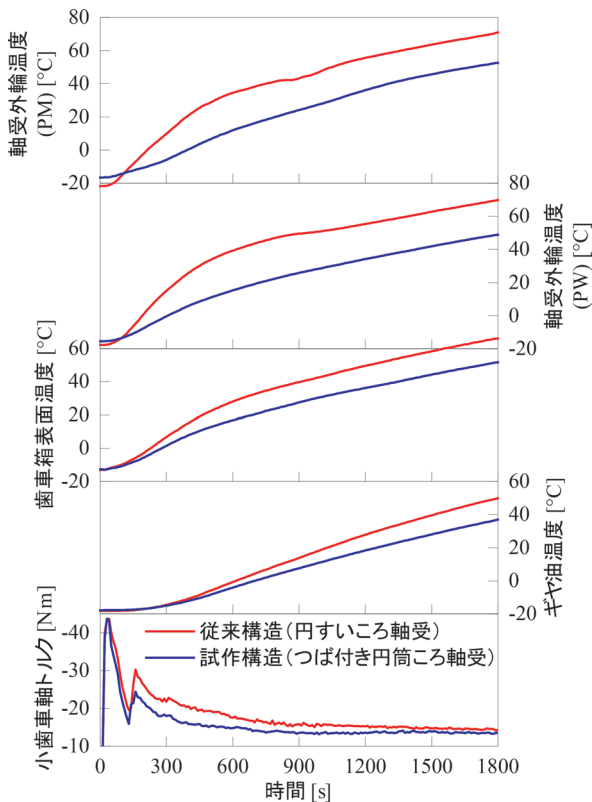


図9(b) 低温起動試験における歯車装置の温度とトルク (逆転)

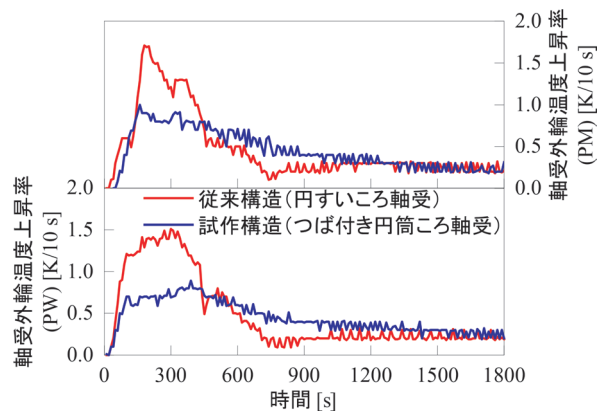


図10(a) 低温起動試験における軸受の温度上昇率 (正転)

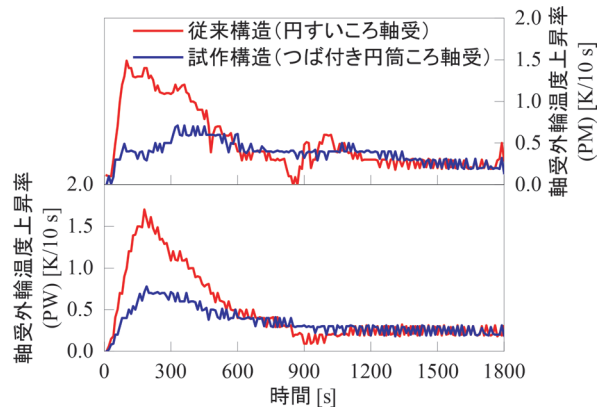


図10(b) 低温起動試験における軸受の温度上昇率 (逆転)

は、試作構造が従来構造に比べて緩やかである(図9(a))。これは、3.3.1項で述べたように従来構造では歯車箱と小歯車軸の熱膨張の違いによりEP値が減少し、軸受の内部すきまがほとんどない状態となった結果、軸受内部での転がり粘性抵抗による発熱が増加するのに対し、試作構造ではEP値が0mmを下回ることがない限り、軸受の発熱が大きく変化することはないためと考えられる。10sあたりの温度上昇の最大値は、試作構造(PM側:1.0K/10s, PW側:0.9K/10s)が従来構造(PM側:1.7K/10s, PW側:1.5K/10s)より低い(図10(a))。歯車箱とギヤ油の温度は、軸受の温度ほど構造の違いによる明確な差は見られないが、歯車箱の回転開始から約600s間の温度上昇、およびギヤ油の回転開始から約1200s間の温度上昇は従来構造の方が急激である。いずれの構造においても小歯車軸のトルクは回転開始直後に大きいが、その後は約900sにかけて徐々に低下する。これは、回転開始直後のギヤ油は低温で粘度が高く、大歯車によるギヤ油のかくはん抵抗と軸受内部でのギヤ油のかくはん抵抗や転がり粘性抵抗が大きいためと考えられる。なお、トルクは、多くの時間で試作構造が従来構

造に比べて低い (図 9(a))。

次に、逆転の場合の結果について述べる。回転開始から約 600s 間の PM 外輪および PW 外輪の温度上昇は、試作構造が従来構造に比べて緩やかである (図 9(b))。それにともない 10s あたりの温度上昇の最大値も、試作構造 (PM 側 : 0.7K/10s, PW 側 : 0.8K/10s) が従来構造 (PM 側 : 1.5K/10s, PW 側 : 1.7K/10s) より低くなっている (図 10(b))。また、トルクは、試作構造が従来構造に比べて低い (図 9(b))。

3.3.3 ギヤ油温度とトルクの関係

3.3.1 項で述べたように、小歯車軸のトルクの変化にはギヤ油による抵抗と軸受の構造の違いが影響していると考えられる。このうち、ギヤ油の抵抗はギヤ油の温度による粘度変化の影響を大きく受けると考えられるため、ここではトルクをギヤ油の動粘度 (以下、粘度とする) によって整理して考察する。なお、粘度は表 2 に示したギヤ油の諸元を用いて ASTM-Walther の式¹⁰⁾ から求めた。図 11 に回転試験中の粘度と小歯車軸トルクの関係 (図 6 に示した運転パターンの最高回転速度時のみ) を示す。(a) が正転、(b) が逆転での関係を示す。

いずれの条件においても、粘度が約 $100\text{mm}^2/\text{s}$ 以上の範囲では粘度の増加とともにトルクが増加することがわかる。一方、粘度が約 $100\text{mm}^2/\text{s}$ を下回るとトルクは横

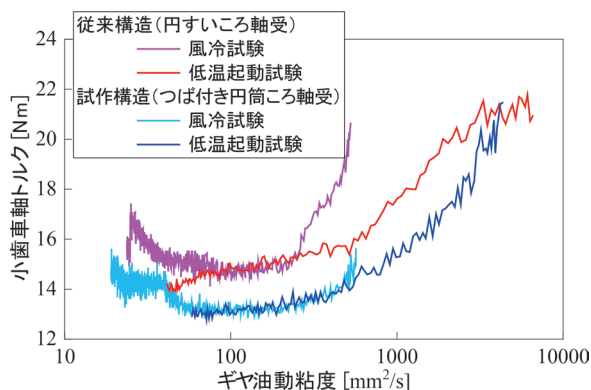


図 11(a) ギヤ油粘度と小歯車軸トルクの関係 (正転)

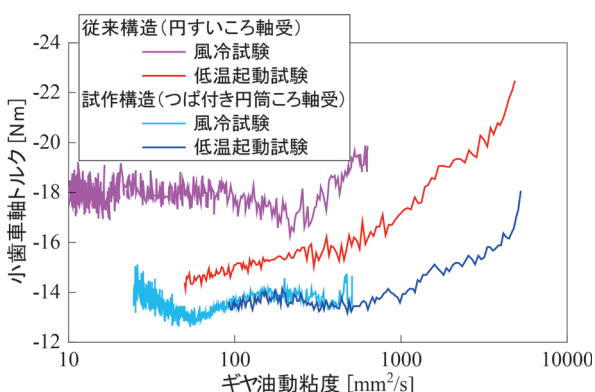


図 11(b) ギヤ油粘度と小歯車軸トルクの関係 (逆転)

ばいまたは若干の増加に転じている。これは、温度上昇により粘度が低下して流動性が増したギヤ油の軸受部への供給量が増加するため、軸受内部でのかくはん抵抗が増加することによって考えられる。

正転、逆転のいずれの場合にも同じ粘度では試作構造が従来構造に比べて低いトルクを示すことがわかる。この理由としては、前述のように従来構造では歯車箱と小歯車軸の熱膨張の違いにより EP 値が減少し、軸受の負荷圏が広がった結果、軸受内部での転がり粘性抵抗が増加することや、円すいころ軸受において発生する、回転による圧力差により軸受の背面側から正面側へ潤滑油を引き込む力により、軸受内部でのギヤ油量が増加してかくはん抵抗が増加することが考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に要約する。

(1) 実機歯車装置を用いたほぼ無負荷での風冷試験において、正転、逆転ともに試作構造のつば付き円筒ころ軸受は従来構造の円すいころ軸受に比べて回転開始直後の温度上昇が低くなることがわかった。それにともない、10s あたりの軸受の温度上昇の最大値も円すいころ軸受が $1.0\sim 1.3\text{K}/10\text{s}$ であったのに対し、つば付き円筒ころ軸受では $0.4\sim 0.5\text{K}/10\text{s}$ となった。また、トルクも、つば付き円筒ころ軸受が円すいころ軸受に比べて低い結果となった。

(2) 実機歯車装置を用いたほぼ無負荷での低温起動試験においても (1) と同様に、正転、逆転ともにつば付き円筒ころ軸受は円すいころ軸受に比べて回転開始直後の温度上昇が低くなることがわかった。それにともない、10s あたりの軸受の温度上昇の最大値も円すいころ軸受が $1.5\sim 1.7\text{K}/10\text{s}$ であったのに対し、つば付き円筒ころ軸受では $0.7\sim 1.0\text{K}/10\text{s}$ となった。また、ほとんどの時間でつば付き円筒ころ軸受が円すいころ軸受に比べて低い結果となった。

(3) (1), (2) の試験結果について、トルクをギヤ油粘度に対して整理した結果、正転、逆転のいずれの場合にも同じギヤ油粘度では試作構造が従来構造に比べて低いトルクを示すことがわかった。

文献

- 1) Takahashi, K., Suzuki, D., Nagatomo, T., " Effects of bearing clearance and atmospheric temperature on performance of pinion bearings of railway vehicles," JAMDSM, Vol.14, No.4, p.20-00048, 2020.
- 2) 鈴木大輔, 高橋研, 岡村吉見, 永友貴史: 鉄道車両用歯車装置における小歯車用円すいころ軸受の荷重状態, 日本機

- 械学会論文集, Vol.88, No.910, p.22-00060, 2022
- 3) 西河崇, 鈴木健吾, 折戸航, 豊田司: 鉄道車両用軸受の開発への取組み, NTN TECHNICAL REVIEW, No.88, pp.21-26, 2020
 - 4) 長恵美子, 岩波健, 後藤研一, 小野寛, 伊藤公二, 中山正幸, 島宗亮平: 新幹線用ヤマバ歯車(分割式歯車)駆動装置の開発, 第22回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, p.3704, 2015
 - 5) 神谷真弘, 浅野純, 金森成志, 足立昌仁, 山岡晃司: N700S用ヤマバ歯車装置の開発, 第25回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, p.3312, 2018
 - 6) SKF, Railway technical handbook, Vol.2, p.48, 2012.
 - 7) 高橋研, 鈴木大輔, 永友貴史: 軸受形式の違いが鉄道車両歯車装置用軸受の性能に与える影響, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.911, p.22-00126, 2022
 - 8) 高橋研, 鈴木大輔, 永友貴史: 鉄道車両の駆動装置用小歯車軸受の運転状態に影響を及ぼす要因の検討, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.876, p.19-00181, 2022
 - 9) 大森達夫, 岡本純三, 若林哲史: 転がり軸受のポンプ作用, トライボロジー会議予稿集(北九州), pp.429-431, 1996
 - 10) ASTM D2160-92, Standard Test Method for Thermal Stability of Hydraulic Fluids, 1992.

横風に対する車両の安全性評価に用いる 車体左右振動加速度の推定法

金元 啓幸* 日比野 有**

Estimation Method of Lateral Vibration Acceleration of Car Body used for Safety Evaluation of
Railway Vehicles against Crosswind

Hiroyuki KANEMOTO Yu HIBINO

The critical wind speed of overturning is often evaluated by the “RTRI’s detailed equation”. In the equation, the lateral vibration inertia force of car bodies is considered as one of acting forces affecting overturning, and the lateral vibration acceleration is assumed from past running test results. This paper shows that the critical wind speed of overturning can be accurately calculated by using simulation results of the lateral vibration acceleration occurring at the center of gravity of a car body under strong crosswinds. In addition, a new method is proposed to estimate the lateral vibration acceleration using track alignment data.

キーワード：横風，転覆限界風速，総研詳細式，左右振動加速度，車両運動シミュレーション，通り変位

1. はじめに

横風に対する鉄道車両の走行安全性を評価する指標のひとつに「転覆限界風速」がある。転覆限界風速は、風上側の輪重がゼロとなるときの風速として定義され、日本では「国枝式¹⁾」をベースとした「総研詳細式²⁾」によりこれを評価することが多い³⁾⁴⁾。

総研詳細式では、走行中の車両に作用する外力のうち、転覆に及ぼす影響が大きい作用力として、図1に示す①横風による空気力、②曲線通過時の超過遠心力、③左右振動慣性力の3力を考慮する。このうち①については、可能な限り風洞試験⁵⁾により空気力係数を求め、実態に即した評価を行うことが推奨されている。また、個別に風洞試験を行うことが難しい場合には、5種類の車体形状と7種類の地上構造物形状を組み合わせた風洞試験結果⁶⁾を準用することもある。次に、②については、

曲線半径、カント、車両の質量、および走行速度が定めれば一意に求められる。一方、③については、車体の左右振動加速度と車体質量の積により求めることができるが、軌道の状態や車両の走行速度により発生する振動の程度が大きく変わり、かつ転覆に対しては有利にも不利にも働く。そこで、左右振動加速度 α_y (m/s²)については、安全側の評価となるよう、次式で示す営業最高速度 v_{\max} (km/h)での走行時に0.98m/s²となるような走行速度 v (km/h)に関する1次式を仮定している。

$$\alpha_y = 0.98 \times v / v_{\max} \quad (1)$$

これは、数は少ないながらも過去の実車での走行試験結果から仮定されたものであり、車両転覆に影響を与えない2Hz程度以上の高周波成分を除いた上で、転覆方向に片振幅の最大値が加わる状態を考慮したものである。また最近では、実態により即した転覆限界風速を評価するために、式(1)の代わりに左右振動加速度の実測値を考慮した評価方法も提案されている⁷⁾。

しかし、転覆限界風速の評価に用いるべき左右振動加速度と通常の車両走行時に測定される左右振動加速度とは次章で述べるような相違があると考えられるが、その相違が転覆限界風速評価に及ぼす影響についてはこれまでほとんど議論されてこなかった。そこで本報では、縮尺模型試験やシミュレーションによりこれらの影響を詳細に確認するとともに、軌道の通り変位から左右振動加速度を比較的簡易に推定する方法を検討したので報告する。なお、本報は文献8の要部抜粋である。詳細については文献8を参照されたい。

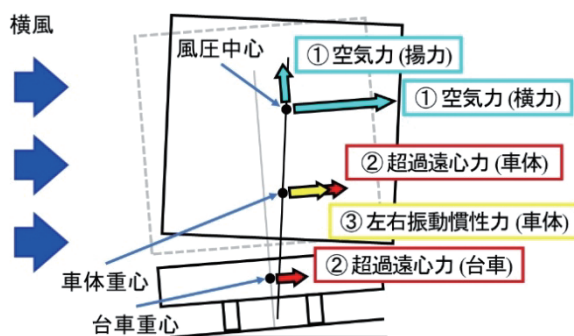


図1 総研詳細式で考慮する作用力

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

** 研究開発推進部

2. 左右振動加速度の相違

総研詳細式の計算モデルで考慮する左右振動加速度（図1）と実車で測定された左右振動加速度には、以下の相違があると考えられる。

まず、左右振動加速度が生じる位置の相違である。総研詳細式では、左右振動慣性力が作用する点を車体の重心位置と定義しているのに対して、実車の走行試験では、車体床面位置で左右振動加速度を測定している。一般的な車両の車体重心位置は、車体床面よりも若干高い位置にある。このため、車体の運動にロール運動が含まれる場合は、車体重心位置での左右振動加速度と車体床面で測定された左右振動加速度とでは相違があると考えられる。

次に、左右振動加速度が作用する向きの相違である。総研詳細式では、軌道面と平行な向きに左右振動慣性力が作用すると定義している。一方、実車の走行試験では、車体床面に設置したひずみゲージ式の加速度計で左右振動加速度を測定することが多い。そのため、車体がロール運動した場合、そのロール角分だけ回転した向きの左右振動加速度を測定することになるとともに、重力加速度成分が重畳する。よって、実際に車体重心位置に生じる左右振動加速度と実車の走行試験で得られる左右振動加速度とでは相違があると考えられる。

最後に、左右振動加速度の発生状況の相違である。総研詳細式で転覆限界風速を求める際は、強風により車体の変位し、左右動・上下動ストップに当たった状態を考慮しているのに対し、実車の走行試験は、運転規制が発令されるような強風下で実施されることは無いため、ストップ当たりはほとんど生じていないと考えられる。よって、総研詳細式で考慮すべき転覆直前に発生する左右振動加速度と実車の走行試験で測定される左右振動加速度とでは相違があると考えられる。

以上の相違は、車両走行中のロール角はそれほど大きくなならないため左右振動加速度に与える影響は小さいと考えられることや、強風下での走行試験が困難なことから、これまで長年検討されてこなかった。そこで、実車で測定された左右振動加速度と総研詳細式の計算モデルで定義している左右振動加速度の相違の影響を明らかにするため、強風時の転覆現象まで再現できる縮尺模型を用いた風洞試験を行った。

3. 風洞における車両模型左右加振試験

本章では、縮尺 1/10 車両模型を用いて風洞内で左右加振試験を実施し、実車の走行試験と同じ無風条件・測定方法から得られる車体床面の左右振動加速度の最大値と、強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度（総研詳細式の計算モデル通り）の最大値との比較を行った。

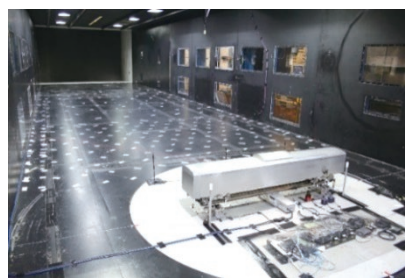


図2 風洞試験風景

また、それら左右振動加速度と風上側輪重との相関を調査した。なお本章では、これ以降、実車の走行試験と同じ無風条件・測定方法から得られる車体床面の左右振動加速度を「左右振動加速度 A（無風，床面）」、強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度（総研詳細式の計算モデル通り）を「左右振動加速度 B（強風，重心）」と表記する。以下に、実験の詳細および結果を示す。

3.1 風洞設備および車両模型設置位置

風洞試験風景を図2に示す。風洞試験は、鉄道総研の大型低騒音風洞の密閉型測定部で実施した。試験では、縮尺 1/10 車両模型および振動台を、密閉型測定部の床面に備わるターンテーブル上に設置した。車両模型は、風洞の風が車体側面に垂直に当たるように設置した。

3.2 車両模型および振動台

車両模型は、通勤車両をモデルとした縮尺 1/10 の模型 1 両である。車体外形は 103 系車両をモデルとし、台車は近年のボルスタレス台車をモデルとした。なお、台車のばね系や車体の大変位を抑制するストップも忠実に再現し、外力に対する車体の変位が実車と相似になるように、ばね定数等を設定した。具体的には、1 車両の質量が約 25ton の通勤車両を想定し、1 車両の模型質量をその $1/10^3$ 倍である約 25kg とした。また、軸ばね、まくらばね定数は、一般的なボルスタレス台車の諸元値を想定し、その $1/10^2$ 倍に近い値のコイルばねを選定した。結果として、車両模型に作用する左右振動加速度は実車と同じ、車両模型の固有振動数は実車の $10^{0.5} \div 3.16$ 倍、風洞での風速は実車が受ける風速の $1/10^{0.5} \div 0.316$ 倍となる。なお、本章において、風洞試験に関する風速や周波数等の数値は、特に断らない限り模型寸法での値とする。

上記車両模型を加振させるための振動台を図3に示す。振動台にはレールを模擬した角材が取り付けられており、車両模型の各車輪は、この模擬レールの上に乗るようになっている。なお、後述するように、各車輪が乗る模擬レール底部に、輪重を測定するための小型ロードセルを設置した。振動台は、単軸ロボットにより、任意

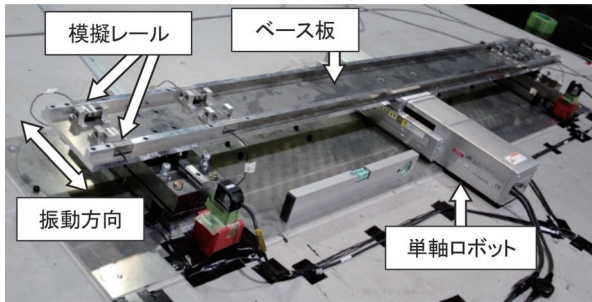


図3 振動台

の波形で加振することができる。試験では、次節に示す通り、正弦波で加振した。

3.3 試験風速および加振条件

試験風速は、無風条件 (0m/s) と強風条件 (11m/s と 12m/s (実車相当 34.8m/s と 37.9m/s)) を設定した。振動台の加振波形は正弦波 20 波とし、振幅は 1.5mm とした。なお、加振試験では、車両模型の前台車と後台車が同位相で加振される。これは、実車では、車両の台車中心間距離とちょうど一致する波長の通り変位が存在する軌道上を走行しているのと似た状況と考えられる。そこで、加振周波数については、その軌道上を実車が速度 10km/h から 95km/h まで 5km/h 刻みで走行していることを想定して、0.6Hz から 6.0Hz まで (実車相当 0.2Hz から 1.9Hz まで) 約 0.3Hz 刻みで設定した。

3.4 測定内容および解析方法

図4に、測定内容を示す。まず、車両模型の床面に、実車の走行試験と同様、ひずみゲージ式加速度計を設置し、車体床面の左右振動加速度 α_{y1} を測定した。つぎに、車体重心位置の左右振動加速度 α_{yG} を求める目的で、車両模型内部の上部梁上にも加速度計を設置し、車体上部

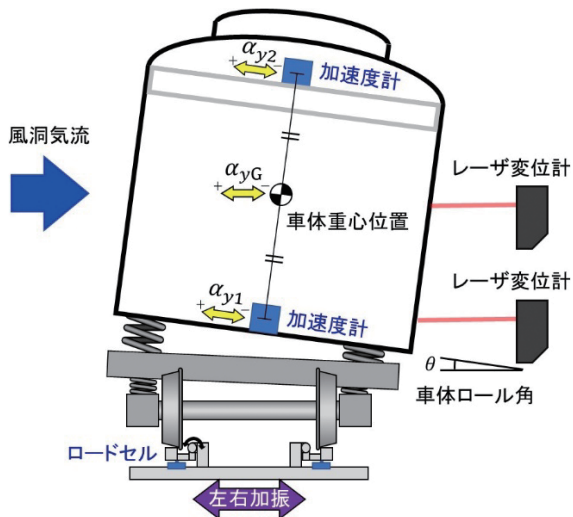


図4 測定内容

の左右振動加速度 α_{y2} を測定した。また、車体側面 2 箇所の左右変位をレーザ変位計で測定し、車体ロール角 θ を求めた。そして、車体重心位置を 2 箇所の加速度計の中間位置と仮定し、左右振動加速度 α_{y1} , α_{y2} および車体ロール角 θ を用いて、車体重心位置に軌道面と平行な向きで作用する左右振動加速度 α_{yG} を求めた。車両模型の風上側輪重は、各車輪が乗る模擬レール底部に小型ロードセルを設置し、それから得られた風上側 4 車輪の平均とした。なお、データ収録のサンプリング周波数は、すべて 100Hz とした。

3.5 試験結果

左右振動加速度 A (無風, 床面) の転覆方向の最大値と、左右振動加速度 B (強風, 重心) の転覆方向の最大値を図5に示す。また、左右振動加速度 A (無風, 床面) および左右振動加速度 B (強風, 重心) と風上側輪重との相関係数を図6に示す。

図5から、左右振動加速度 A (無風, 床面) の最大値 (赤線) は、2.2Hz 近傍に車両の下心ロールの共振によるピークが見られる。また、加振周波数 2.9Hz 以上では、車体のロール運動の中心が徐々に上に移動して上心ロールが顕著となり、左右振動加速度が大きくなる傾向であった。なお、各加振周波数における車両運動 (姿勢) のイメージについては、文献8を参照されたい。一方、左右振動加速度 B (強風, 重心) の最大値 (青線と黒線) は、車体が左右動・上下動ストップに常に当たった状態

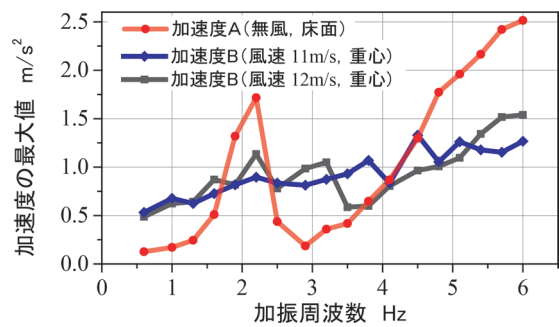


図5 左右振動加速度の転覆方向の最大値

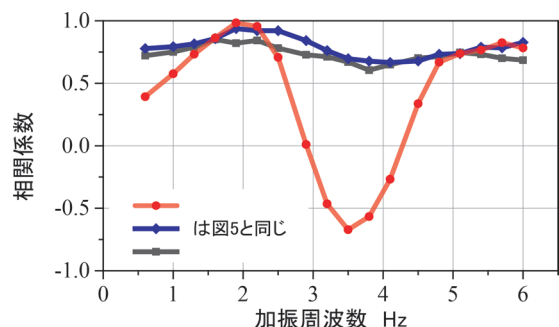


図6 左右振動加速度と風上側輪重との相関係数

となったためロール運動に関するピークは見られず、車両模型後流の乱れ等の影響によるばらつきは大きいものの、加振周波数の増加に伴い、大きくなる傾向であった。また、図6から、左右振動加速度B（強風、重心）と風上側輪重との相関は高く、試験した加振周波数全域で相関係数0.6以上であった。なお、試験風速12m/sの結果が、試験風速11m/sの結果よりも、若干相関係数が低かった。これは、試験風速12m/sでは風上側輪重がゼロになる瞬間があり、その影響で左右振動加速度との相関が下がったものと考えられる。

以上のことから、左右振動加速度A（無風、床面）は、軌道の通り変位の影響を受けた車体のロール運動によるものが支配的であると考えられるのに対して、左右振動加速度B（強風、重心）は、車体が左右動・上下動ストッパに常に当たった状態となるためロール運動は発生せず、軌道の通り変位によるものが支配的であると考えられる。また、風上側輪重との相関について、左右振動加速度B（強風、重心）の方が高いことを考慮すれば、総研詳細式で考慮する左右振動慣性力（左右振動加速度）について、無風条件で実施された実車での走行試験の結果から仮定するよりも、強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度（総研詳細式の計算モデル通り）を用いた方が、より精緻な転覆限界風速を得られる可能性があることがわかった。

4. シミュレーションによる強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度の検討

前章の結果から、総研詳細式で転覆限界風速を算出する際は、無風条件で実施された実車での走行試験の結果から仮定した左右振動加速度を用いるよりも、強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度（総研詳細式の計算モデル通り）を用いた方が、より精緻な値を得られる可能性があることがわかった。しかし、車両が転覆するような強風下で走行試験を実施することは相当難しい。そこで本章では、車両運動シミュレーションにより、強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度を求めるとともに、軌道の通り変位からその左右振動加速度を推定する方法を示す。

4.1 車両モデル

汎用マルチボディ・ダイナミクス解析ソフトウェアSimpackにより車両運動シミュレーションモデルを構築した。図7に車両モデルを示す。車両モデルの寸法や質量、ばね定数等は、一般的な在来線の通勤車両を想定した値とした。台車については、近年のボルスタレス台車（軸箱支持方式は軸はり式）をモデルとし、車体等の大变位を抑制するストッパ当たりも考慮した。車両は、車

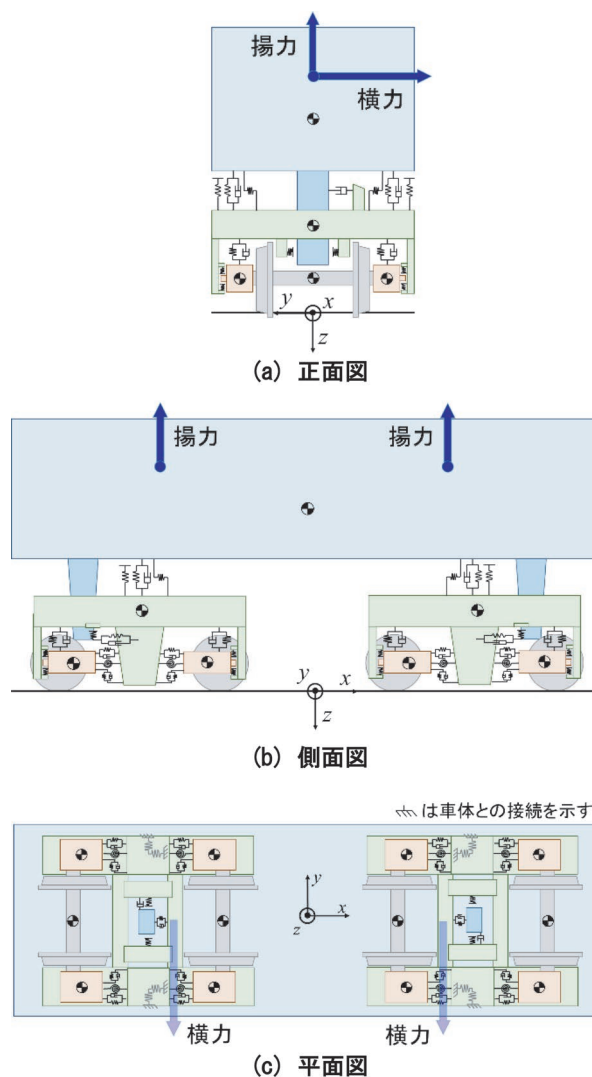


図7 車両モデル

体1個、台車枠2個、軸箱支持装置8個、輪軸4個についてそれぞれ6自由度を有する剛体要素で構成され、各剛体要素はばね・減衰系で結合されたモデルとした。また、横風による横力および揚力（詳細は4.3節）を車体への作用力として与えた。なお、車輪踏面形状は修正円弧踏面、車輪／レール間の摩擦係数は0.3とした。

4.2 軌道条件

作成した軌道モデルの線形は直線で、距離4000mとした。その軌道上の2500~3500mの区間に、通り変位No.1からNo.10までの10条件を設定した。本報では、参考として、図8に通り変位No.1~No.3のみを示す。通り変位No.1~No.10は、実際の軌道変位データから復元した、サンプリング間隔0.25mの波形（復元波長帯域は5~50m）であり、波形の両端で変位0mmとなるように、距離2500mまたは3500m（両端）で0、両端から10m離れた距離2510mまたは3490mで1とな

る1次関数をそれぞれ掛け合わせた。なお、ここで用いた軌道変位データは、整備状態が普通あるいは悪いと評価されたデータである。

4.3 走行速度および空気力条件

シミュレーションでの車両の走行速度は、30、60、90、120km/hとした。空気力は、図7に示した車両モデルにおいて、車体の2箇所 $(x, y, z) = (5\text{m}, 0\text{m}, -2.283\text{m})$, $(-5\text{m}, 0\text{m}, -2.283\text{m})$ に、横力と揚力が作用するようにした。なお、 $z = -2.283\text{m}$ は、レール面上からの風圧中心高さであり、文献6の結果を参考に、在来線の通勤車両を想定して設定した値である。また、車体の2箇所に分けて横力と揚力を作用させたのは、今後の研究においてのモデルの拡張性を考慮したものである。横力および揚力は、車両に過渡応答が発生しないよう、0kNから横力の最大値20kN/1箇所および揚力の最大値13kN/1箇所まで70秒かけて正弦波の半波長形状（位相 $-\pi/2 \sim \pi/2$ ）でゆっくりと立ち上がった後、最大値で作用し続けるようにした。なお、横力および揚力の最大値が作用した際は、車体は2次ばねの上下動ストップや左右動ストップ等と接触し、転覆直前の状態となる。また、車両の走行速度120km/hの場合、横力および揚力が最大値となる70秒後は、直線軌道上に通り変位を設定した2500～3500mの手前である約2333m地点を走行している状態となる。

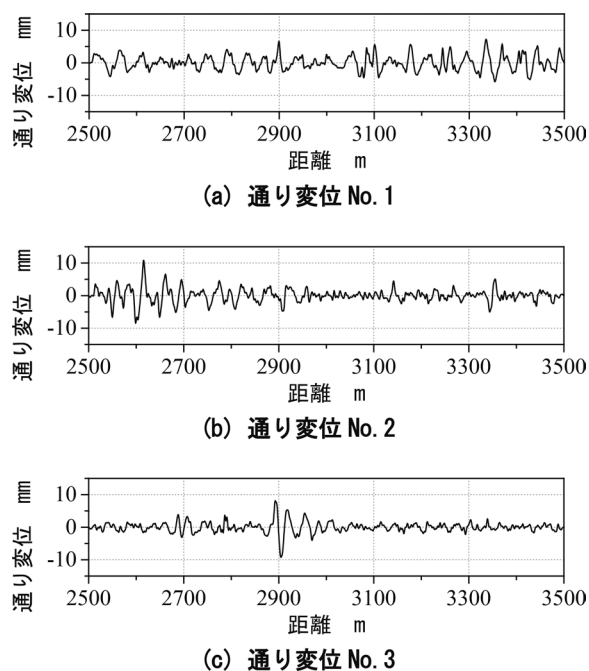


図8 軌道モデル上に設定した通り変位 No.1～No.3

4.4 車体重心位置に生じる左右振動加速度のシミュレーション結果

前節までに示した条件でシミュレーションを行い、強風下において車体重心位置に生じる左右振動加速度を算出した。なお、算出結果はサンプリング周波数50Hzで出力し、正值が転覆方向となるようにした。結果例を図9に示す。図9は、車両が強風下で図8に示した通り変位 No.1～No.3 を走行速度90km/hおよび120km/hで走行した際の車体重心位置に生じる左右振動加速度を示している。算出結果から、走行速度の上昇に伴い、強風下において車体重心位置に生じる左右振動加速度は大きくなった。本章で使用した総延長10km（1km×10条件分）の通り変位のある軌道上を走行させた際の転覆方向の左右振動加速度の最大値は、通り変位 No.2上を速度120km/hで走行した際に発生した 0.57m/s^2 であった。

次に、算出した車体重心位置の左右振動加速度の最大値をまとめた結果を図10に示す。図10から、走行速度の上昇に伴い、左右振動加速度の最大値は2次関数的に大きくなっている。そこで、走行速度120km/hにおける最大値 0.57m/s^2 を通る2次式を図10中に薄い赤線で示した。転覆方向の左右振動加速度の最大値を $\alpha_{yG,\max}$ (m/s^2)、走行速度を v (km/h)とおくと、この薄い赤線の関数は次式となる。

$$\alpha_{yG,\max} = 3.93 \times 10^{-5} \times v^2 \quad (2)$$

図10から、式(2)は左右振動加速度の最大値をほぼ

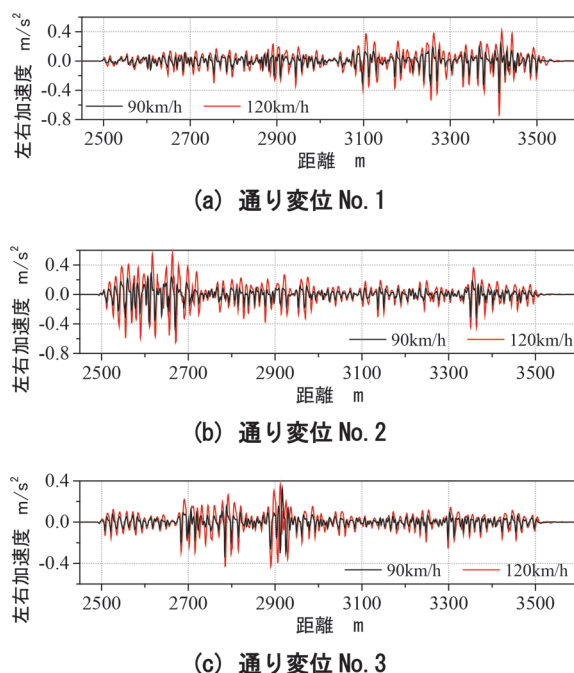


図9 強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度のシミュレーション結果

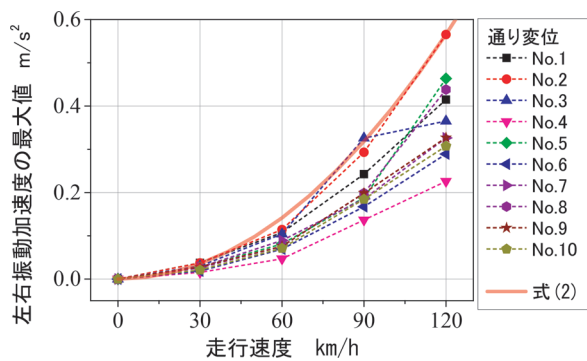


図 10 車体重心位置に生じる左右振動加速度の最大値

包含していることがわかる。以上のことから、本章で仮定した一般的な在来線の通勤車両（ボルスタレス台車）が本章の軌道を走行する場合の転覆限界風速を算出する場合、総研詳細式の左右振動加速度に関する仮定式に、式(2)を用いることで、より精緻な値を得ることができると考えられる。ただし、本章では総延長 10km 分の軌道変位データを用いて、式(2)を仮定した。線区全体の長さに対して、どの程度の長さの軌道変位データを用いれば線区を代表した仮定式になるかは、議論の余地があり、今後の検討事項としたい。

4.5 通り変位から左右振動加速度を推定する方法

前節では、車両運動シミュレーションを用いて、強風下において車体重心位置に生じる左右振動加速度を算出し、左右振動加速度に関する新たな仮定式を導出する方法を提案した。本節では、より簡易な方法として、軌道の通り変位から、車体重心位置に生じる左右振動加速度を推定する方法を検討した。

まず前提として、車両は強風により車体の変位し、左右動・上下動ストoppaに当たった状態を考慮する。この状態では、3章で示したように、車体は、2次ばねによるロール運動等をするのではなく、軌道の通り変位の影響を受け、左右振動が発生すると考えられる。そこでまず、通り変位 No.1～No.10（サンプリング間隔 0.25m）について、本章の車両モデルの台車中心間距離 13.8m に近い 13.75m 離れた 2 点を平均した、2 点平均波形を作成した。これは、前台車と後台車が軌道の通り変位に沿って走行した場合のレール方向の車体中心に生じる左右変位と考えられる。この 2 点平均波形を 2 階微分すれば、車体重心位置に生じる左右振動加速度相当の値を得ることができるが、これを実行すると、車両運動シミュレーションから得られる左右振動加速度よりも相当大きな加速度になる。これは、鉄道車両が軌道上を走行する場合、軌道の通り変位に沿って走行するわけではなく、台車・輪軸の運動によって、ある程度その変位を吸収しながら走行していることが理由と考えられる。

そこで、車両運動シミュレーションから計算した車体重心位置に生じる左右振動加速度（走行速度 120km/h）に含まれる周波数成分を確認した。図 11 に、その周波数解析結果を示す。なお、図 11 は、通り変位 No.1～No.10 を走行速度 120km/h で走行した際の車体重心位置に生じる左右振動加速度 10 波形をそれぞれ周波数解析し、得られた振幅の結果を平均化したものである。また、用いた通り変位の復元波長帯域 5～50m において、走行速度 120km/h 時に車両に励起されると考えられる周波数領域（0.67～6.7Hz）も記載した。図 11 から、1～4Hz の周波数成分が左右振動加速度の主成分であることがわかる。そこで、車両モデルが速度 120km/h で走行しているとして、通り変位 No.1～No.10 の 2 点平均波形を 4Hz のローパスフィルタ（FFT フィルタ）に通した。そして、4Hz のローパスフィルタを通した 2 点平均波形を 2 階微分することで、車体中心位置に生じる左右振動加速度を推定することとした。

得られた結果を図 12 に示す。図 12 は、前述した軌道の通り変位から推定した左右振動加速度（赤線）と、図 9 に示した、車両が強風下で走行速度 120km/h で走行した際の車体重心位置に生じる左右振動加速度（黒線）である。図 12 から、左右振動加速度の出現傾向はほぼ一致しており、かつ、軌道の通り変位から推定した左右振動加速度（赤線）の方が大きい加速度となっていた。このことから、本節で示した軌道の通り変位を用いて強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度を推定する方法は、比較的精度よく推定できる可能性があり、かつ、車両の転覆問題を考えた際に安全側の推定となっていると考えられる。ただし、本報で用いた軌道総延長 10km において、本節で推定した左右振動加速度（赤線）よりも、車両運動シミュレーションから求めた左右振動加速度（黒線）の方が大きい箇所も見られた。これについては、フィルタの変更等で改善される余地があると考えられるものの、本手法の目的は、総研詳細式の左右振動加速度に関する仮定式の導出にある。そのため、走行中に発生する可能性のある左右振動加速度の最大値を、

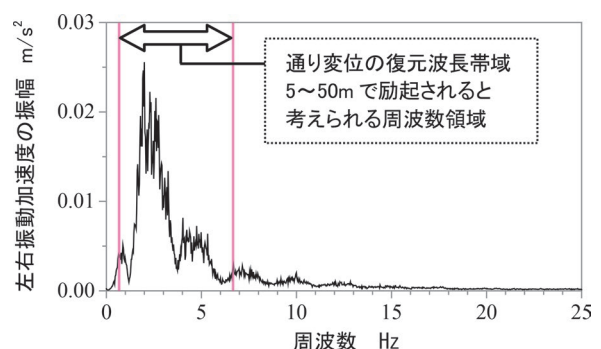
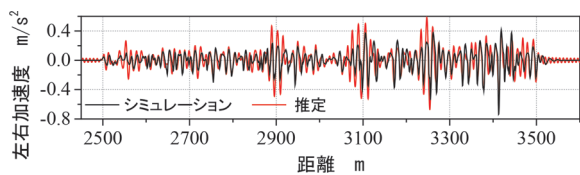
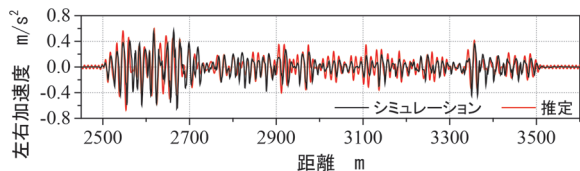


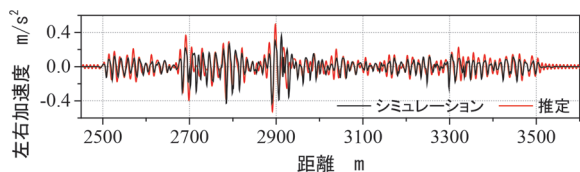
図 11 左右振動加速度の周波数解析結果



(a) 通り変位 No. 1



(b) 通り変位 No. 2



(c) 通り変位 No. 3

図 12 推定した左右振動加速度の比較

ある程度の精度で推定できれば良いと考える。ただし、今後より多くの軌道変位データを用いて、本手法の精度検証を実施する予定である。

最後に、本節で提案した手法（4Hzのローパスフィルタを通した2点平均波形を2階微分）から得られた、車体重心位置に生じる左右振動加速度の推定最大値（通り変位 No.1～No.10を対象）は、走行速度 120km/h で 0.61m/s^2 であった。これから、式(2)と同様に2次式を仮定すると、左右振動加速度の仮定式は、次式となる。

$$\alpha_{yG,\max} = 4.24 \times 10^{-5} \times v^2 \quad (3)$$

なお、本節で提案した手法は、一般的な在来線の通勤車両（ボルスタレス台車、修正円弧踏面）を対象としたものであり、台車形式や台車寸法、車輪踏面形状等が大きく異なる場合や、軌道の通り変位の出現傾向や大きさ（本報では最大 10mm 程度）が異なる場合は、フィルタの値等が異なる可能性があることに注意が必要である。

5. 転覆限界風速の算出結果の例

本章では、現在の総研詳細式における左右振動加速度の仮定式（営業最高速度での走行時に 0.98m/s^2 となるような走行速度に関する1次式、式(1)）、および前章で提案した新たな手法による仮定式（式(2)、式(3)）を用いた場合の転覆限界風速の算出結果の例を示す。さらに参考として、文献7に示された実車での左右振動加速度実測データに基づく仮定式（式(1)'）を用いた場合も併

せて示す。

$$\alpha_y = 0.5 \times v/v_{\max} \quad (1)'$$

式(1)'は式(1)と同様に走行速度に関する1次式であるが、最大値が式(1)とは異なる。これらの左右振動加速度と走行速度との関係を図13に示す。なお、実測データに基づく式(1)および軌道の通り変位に基づく式(2)、式(3)については、軌道の状態や車両の条件によって係数が異なる式となる可能性があることに注意が必要である。

計算に用いた車両諸元は、近年の比較的軽量の通勤車両を参考にした想定値とした。空気力係数は、文献6の結果を準用することとし、車両形状は通勤車両である103系の先頭車、線路構造物は複線高架橋（桁高3.5m）と盛土を選定した。走行に関する条件は、直線、走行速度0～120km/h（10km/h刻み）とした。

各計算条件における転覆限界風速の計算結果を図14に示す。図14は、横軸に車両の走行速度、縦軸に転覆限界風速を示しており、縦軸の1目盛りは2m/sとなっている。なお、計算に用いた車両諸元が想定値であることから、転覆限界風速の数値に具体的な意味はないため、縦軸の数値の記載を省略した。黒線は現在の総研詳細式における左右振動加速度の仮定式（式(1)）、灰色の線は実測データに基づいた仮定式（式(1)'）、赤線および青線は前章で提案した新たな仮定式である式(2)および式(3)を用いた結果である。図14から、実態を最も正確に反映していると考えられる仮定式(2)を用いた場合の転覆限界風速を基準として考えると、仮定式(3)を用いた場合にはそれとほぼ同等の評価が可能であり、現在の仮定式(1)を用いた場合よりも、最大で2m/s程度、高く評価されることがわかった。

以上より、総研詳細式により転覆限界風速を計算する際に使用（仮定）する車体左右振動加速度は、目的や精度に応じて適宜選択することが考えられる。例えば、一般的な評価においては、現在の仮定式（式(1)）は安全側の仮定（転覆限界風速を厳しく見積もる評価）となっ

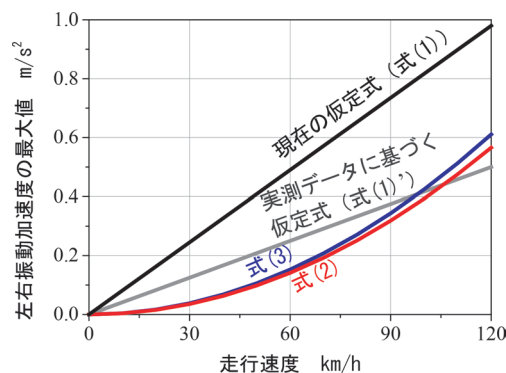
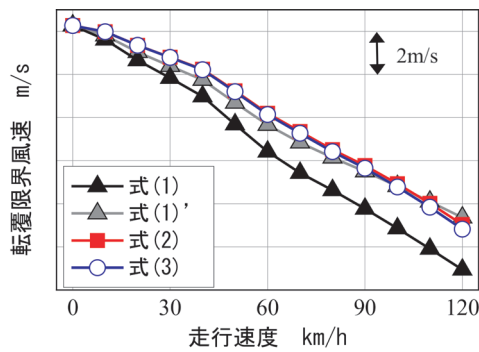
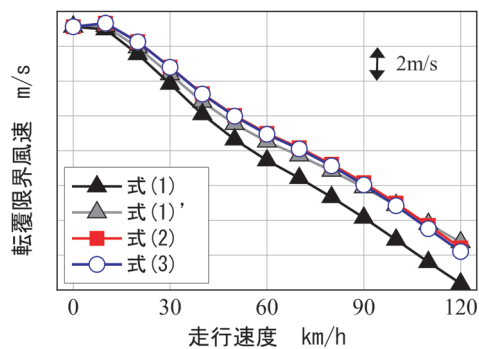


図 13 左右振動加速度に関する仮定式



(a) 通勤車両（先頭車），複線高架橋（桁高 3.5m）



(b) 通勤車両（先頭車），盛土

図 14 転覆限界風速の計算結果

ていることから、引き続きこのまま使用することが可能であると考えられる。一方で、実態により即した評価を行う場合、あるいは運転規制の検討等において推定精度が求められる場合には、左右振動加速度の実測データに基づく仮定式（式(1)）、または軌道の通り変位に基づく仮定式（式(2)、式(3)）を使用することが考えられる。これらの仮定式の考え方や特徴を表1にまとめて示す。

表 1 左右振動加速度に関する仮定式の考え方・特徴

式	考え方・特徴
(1)	最高速度で 0.98m/s^2 となる1次式 ○簡易かつ安全側の仮定である △転覆限界風速が低く評価される傾向（安全側の仮定のため）
(1)'	左右振動加速度の実測結果に基づく1次式 ○加速度測定は比較的簡易である △ロール運動に起因する成分が加速度データに重畳
(2)	強風時を想定した車両運動シミュレーション結果に基づく2次式 ○実態を最も正確に反映していると考えられる △シミュレーションに手間とコストがかかる
(3)	軌道の通り変位データに基づく2次式 (ローパスフィルタを通した2点平均波形を2階微分) ○計算（加速度推定）は比較的簡易である △車両・軌道条件によってはフィルタ特性の再考が必要

6. まとめ

本報では、鉄道車両の転覆限界風速を評価する総研詳細式で考慮される作用力のひとつである左右振動慣性力に関する車体の左右振動加速度について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 縮尺 1/10 車両模型を用いて風洞内で左右加振試験を実施し、実車の走行試験と同じ無風条件・測定方法から得られる車体床面の左右振動加速度と、強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度（総研詳細式の計算モデル通り）を測定した結果、後者の方が風上側輪重との相関が高かった。
- (2) 上記の結果を受けて、車両運動シミュレーションにより、強風下で車体重心位置に生じる左右振動加速度を求めた結果、車体重心位置の左右振動加速度は走行速度の上昇に伴い2次関数的に大きくなった。
- (3) シミュレーションよりも簡易な方法として、軌道の通り変位から車体重心位置に生じる左右振動加速度を推定する方法を検討した。具体的には、ローパスフィルタを通した2点平均波形を2階微分することで、左右振動加速度を推定した。
- (4) 左右振動加速度の仮定式の違いによる転覆限界風速の差を試算した結果、提案した新たな手法による仮定式を用いた場合の転覆限界風速は、現在の仮定式を用いた場合よりも最大で約2m/s高かった。

なお、本報は一般的な在来線の通勤車両（ボルスタレス台車、修正円弧踏面）を対象としたものであり、台車形式や台車寸法、車輪踏面形状等が異なる場合や、軌道の通り変位の出現傾向や大きさが異なる場合は、結果が異なる可能性があることに注意が必要である。また、実車における左右振動加速度の最近における実測例⁷⁾を考慮すると、現在の総研詳細式における左右振動加速度の仮定式（営業最高速度での走行時に 0.98m/s^2 となるような走行速度に関する1次式）は安全側の評価になっていると考えられる。よって、本報の結果は、現在の風速規制値等に利用されている転覆限界風速評価結果の再考を求めるものではなく、軌道の整備状態に合わせたより精緻な転覆限界風速を改めて求める際に利用すべきものとする。

文 献

- 1) 国枝正春：鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析，鉄道技術研究報告，No.793，1972
- 2) 日比野有，石田弘明：車両の転覆限界風速に関する静的解析法，鉄道総研報告，Vol.17，No.4，pp.39-44，2003
- 3) 航空・鉄道事故調査委員会：東日本旅客鉄道株式会社羽越

- 線砂越駅～北余目駅間 列車脱線事故, 鉄道事故調査報告書, RA2008-4, 2008
- 4) 南雲洋介, 一木道弘, 三須弥生: 総研詳細式に基づく風規制手法における列車運行の安全性評価, JR EAST Technical Review, No.66, pp.25-33, 2021
- 5) 鈴木実, 種本勝二, 斎藤寛之, 今井俊昭: 自然風を模擬した車両に働く空気力に関する風洞試験法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, pp.47-52, 2003
- 6) 種本勝二, 鈴木実, 斎藤寛之, 井門敦志: 在来線車両の空気力係数に関する風洞試験結果, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.47-50, 2013
- 7) 日比野有, 金元啓幸: 左右振動加速度の実測値を考慮した転覆限界風速評価, 鉄道総研報告, Vol.33, No.3, pp.11-16, 2019
- 8) 金元啓幸, 日比野有: 鉄道車両の横風に対する安全性評価に用いる車体左右振動加速度の推定法, 日本機械学会論文集, Vol.89, No.918, DOI: 10.1299/transjsme.22-00279, 2023

新幹線列車の通過時の軌道面流れを再現した 地上側敷設物の飛散に関する風洞試験

井上 達哉* 中野 高志* 井門 敦志**

Wind Tunnel Test to Reproduce Track Surfaces Flow
When Shinkansen Trains Pass for Ballast and Ballast Screen Scattering

Tatsuya INOUE Takashi NAKANO Atsushi IDO

Air flow is induced on track surfaces when Shinkansen trains pass. To prevent ballast scattering due to the air flow, measures such as ballast screens are taken on track surfaces. However, considering the extension of Shinkansen lines and speed up in the future, it is necessary to improve current measures to prevent ballast scattering and to develop new ballast screens. Therefore, in this study, we developed the wind tunnel test method that can be used for research on measures to prevent ballast scattering and studied the scattering phenomenon of objects.

キーワード：風洞試験，新幹線，軌道面流れ，バラスト，バラストスクリーン，飛散

1. はじめに

新幹線列車が通過する際の軌道面付近には、車両の通過に伴う流れ（以下、軌道面流れとよぶ）が誘起される¹⁾²⁾。この流れによりバラストが飛散した場合、飛散したバラストが車両の床下機器に当たることで、動作不良や損傷を招く危険性がある。また、駅のホームや沿線にバラストが飛散した場合には、人に危害を加える危険性もある。そこでバラストが飛散しないように、軌道面には、バラストを覆うバラストスクリーンの敷設や、バラストを固定する樹脂の散布といった、バラスト飛散防止対策が実施されている³⁾。バラストスクリーンは、それ自体が飛散しないように、スクリーン同士がベルトや樹脂ジョイントで締結され、さらに、レール外側の道床に埋め込まれたアンカーに固定される。現状では、これらの対策により、バラストやバラストスクリーン（以降、総称して地上側敷設物とよぶ）が飛散することはない。しかし、今後の新幹線の延伸等を考慮すると、バラスト飛散対策にかかる保守コストの低減や飛散防止性能の向上など、対策方法の改良や新たな開発が求められる。現状では、これらの改良や開発には現地試験が有効であるが、現実には現地試験における地上側敷設物を飛散させる危険性や、実施するための費用を考慮すると、現地試験を活用しての研究開発は困難である。そこで、バラスト飛散対策方法の改良や開発を目的として、鉄道総研所有の大型低騒音風洞による風洞試験方法を開発し、風洞

試験により地上側敷設物の飛散現象に関する研究を行った⁴⁾⁵⁾ので、その内容を報告する。

2. 風洞試験方法の開発

2.1 使用風洞とバラスト軌道模型の配置

本研究は、大型低騒音風洞の開放型測定部で実施した。図1に風洞と軌道模型の配置を示す。前方胴開口部の大きさは、幅5.0m×高さ3.0mである。バラスト軌道模型は、模型支持台車（幅5.5m×長さ7.0m）上に配置した。バラスト軌道模型下流側には、地上側敷設物が飛散しても風路に入らないように飛散防止ネットを配置した。前方胴内には風洞制御用のピトー管が設置されてお

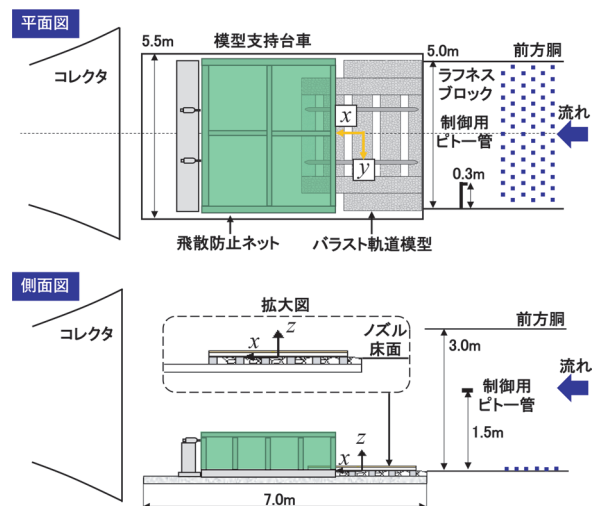


図1 風洞と軌道模型の配置

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

** 研究開発推進部 風洞技術センター

り、これにより算出した風速を風洞試験風速とした。

2.2 バラスト軌道模型

図2にバラスト軌道模型を示す。軌道模型のバラストには、新幹線軌道で実際に使用されているバラストを使用した。一方で、軌道面流れに影響を及ぼすレールやまくらぎは、新幹線軌道で使用されている形状を再現した実寸大の模型とした。なお、レールとまくらぎ間の締結装置は、軌道面流れに大きな影響を与えないと判断して省略した。本実験では、模型支持台車の長さの制限を考慮し、軌道長さを2.7mとし、流れ方向のレールの中央部（上流から3つめの区間：図2参照）を測定区間とした。測定区間のバラストの深さは、現実の軌道で実施しているバラスト飛散防止のための中すかし（レール間の軌道面からバラストの一部を取り除く）状態でも、バラストが2~3層以上確保できる深さ（195mm）とした。バラスト軌道模型の上流端は前方胴下流端とあわせ、バラスト面高さは、前方胴の底面高さとも一致させた。

2.3 バラスト軌道面の風速分布の再現

風洞試験では、前方胴の床面にラフネスブロックを設

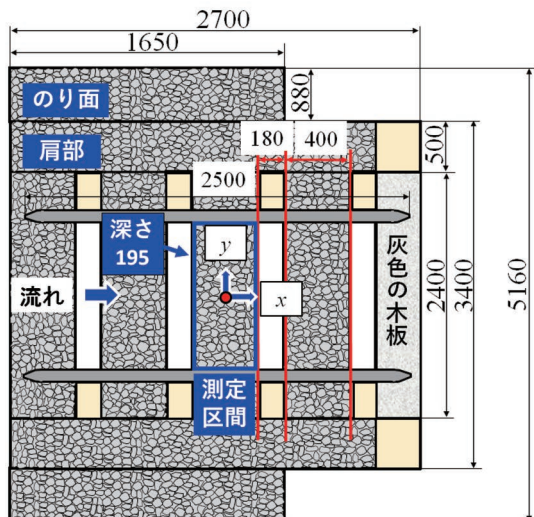
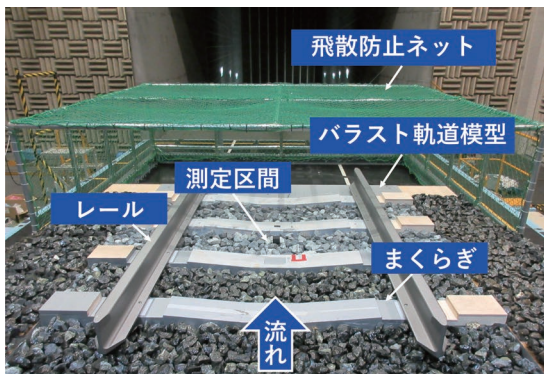


図2 バラスト軌道模型（単位：mm）

置し、そのブロックの大きさ、数、配置を調整することによって、バラスト軌道模型の測定区間に現車（新幹線16両編成、列車速度280km/h）通過時の軌道面の風速分布を再現した。

図3にバラスト軌道面の風速分布の測定状況を示す。レール模型上にピトー管を、測定区間のバラスト上に、くし型総圧管を設置する。原点は軌道面の流れ方向、まくらぎ方向の中央である（図2参照）。くし型総圧管の先端が $x=0, y=0$ となるように設置した。なお、くし型総圧管の管数は合計19本で、軌道面上7.5mmの位置から10mmピッチで187.5mmまで測定した。くし型総圧管の総圧およびピトー管の静圧は、多点圧力計（Digital Sensor Array：DSA-3217, Scani Valve Corp.）で測定した。各々のくし型総圧管高さでの風速は、各々の総圧と、ピトー管の静圧との差圧、すなわち動圧より算出した。図4に、風洞試験および現地試験¹⁾での軌道面の風速分布を示す。ラフネスブロックの配置を調整することで、測定区間の風速分布を現地試験結果とほぼ一致させることができた。また、この時の風洞試験風速（前方胴に設置した制御用ピトー管の風速）は、50m/sであった。なお、ここで再現している風速分布は、列車の中間部が通過している際の時間平均風速であり、乱れ強さや局所的な流れは再現されていない。

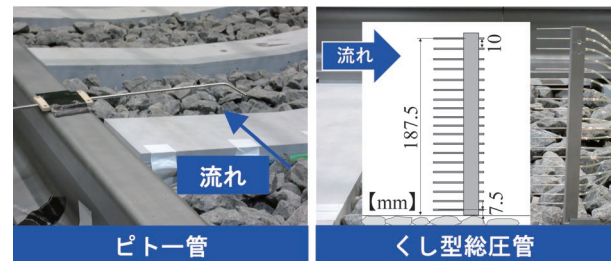


図3 軌道面の風速分布測定

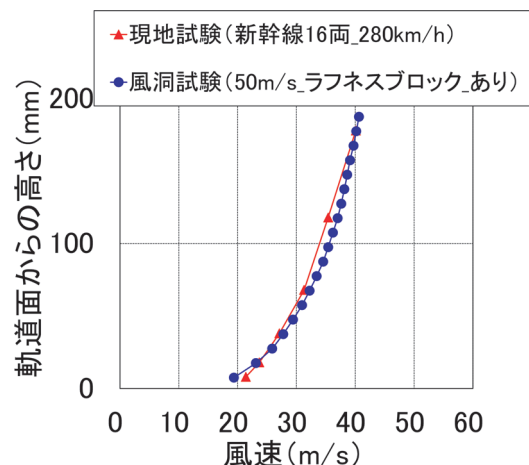


図4 軌道面の平均風速分布

2.4 バラスト振動の再現

現地試験結果を参考に、車輪通過に起因する振幅の大きい振動を風洞試験で模擬することとした。周波数は、列車速度270km/h時を想定し30Hzとした。また振動波形は、より厳しい条件として連続的な正弦波とした。振動加速度についても、現地試験結果を参考に、約 5m/s^2 とした。ただし、実際に車両が通過する場合には、車輪通過時以外でも振動が発生し、軌道の広い範囲が振動するが、風洞試験に用いる軌道模型全体を振動させることは困難であり、実際の軌道上の振動を完全に模擬できていないことに注意されたい。

図5に風洞試験で用いた、軌道模型の一部のバラストに上下方向の振動を与える振動装置（幅0.3m×長さ0.3m×高さ0.1m）を示す。この振動装置を軌道模型内に組み込んだ後、バラストを埋め戻し、振動装置の上に載せたバラストに振動を与えた状態で送風を行い、バラストの振動が飛散に与える影響を調べた。

2.5 風洞試験風速と列車速度

図4に示したように軌道模型上に、現実の列車（走行速度：280km/h）が通過した際の軌道面の風速分布を再現した場合、風洞試験風速は50m/sであった。列車速度に対する試験風速の割合が一定であるとすると、風洞試験風速を1.56倍（ $280/(50 \times 3.6)$ ）することで、通過する列車の速度に換算できる。

3. バラストに関する風洞試験

3.1 バラスト模型

前述したように、新幹線には、バラストが飛散しないように、バラストを固定する樹脂の散布やバラストスクリーン等の敷設等の対策が実施されているが、全ての区間において行われているわけではない。そのため、対策の無い区間を対象として、バラストの飛散に関する風洞試験を実施した。

図6に、風洞試験で使用した4種類のバラスト模型と寸法を示す。本試験に用いた4種類のバラスト模型は、①形状が極端でなく、一般的によく見られる「標準模型」②フラットな形状で、軽量であり飛散の可能性が大きいと考えられる「扁平模型」③基本的な形状として



図5 バラスト振動装置（単位：mm）

一辺50mmの「立方体模型」④立方体模型の比較対象として、立方体模型の下の角部を斜めにカットし、流れを下部に誘導（飛散につながる）する形状の「立方体切欠模型」である。このうち現実のバラストを模擬した①と②は、3Dプリンタにより形状を再現した。

3.2 バラストの空気力測定試験

図7に、バラストの空気力測定時の様子を示す。空気力を測定するバラスト用天秤（日章電機社製3分力天秤：LMC-31480）は、水平面の原点（図2参照）に設置した。模型には6分力が作用するが、本試験ではバラスト飛散に大きな影響を及ぼすと考えられる、抗力 D （N）、揚力 L （N）、ピッチングモーメント M （Nm）（以下、単にモーメントとよぶ）の3分力の時間平均値を、バラスト用天秤により測定した。模型の設置高さは、図8に示すように、まくらぎ上面とバラスト模型の上面をあわせた場合の高さ0mm、バラストスクリーン（厚さ20mm）の敷設を想定した場合の高さ-20mm、中すかしを模擬した場合の高さ-50mmで試験を実施した。風洞試験風速は、0、14、28、42、50m/s（列車速度換算：0、78.4、156.8、235.2、280.0km/h相当）の5速度段、測定時間は20sである。

図9に、高さ0mm時に4種類の各模型に加わる空気力を示す。バラスト形状に関わらず、現実のバラストの自重（標準：2.5N、扁平：1.8N）と比較して、空気力は非常に小さな値となる。さらに低い高さに設置した場

	立体図 (3D-View)	側面図(Side-View)
①標準模型		
②扁平模型		
③立方体模型		
④立方体切欠模型		

図6 バラスト模型とその種類（単位：mm）



図7 バラストの空気力測定時の風景

合は、さらに小さい（ほとんどゼロ）値となり、バラストがまくらぎ上面より低い位置にある場合には、バラストにはほぼ空気力は加わらないことが分かった。

3.3 バラストの飛散可能性の検討

軌道面より低い位置（バラスト高さ0mm以下）にバラストが存在する際に、バラストが飛散する可能性を検討する。バラストの飛散可能性の評価には、バラストが回転するかどうかを指標として、バラストの下流側・下端回りのモーメントを求めた（図10の図中、 M を「黄色」、 M_+ を「赤」、 M_- を「青」で示す）。ここで l (m) は、バラスト模型中心から模型下流端までの距離、 m (kg) は実物バラストの質量を示す。 $M_+ (=M+Ll)$ は軌道面流れによるモーメント、 $M_- (=mgl)$ は自重によるモーメントである。現実には、バラストが回転するかどうかは、空気力によるモーメントの最大値や作用時間に依存するが、ここでは、空気力の時間平均値により、 M_+ を求めて、 M_+ の絶対値が M_- の絶対値より大きければ、軌道面流れによりバラストは回転し始め、 M_- の絶対値が M_+ の絶対値より大きければ、バラストは回転しない、と考えることにする。本実験では、空気力の時間平均値で評価を行ったが、瞬間的に大きな空気力が作用した場合、バラストが回転する可能性があることに留意する必要がある。

図10に、バラスト高さ0、-20、-50mm、風洞試験風速50m/s（列車速度換算280km/h）の条件での、標準模型、扁平模型に加わるモーメント（ M_+ と M_- ）の絶対値を示す。両模型とも、全てのバラスト高さで、 M_+

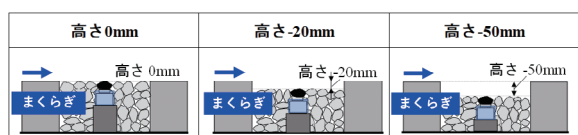


図8 バラスト模型とその種類

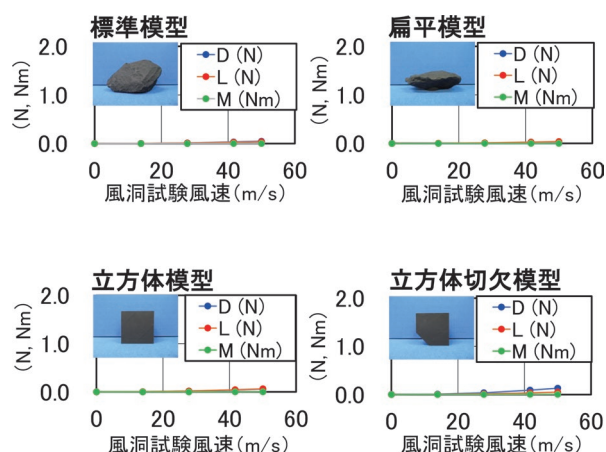


図9 バラストの空気力測定（バラスト高さ0mm）

の絶対値が M_- の絶対値より十分小さくなり、本試験で用いたバラストでは、軌道面流れによりバラストが回転する可能性は、ほとんどないと考えられる。このことより、新幹線が280km/hで走行する現実の軌道においても、バラスト高さが0mm以下（バラスト上面が、まくらぎ上面より低い）であれば、バラストが飛散する可能性は非常に小さいと推定される。

3.4 バラストの挙動確認試験

図11に、バラストを飛散させるために、バラスト高さ+40mmで、風洞試験風速を最大72m/s（列車速度：404km/h相当）まで上げた際の、バラスト飛散時の挙動を高速カメラで撮影した画像を示す。バラスト飛散時の挙動は、①風速が上がると、一部の不安定なバラストは揺れはじめる。②さらに風速を上げた場合、必ずしも揺れているバラストが転がるわけではないが、バラストが軌道面上を転がり始める。③軌道面上を転がったバラストは、下流へ流されて途中で止まる場合と、下流へ流される途中で風に巻き上げられ、空中へ飛散する場合があることがわかった。また、バラストが空気をはらみ、浮き上がる際の挙動も確認することができた。バラストの形状は千差万別であるが、今後、バラスト飛散防止対策を検討する際に、本試験方法を用いて、バラスト飛散・浮き上がり時の挙動を観察できることは、非常に有効であると考えられる。

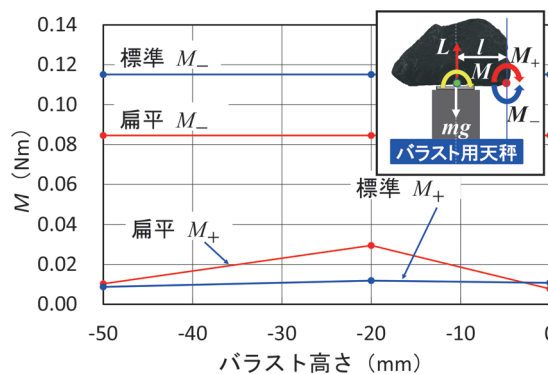


図10 バラストの飛散可能性の検討

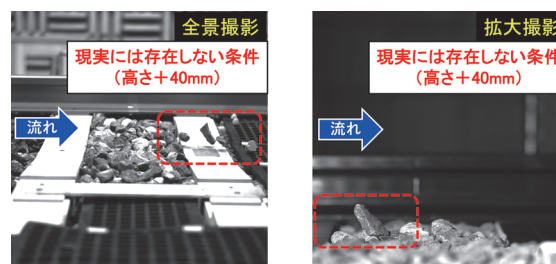


図11 バラストの挙動確認試験（バラスト高さ+40mm）

3.5 バラストの振動が飛散に与える影響

バラスト上面をまくらぎ上面とあわせ（バラスト高さ0mm）、バラスト振動装置（図5参照）を使用してバラストに振動を加え、風洞試験風速72.2m/s（列車速度：405km/h相当）で試験を行ったが、バラストは飛散しなかった。このことより、今回の風洞試験では、バラストに振動を与えることでバラストが飛散しやすくなることは、確認できなかった。

4. バラストスクリーンに関する風洞試験

4.1 バラストスクリーンの構成と固定方法

図12に、バラストスクリーン（以降、単にスクリーンとよぶ）の構成と固定方法を示す。スクリーンは軌道間に設置される軌道内部材、レールより外側に設置される軌道外部材で構成される。また軌道内部材と軌道外部材は、ジョイントで締結する。軌道内部材は、軌間中心付近に設置される1個の中心パーツとこれに隣接する2つの外パーツの合計3個で構成され、外パーツと中心パーツはベルトで締結する。まくらぎを挟んで線路方向に隣接する軌道内部材は、まくらぎ下を通した固定用ロープで締結する（今回の風洞試験では、固定用ロープは設置していない）。この様に、スクリーンは軌道面に強固に固定され、飛散する可能性はない。しかし、固定用ロープを設置した場合、バラスト点検時などに、より多くの労力が必要となる。そこで本研究では、省力化を目的とし、固定用ロープを省略した場合に、スクリーンが飛散する可能性を風洞試験により検討した。

4.2 バラストスクリーンの空気力測定試験

新幹線列車が通過する際の軌道面の風速は、車体中心付近の風速が最も大きいことが知られている²⁾。このこ

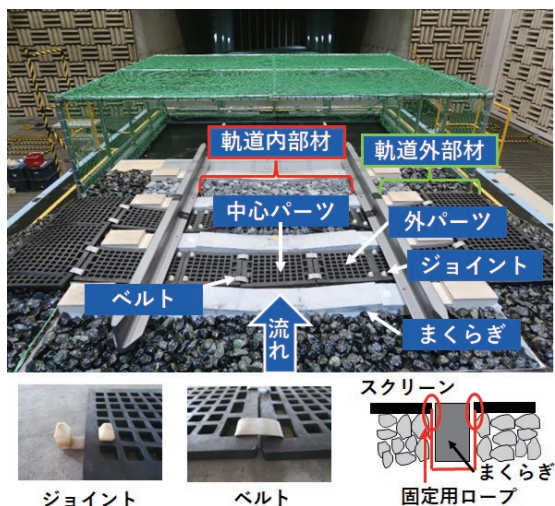


図12 バラストスクリーンの構成と固定方法

とから、スクリーンに加わる空気力は中心パーツが最も大きいと判断し、現実のスクリーンと同じ形状の模型を用いて、中心パーツに働く空気力をスクリーン用天秤（日章電機社製6分力天秤：LMC-61481）により測定した。なお空気力測定時には、外パーツに加わる空気力が測定結果に影響しないよう、中心パーツと連結するベルトは外している。図13に、スクリーンの設置状態を示す。スクリーンの厚さは20mmである。スクリーン試験時のまくらぎ上面からバラスト上面までの高さは、（0mm、-20mm、-50mm）とする。スクリーンの角度は、スクリーンの下にバラストをはらんだ状態を想定し、最大角度を20°とする。すなわち、スクリーン試験時の試験条件は、高さ（0mm、-20mm、-50mm）と角度（0° 10° 15° 20°）を組み合わせて決定する。また空気力の評価には、抗力 D 、揚力 L 、モーメント M を風洞試験風速により無次元化した、抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、モーメント係数 C_M を用いた。風洞試験風速は27.8m/s、測定時間は20sである。その結果を図14に示す。図14より、スクリーンの高さや角度が大きいほど、スクリーンに加わる空気力係数は大きくなるのがわかる。

4.3 バラストスクリーンの飛散可能性の検討

スクリーン（中心パーツ）が飛散する可能性を検討する（ベルト、固定用ロープ、ジョイント全て無し条件）。スクリーンの飛散可能性は、スクリーンの下流側・下端回りに加わるモーメントにより評価した。図15にスクリーンを設置した際に、スクリーンの下流側・下端回りに加わるモーメントの模式図を示す。 M_s (Nm) は軌道

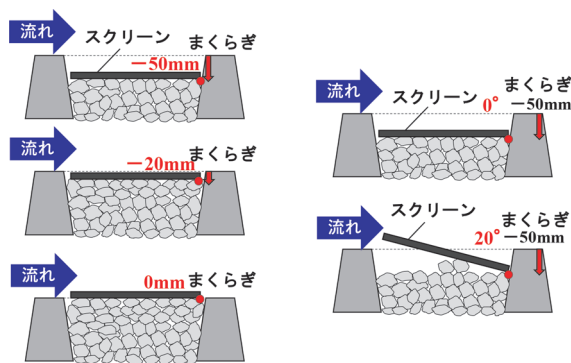


図13 バラストスクリーンの設置条件

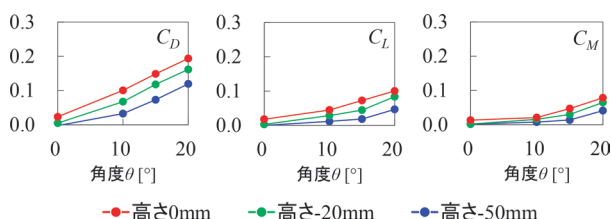


図14 バラストスクリーンに加わる空気力係数

面流れによるモーメント、 M_w (Nm) はスクリーンの重力によるモーメントである。ここで回転安定度 S を、 M_s/M_w と定義する。回転安定度 S が 1 を超える (M_s が M_w より大きくなる) と、スクリーンは浮き上がる。逆に、回転安定度 S が 1 未満の場合には、スクリーンが浮き上がることはない。 S の検討結果 (列車速度 300km 相当) を示した図 16 をみると、高さが 0mm、-20mm、かつ角度が 20° の場合に、回転安定度 S は 1 以上となり、スクリーンは浮き上がる可能性があることがわかる。このことから、固定用ロープを設置せず、高さや角度が大きい (高さ -20mm 以上、かつ角度 20° 以上) 場合には、スクリーンが浮き上がる可能性がある。しかし現実のスクリーンの設置条件は、高さ -50mm、角度 0° であり、本試験の結果からも回転安定度 S は、ほぼ 0 (図 16 参照) であることから、このような現象が生じることはないことがわかる。今回の試験は、スクリーンの飛散可能性を検討したものであり、現実には浮き上がることはな

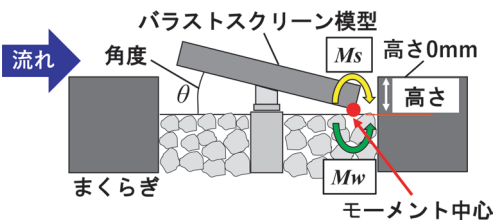


図 15 スクリーン下流側・下端のモーメント

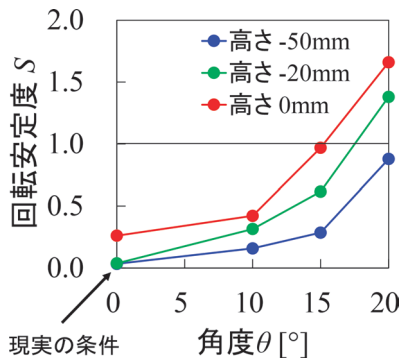


図 16 バラストスクリーンの飛散可能性の検討 (列車速度 300km/h 相当, 中心パーツ, ロープなし)



図 17 バラストスクリーンの挙動確認試験 (高さ-20mm, 角度 20°)

い点に、注意が必要である。

4.4 バラストスクリーンの挙動確認

図 17 に、高さ -20mm、角度 20° で、風洞試験風速を最大 71m/s (列車速度 399km/h 相当) まで上げた際の、スクリーン浮き上がり時の挙動を高速カメラで撮影した画像を示す。スクリーン浮き上がり時の挙動は、①風速が上がるにしたがって、中心パーツは徐々に浮き上がり始める。②ベルトを介して、中心パーツと外パーツは連結されているため、外パーツも中心パーツに引っ張られて持ち上がる。③その後、中心パーツの下流側も浮き上がり、中心パーツの下流側の一部がまくらぎ上を覆う。④送風を停止すると、スクリーンは下流側に移動したままであった。このことより、下流へ流されたスクリーンは、元の状態の様に戻らず、バラスト飛散防止の役割を果たせないこと、浮き上がったスクリーンは、車両限界や建築限界を支障する可能性があることがわかった。なお、本試験も、挙動確認のために実施した試験であり、高さ -20mm、角度 20° の設置条件は現実には存在しない。

5. まとめ

本研究では、今後の新幹線の延伸や速度向上等をふまえて、バラスト等の地上側敷設物の飛散防止対策に関する研究に活用可能な風洞試験方法を開発した。さらに開発した風洞試験方法を用いて、バラストやバラストスクリーンに加わる空気力の測定や、飛散や浮き上がる可能性の評価を行った。その結果を以下に示す。

- ①実物大のバラスト軌道模型を飛散防止ネットで覆い、バラスト等の飛散が可能な風洞試験方法を開発した。
- ②風洞のノズル床面にラフネスブロックを設置し、新幹線列車が通過する際の軌道面の風速分布を再現した。
- ③バラストに加わる空気力を測定した結果、バラストの設置高さがまくらぎより低い場合、バラストにはほぼ空気力は加わっていないことがわかった。
- ④バラストスクリーンに加わる空気力を、設置の高さや角度を変えて測定し、飛散する可能性のある高さや角度を明らかにした。
- ⑤バラストが飛散する際の挙動や、バラストスクリーンが浮き上がる際の挙動を明らかにした。

文献

- 1) 井門敦志：車上側および地上側からの計測による車両床下流れの評価，鉄道総研報告，Vol.23, No.7, pp.39-44, 2009
- 2) 岩崎誠，井門敦志，山崎展博，宇田東樹，若林雄介：新幹

- 線車両の床下流れの特性, 鉄道総研報告, Vol.29, No.5, pp.11-16, 2015
- 3) 吉田眞, 内田雅夫, 矢口直幸, 御船直人: 高速走行時のバラスト飛散防止対策, 鉄道総研報告, Vol.6, No.6, pp.27-36, 1992
- 4) 井上達哉, 中野高志, 井門敦志: 実物大軌道模型を用いて鉄道車両の通過時に誘起される軌道面付近の流れを再現した風洞実験方法, 日本実験力学会講演論文集, B208, 2022
- 5) 井門敦志: 大型低騒音風洞における鉄道の技術開発の変遷, RRR, Vol.79, No.3, pp.4-9, 2022

蓄電池電源車の構想と編成電車への給電手順

小笠 正道*

Concept of Storage Battery Electricity Source Railcar and Power Supplying Procedure to e.m.u.-trains

Masamichi OGASA

Here we propose a concept of a storage battery electricity source railcar to run e.m.u. (electric multiple unit)-trains on non-electrified lines of a middle distance beyond 100 km. This method has advantages in formation possibility as a train and in the total cost of the first few decades in some cases compared to the usual electrification method of a whole line. To embody a battery source car, a circuit configuration and a power supply method when connecting and releasing it to a train has been presented. The procedure of replacing source cars at a nodal station is also specifically described, while preventing electric shocks.

キーワード：非電化、電車、電源車、蓄電池、連結、電源切替え

1. はじめに

近年の蓄電池技術の進展により、比較的短距離の非電化線を走行する蓄電池電車が営業運行中である¹⁾²⁾。一方で中長距離の非電化線に純電気車を走らせるには、一般には電化が必要と考えられるが、燃料電池車への期待も存在する。これら以外の手法として筆者は、距離100kmを超える非電化線区を、内燃動車や燃料電池車ではなく編成電車が電気エネルギーのみで走行する方法を提案してきている³⁾⁴⁾⁵⁾。本稿では電源車の連結解放による走行の構想と編成電車への給電手順を示す。

2. 長距離非電化線に編成電車を走らせる方法

2.1 充電ポイント観点からの4種類の走行方法

文献4では、4両編成気動車特急が1日8往復走行する距離130kmの実在非電化線を対象として、4両編成電車が以下に示す4つの方法で蓄電池走行する場合を想定し、全線電化方式に対するコスト比較のケーススタディを行っている。

- (1) 片道以上を走破できる蓄電量を編成電車に分散搭載。折返し駅の充電所において約20分で急速充電。
- (2) 片道走破必要分より少量の蓄電量を編成電車に分散搭載。特急停車等の各主要駅のみで1~3分停車中に急速充電。停車時分内に充電し切れずに不足した量は終点駅で補充充電。
- (3) 編成電車は連結した蓄電池電源車の電力で非電化線を走行後、途中駅や

終点駅で電源車を切離し待機中の充電済み電源車を連結して継続走行。切離された電源車は次の列車到着までにゆっくり充電して待機(図1)。電源車は総質量50tonとした。

- (4) 明かり区間は架線からの電力で走行し、狭小トンネル内のみ編成電車に分散搭載された蓄電池の電力で走行する、部分電化による走行方法。

特急の運行頻度が1時間あたり平均1本未満となる当線区では、初期コスト、運用コスト、コストペイバックタイムの比較を行った。運用コストは鉄道統計年報に基づき、額自体および方式による差異が大きい車両保存費、電路保存費、蓄電池交換費を主な比較対象とし、それ以外の費目は差異が少ないため相殺できるとした。その結果、10箇所以上の変電所設備と架空電車線設備の整備が必要となる全線電化方式に比べて、(1)~(3)の蓄電池電力を利用した電車走行の方が、当初数十年以上の間、コスト面で有利となる結果(図2)が得られた³⁾⁴⁾。

しかし、(1)と(2)に示す走行方法では、急速充電時におけるパンタグラフの熱的上限からの集電電流の制

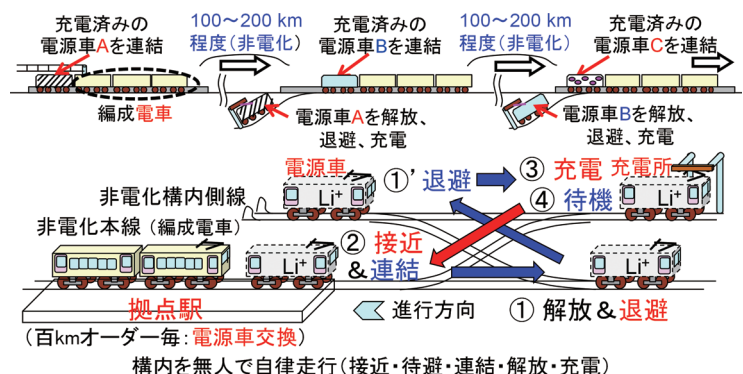


図1 電源車解結による非電化線の電車走行イメージ

* 元 車両技術研究部

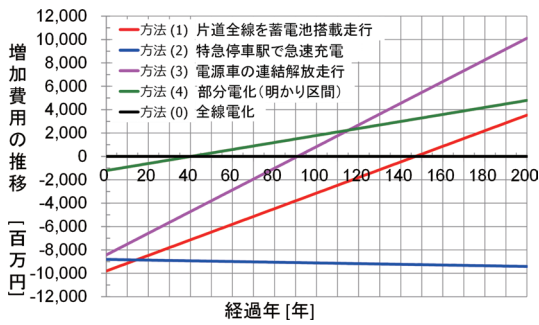


図2 蓄電池各種走行方式における対電化コストペイバックタイム
(距離 130km 非電化実在線でのケーススタディ)

約により、編成電車に搭載すべき集電装置の数が多くなる。特に(1)では1車両当たり3基の集電装置が必要となる車両が発生する。蓄電池搭載による軸重増加と相俟って、編成電車としての成立のハードルが高いことが分かった。

また、(4)の方式は走行中に高頻度のパンタグラフ昇降を伴い、トロッコ線とパンタグラフ双方に対する耐久性の課題が存在する。

これに対し、(3)の電源車方式ならば、充電パワーは(1)や(2)の3分の1程度で良く、また、電源車1両当りの集電装置も2基で済むなど、現実的な構成が期待できる。

「連結して、走行する (Connect and Run)」は鉄道の大きな特長であり、電源車はそれを活かせる手法である。

2.2 電源車方式の導入による利点

電源車や編成電車への充電、充填場所を図3に示す。以下に電源車方式の利点を示す。

(1) 地上設備の簡素化

- ・初期費がネックで電化できない非電化路線への“電車”走行を他方式よりも比較的容易に実現。
- ・運行頻度の低い電化線では電源車方式電車の走行に置き換えることによる、架線設備の縮減による保守費の削減や、老朽架線設備の撤去。
- ・充電所と付帯設備(送配電設備を含む)最小化：充電所は結節駅か折返し駅のみ、変電所は電化線既設のみ。
- ・充電所や変電所の用地確保や、山腹への高圧铁塔群建植や高圧線引込み、といった大掛りな整備が不要。
- ・運行ダイヤ上、次列車までの充電時間を長く取れば充電所 kVA 容量を抑えられ設備投資が軽減。
- ・地域設置型の充電所として、電力系統に連系しない分散発電所や、地上併設蓄電装置との組み合わせが可能。

(2) 非電化線の簡易電化による環境負荷低減

- ・編成電車や編成蓄電池電車と同じ電気駆動で、非電化線における走行時や駅構内での排ガスゼロ、静粛化、充電する電気を発生する発電所における発電方式や脱炭素対策次第で“クリーン電気”を使用可能。
- ・立地、設備 kVA 容量、運用上確保できる時間次第で、分散型再生可能エネルギー発電式の充電所も可能。

(3) 電化区間における非常時対応

- ・走る蓄電池として、架線停電時の蓄電非搭載電車の救援車として対応可。

(4) 駅設備の有効活用

- ・駅構内の側線や各種設備を撤去した後の遊休地を有効

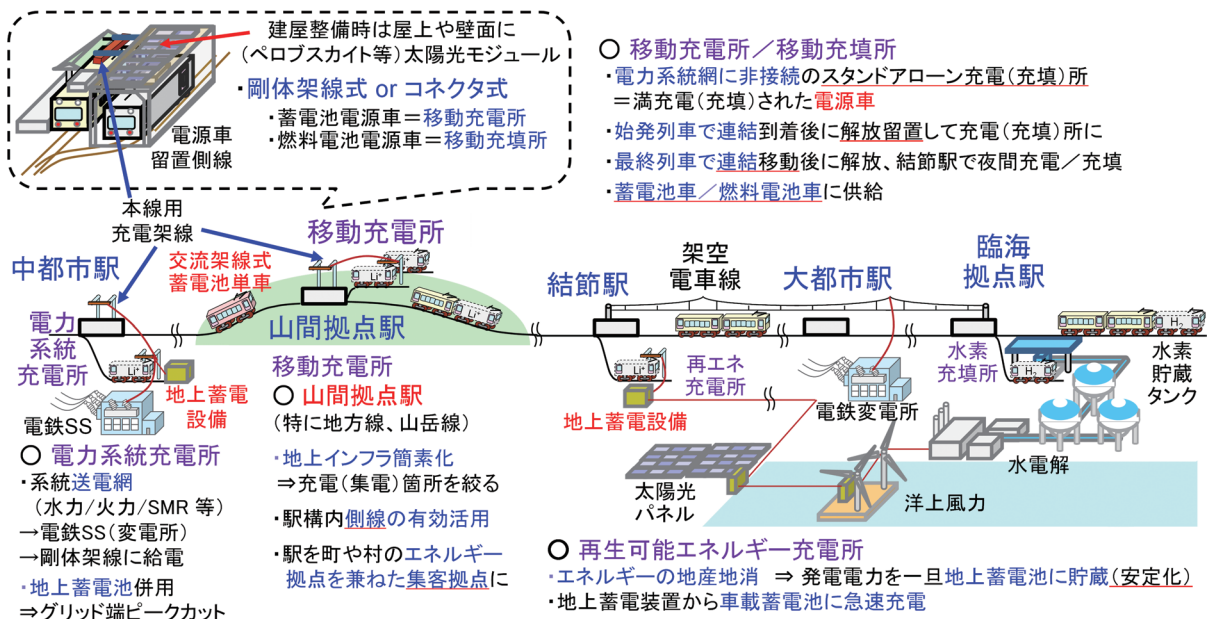


図3 電源車 / 編成電車への充電 / 充填イメージ

活用して充電所や小規模簡易発電所を設置。

- ・蓄電池電源車を充電する充電所が、電力系統連系型や、蓄電装置併設型である場合は kVA 容量または kWh 容量次第で、充電ステーション、町や村の集客拠点に。
 - ・電源車自体を移動充電所として留置側線上に設置可。
- (5) 車両機装設計のシンプル化
- ・連結方式の蓄電池テンドー車であることから、編成電車への蓄電池搭載に比べて構成上の無理が少ない。
- (6) 蓄電池の劣化抑制
- ・編成から解放後は次列車までの時間でゆっくり充電し急速充電を極力回避することで、蓄電池劣化を抑制。
- (7) 対象列車、走行線区、電源供給の自由度が大
- ・エネルギー容量 kWh 次第で“移動式充電所”として駅構内側線に留置し、蓄電搭載型編成電車の停車中充電器として使用できる。
 - ・移動式充電所として使用する際は、充電可能な結節駅で夜間に電源車を充電し、始発電車に連結して線区走行後に山腹等の所定充電駅構内側線に留置する。日中は充電器として編成電車を充電し、最終電車に連結して結節駅に戻す運用が可能。
 - ・編成電車が蓄電搭載型なら電源車を解放後にそのまま自力走行を続け、蓄電非搭載型なら電源車を連結した状態で走行継続する。この場合、始発電車に連結する電源車数を調整することで、複数の移動充電所や電源車連結を必要とする編成電車に対応する。
 - ・移動式のため、ダイヤ改正に伴う編成電車への充電所位置の変更要求に柔軟に対応できる。

なお、電源車は蓄電池価格次第では、蓄電池以外に内燃機関または燃料電池での代替え選択も可能である。気動車の軽油や燃料電池車の水素は各車のタンクごとに充填が必要なため、電源車1車両に集約すれば長編成になるほど燃料充填の労力を低減できる。

3. 電源車解結式の具現化に向けた技術課題

3.1 電源車連結による編成電車への給電回路と手順

電源車は自走可能な両運転台 Mc 車で編成電車の前位または後位に連結する。電化線を走行して来た編成電車が蓄電非搭載型の場合、車内の照明や空調など接客用補機電力を落とさず、また電圧が異なる電源を混触させずに蓄電池電源車からの電源供給に切換えた上で、非電化走行に臨む必要がある。

編成電車への直流高圧引通し母線（以下、DC バス）の設備、架線電圧あるいは電源車の蓄電池電圧と編成電車の DC バスの電圧を整合させた上での接続解放シーケンス、それを実現できる回路構成が必要となる。

そのような蓄電池電源車の主回路構成例を図4に示す。

3.2 人手を介さない連結器周辺構成

人手を介さない連結解放操作のため、データ伝送線、電力供給線、空気配管を自動で引通せる連結器が必要となる。近年、欧州 Voith（フォイト）社で Cargo Flex なるデジタル対応自動連結器⁶⁾が開発されており、利用できる可能性がある。

また、人手を介した連結を行う場合も想定して、連結解放作業時の作業員の感電防止策も重要である。

このような連結器を編成電車および電源車の各前後端に採用し、乗客移乗が無いことを前提に貫通幌の脱着作業を省略、あるいは自動貫通幌自動接続機構の開発により、手動作業を介さない連結が可能となる。

具体的には、両用連結器（自動連結器と密着連結器に対応）下部の電気連結器を基本として電源車に装備し、主回路、補助回路、制御指令線、ブレーキ用空気配管（エアレス車では不要）を自動で接続、解放が可能となる構成とする。配線群と配管の一体接続可能な連結器を前提に、主回路 DC バスはプラス線とマイナス線の対とし、レールを帰線回路として期待できない非電化線に対処する。

3.3 電源車自律運転による充電・接近待避・連結解放

連結解放に人手を要しては人件費が余計に掛かってしまう。それを避けるため、下記一連の作業を無人かつ自律的に行う必要がある。

- 電源車が編成電車への電力供給を停止
- 連結器を自己解放
- 待避走行して充電位置に留置
- 充電位置で充電作業を行い、その後は待機
- 次の編成電車が到着したら接近して連結
- 編成電車と電源車とで回路を構成、給電開始

これらは構内側線の線路形状マップを元に、本線信号機の現示を確認した上で、分岐器（スプリングポイント可）を亘る走行を行う。そのため、分岐前停止、充電位置への停止、連結位置への停止、の各段階における高精度の停止位置制御が要求される。無人自律走行パターン

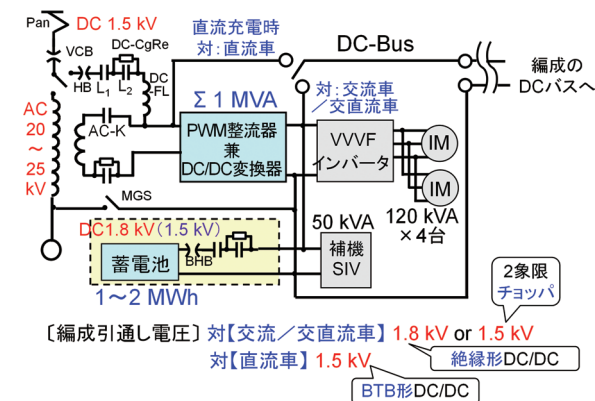


図4 蓄電池電源車の主回路構成（交直両用の例）

生成の概念を図5に示す。

なお、無人自律走行を行う駅においてはそのルート上にヒト、動物、モノ、移動体などが入り込まないように、プラットフォーム上のホームドアなど安全面での施策を合せて行う検討が必要である。

4. 電源車連結解放時の給電回路の構成と手順

前章の技術課題のうち、1番目の主回路を構成できることが電源車方式を実現するための最初のステップとなる。そのため本稿では、給電回路の構成例と給電手順について述べる。

4.1 引通し回路構成例

蓄電池電源車は架線または自車蓄電池からの電力による自力走行と自車搭載蓄電池への充電、ならびに自車搭載蓄電池から編成へ電力を供給する役割を持つ。そのため、電源車から供給する直流電力には編成電車の駆動インバータを動作できる電圧が要求される。その際、蓄電池後段に電圧変換器を配置する方法があり得るが、蓄電池走行が主体の場合は変換器による電力損失が生じ続ける。これを避ける観点から、蓄電池電圧を直接編成に供給する方式とした。直流架線電圧1.5kVから変換器を介して8両程度の編成電車への供給と1.2~1.8kV程度の公称電圧を有する蓄電池充電が可能な回路構成とした。

直流架線充電型の蓄電池電源車と直流編成電車の主回

路構成の例を図6に示す。電源車の連結器および、編成電車の編成前後の連結器内にDCバス引通し線のコネクタ機能を有することを前提としている。

連結器内コネクタからの結線は、接続接触器(Connecting Contactor)箱に引込まれた後、プラス線側を接続解放できる接触器LBpl(Line Breaker of positive line)と、プラス線とマイナス線の間を放電抵抗経由で短絡できるLBdcg(Line Breaker of discharge)とに接続される。

電源車においてはさらに、プラス線をDC/DC変換回路を介してその先の架線電圧に接続できる接触器LBch(Line Breaker of chopper)、およびプラス線を電源車の蓄電池ならびに電源車の自車駆動回路と補機回路に接続できる接触器LBbt(Line Breaker of battery)とを有す

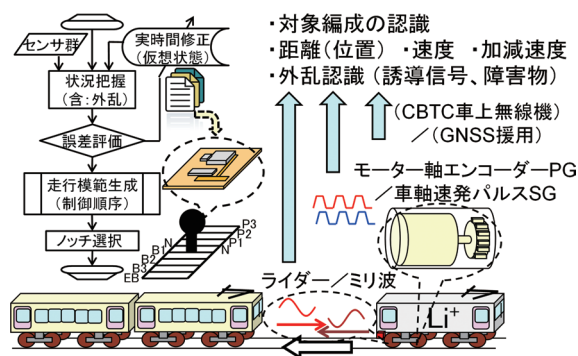
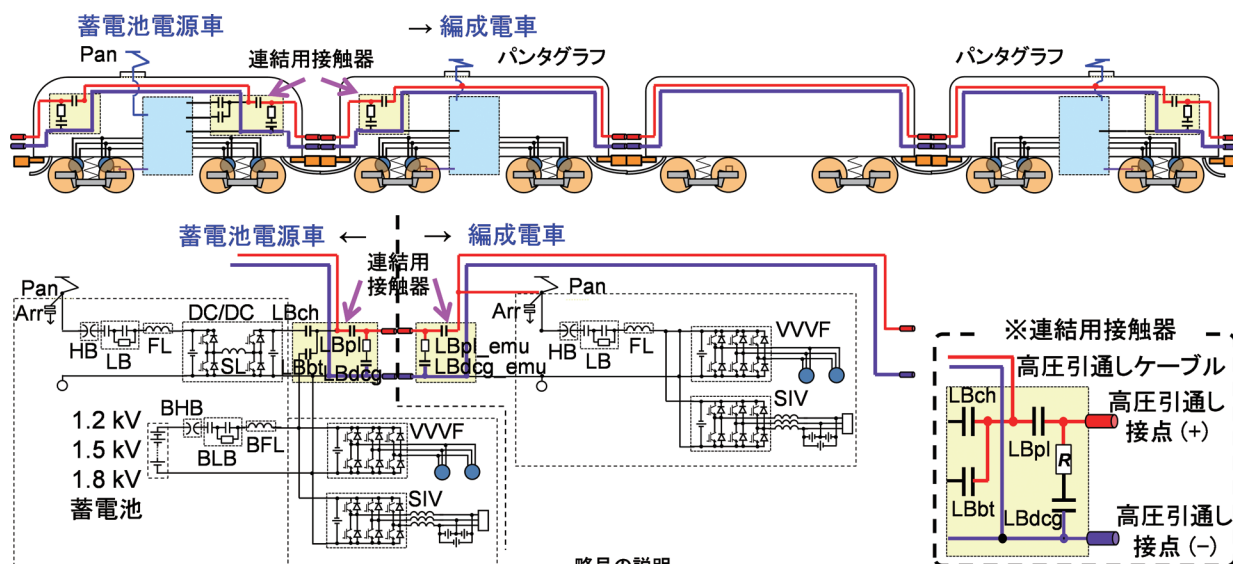


図5 無人自律走行パターン生成のイメージ



略号の説明
 Pan: Pantograph(パンタグラフ) HB: High speed circuit Breaker(高速度遮断器) LB: Line Breaker(断流器または接触器)
 FL: Filter reactor(フィルタリアクトル) SL: Smoothing reactor(持流リアクトルまたは平滑リアクトル)
 ※L: リアクトル(インダクタ)の略号Lは“レンツ(Lenz)”に由来
 DC/DC: Direct current ⇄ Direct current(直流/直流変換器) Arr: Arrester(避雷器)
 VVVF: Variable Voltage Variable Frequency(可変電圧可変周波数インバータ) SIV: Static Inverter(静止型補助電源装置)
 BHB: Battery HB(蓄電池高速度遮断器) BLB: Battery LB(蓄電池断流器) BFL: Battery FL(蓄電池リアクトル)
 LBch: LB of chopper(チョップパ出力接触器) LBbt: LB of battery(蓄電池出力接触器) R: Rheostat(抵抗器)
 LBpl: LB of pull through(引通し出力接触器) LBdcg: LB of discharge(放電用接触器)

図6 電源車と編成電車との直流主回路引通し構成

る構成とした。

DC/DC 変換器は、図 6 に例示する降圧チョップと昇圧チョップの BTB (Back to Back) 接続の非絶縁型ならば、蓄電池電圧が架線電圧より低い場合にも高い場合にも対応可能である。高周波変圧器を用いた絶縁昇降圧 DC/DC 変換器としても良い。また、蓄電池公称電圧の設定次第では降圧チョップのみ、昇圧チョップのみとして簡易化する選択も可能である。

4.2 連結解放時の主回路の構成および給電の手順

4.2.1 結節駅での編成電車への電源車連結と給電開始

電化線から非電化線への結節駅において、編成電車が到着し、電源車が停止している状態から連結を行う際の回路構成と給電の手順を図 7 に示す。

電源車主回路と編成電車主回路の接続の前に、連結面に電荷が供給されないように LBpl および LBpl_emu を開放する。次に残存電荷を除去するため LBdcb および LBdcb_emu を投入し、電気抵抗を直列接続して閉回路を構成して放電する。連結して電源車連結面と編成電車連結面の回路同士が接続された後は LBdcb および LBdcb_emu を開放し、引通し線のプラス側とマイナス側の短絡を避ける。この手順で人手による連結時の感電を防止する。

この間、編成電車は架線から電力供給を受けており、車内の照明や空調などのサービス電源は落ちない。

次に、電源車は、連結回路を通して繋がった編成電車の引通し線の電圧が、電源車側回路に入り込まないように、DC/DC 変換器の出力後段の LBch を開放しておく。その上でパンタグラフを上昇し、架線からの電力を受けて DC/DC 変換器のゲート制御により、出力電圧を編成電車の電圧と等しくする。単純な降圧チョップでは通流率 100%、単純な昇圧チョップでは通流率 0% で良い。この段階で LBch と LBpl を投入することで、架線電圧が印加された電源車側出力端と、編成電車側の引通し線が同電圧の状態に接続される。そのため電位差に起因する横流を回避できる。

電源車、編成電車ともに架線から

の電力供給状態となった段階で、今度は編成電車のパンタグラフを降下する。これにより、編成電車へは架線からの電力が電源車を介して供給される。

ここで、電源車の DC/DC 変換器は出力電圧を移行させ、車載蓄電池電圧と等しくする“均圧制御⁷⁾”を行う。

“均圧制御”の原理を図 8 に示す。負荷に印加する電圧を第 1 電源から第 2 電源に切替える際に、予め DC/DC 変換器の通流率制御を行って第 2 電源の電圧と等しい電圧が負荷に印加されるよう調整した上で、第 2 電源を投入し、第 1 電源を外す方法である。負荷にいきなり異なる電圧が不連続に印加されることがなく、目標電圧に 1~数秒程度の時素を経てゆっくり変化して印加されるため、尖頭電流の流入を避けられる。特に、電源同士の短絡を防ぐことが主眼である。

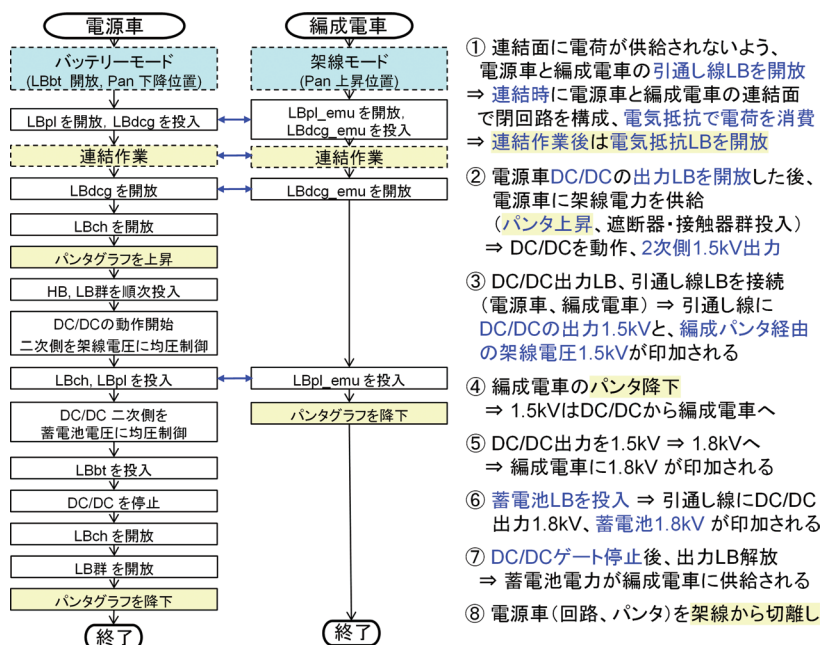


図 7 電源車連結時の給電切替えフロー

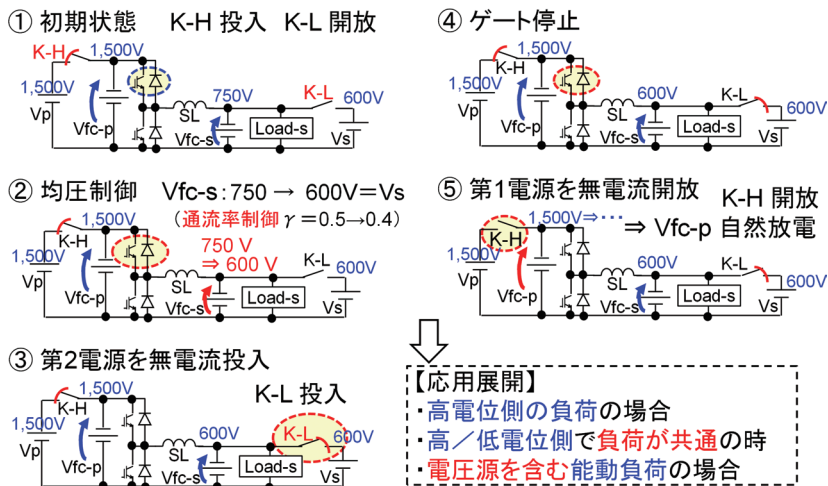


図 8 均圧制御による電源切替えの原理 (低電位側受動負荷の場合)

均圧制御により、編成電車の引通し線全体の電圧が、電源車搭載の蓄電池と等しい電圧に制御された状態になる。ここへ来て初めて、電源車の蓄電池と編成電車の引通し線を接続して良い条件が整い、電源車の蓄電池出力端のLBbtを投入できる。

その後は、編成へは電源車蓄電池からの電力が直接供給された状態となるため、電源車が架線から受けている電力を停止すべく、降圧チョップや昇圧チョップの場合であればDC/DC変換器をゲート停止すれば良い。各レグのスイッチング素子と逆並列されたダイオードにより、降圧チョップの場合は架線からの流入を防ぐことにより、また昇圧チョップの場合は電流が流入できる向きではあるものの蓄電池電圧の方が高いため、架線からの流入が防止される。

電源車の架線側接触器であるLB群を無電流状態で開放した後、HB（Hi-speed circuit Breaker：高速度遮断器）を開放しないままで、パンタグラフを降下できる。

この一連の手順により、電化線から非電化線への結節駅で電源車から編成電車への電力供給が可能となる。

4.2.2 結節駅での編成電車への給電停止と電源車解放

非電化線から電化線への結節駅において、電源車連結の編成電車が到着後、電源車を解放する際の回路分離と給電の手順を図9に示す。

電源車のパンタグラフを上昇し、架線側接触器LB群を投入し、DC/DC変換器のゲート制御により、DC/DC変換器の出力電圧を蓄電池電圧の値に制御する。編成電車の引通し線には蓄電池電圧が印加されているので、この状態でLBchを投入する。

続いてLBbtを開放することで、蓄電池からの電力供給は停止し、架線からDC/DC変換器を介した蓄電池電圧相当の電力が編成電車に供給された状態になる。

ここで、DC/DC変換器の出力電圧が架線電圧と等しくなるように均圧制御を行う。編成電車の引通し線に架線と同じ電圧が印加されたら、編成電車のパンタグラフを上昇し、引通し線の接続開放のプラス側接触器である電源車LBplと編成電車LBpl_emuを開放する。これにより、編成電車の架線側HBやLB群の状態遷移を伴わずに、架線電力を編成電車に供給できるようになる。

電源車ではDC/DC変換器の停止、架線側HBやLB群の開放、パンタグラフ降下を行う。

最後に、連結時と同様に、連結面回路の電荷放出を行い、その後に連結器を解放して、短絡抵抗器を復帰する。

4.2.3 電源車交換における給電停止 - 解放 - 別車連結 - 給電開始

非電化線内の結節駅において、電源車Aが連結された編成電車が到着し、電源車Aを解放した上で、電源車Bを連結する際の回路分離と給電停止、ならびにそれに続く回路構成と給電開始の手順を図10に示す。

本線上に急速充電用剛体架線が設置されている場合は、それを架線電圧に準ずる電源と捉えることで、4.2.1項および4.2.2項に準ずる形態で大元の電源遮断期間を発生させずに電源切替えを行うことができる。

また、電源車Aと電源車Bが編成電車へ接続する位置が異なる場合は、電源車Aまたは電源車Bを同時に連結する状態が作れることから、相手の電源車の蓄電池電圧を架線電圧の代替え電圧とみなす。あるいは編成電車が蓄電搭載型の場合は編成内蓄電装置を仲介電源とする。これにより、いずれも4.2.1項と4.2.2項の手順に準じて電源切替えを行える。

ここでは最も厳しい前提として、別電源を介した電力供給切替えができない場合を想定する。この場合、電源車交換時には大元の電源が遮断される期間が発生する。その間は直流100V系や24V系の補機用蓄電池からの電力供給により車内の空調や照明等の補機電力を賄う必要がある。編成電車に非常走行用の蓄電池が搭載されている場合は、それらを活用しても良い。

電源車Aの解放に先立ち、編成電車側の接触器LB群の開放を行う。この段階で、編成電車への電源車からの電力は一旦遮断される。補機回路への供給電流も含めて編成電車LB群を無電流遮断とするには、補機用蓄電池回路の構成変更を伴う場合がある。

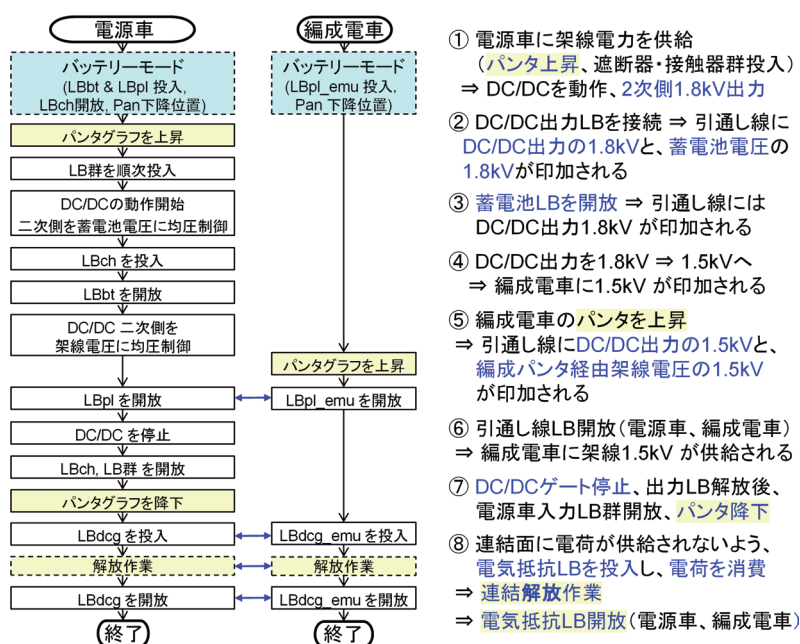


図9 電源車解放時の給電切替えフロー

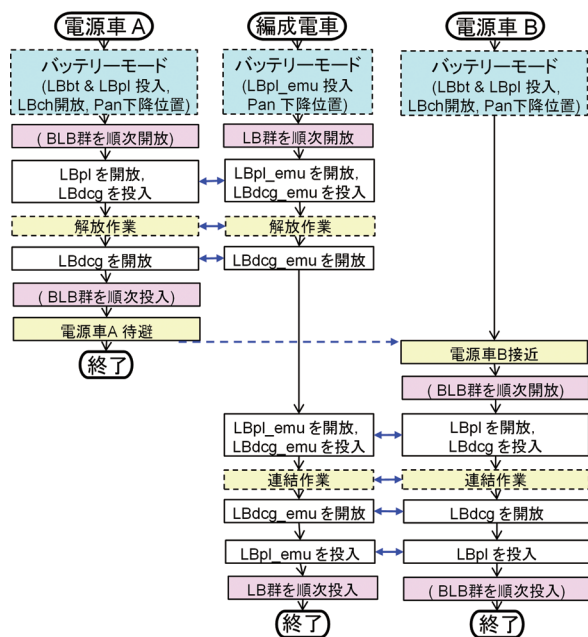


図 10 電源車交換時の給電切替えフロー

安全面から連結面回路の電気抵抗により電荷放電を施した上で、電源車 A が解放されて待避する。電源車 B が接近して連結する際も、安全面から電荷放電の後、LBpl および LBpl_emu を投入して引通し線に蓄電池電源電圧を印加し、編成電車の接触器 LB 群を投入するのが、最も簡便な方法となる。編成電車 LB 群の開放と投入の代わりに、電源車 BLB 群の開放と投入を行っても良い（図 10 の薄桃色着色部）。

5. まとめ

蓄電池電源車の構想の具現化に向けて、蓄電池自体の技術では無く、それを適用する鉄道分野固有領域における技術課題として以下 3 つの存在を示した。

- ① 連結解放時の給電回路構成と給電および停止の手順
- ② 連結器周辺技術－感電防止策を含む
- ③ 電源車の自律自走による無人での連結、解放

これらの運用段階においては、電源車運転の計画策定や管理、走行ルート上における安全確保施策や異常時対応などの施策が必要となる。

本稿では、①と②の蓄電池電源車を編成電車に連結解放する際の電力供給の回路構成と供給手順を提案した。

基本は人手を介さない自動構成としつつ、人手による連結解放にも対応できるよう感電防止など安全を確保した電源の供給、停止の手順が必要である。具体的には以下 3 つの場合の給電切替え手順を提示した。

- (1) 編成電車が電化線から非電化線へ入る結節駅における、電源車の連結と主回路確立の手順
- (2) 非電化線を電源車連結で走行して来た編成電車が、

電化区間に入る結節駅において、給電を停止して電源車を解放し、通常の電車として走行可能とする手順

- (3) 非電化線の結節駅において、電源車を交換する手順
さらには、蓄電池を搭載しない編成電車が電源車を連結して走行する以外に、電源車を途中駅に留置し、蓄電池電車が到着した際の急速充電用の移動型電源（モバイルチャージャー）とする運用展開も考えられる（図 3）。

電源車の電源としては蓄電池以外に、内燃機関や燃料電池により発生する電力も想定でき、電源選択の自由度を保持した上での開発検討が可能となる利点がある。

蓄電池電源車は、編成電車に連結する蓄電池テンダー車のイメージである。蒸気機関車のテンダー車が機関車後位に連結されて水と石炭を供給したのに対し、蓄電池電源車は電気エネルギーを編成電車に供給する。

最近、米国でも貨物列車の電気式ディーゼル機関車後位への蓄電池テンダー車連結による“電化”が構想されている⁸⁾。

本稿で示した技術課題の解決手法を順次提示し、また、移動充電所として用いる場合の蓄電容量の検討設計を行うことで、構想の具現化に繋がると考える。

文献

- 1) 滝口裕之：蓄電池駆動車 EV-E301 系（ACCUM）の概要，JR EAST Technical Review, No.51, pp.45-50, 2015
- 2) 畑中宏文，畠田憲司，田口義晃，金子貴志，大室敦士：DENCHA の開発と走行試験結果，第 23 回鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail2016），S3-4-6, pp.579-582, 2016
- 3) 小笠正道：蓄電池電源車の解結による非電化線の電車走行と対電化コスト FS，平成 27 年電気学会産業応用部門大会，5-49, pp.V-307-312, 2015
- 4) Masamichi Ogasa, “Case study of four battery-powered methods to run electric trains on non-electrified lines”, Proceeding of International Power Electronics Conference 2022 (IPEC-Himeji), 17C3-1, pp.1095-1100, 2022.
- 5) 小笠正道：蓄電池電源車解結における連結時の回路構成と給電手順の構想，令和 4 年電気学会産業応用部門大会，5-37, pp.V-245-250, 2022
- 6) Railway Gazette International, “Cargo Flex enters the digital era,” ISSN 0373-5346, Vol.177, No.09, pp.28-29, 2021.
- 7) 小笠正道，田口義晃，上園恵一，松本哲也：蓄電池電車の電源切替シーケンスと電圧均等化制御—直流複電圧版，電気学会半導体電力変換研究会，SPC-18-171, pp.1-6, 2018
- 8) Kiran Julin “Battery-tender cars,” Berkeley Laboratory, <https://newscenter.lbl.gov/2021/11/23/big-batteries-on-wheels-can-deliver-zero-emissions-rail-while-securing-the-grid/>（参照日：2023 年 1 月 12 日）

バラスト軌道の道床加速度計測の無線化

栗田 いずみ* 流王 智子* 岩澤 永照** 河野 昭子***

Examination of Wireless Acceleration Measurement for Ballasted Track

Izumi KURITA Satoko RYUO Nagateru IWASAWA Akiko KONO

Railway operators examine dynamic characteristics of ballast vibration using wired sensors. To improve the efficiency of maintenance works in track. In terms of prevent disconnection of sensor cables during tamping works, wireless measurement of the vibration is required. In this research we discussed specifications of wireless sensors such as an operation pattern and a radio system. We evaluated the wireless characteristics of some buried wireless devices in a ballasted track and confirmed that RSSI which is a wireless indicator exceeds the minimum received sensitivity. Furthermore, we confirmed the behavior of the buried sensors during a road railer run over them.

キーワード：無線化，加速度センサ，バラスト軌道，モニタリング，Wi-SUN，レイトレース

1. はじめに

鉄道線路では、レール、まくらぎ、砕石層、路盤で構成されるバラスト軌道が広く一般的に採用されている。バラスト軌道は、敷設コストが安価で、まくらぎからの圧力を効率良く分散させ、軌道に適度な弾性を持たせる一方、列車荷重の繰り返し作用などの影響で、特にレール継目部で局所的な道床沈下により浮きまくらぎを発生させる場合がある。バラスト軌道において保守作業の発生頻度が高い箇所や新規の軌道材料を導入する箇所では、保守作業効率向上を目的として、道床沈下特性の影響要因の把握が必要となる場合がある。そのための検討手法として、バラスト軌道の離散体モデルを用いたDEMシミュレーション¹⁾の他、道床振動の加速度計測による動特性評価がある。

バラスト軌道の動特性評価においては、レール継目部の道床沈下急進箇所での衝撃荷重下の道床振動と道床沈下の関連性を検証するために、バラスト砕石サイズの加速度計を用いて、列車通過時の道床振動加速度の計測が行われている²⁾³⁾。実軌道における道床振動加速度計測では、まずバラスト砕石を一時的に撤去し、まくらぎ下にセンサを埋設した後、バラスト砕石を埋め戻しながらセンサのケーブルをバラスト層内に這わせ、線路脇のデータロガーに接続する。そのためケーブル類が保守通路を支障するだけでなく、道床埋め戻し後のタンピング作業中にケーブルが断線してしまうこともありうる。更に、ケーブルが加速度センサの動きを拘束するため、実

際のバラスト砕石とは異なる挙動が発生する可能性もあり、加速度計測システムの無線化が望まれている。

加速度計測システムの無線化を行うためには、センサをバッテリー駆動に対応させるほか、バラスト内のセンサから建築限界外のデータ集約装置までの無線伝送路を確保する必要がある。そのため、バラスト軌道においては、バラストやレールを始めとする、路盤上の地物による電波の減衰を考慮する必要がある。そこで本研究では、特に影響が大きいと想定される、バラスト、レールおよびバラストの側方への流動を防止するためのバラスト止め等の存在する環境を対象として、無線による道床振動加速度データの伝送可能性を検証した。

本報告では、道床振動を計測するための無線センサの仕様に関する検討結果について述べたのち、実軌道への導入に向けて、所内試験線においてバラスト止めを設置したバラスト軌道での伝送試験の結果を報告する。

2. 無線センサ・データ集約装置の仕様検討

前述のように、道床内に埋設したセンサによる道床振動加速度計測において、有線ケーブルを用いたセンサデータの伝送が一般的であったが、近年、加速度センサの無線化、小型化が進み、欧米では道床表面の振動計測⁴⁾や室内における模擬線路による試験⁵⁾⁶⁾で無線加速度センサ（以下、無線センサ）を用いた事例がある。しかし、実軌道のまくらぎ直下にセンサを埋設して、列車通過時の道床振動加速度を計測した事例はほとんどない。

また、無線センサはバッテリー駆動であり、再利用する場合には、まくらぎ下に埋設した無線センサを掘り起こして回収・バッテリー交換を行う必要がある。よって、無線センサのバッテリーの効率的な利用のためスリープ時間

* 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室

** 元 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室

*** 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

や計測間隔を制御することが必要となるが、無線センサに関する既存研究ではこれらの制御に関する検討が行われていない⁵⁾⁶⁾。そこで、本研究では、道床振動加速度データの伝送のための無線仕様を検討した上で、バッテリーの効率的な制御を行う無線センサの仕様を提案し、その一部を実装した。

2.1 無線方式の選定

今回の仕様検討にあたって前提とした加速度計測システムは、下記の要求を満たすものとした。

- まくらぎ下のセンサ埋設地点から幅 1.0~2.0m の保守用通路の線路外側に設置したデータ集約装置へ伝送可能
- センサのサンプリング間隔を 1500Hz、データサイズを 1 データ 2byte × 3 軸とした場合、約 72kbps の伝送容量を確保

無線センサに使用される各種の無線方式のうち、免許不要で利用できる方式の例を表 1 に示す。表 1 に示す無線方式のうち、所望の伝送容量を満たすことができるものとしては、920MHz 帯の Wi-SUN もしくは 2.4GHz 帯の Wi-Fi が候補として挙げられる。さらに、実軌道で無線センサを使用する際には、アンテナが地表近くに位

表 1 無線通信方式の比較⁷⁾

周波数帯	429MHz 帯	920MHz 帯 (日本国内 Wi-SUN)	2.4GHz 帯 (Wi-Fi)
最大到達距離	1.5km 程度	1km 程度	100m 程度
最大通信速度	4.8kbps	400kbps	22Mbps
電波の回り込みやすさ	○	○	△
低消費電力性	○	○	△

表 2 加速度計測設定および無線諸元⁹⁾

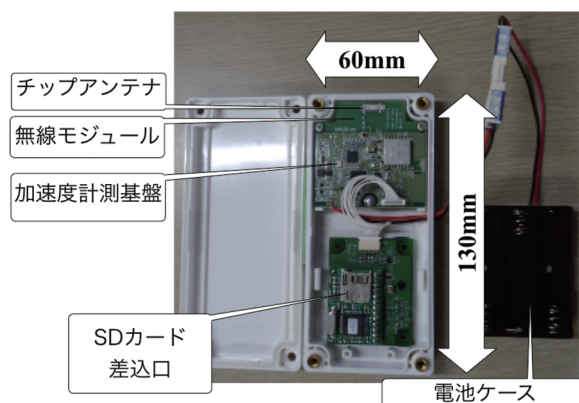
加速度計測設定	
加速度レンジ (分解能)	±2,000mG (1mG)
サンプリング間隔	12.5, 25, 50, 100, 200, 400Hz
連続計測可能データ数	90
スリープ時間	30s (30-86,400s)
計測間隔 (定期モード)	30s (30-60s)
閾値 (振動検知モード)	300mG
無線センサ・データ集約装置共通無線諸元	
準拠規格	IEEE 802.15.4g (Wi-SUN)
周波数	920MHz 帯
帯域	400kHz
最低受信感度	-105 dBm

置する場合があります、工具箱や線路に付随する諸設備が伝搬に与える影響を考慮する必要があるなどの問題がある。これに対して、920MHz 帯は 2.4GHz 帯域と比較すると通信距離が長く、障害物に対して電波が回り込みやすいといった特徴を持つ。鉄道総研における先行研究では、920MHz 帯を利用した国際規格に準拠した特定小電力の無線通信規格である Wi-SUN を使用して、鉄道沿線斜面の状態監視用途やバラスト軌道を敷設した試験場での加速度データの伝送を行った実績がある⁷⁾⁸⁾。

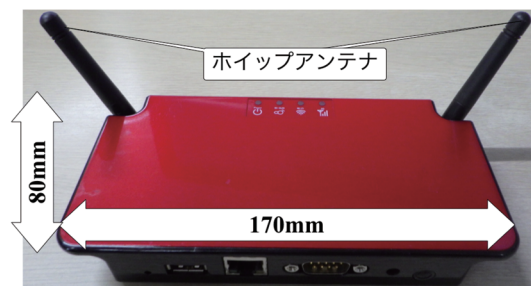
これらを踏まえて、本研究では 920MHz 帯の周波数を選定し、鉄道総研で過去に開発した 920MHz 帯を使用する 3 軸無線加速度センサ⁸⁾を改良して使用することとした。

2.2 無線センサ・データ集約装置の仕様

今回用いた無線センサとそれに対応するデータ集約装置 (ISB 製無線ルータ) を図 1 に、加速度計測に関する設定および無線諸元を表 2 に示す。



(a) 無線センサ



(b) データ集約装置



(c) 集約装置と無線センサの配置

図 1 無線センサおよびデータ集約装置⁹⁾

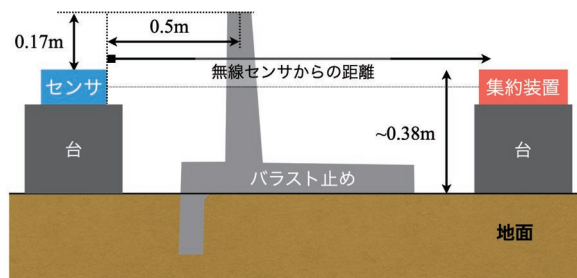
図1 (a) に示すように、無線センサは、振動を計測する3軸加速度計、計測データを伝送する無線モジュール、計測データを記録するSDカードから構成され、バッテリー（単3電池3本）で駆動される。なお、SDカードは、試験環境の変化や干渉等によってデータ集約装置に加速度データを伝送できない場合に備えて、加速度データを内部に保存するためのものである。

無線センサのサイズについては、将来実用化の段階ではバラストの挙動に影響を与える恐れがあるため小型化される必要があるが、今回の試験では伝送の可能性を把握することが目的であるため、バラスト径に対して大型（約60mm×130mm）ではあるが、一般的なサイズの製品を用いた。また、データ集約装置（図1 (b)）は、実軌道においては線路脇の保守用通路等に設置することを想定している。

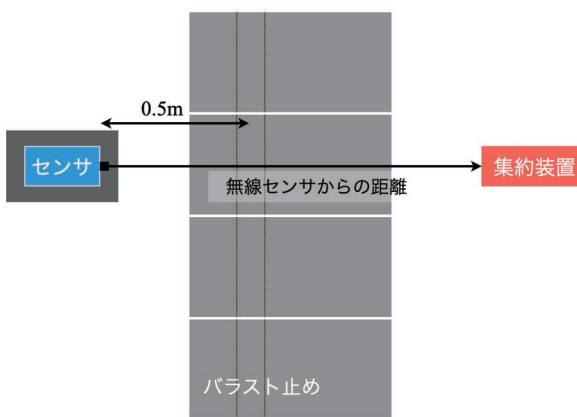
先述したように、バラスト軌道における道床振動の加速度計測では、バッテリーの消費量を節約するため、スリープ時間や計測間隔の制御が必要となる。そこで、無線センサの動作モードとして以下に示す3つのモードを実装した。

- (1) スリープモード（動作開始前）：まず、無線センサの動作については、所望の計測時刻までのバッテリーの消耗対策として、あらかじめ初期起動までの時間をスリープ時間として設け、電源投入後であっても計測・データ送信を行わないスリープ状態を維持する。
- (2) 定期モード（動作開始後）：スリープ時間を経過すると無線センサが起動し、事前に定めた計測間隔に従って加速度の計測・データ送信を行う。
- (3) 振動検知モード（動作開始後）：スリープ時間経過後、無線センサが起動し待機状態となる。事前に定めた閾値を上回る衝撃が無線センサに加わった場合に計測・データ送信を行い、再び待機状態に戻る。

動作開始後、無線センサは予め設定した定期モードか振動検知モードのいずれかに従って動作する。データ集約装置は無線センサからの信号を受信し、受信データを保存すると同時に、無線センサからの受信信号強度（RSSI）を記録する。ここで、RSSIはデータ集約装置で計測された受信機入力電力[dBm]である。表2に示したとおり、データ集約装置の最低受信感度-105dBmを上回る強度の信号が入力された場合に、データ集約装置はデータを正常に受信する。また、無線センサおよびデータ集約装置（以下、無線機）のアンテナは、アンテナ素子と直交する平面上では無指向であり、本報告ではいずれの場合においても、偏波面が一致する向き（図1 (c)）に固定して試験を行った。



(a) 断面図



(b) 俯瞰図

図2 無線機の設置位置

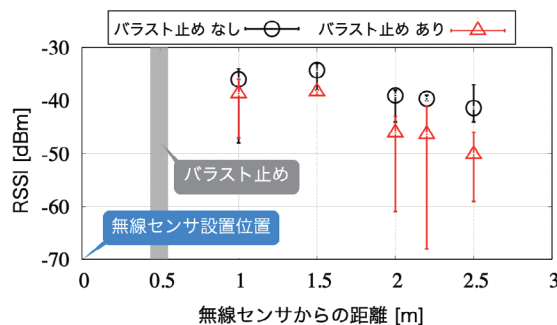


図3 バラスト止め単体試験でのRSSI

3. バラスト止め単体の影響確認

2章で提案した無線機により、道床内部での加速度計測データを線路脇で無線伝送可能であることを確認するため、当該無線機を用いて所内試験線での検証を行った。

実軌道において振動計測を行う場合、データロガー等の機器類は建築限界外の保守用通路等に設置され、保守用通路の諸設備の配置状況によっては、軌道から遠方に設置される場合が考えられる。他方、計測データを無線により伝送する場合、道床内に埋設した無線センサと線路脇に設置したデータ集約装置との距離が離れるほどRSSIが減衰するだけでなく、電波の伝搬路に影響を与える鉄柵等の障害物が存在する可能性も高くなる。また、バラスト軌道での道床振動計測を想定した場合、軌道の

保守通路側に鉄筋コンクリート製のバラスト止めが設置されることがあるため、電波が遮蔽されることが懸念される。

そこで、本伝送試験では安全側の検証を行うため、バラスト止め敷設区間を想定した。本章では、まずバラスト止めによる電波伝搬への影響を切り分けるため、バラスト止め単体を用いた無線伝送試験を行う。さらに伝搬パスの推定のため、試験環境を模擬した電波伝搬シミュレーションを行った結果を報告する。

3.1 試験構成

試験にはバラスト止め4台、無線センサ・データ集約装置各1台を用い、バラスト止めはレールに平行となるよう4台並べて敷設した(図2(a),(b))。なお、施工精度の限界から、バラスト止め同士は3mm～10mm程度の隙間が存在していた。また、使用したバラスト止めはコンクリートの内部に約100mm×100mmの格子状に直径6mmの鉄筋が配筋されており、バラスト止め壁の中央下部には直径40mm程度の排水孔が存在する。無線センサの設置箇所は、バラスト止めに対して近傍側レールのまくらぎ下を想定し、バラスト止めからバラスト側に水平方向0.5mの距離に無線センサ端部が位置するように設置した。データ集約装置は保守用通路への設置を想定し、バラスト止めを挟むように無線センサから1～2.5mの距離に設置した。このとき、データ集約装置と無線センサの高さは、まくらぎ下を想定しバラスト止めの上端から0.17m下方の位置とした。なお、無線伝送データ数を極力多く取得するため、無線センサは定期モードとし、計測間隔は設定可能な最小間隔の30秒に設定した。

試験では、まず、無線センサとデータ集約装置間にバラスト止めが存在する図2の状態において、無線センサの位置は固定とし、データ集約装置を移動させながら、データ集約装置側でRSSI計測を行った。さらに、バラスト止めの存在が通信環境に与える影響を調査するため、無線センサとデータ集約装置間にバラスト止めが存在しない状態で計測した結果との比較も行なった。

3.2 試験結果

3.1節に示した構成において計測したRSSIの測定結果を図3に示す。図3の記号は平均値、エラーバーは最大値と最小値のレンジを表しており、結果よりRSSIは距離に対して一様に減少せず、地点によりRSSIが増減している。また、バラスト止めが存在しない場合に比べて、バラスト止めを挟んで通信する場合には、RSSIの平均値が約3～10dB減少し、計測したRSSIのばらつきが大きく増大することを確認した。これは、試行数を増やすため、データ集約装置を何度か設置し直しながら

表3 シミュレーションに用いた無線機の設定

	Tx	Rx
周波数帯	920MHz	
帯域幅	400kHz	
アンテナ	水平面内無指向性 垂直面内半値幅 90 [deg]	
最大ゲイン [dBi]	1.64	0
VSWR	3	2
送信出力 [dBm]	13	-

表4 シミュレーションの各種パラメータ

パラメータ	設定内容
Ray Spacing	0.2°
最大反射回数	15
最大透過回数	1
最大回折回数	1
素材	バラスト止めコンクリ部分： コンクリート (比誘電率 7, 導電率 0.015 S/m)
	バラスト止め鉄筋部分： 金属

ら繰り返し同じ試番を測定した影響と考えられる。伝搬路にバラスト止めが存在する場合、バラスト止めで反射・回折・透過することで多数の伝搬パスが生じる。そのマルチパスの干渉があるため、送受信点間の微小な距離のずれにより、受信レベルが大きく変動することが想定される。そのため、データ集約装置を設置した際の位置の誤差により、RSSIの変動が生じたものと推測される。

3.3 電波伝搬シミュレーション

試験結果よりマルチパスによる干渉が推測されるため、バラスト止めによるパスの変化を確認することを目的として、実験環境を模擬したレイトレースシミュレーションを行った。計算には Wireless InSite v3.3.5 を用いた。シミュレーションでは、試験で使用したバラスト止めの配筋図に基づいた3Dモデルを作成した。なお、前述したように所内試験で敷設したバラスト止め同士に隙間が存在していたことから、シミュレーション上のバラスト止め同士の離隔を5mmとした。また、無線機の設定は、仕様に基づき表3の通りとした。さらに、送信点Tx(無線センサ側)の位置は図2(a)の通りとした。受信点Rx(データ集約装置側)は、図2(a)の無線センサとデータ集約装置を結ぶ軸に沿って、無線センサの位置を始点としてデータ集約装置に向かって0.016m間隔に配置した。

シミュレーションにおける伝搬に関する主なパラメータを表4に示す。パラメータ“Ray Spacing”はレイトレー

ス計算におけるレイの発射間隔を意味する。これらのパラメータについては、“Ray Spacing”が十分小さく、“最大反射回数”、“最大透過回数”等は十分大きい場合に精度の高い結果が得られる。今回の計算では、事前に試計算を行い、十分な精度を満たしつつ有限時間内に計算が終了するパラメータを設定した。

レイトレースシミュレーションで得られた受信信号強度と図3で示した実測値の比較結果を図4に示す。図中の0.5m付近の斜線部分はバラスト止め壁が位置する領域である。無線センサからの距離が0.5m未満では自由空間および二波モデルとはほぼ一致しており、バラスト止めで遮蔽された0.5mを超えると大きく減衰している。また、バラスト止め壁で遠くでは実測値と概ね一致していること、Rxの位置が数十mm変わるとRSSIが10～20dB変動することを確認した。

また、伝搬経路の一例として、TxとRxの距離が1.0mの場合の電波の経路を描画した結果を図5に示す。送信点からバラスト止めの反対側に到達する経路として、①バラスト止めのコンクリート部分を透過し内部の鉄筋部分とコンクリート面などで反射する経路、②隣り合うバラスト止め同士の間隙部分で数回反射する経路、さらに、③バラスト止め壁に存在する排水用の穴を経由する経路の3パターンが存在することを確認した。

これらのシミュレーション結果から、伝搬路にバラスト止めが存在することにより、コンクリート面や鉄筋部分での反射や回折等によって受信点に到来するパスが多数存在するためマルチパスによる干渉が発生し、数十mmの位置の変化で受信レベルが大きく変動することを確認した。

4. 所内試験線での計測結果

実際に無線センサを使用する環境への適用性を確認するためには、前章で述べたバラスト止め単体の電波伝搬への影響に加えて、バラストやまくらぎ、レール等の影響も併せて検証する必要がある。そこで鉄道総研の所内試験線において実際のバラスト止め区間を想定した試験環境を構築し、無線センサの性能確認試験を行った⁹⁾。

4.1 無線伝送試験

無線センサと線路脇に設置したデータ集約装置の間の無線通信品質に対する、道床とバラスト止め等の影響を評価するため、図6に示す試験環境を構築した。無線センサの高さは、まくらぎから100mm程度下方とし、データ集約装置の高さは無線センサに合わせた。またレール方向に対しては、レールに対して無線センサとデータ集約装置の通信経路が直交となるよう配置した。試験条件としては、無線センサとデータ集約装置の間の距離を3

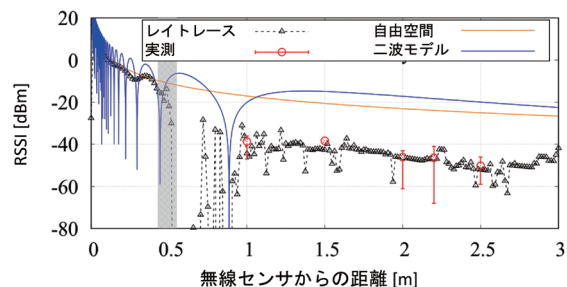
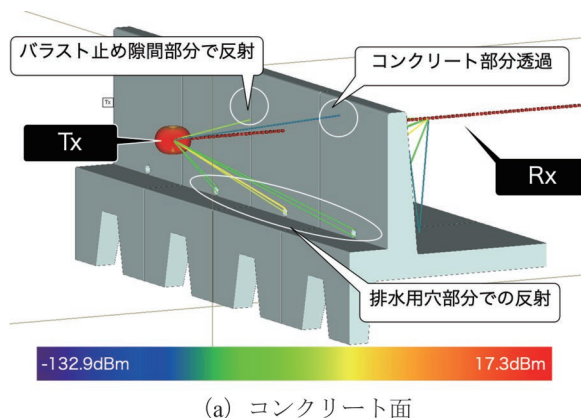
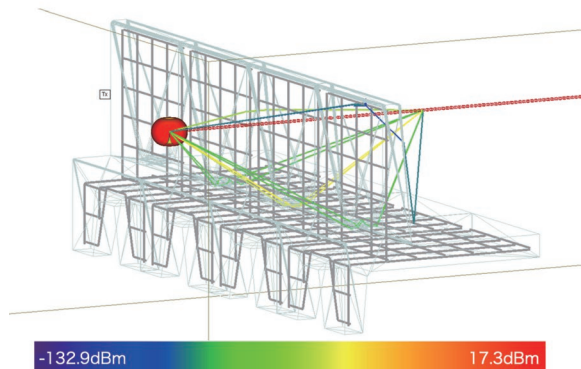


図4 シミュレーション結果と実測値の比較



(a) コンクリート面



(b) 鉄筋部分での反射 (約1.0m地点)

図5 伝搬経路の例 (1.0m地点)

パターン (1m, 1.5m, 2.0m)、無線センサ埋設前 (バラスト止めなし、バラスト充填前) と埋設後 (バラスト止めあり、バラスト充填後) の2パターンとし (図7)、計6通りとした。

なお、従来の有線センサの場合は、埋設時に列車通過荷重に耐えるために鋼製筐体で加速度センサを保護して強度を確保していた。しかし、無線センサを鋼製筐体に格納する場合には、電波が遮蔽されてしまい、無線によるセンサデータの伝送に支障をきたす。そこで、電波を透過させる樹脂製の筐体 (図8) を製作し、筐体の有無によりRSSIの変動がないことを確認した上で、無線センサを当該筐体に収容して試験を実施した。

無線センサ埋設前後のRSSIを計測した結果を図9に示す。まず、今回設定した無線センサ・データ集約装置

間の距離では、いずれの条件においても RSSI が表 2 に示したデータ集約装置の最低受信感度 -105dBm を上回ることを確認した。また、埋設前と比較すると、埋設後の RSSI の平均値が全体的に小さくなっており、いずれの地点においても埋設の影響により平均で約 10dB 以内の減衰が発生することを確認した。また、埋設後には RSSI のばらつきが最大 20dB 程度と増大している。これは、3 章の単体試験で確認したパラスト止めで生じるマルチパスの影響および、無線センサとデータ集約装置間のパラスト層での反射・散乱の影響により、微小な位置の違いによる受信レベルの変動が発生したものと考えられる。よって、パラスト止め区間では受信レベルの大きな変動を想定して、無線機の仕様検討や配置を行う必要があると推察される。

また、データ集約装置で受信した加速度データと無線センサ内部の SD カードに記録されたデータを照合した結果、全ての加速度データがデータ集約装置に到達していることを確認した。なお、次節の列車通過時の振動計測においても同様の照合を行い、軌陸車走行時にも抜け落ちなくデータ伝送が行われていることを確認した。

4.2 列車通過時の振動検知機能の確認

前節の試験環境において、パラスト止めの敷設及びパラスト投入・タンピング完了後に、無線センサ埋設地点を含む区間で軌陸車を走行させ、走行時の伝送可能性および無線センサの振動検知機能の検証を行った。なお、軌陸車の走行速度は、最大 40km/h 程度であるため、振動検知の閾値は 0.3G で固定とした。

無線センサの埋設位置を図 10 に示す。センサ①～⑤が今回開発した無線センサ、「有線」が従来の有線加速度センサを表す。なお、ケーブルが接続されていることで、加速度センサの動きが拘束されてしまう可能性を検証するため、センサ③は無線センサではあるがダミーのケーブルを付加している。

図 10 の通り埋設した無線センサの設定値と軌陸車走行時の振動検知回数を表 5 に示す。走行試験の結果、軌陸車走行に伴い振動検知機能が作動し、加速度データの SD カードへの記録とデータ集約装置へのデータ送信が行われることを確認した。

また、前述の通りいずれの無線センサにおいても振動検知の閾値は共通であるが、表 5 より、無線センサの位置により振動を検知できた回数に 0 回～8 回の差が生じている。その原因として、検知した振動は、軌陸車が図中のレール継目上を通過することによるものであるためであると考えられる。そのため、継目部に最も近いセンサ⑤での検知回数が最も多く、継目から遠い無線センサの位置では、振動加速度が 0.3G に満たなかったものと考えられる。また、ダミーケーブルを取り付けたセン

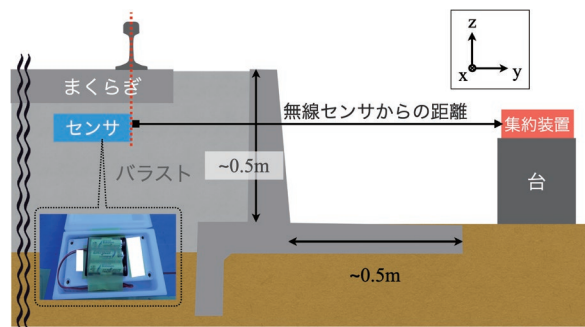


図 6 無線センサ・データ集約装置設置位置

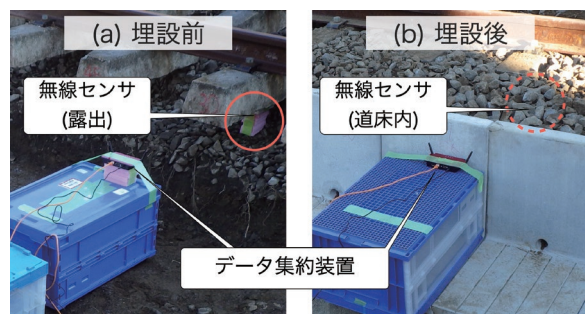


図 7 埋設前後の様子⁹⁾



図 8 樹脂製筐体

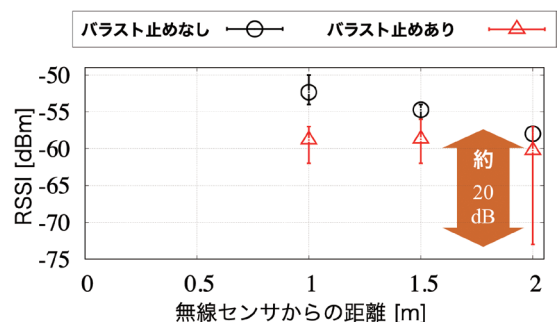


図 9 埋設前後の RSSI の変化⁹⁾

(点は平均値、塗り潰しは最大値-最小値のレンジ)

サ③では振動は検知されず、有線ケーブルの存在がセンサに与える振動に影響した可能性があると考えられる。

以上より、振動検知機能は確認できたが、事前に設定する閾値や設置箇所については、車両種別や走行速度、軌道状態を考慮して決定する必要があるといえる。

5. 今後の課題

前章で所内試験線における道床振動加速度計測時の無線伝送の可否等を確認した。その際、センサ②で取得した道床振動加速度の計測結果を、従来の有線センサ（有線加速度計）の計測結果と合わせて図 11 に示す。なお従来センサについては、1500 データ / 秒で AD 変換した結果である。

図 11 より、従来センサおよび無線センサのいずれにおいても、レール継目部通過時のものと推測される振動成分の波形が得られている。ただしセンサ②はサンプリング周波数が 200Hz であるため波形が粗く、従来センサで計測された波形の最大値・最小値が取得できていない。ただし、今回無線方式の候補として取り上げた Wi-SUN の伝送速度は 400kbps まで対応できるため、従来の有線センサと同等の時間分解能で計測したデータを伝

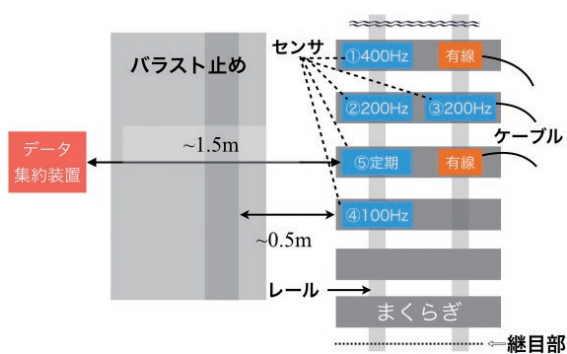


図 10 無線センサ埋設箇所

表 5 埋設した各無線センサのデータ取得条件

センサ	モード	サンプリング周波数 (計測時間)	検知回数
センサ①	振動検知	400Hz (0.225s)	1
センサ②	振動検知	200Hz (0.45s)	5
センサ③	振動検知	200Hz (0.45s)	0
センサ④	振動検知	100Hz (0.9s)	8
センサ⑤	定期		

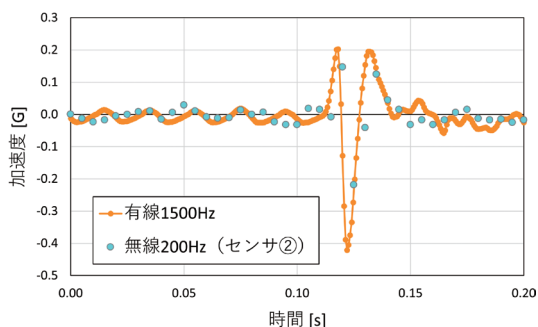


図 11 計測データの比較

送可能である。今後、無線機のパラメータ調整などを行なった上で検証を進めたい。

また、無線センサ保護のための樹脂製筐体により、バラスト振動の高周波成分が抜け落ちないかを検証する必要がある。加えて、バラスト径に対して同程度の大きさとなるよう無線センサの小型化が重要となる。

6. まとめ

道床振動加速度計測の無線化に向けて、無線機の仕様提案を行うとともに、鉄道総研所内試験線において提案した無線機を用いて、バラスト止めの影響も考慮した無線伝送試験を行い、その伝送特性と加速度データの計測可否を確認した。その結果、今回検証した 2m の範囲においては、データ集約装置の最低受信感度を上回る RSSI で加速度データの受信が可能であり、道床加速度計測を無線化できる可能性が高いことを確認した。

なお、本検討では既存の無線センサを用いたが、実軌道での計測を想定した場合、無線センサのサイズや計測データ量（サンプリング間隔や計測時間）を目的に合わせて最適化する必要がある、今後検証を進める予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、センサ開発や度重なる情報提供などにご協力いただいた株式会社アイ・エス・ビーの関係者の皆様にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 河野昭子：バラスト軌道のマイクロメカニクスに着目した解析手法の改良，鉄道総研報告，Vol.36, No.7, pp.69-78, 2021
- 2) 石田誠，名村明，鈴木貴洋：軌道沈下の実態と予測モデル，鉄道力学シンポジウム論文集，Vol.6, pp.61-66, 2002
- 3) Aikawa, A., et al.: Development of a measuring instrument of the triaxial acceleration on a ballast particle, Railway Engineering 2007.
- 4) D. Milne, et. al: Measuring Acceleration of Ballast Particles at Track Level, Proceeding of the 3rd Intl. Conf. on Railway Technology, Research Development and Maintenance, 2016.
- 5) Liu, S., et al.: Laboratory development and testing of "SmartRock" for railroad ballast using discrete element modeling. Joint Rail Conference, 2015.
- 6) Liu, S., et al.: Study on ballast particle movement at different locations beneath crosstie using "SmartRock". Joint Rail Conference, 2016.
- 7) 野末道子，流王智子，岩澤永照，岩城詞也，川村智輝，川

- 崎邦弘：鉄道環境における Wi-SUN センサーネットワークの活用，鉄道総研報告，Vol.32，No.5，pp.17-22，2018
- 8) Iwasawa, N., et al.: Basic Concepts of Buried Wireless Sensor under Ballasted Layer, ICSNC 2019, 4346, 2019.
- 9) 栗田いずみ，岩本功貴，流王智子，河野昭子，羽田明生，中村一城：バラスト軌道における道床加速度計測の無線化の検討，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.25，CD-ROM，2021

大都市圏における鉄道輸送サービスと沿線居住意向の関係

渡邊 拓也* 深澤 紀子* 奥田 大樹* 鈴木 崇正*

Relationship between Levels of Urban Railway Services and Residential Location Preference in Metropolitan Area

Takuya WATANABE Noriko FUKASAWA Daiki OKUDA Takamasa SUZUKI

Railway operators are endeavoring to improve levels of their services in order to gain more residents nearby. However, no studies have been focusing on the relationship between levels of railway services and residential location preference in metropolitan areas. In this study, a questionnaire survey was conducted in metropolitan areas. We applied a conjoint analysis to the collected data and quantified the effect of each transportation services on residential location preference. We confirmed that the effects can be compared quantitatively among each transportation service. The result of the analysis suggests that railway services that affect residential location preference differ depending on resident's attributes such as where they live and/or how often they use rail.

キーワード：都市鉄道，鉄道輸送サービス，居住意向，アンケート調査，コンジョイント分析

1. はじめに

人口減少時代への突入や働き方の変化などにより、鉄道の利用者数は減少することが予想される。そこで鉄道事業者は今後も安定的に需要を獲得するために、新駅設置や新型車両の投入などの設備投資をはじめ、ダイヤ改正による利便性の向上など多岐にわたる輸送サービス向上施策を実施し、自社路線の沿線居住者の維持・増加を図っている。しかし、それら施策がどの程度、沿線居住者の維持・増加に寄与しているかは明らかになっておらず、鉄道事業者は施策の有効性を定性的に検討しながら、手探りで各施策を実施している。その一方で、各施策の実施にはコストがかかり、限られたリソースで効率的な施策を実施することが求められている。特に、新線・新駅建設といった大規模な設備投資と比較すれば、運行本数やダイヤの変更といった輸送サービス向上施策は、比較的 low コストで実施することが可能である。それらと沿線居住意向の関係について明らかにできれば、各鉄道事業者の持続性に寄与することができ、沿線住民の生活の安心・安全の創造にもつながる。

鉄道路線の輸送サービスが、利用者の満足度や需要に与える影響について分析した研究事例は数多く存在する¹⁾²⁾が、沿線への居住という観点での検討はなされていない。居住の観点では、鉄軌道の運行頻度と駅周辺の人口分布の経年変化について分析する研究³⁾も存在するが、地方都市を対象とした検討に留まっている。

そこで本研究では、大都市圏の鉄道沿線に居住している鉄道利用者を対象として、鉄道路線の輸送サービスと

鉄道路線沿線への居住意向に着目し、それらの関係性について考察を行った。

2. アンケート調査によるデータの収集

2.1 仮想選択調査の設計

本研究では、被験者に対して様々な輸送サービスをもった仮想的な鉄道路線を複数提示し、それら路線に対する選好を調査することにより、個別の輸送サービスが居住意向にどの程度影響を及ぼしているかを明らかにすることとした。収集データに対する分析方法として、コンジョイント分析を適用することとした。コンジョイント分析は、複数の要素で構成される製品などの嗜好を把握する目的で、要素ごとの嗜好を定量的に評価するのが困難な場合に、全体の評価を行うことで、その結果から各要素の嗜好を推計する統計的方法である。

調査で提示する仮想的な鉄道路線は、列車本数や速達列車の有無などの複数の輸送サービスに関する属性を持つ。コンジョイント分析において、被験者に提示する選択肢をプロファイルといい、本研究ではこの仮想的な鉄道路線を持つ輸送サービスの組み合わせのことを指す。

コンジョイント分析を適用するためのデータの測定方法にはいくつかの方法があり、被験者が妥当な判断をできるかどうかなどを考慮して、その方法を決定する。今回は、提示した二つのプロファイルから好ましい一方を選択してもらって対比較法を用いる。本節では、対比較法を用いた調査の設計について述べる。

2.1.1 提示するプロファイル

評価の対象としたい輸送サービスはプロファイルに必ず盛り込む必要がある。しかし、提示する輸送サービス

* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

の種類が多くなりすぎると、被験者が各選択肢を適切に認知できなくなる可能性がある。そこで、最適な提示属性数についての既往研究⁴⁾や、鉄道事業者が輸送施策で改善しうるサービスか否かを考慮して、本研究では表1に示す9つの輸送サービスをプロフィールに盛り込む属性として採用した。また、各輸送サービスの水準は、各属性の現実的な変動幅を少し上回る範囲が両端となるように設定した。

本調査では、表1にまとめた水準をランダムに持つプロフィールを複数作成し、それを被験者に提示する必要がある。調査に必要なプロフィールの数を抑制するため、直交表を用いて64通りのプロフィールを作成した。

2.1.2 サンプルサイズの検討

一対比較法は、被験者にとって判断が容易であるという長所がある一方、統計分析に足る判断回数が非常に大きくなる欠点がある。そのため必要なサンプルサイズに関する検討が必要である。本研究では「全ての水準が500回以上出現」とする基準⁵⁾を参考にした。このとき、本研究で必要な総提示回数は3,800回程度となる。1人の被験者に10回の仮想選択を行わせる場合、被験者数は380人で良い。ただし、属性ごとの分析を行う際には、属性ごとに分割した後の提示回数が3,800を超えている必要があるため、より多くの被験者が必要になる。

2.1.3 仮想選択場面の状況設定

今回の調査では、個別の輸送サービスが評価に与える影響を調査するため、自宅周辺の地域の住みやすさや、駅周辺の公共施設・商業施設の多さ、通勤・通学先へのアクセスなどについては不変であって、最寄り鉄道路線だけが異なる状況になるような場面を被験者に想定させなければならない。ただし、そのような土地は現住地以外には存在し得ず、調査で提示する仮想的な鉄道路線の沿線に転居することを想定させる場合、仮定が多くなり、被験者が妥当な回答をすることができなくなる可能性がある。そこで、自宅や地域、駅周辺は全くそのままに、最寄り鉄道路線の輸送サービスだけが変化するという状況を想定し回答してもらうことで、居住意向に影響を及ぼす鉄道輸送サービスを評価することとした。

2.2 調査対象者

今回の調査は、自宅最寄りの鉄道路線の輸送サービスの違いが居住意向に及ぼす影響について問う調査であることから、被験者は、鉄道が身近にあり各家庭において居住場所に関する意思決定権を有している者であることが望ましい。また調査項目に対して適切に回答してもらうため、最寄り鉄道路線の利便性が居住地決定に影響を及ぼすと考える者であり、現住地から転居する可能性、または転居意向を多少なりとも持っている者である必要

表1 調査で設定した属性と水準

	属性	水準数	水準
1	快速列車などの速達タイプの列車の有無	4	①速達タイプの列車があり、最寄り駅には全て、もしくは大半停車する ②速達タイプの列車があり、最寄り駅にはそのうち半分程度停車する ③速達タイプの列車はあるが、最寄り駅には全く停車しない ④各駅停車の列車しかない
2	都心の大規模ターミナル駅までの直通運転	2	①あり ②なし
3	有料着席サービス（列車）の有無	2	①あり ②なし
4	小規模な遅延による目的地への到着時刻の数分の遅れの発生頻度	4	①1ヶ月に1回程度 ②2週間に1回程度 ③1週間に1回程度 ④ほぼ毎日
5	よく行く目的地に移動する際の、最寄り路線部分の片道運賃	5	①○○円（現状より2割増） ②○○円（現状より1割増） ③○○円（現状のまま） ④○○円（現状より1割引） ⑤○○円（現状より2割引）
6	よく行く目的地に移動する際の、最寄り路線部分の所要時間	5	①○○分（現状より2割増） ②○○分（現状より1割増） ③○○分（現状のまま） ④○○分（現状より1割減） ⑤○○分（現状より2割減）
7	自宅最寄り駅への終列車の到着時刻	6	①午後11時30分 ②午前0時00分 ③午前0時30分 ④午前1時00分 ⑤午前1時30分 ⑥午前2時00分
8	ラッシュ時間帯の1時間あたりの停車本数（片方向あたり）	8	①4本（15分間隔） ②6本（10分間隔） ③8本（7～8分間隔） ④10本（6分間隔） ⑤12本（5分間隔） ⑥15本（4分間隔） ⑦20本（3分間隔） ⑧30本（2分間隔）
9	ラッシュ時間帯の混雑の状況	5	①席が半分程度埋まる ②席が全て埋まり、つり革・手すりはほぼあいている ③席もつり革・手すりも全て埋まる ④折りたたむなど無理をすれば新聞を読める ⑤電車が揺れるたびに体が斜めになって身動きできず、手も動かせない

がある。さらに、鉄道輸送サービスに対する重要度・満足度評価は、地域によって異なることが示されている⁶⁾ことから、複数の地域を対象に調査を行うことが望ましい。

以上の検討により、①都市近郊鉄道が通過する、埼玉県・千葉県・東京都・神奈川県内の関東圏144市区町村、滋賀県・京都府・大阪府・奈良県・兵庫県・和歌山県内の関西圏96市町村のいずれかに居住していること、②鉄道を年数回程度以上利用していること、③年齢が18歳以上で高校生でないこと、④5年後の居住地が現住地と異なる可能性が少しでもある、または現住地から引越しをしたいと少しでも思っていること、⑤転居先に関して重視する項目（複数選択）について「最寄り駅を通る鉄道路線の利便性（列車本数など）」を選択すること、の5条件をスクリーニング条件とした。

本調査の実施はweb調査会社に委託した。被験者は、そのweb調査会社に登録されているモニターのうち、上記のスクリーニング条件に合致する者とした。

2.3 調査項目

2.1節で述べたように、調査では被験者に対して一対のプロファイル（仮想的な鉄道路線）を提示し、どちらの沿線への居住意向が高いかを尋ねた。本調査の対象者は、既に鉄道沿線に居住していて、大都市圏の鉄道輸送サービスに関して十分な認識を持っており、転居の可能性や意向があり、転居先として鉄道路線の利便性を重視する人である。そのため、沿線への居住意向が高い路線を尋ねることで、実際に転居する場面になったときに重視する沿線鉄道路線の輸送サービスを明らかにすることができると期待される。この選択調査を一人の被験者に対して、10回繰り返した。なお、これに加え、性別・年齢などの個人属性や、普段の鉄道の利用頻度、仮想選択で提示した9つの属性に関する自宅の最寄り鉄道路線・最寄り駅の状況についても尋ねた。

2.4 調査の実施と回答の収集

今回の調査では、スクリーニング調査と本調査の両方を、2020年12月1日～3日の3日間で実施した。最終的に、関東圏から2,383人、関西圏から2,329人の、合計4,712人から回答を得た。各被験者には仮想的な鉄道路線に対する選好評価を10回実施したため、評価についての取得サンプルサイズは、47,120(=4,712×10)である。

被験者の年齢・性別構成を図1に示す。被験者の年齢・性別・職業の構成に、関東圏と関西圏で大きな偏りはみられなかった。

今回の調査は、2020年以降に世界規模で発生した新型コロナウイルスの感染拡大後に実施したが、調査ではこの影響を除外するため、感染拡大前の自身の状況を想

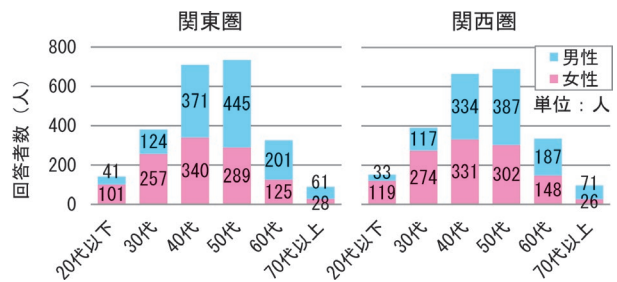


図1 被験者の年齢・性別構成

定して回答をもらった。

3. 分析の方法

3.1 効用関数の推定方法

本研究におけるコンジョイント分析では、ロジットモデルによる効用関数の推定を行った。調査において、被験者は2つの仮想的な鉄道路線から、沿線に居住するのに好ましいと思う鉄道路線を選択する。路線*i, j*の2路線から、路線*i*を選択する確率Prは、

$$\Pr(i \text{ を選択}) = \frac{\exp(V_i)}{\exp(V_i) + \exp(V_j)} \quad (1)$$

と書ける。ここに、 V_i は路線*i*の効用の確定項である。

今回の分析における効用の確定項は、提示する仮想的な鉄道路線が持つ各輸送サービスのパラメータの線形和とする。コンジョイント分析に用いる効用関数の形式にはいくつかあるが、本分析では現象に対して柔軟なフィッティングが可能である折れ線モデル⁷⁾を、全ての属性に対して仮定する。折れ線モデルの場合、輸送サービス*s*($\in S$)の水準*t*($\in T_s$)が仮想的な路線*k*で提示されるときに $D_{st}^{(k)} = 1$ 、提示されないときに $D_{st}^{(k)} = 0$ をとるダミー変数を用いると、路線*k*の確定効用 V_k は、輸送サービス*s*の水準*t*のパラメータ β_{st} を用いて、

$$V_k = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T_s} \beta_{st} D_{st}^{(k)} \quad (2)$$

と表すことができる。

パラメータ推計は最尤推定により行う。分析に用いる選択問題のサンプルサイズ（被験者数×繰り返し回答数）を*N*とし、選択問題*n*($= 1, \dots, N$)において提示される2つの路線のうち、被験者が選択した路線を*C_n*、選択しなかった路線を*Z_n*と記すと、尤度L(β)は、

$$L(\beta) = \prod_{n=1}^N \frac{\exp(V_{C_n})}{\exp(V_{C_n}) + \exp(V_{Z_n})} \quad (3)$$

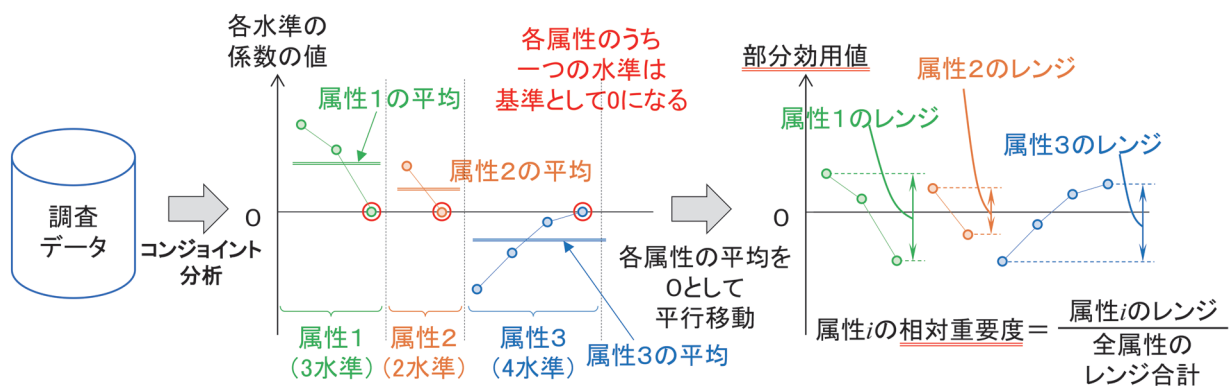


図2 部分効用値と相対重要度の算出手順

と表すことができる。これを最大にするような β が、求めるべきパラメータである。

3.2 部分効用値と相対重要度

パラメータ β の大小が、輸送サービスの各水準が居住意向に及ぼす影響の大きさを示しており、属性間においても相対的に比較ができるものである。分析結果の表現には様々な方法があるが、今回はコンジョイント分析を行った結果の解釈を行う際に一般的な、部分効用値と相対重要度と呼ばれる指標を用いる⁸⁾。

部分効用値は、各属性において全ての水準のパラメータの合計が0になるように平行移動させるゼロ和制約を適用して表現する。ゼロ和制約適用後の平行移動した後のパラメータの値を部分効用値という。相対重要度は、今回設定した水準において各属性が居住意向に及ぼす影響の最大幅を比較する指標である。属性ごとの部分効用値の最大値と最小値に着目し、その差（レンジ）を算出する。全ての属性のレンジを算出して合計し、各属性のレンジが、合計レンジのどれだけの割合を占めているかを計算したものが相対重要度である。これらの値の算出手順を図2に示す。分析の結果はこれらの指標に基づいて考察する。

3.3 妥当性の検証

モデル全体の当てはまりを示す指標として、自由度調整済み尤度比（McFaddenの決定係数） \bar{p}^2 を用いる。この値は、計算されたパラメータベクトル β と、全てのパラメータが0である零ベクトル 0 を用いて、

$$\bar{p}^2 = 1 - \frac{\ln L(\beta) - \text{size}(\beta)}{\ln L(0)} \quad (4)$$

と定義される。ここに、 $\text{size}(\beta)$ はパラメータの数（今回は全水準数－属性数）である。 \bar{p}^2 は、1に近いほどモデルの適合度が良いことを示す指標である。十分に高い

適合度を持つとされる値の閾値には、0.2～0.4が広く用いられる⁹⁾。

また、コンジョイント分析の特徴である複数仮説の同時検証を統計的に検定するために必要なサンプルサイズの基準として、仮想選択において各水準が被験者に500回以上選択される⁵⁾ というものがある。

今回は、これら2つの基準により妥当性を検証する。

4. コンジョイント分析の結果と考察

前章で説明した方法によって収集したデータに対し、コンジョイント分析を適用した。様々な切り口から分析を実施することができるが、本研究の目的は、居住意向に影響を及ぼす輸送サービスについて考察することである。鉄道輸送サービスに対する評価は地域によって異なることが示されている⁶⁾ ことから、居住意向についても異なる傾向を示すことが予想される。そこで、本研究では関東圏と関西圏それぞれで分析を適用した地域別の分析を行う。

さらに近年、鉄道事業者が実施する沿線価値向上の取り組みとして有料着席サービスの導入が拡大している。そこで、鉄道事業者が実施する施策として有料着席サービスに着目し、居住意向に及ぼす影響について考察するため、現在の有料着席サービスの利用頻度別の分析を行う。

効用関数のパラメータ推計には、統計解析ソフトウェア R(64bit) version 3.6.3¹⁰⁾ の survival パッケージ version 3.2.7¹¹⁾ における clogit 関数を用いた。

4.1 地域別の分析

関東圏2,383人、関西圏2,329人、それぞれから収集したデータに対して、別々にコンジョイント分析を適用した。その結果について、部分効用値と相対重要度を折れ線グラフにして表現した結果を図3に示す。

グラフは横軸に属性ごとに各水準を並べ、縦軸に部分効用値をとったものである。属性の下部に示した数値は

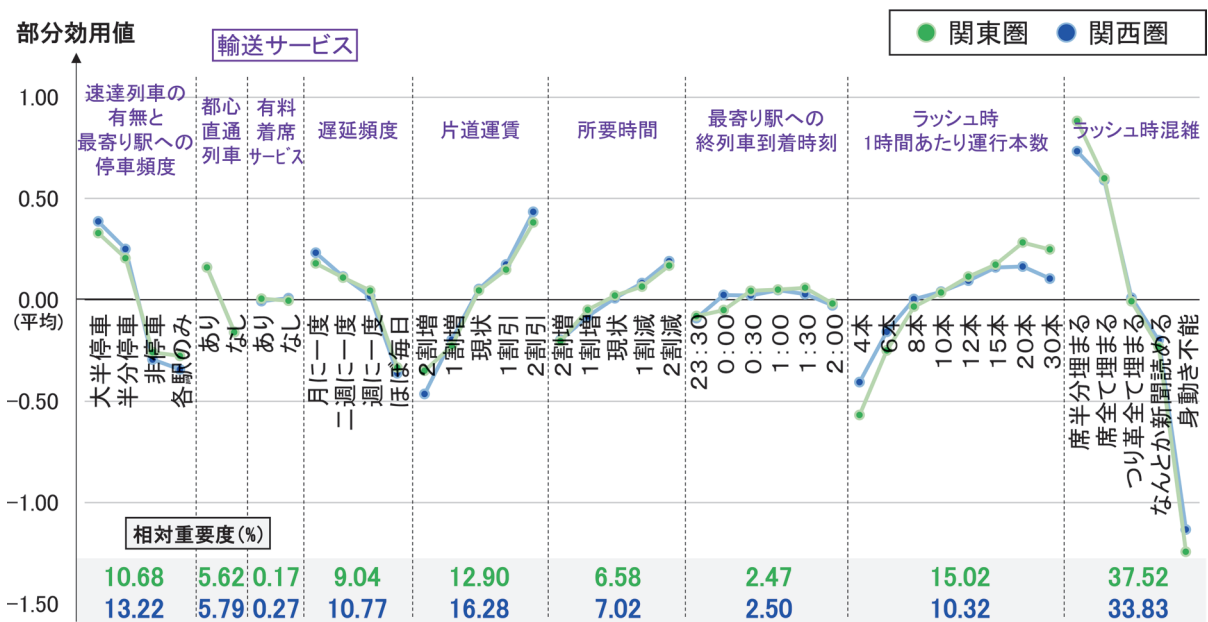


図3 地域別のコンジョイント分析の結果

相対重要度を表している。

4.1.1 分析結果の妥当性

モデル全体の当てはまりを示す自由度調整済尤度比 R^2 はそれぞれ0.1684（関東）、0.1576（関西）と計算された。今回のモデルの自由度調整済尤度比は、基準⁹⁾となる0.2を下回っているが、仮想選択状況による調査では、被験者にとっては現実ではない状況を想像させた場合、適合度が低く出てしまうこともある¹²⁾。

また、今回選択された水準のなかで最も回数が小さかったものは、ラッシュ混雑の「身動き不能」の3,049回であり、これは基準⁵⁾となる500回を超えている。

自由度調整済尤度比が十分高くないために、結果の解釈にあたっては留意が必要であるものの、鉄道の輸送サービスが居住意向に及ぼす影響に関して、コンジョイント分析を適用することができると考えられる。

4.1.2 各属性の相対重要度

各属性の相対重要度を比較すると、関東圏、関西圏ともに「ラッシュ時の混雑」が最も高く、「有料着席サービスの有無」が最も低いという結果となった。今回の調査で設定した水準における輸送サービスの変化の場合、居住意向に与える影響は「ラッシュ時の混雑」が最も大きく、「有料着席サービスの有無」が最も小さいことが示された。

「ラッシュ時の混雑」に続いて、相対重要度が大きかったのは、関西圏では「片道運賃」「速達列車」「遅延」の順であるのに対して、関東圏では「ラッシュ時運行本数」「片道運賃」「速達列車」の順であった。このように、地域によって居住意向に影響を及ぼす鉄道輸送サービスが異なることが示された。

4.1.3 各水準の部分効用値

属性ごとの部分効用値の分布を見ると、輸送サービスの利便性が相対的に高いと考えられる水準は部分効用値が概ね大きく、利便性が低いと考えられる水準は部分効用値が概ね小さくなっている。

「速達列車」属性について考察する。関東圏の各水準の部分効用値は、最寄り駅に大半が停車する場合は0.329、およそ半分程度停車する場合は0.205、停車しない場合は-0.258、そもそも速達列車が路線にない場合は-0.276であった。速達列車が最寄り駅に半分程度停車する場合と、全く停車しない場合で、部分効用値に大きく差が生じていることから、必ずしも全ての速達列車が最寄り駅に停車しなくとも、一部が停車するならば、居住意向への負の影響はそれほど大きなものにはならないと考えられる。また、速達列車が最寄り路線に存在はするけれども最寄り駅に停車しない場合と、そもそも速達列車が存在しない場合では、ともに部分効用値は平均を大きく下回る負値でそれほど変わらず、最寄り駅への停車が、居住意向への影響という観点からは重要であると考えられる。

各水準内の部分効用値の分布に着目すると、ほとんどの属性で、輸送サービスの利便性と部分効用値の関係は単調増加、もしくは単調減少になっている。しかし「終列車到着時刻」と「ラッシュ時運行本数」については、その傾向を示さなかった。鉄道利用の利便性のみで考えると、「終列車到着時刻」は遅いほど、「ラッシュ時運行本数」は多いほど、輸送サービスの利便性は高いものと考えられる。しかし、「終列車到着時刻」は関東圏は午前1時30分、関西圏は午前1時00分の部分効用値が

最も高く、そこから遅くなるにつれて部分効用値は低下しており、全体として上に凸の傾向を示している。同様に、ラッシュ時運行本数についても、1時間あたり20本の水準までは運行本数が増加するにつれて部分効用値が増加しているが、1時間あたり30本の水準では、20本のときよりも部分効用値が低くなっている。

この傾向は、沿線に住みたいかどうかという観点で考えた場合に、終列車の到着時刻が遅く、ラッシュ時の運行本数が1時間に30本もあるような、人口密度が高く鉄道利用者が多いエリアの路線の沿線には居住したくないという気持ちを反映したものであると考えられる。利用の観点から鉄道の利便性を考えると、運行本数は多く、終電は遅いほうが好まれるが、居住地選択においては、鉄道の利便性を重視する人であっても、交通利便性が高い都心エリアに居住することを好まない可能性がある。

両地域の結果が顕著に異なる箇所に着目する。「ラッシュ時運行本数」属性について、1時間あたりの運行本数が8~15本の場合には、両地域の部分効用値にはそれほど差がないものの、それらより多い場合にも少ない場合にも差が生じている。このことは、1時間あたりの運行本数について、多い場合に十分だと考える本数や、少ない場合に不満を抱き始める本数の境界に、両地域で差があることを示唆するものである。

4.2 有料着席サービス利用頻度別の分析

鉄道事業者が実施する施策が、沿線居住意向に影響を与えるかどうかについて考察するため、施策の一例として有料着席サービスに着目した分析を行う。自宅の最寄り鉄道路線の有料着席サービスを「よく利用する」「ときどき利用する」と回答した271サンプル、それ以外の「ほとんど利用しない」「全く利用しない」「最寄り路線には無い」と回答した4,441サンプルにセグメントし、それぞれについてコンジョイント分析を適用した。「利用する」グループでは、各水準が選択された回数で最小のものが500を下回っており、十分なサンプルサイズを確保できていないため、この分析結果は、あくまで傾向を把握するための補助的な位置付けとしたい。

分析の結果、有料着席サービスを「利用する」グループにおいては「有料着席サービスの有無」属性の項のパラメータが統計的に有意となった。したがって、日頃から有料着席サービスを利用していることで、居住意向の観点でも有料着席サービスに対する意識が高まることが示された。有料着席サービスを普段から利用する方にとって、有料着席サービスの運行路線沿線への居住意向が大きいことは当然のことのように思われるが、このことはこれまで定量的に検証されていない。本手法を適用することで、その有意性や、影響の大きさを定量的に把握できるようになることに大きな意義がある。

4.3 属性間の居住意向への影響の定量的な比較

コンジョイント分析で算出した各属性の部分効用値を比較することで、直接的には金銭単位で評価できない属性の価値を、金銭単位に換算して評価を行うことができるようになる。

今回は計算例として、関東圏におけるラッシュ時運行本数の変化を片道運賃の変化割合に換算することを考える。効用関数に折れ線モデルを仮定しているため、属性の値によっても、別の属性が1単位変化した場合の属性の変化量は異なるものとなる。

ラッシュ時運行本数について部分効用値の分布は、1時間あたりの運行本数が30本のときを除けば、本数が増えるに従って部分効用値の変化量が小さくなっている。そこで、運行本数について逆数をとることで、運転間隔(分)に変換し、1時間あたり4本から20本の間に関して線形単回帰分析を適用すると、運転間隔(分)の係数が-0.0697、切片が0.4671と推計でき、決定係数が0.9961と極めて高い数値となった。すなわち、ラッシュ時の1時間あたりの運転本数が4本から20本の路線では、運転間隔が1分短縮するごとに部分効用値が0.0697上昇すると計算できる。

ここで計算された値を、片道運賃の変化割合に変換することを試みる。運賃が現状から1割減少することの部分効用値の増分は0.103であるから、これを0.0697で割ることにより、運転間隔1.48分に相当すると計算できる。ただし、この数値は鉄道利用に関する効用について計算したのではなく、居住意向に対する影響を定量化したものであるため解釈が難しい。この場合であれば、「最寄り路線のラッシュ時の運転間隔が1.48分変化することによるその路線への居住意向の変化は、最寄り路線の片道運賃が10%変化することによる居住意向の変化に相当する」と解釈が可能である。

4.4 分析結果に基づく効果的な輸送サービスの検討

本章で示した分析結果と考察に基づき、鉄道事業者が自社沿線の居住者を維持・増加させるために効果的な輸送サービスについて、いくつかの例をあげて検討する。

4.4.1 速達列車と停車駅の設定

「速達列車の有無と最寄り駅への停車頻度」属性では、「大半停車」「半分停車」と「非停車」「各駅のみ」の間に大きな部分効用値の差が見受けられる。このことから、速達列車を設定する場合には、速達列車の種別を複数用意し、速達列車のうち半分程度が停車するような駅をなるべく多く設ける方が、路線全体の居住意向を高めるという観点では好ましいと考察できる。

速達列車の停車駅を増加させた場合、全体として所要時間は増加する。しかし「所要時間」属性の「1割増」水準の部分効用値は、関東圏で-0.050、関西圏で-0.082

であり、この絶対値は「半分停車」水準の部分効用値である。関東圏の0.205、関西圏の0.251よりも小さい。したがって、所要時間が1割増加する程度であれば、速達列車が半分停車する駅を増加させたほうが、全体としての居住意向の向上に寄与すると考えられる。また、速達列車の停車駅を増加させつつ、所要時間の増加を抑える施策としては、速達列車の停車駅を分散化させる施策（千鳥停車と呼ばれる）も効果的であると考えられる。

4.4.2 許容されるラッシュ時混雑の程度

「ラッシュ時混雑」属性においては、どのセグメント化をした分析においても、「つり革が全て埋まる」水準の部分効用値が概ね平均程度を示し、「なんとか新聞読める」水準と「身動き不能」水準に大きな差がみられた。各水準の混雑度合いは、国土交通省による混雑度の目安¹³⁾において、それぞれ100%、180%、250%を示す。「つり革が全て埋まる」水準と「なんとか新聞読める」水準の部分効用値の差と比較すると、「なんとか新聞読める」水準と「身動き不能」水準の部分効用値の差は5倍以上の差があり、鉄道事業者にとっては、ラッシュ時の混雑率が180%を超えないようにすることが、居住意向に対する負の影響を加速度的に増加させないための一つの目安となると考えられる。

4.4.3 関東圏と関西圏の分析結果の違い

関東圏と関西圏で異なる傾向を示す属性の一つに、「ラッシュ時1時間あたり運行本数」がある。1時間あたり15本と20本の間の部分効用値の差は、関東圏では0.109であるのに対して、関西圏では0.005しかない。本調査の被験者自宅の最寄り路線におけるラッシュ時1時間あたりの運行本数の平均は、関西圏（9.85本）よりも関東圏（12.88本）のほうが多く、現在受けている輸送サービスの多寡の影響を受けていると考えられる。

また、「最寄り駅への終列車到着時刻」属性について、関西圏では「午前0時00分」水準の部分効用値が0.023で0を上回っていたのに対して、関東圏では-0.052で0を下回っていた。なお、被験者自宅の最寄り駅の終列車到着時刻の平均は、関西圏が午後11時58分で午前0時00分より速かったのに対して、関東圏では午前0時10分であり、午前0時00分より遅かった。その一方で、相対的なサービス水準を設定した「片道運賃」属性や「所要時間」属性においては、関東圏と関西圏に差はほとんど見られなかった。

したがって、本手法はどの地域に対しても適用することが可能であるが、各地域の鉄道における現状の輸送サービスレベルが、居住意向評価に影響を及ぼすものと予想されるため、それを踏まえた施策の決定が重要である。

4.4.4 有料着席サービスの利用状況の影響

地域別のコンジョイント分析の結果によれば、有料着席サービスの有無による部分効用値の違いは、関東圏、

関西圏ともに0.01程度であった。前節に示した考察の通り、関東圏におけるラッシュ時1時間あたりの運行本数が4本から20本の路線では、運転間隔が1分短縮するごとに部分効用値が0.0697上昇することから、有料着席サービスの存在は、運転間隔の短縮8秒程度にしか相当しないことになる。

ただし、有料着席サービスを利用している人を対象にした分析では、有料着席サービスの存在に対する部分効用値は0.117であり有意であった。本調査の被験者では、有料着席サービスを「よく利用する」もしくは「ときどき利用する」人の割合は5.8%に留まったが、有料着席サービスの利用率がより高まることで、全体としても、有料着席サービスの存在が居住意向に影響を及ぼすようになる可能性がある。

5. まとめと今後の課題

本研究では、居住意向に影響を及ぼす都市鉄道の輸送サービスに関するwebアンケート調査によって得られたデータに対してコンジョイント分析を適用し、調査で設定した9つの鉄道輸送サービスについて、居住意向への影響を定量的に評価した。その結果、今回設定した水準内の変化においては、ラッシュ時の混雑程度が最も居住意向に影響を及ぼしており、有料着席サービスの有無がそれほど影響を及ぼしていないことがわかった。地域別の分析結果からは、関東圏と関西圏では、各輸送サービスに対する重要度が異なることや、許容できるサービス水準のレベルに違いがある可能性が示唆された。また、有料着席サービスの利用頻度別の分析から、被験者が置かれている状況や現在の利用傾向が、部分効用値に対して影響を及ぼすことがわかった。さらに、コンジョイント分析で算出した各属性の係数の比較から、部分効用値に与える影響を、複数属性間で定量的に比較することが可能であることを確認した。

最後に本研究の課題について述べる。今回構築したモデルに関しては、モデルの適合度を示す自由度調整済尤度比が、適合度が高いと見做せる0.2を超えなかった。本研究で行った仮想選択調査においては、路線沿線への居住意向に影響を及ぼしていると報告されている鉄道路線のイメージ¹⁴⁾を始め、車両や設備のデザイン、緩急接続の有無、パターンダイヤ化の有無など、調査対象から除外した属性も存在した。除外した属性による居住意向への影響も存在していると考えられるため、モデルの適合度が十分でなかった一因として、居住意向を説明するのに十分な属性を組み込めなかったことが考えられる。これら属性をモデルに組み込むことによって、沿線への居住意向に影響を及ぼす要因をより詳細に明らかにすることができ、鉄道事業者にとって、沿線居住者の維持・

増加に向けた輸送サービス向上施策への活用が可能になると考えられる。

文 献

- 1) 櫛谷浩之, 井上晋一, 荒川英司: 東京圏を方面別に見た鉄道サービスの満足度, 土木計画学研究・講演集, Vol.24, No.1, pp.389-392, 2001
- 2) 武藤雅威, 奥田大樹: 鉄道競合地域における定量的な駅勢圏設定手法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.2, pp.5-10, 2013
- 3) 長尾基哉, 中川大, 松中亮治, 大庭哲治, 望月明彦: 地方都市における鉄道・軌道の運行頻度に着目した駅周辺人口分布の経年変化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, No.2, pp.399-407, 2010
- 4) 佐藤真行, 新山陽子: 食品購入時の提示情報量と消費者の選択行動—トレーサビリティ・システムにおける情報提供をめぐって—, フードシステム研究, Vol.14, No.3, pp.13-24, 2008
- 5) 宋財法, 善教将大: コンジョイント実験の方法論的検討, 法と政治, Vol.67, No.2, pp.611-652, 2016
- 6) 深澤紀子, 奥田大樹, 鈴木崇正: 鉄道輸送サービスが路線愛着度に与える影響に関する基礎的検討, 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019), 2019
- 7) 湯沢昭, 須田熙, 高田一尚・境潔: コンジョイント分析の適用性に関する実証的研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.8, pp.257-264, 1990
- 8) 君山由良: 第3版コンジョイント分析, データ分析研究所, 2010
- 9) 土木学会編: 非集計行動モデルの理論と実際, 丸善, 1995
- 10) R Core Team, "R: A Language and Environment for Statistical Computing," R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: <https://www.r-project.org/> (参照日: 2022年7月4日)
- 11) Revelle, W., "psych version 2.1.6," <https://cran.r-project.org/web/packages/psych/index.html> (参照日: 2022年7月4日)
- 12) 梅本通孝: 県域間に及ぼすような長距離避難における住民の避難手段選択に関する研究, 都市計画論文集, Vol.46, No.3, pp.132-142, 2011
- 13) 国土交通省: 三大都市圏の主要区間の平均混雑率の推移 (2018), 国土交通省令和元年7月18日報道発表資料 (三大都市圏で輸送人員は微増, 東京圏混雑率は横ばい), 資料1, <https://www.mlit.go.jp/common/001299795.pdf>, 2019 (参照日: 2022年2月1日)
- 14) 渡邊拓也, 深澤紀子, 奥田大樹, 鈴木崇正: 都市鉄道における鉄道路線イメージと沿線居住意向の関係の考察, 土木計画学研究・講演集, Vol.64, CD-ROM, 2021

電気車と電力設備の協調に関する関連規格と要件

仲村 孝行* 赤木 雅陽** 廿日出 悟*

Relevant Standards and Requirements of Coordination between Electric Railcars and Power Supply Systems

Takayuki NAKAMURA Masataka AKAGI Satoru HATSUKADE

Coordination between electric railcars and power supply systems is essential to introduce new technical elements in onboard power conversion systems. The standard on the coordination is established in Europe, whereas there are no documents to rely upon in Japan. The European standard, which operates as a mandatory standard concretely designates technical specific values. Therefore, understanding the standard is essential of performing business abroad. The standard is also useful for performing business in Japan, in situations such as determination and assessment for new technical elements. Considering these circumstances, this paper explains the requirements regarding the coordination to be also useful for business in Japan.

キーワード：車両設計，電気車，き電システム，規格，標準電圧

1. はじめに

新形式車両の製作や車載電機品（主回路制御装置，補助電源装置）の更新など，これらの電機品に新規要素を導入する場合，既存の信号システムやき電システムに対する適合性評価が必要となる。このためには，人的，時間的，金銭的なコストを必要とする現車での確認を要する項目もあり，鉄道事業者や電機品製造事業者の負担となる。

日本国内においてこの評価時に拠るべき基準は「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」（以下，「技術基準省令」と表記）であり，鉄道事業者として遵守すべき強制力を有する。車載電機品のうち，走行用機器に相当する動力発生装置については，技術基準省令第68条第2項第2号において，「誘導作用による障害を鉄道事業の用に供する他の電気回路の電気設備に及ぼすおそれのないものであること」と定められている。第68条の解釈基準の解説（解説は強制力を有さない）では信号システムに対して考慮すべき周波数が例示されている¹⁾。一方，き電システムに対して考慮すべき要件は文献1では定量的に定められていない。電力設備側の観点で，技術基準省令第41条第5項の解説で適正な運行を確保するための電圧範囲が例示されているのみである²⁾。車載電機品に関する国家規格（JIS規格）の多くは，当該製品に関して発注者と製造事業者が協議すべき事柄を定めた製品規格であり，法的強制力のない任意規格に相当する。このためき電システムに対して考慮すべき要件について拠るべき具体的な仕様を定めた国内基準や規格はなく，

各鉄道事業者にて所要の要件を規定することが求められる状況にある。

一方欧州では，欧州域内での相互直通運用を実現するための強制力を持つ技術仕様としてTSI（Technical Specifications for Interoperability：相互直通運用のための技術仕様）が定められており³⁾，電気車と電力設備の協調に関する詳細仕様は欧州の地域規格であるEN 50388を参照している。EN規格は強制力を有さない任意規格であるが，強制力を有するTSIから参照されたEN 50388の条項は強制力を有する。そのため，欧州に車載電機品を納入する製造事業者にとって，EN規格に定められた電気車と電力設備の協調の要件の理解は必須となる。また，EN規格に定められた要件を理解することで，間接的に国内業務における車両設計や適合性評価の業務効率化の一助となることが期待されるが，対応するJIS規格や解説となる文献は現在存在しない⁴⁾。サプライチェーンの国際化の観点及び，WTO政府調達協定における安全注釈の撤廃（2020年2月発効）を踏まえ，日本国内においても車載電機品と電力設備の協調に関する仕様の明示化が今後は求められるであろう⁵⁾。そこで，日本国内における車載電機品への新規要素導入時における業務効率化に資するよう電気車と電力設備の協調に関する規格および求められる要件を概説する。

2. 関連規格および標準電圧値

電気車と電力設備の協調に関する具体的要件に先立ち，関連規格および標準となる電圧値について整理する。

2.1 国際規格，国家規格および地域規格

本解説で扱う規格類はIEC規格，EN規格，JIS規格

* 車両技術研究部 駆動システム研究室

** 電力技術研究部 き電研究室

であり、基本的には法的強制力を有さない任意規格である。IEC規格は国際規格、EN規格は欧州の地域規格、およびJIS規格は日本の国家規格である。EN規格は任意規格であるが、TSIから参照されたEN規格は強制力を有する。これは日本において技術基準省令がJIS規格を参照することで、JIS規格において規定された事柄が強制力を有することに相当する。日本では国家規格であるJIS規格が、国際規格であるIEC規格から逸脱する事態にならないよう、IEC規格に整合させる動きが進んでいる。

2.2 車載電機品に共通する規格と動向

車載電機品に共通する国際規格（IEC規格）と地域規格（EN規格）、国家規格（JIS規格）の対応を表1に示す^{6)~14)}。本報告の中心となる規格である電気車と電力設備の協調に関する規格の概要などは次章で詳述するため、本項ではIEC規格とEN規格の対応にとどめる。以下、各節で関連規格の概要と動向などを概説する。

2.2.1 標準電圧

標準電圧および電圧の範囲はIEC 60850に定められている。本規格で定義された電圧は電気車と電力設備の協調に関する規格でも使用されている。本規格に対応するJIS規格は存在しないが、JIS E 5004-1ではIEC 60850を参照している。また、技術基準省令第41条第5項の解釈基準および解説に、電車線の標準電圧と最高電圧・最低電圧が例示されている²⁾。具体的数値は2.3節で挙げる。

2.2.2 絶縁協調

車載電機品が具備すべき絶縁耐圧や試験電圧について定めた規格として、絶縁協調に関する規格が存在する。過電圧カテゴリーや汚損度に応じて最小空間距離および最小沿面距離の決定法が定められており、文献15で詳細な解説が示されている。絶縁協調に関する要件は1999年に制定されたIEC 60077-1において定められて

表1 国際規格と、地域規格および国家規格の対応

	国際規格 (IEC)	地域規格 (EN)	国家規格 (JIS)
標準電圧	IEC 60850 (2014)	EN 50163 (2004)	-
絶縁協調	IEC 62497-1 (2010)	EN 50124-1 (2017)	-
車載電機品 の一般規則	IEC 60077-1 (2017)	EN 60077-1 (2017)	JIS E 5004-1 (2022)
電気車と 電力設備の協調	IEC 62313 (2009)	EN 50388-1 (2022)	-

※ 括弧は最新版の発行年

いた。その後、2001年に絶縁協調に関する要件を独立させた欧州規格としてEN 50124-1が発行され、2010年に当該規格を基礎とするIEC 62497-1が発行された。IEC化に際して議論となった事柄などは文献16に示されている。EN 50124-1は2017年に改訂され、現時点において追補の作業が2023年終了を目途に行われている。この後にIEC 62497-1の改訂が提案される可能性があるため、今後の動向を注視する必要がある。

2.2.3 車載電機品の一般使用条件および一般規則

一般的に車載電機品の仕様として定めるべき用語、使用条件、試験等をまとめた規格がIEC 60077-1である。最新版のIEC 60077-1は2017年版であり、IEC 62497-1に整合させるように改訂された。IEC 60077-1に対応するJIS規格がJIS E 5004-1である。JIS E 5004-1はIEC 60077-1と同様にIEC 62497-1にも整合させるように2022年に改訂された。

2.3 国際規格で定められた標準電圧値

IEC 60850に定められている電圧値の具体的数値および定義を本節で示す。IEC 60850で定められた定義や数値は電気車と電力設備の協調の規格を含む他の規格でも使用される。

電圧値 U の定義は表2の通りであり、以下のような要求事項がある。

- ・電圧値 U が U_{min2} と U_{min1} の間の状態が2分を超えてはならない。
- ・電圧値 U が U_{max1} と U_{max2} の間の状態が5分を超えてはならない。
- ・変電所での電圧は無負荷状態で U_{max1} 以下でなくてはならない（直流き電は U_{max2} まで許容可能）。
- ・通常時の電圧は $U_{min1} \leq U \leq U_{max2}$ とする。
- ・異常時においても電圧が $U_{min2} \leq U \leq U_{min1}$ の範囲では損傷や機能不全などの影響を及ぼしてはならない。
- ・ $U_{max1} \leq U \leq U_{max2}$ に達したら、 U_{max1} 以下になるようにしなければならない。 $U_{max1} \leq U \leq U_{max2}$ は一時的な現象（例：回生制動時、タップ切換による電圧補償）に限り許容される。
- ・ U_{min2} でも車両は動作可能であること。（車両の低電圧検知に関する保護整定値は U_{min2} の85%~95%に設定すべきである。）

表2で示された各電圧種別に対する具体的数値の一例を表3に示す。国際標準となる数値はIEC 60850の4章で定められており、各国固有の数値は附属書Bに定められている。日本固有の数値も附属書Bに定められている。そのため、IEC 60850の改訂時には本文のみならず、附属書Bの扱いについても留意する必要がある。なお、この附属書BはNormative（規定）の扱いである。

表2 国際規格における電圧の名称

	名称 (英)	名称 (日)
U_n	Nominal voltage	公称電圧
U_{max1}	Highest permanent voltage	連続最高電圧
U_{max2}	Highest non-permanent voltage	短時間最高電圧
U_{min1}	Lowest permanent voltage	連続最低電圧
U_{min2}	Lowest non-permanent voltage	短時間最低電圧

3. 電気車と電力設備の協調に関する規格

3.1 電気車と電力設備の協調に関する規格の概要と動向

電気車と電力設備の協調に関する要件を定めた国際規格は表1に示した通り IEC 62313 であり、対応する JIS 規格などの国内規格は存在しない。IEC 62313 の原案となった EN 50388 は 2005 年に初版が発行され、2009 年に IEC 化された。IEC 化の際には切替セクション方式に代表される日本の実情などに関する修正提案の審議結果を反映した。その後、EN 50388 は 2012 年に改訂版が発行された (TSI は 2012 年版 EN 50388 を参照)。その後も改訂作業が継続していたが、2012 年版から技術要件を大幅に見直し数値規定が増加した 2022 年版が発行された。なお今回 EN 50388-1 とパート番号が付与されたのは、EN 50388:2012 の 10 章に定められた高調波及び動的影響に関する条項を EN 50388-2 として分離させることを見越した対応であると予想される。EN 50388-1 の発行により、2009 年以来改訂されていない IEC 62313 の改訂を提案される可能性がある。IEC 改訂時に日本の実情を国際規格に反映できるよう、内容の理解や準備を進める必要がある。その準備の一例として、例えば鉄道事業者において次節で定められた要件について、具体的数値を含めて精査したり、仕様書指定の準備をしたりすることは、車載電機品調達の観点と国際規格審議の両者の観点から有用であろう。

表3 IEC 60850 に定められた標準電圧

U_{min2}	U_{min1}	U_n	U_{max1}	U_{max2}
(DC 360V)	(DC 360V)	(DC 600V)	(DC 720V)	(DC 800V)
DC 500V (DC 450V)	DC 500V (DC 450V)	DC 750V	DC 900V	DC 1000V
DC 1000V (DC 900V)	DC 1000V (DC 900V)	DC 1500V	DC 1800V	DC 1950V
(AC 16kV)	(AC 16kV)	(AC 20kV)	(AC 22kV)	(AC 24kV)
AC 17.5kV (AC 20kV)	AC 19kV (AC 22.5kV)	AC 25kV	AC 27.5kV (AC 30kV)	AC 29kV (AC 32kV)

※ 括弧は附属書 B に記載された日本における数値

3.2 電気車と電力設備の協調に関する規格で定められた要件

本節では、現在も欧州域内で強制力を有している 2012 年版の EN 50388 に定められた事柄を中心に記載する¹⁷⁾。IEC 62313 および 2022 年版 EN 50388-1 で変更になった事柄は適宜付記する。特に、車両の TSI において電気車に対して強制力を有する要件として参照されている条項は表 4 の通りである。

3.2.1 力率 (交流電気車)

EN 50388 で定められた力率は誘導性力率と容量性力率に条項が分離されている。誘導性力率では有効電力量および無効電力量で定義された力率が必要となり、この値が 0.95 以上であることを定めている。なお、工場や留置時など補機類のみの動作で 200kW を超えて集電する場合の力率は 0.8 以上であることが定められている。容量性力率に対しては、フェランチ効果防止の観点で $U_{max1} \leq U \leq U_{max2}$ においてコンデンサの働きをしてはならない旨定められている。

2022 年版の EN 50388-1 では構成が大幅に変更されている。変位力率が 0.95 以上であること、公称電圧における最大出力の 3% の無効電力が許容されることが定められている。さらに無効電力量の具体的数値が導入され、「25kV 50Hz き電システムにおいて架線電圧が U_{max1} を超える場合に無効電力量 190kvar を超えてはならない」旨定められている。190kvar については、駆動ユニット (traction unit: パンタグラフから主電動機までの駆動用機器一式。日本における MM² ユニットとほぼ同義) の値であり、列車の状態などについては特に指定されていない。数値規定の目的としては、前述のフェランチ効果防止の観点で設けられたものと想定される。IEC 化に際しては具体的数値の扱いが論点となるであろう。その他、駆動時 (0.95 以上)、静止時 (0.8 まで低下してよい) など個々の状況に応じた数値が定められた。

日本で現在製造される交流電気車は PWM 整流器により力率 1 制御が行われているため、問題ないものと考えられる。ただし、パンタ点での力率 1 制御を求められる場合は、扱いに注意を要する。日本では計器用変圧器を搭載していない車両も存在するためである。計器用変

表4 EN 50388 (2012 年版) に定められた要件と条項

強制力を有する要件	要件の条項	適合性評価の条項
力率 (交流電気車)	6 (6)	15.2 (14.2)
力行絞り込み制御	7.2 (7.2)	15.3 (14.3)
高調波及び動的影響	10 (10)	15.5 (14.5)
保護協調	11 (11)	15.6 (14.6)
回生制動	12 (12)	15.7 (14.7)

※ 括弧は IEC 62313 における条項

圧器を搭載しない交流電気車は、主変圧器の3次巻線における電圧値を用いてPWM整流器の制御をおこなっているため、パンタ点における厳密な力率管理が難しくなるものと想定される。欧州では車両のTSI条項4.2.8.2.2で実測の架線電圧が確認可能なように定められているため³⁾、計器用変圧器を前提とした議論となる可能性がある。

3.2.2 力行絞り込み制御

EN 50388 の7章では主回路電流の制限について定められており、低電圧時に集電電流を絞り込み制御するよう定められている。絞り込み特性はき電システムに対して一意であり、絞り込み開始電圧は U_n の0.9倍 (DC 750V き電システムのみ U_n の0.8倍)、絞り込み停止電圧は U_{min2} 、低電圧検知時の保護整定値は U_{min2} の85%~95%とするよう定められている (図1)。IEC 62313 では絞り込み開始電圧を Informative にする対応がとられている。日本では採用事例として、例えば文献18の事例があるが、その特性はEN 50388の特性とは異なる他、電流での規定とモータートルクでの規定の両方の例が挙げられている。また、架線電圧低下時における運行ダイヤへの影響の懸念から力行絞り込み制御自体を採用しない鉄道事業者もあるものと想定される。

2022年版のEN 50388-1では、集電電流の絞り込み特性だけでなく、集電電力の絞り込み特性も加筆された形で、附属書Fに Normative (規定) の扱いとして定められている。そのため、今後のIEC化に際して附属書Fを Informative (参考) の扱いにするなどの対応が必要であろう。

3.2.3 高調波及び動的影響

EN 50388 では高調波や過渡的な動的影響など、電気車や電力設備の回路定数に起因する意図しない共振などについて、技術の概説がされている。主な現象として、システムの不安定に起因する低周波振動や高調波に起因する過電圧が挙げられる (図2)。具体的な波形はEN 50388の附属書Cに例示されている。この附属書Cは Informative (参考) の扱いである。また、附属書Dで

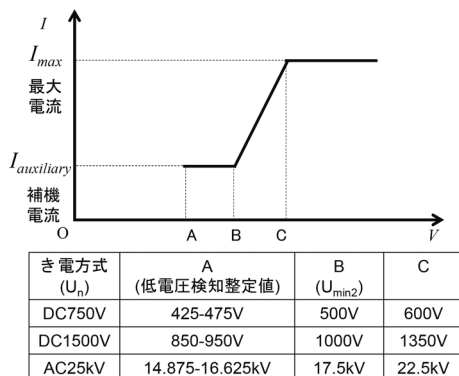


図1 EN 50388 に定められた力行絞り込み特性

は Informative (参考) の扱いであるものの、電力設備や電気車の回路定数が例示されている。本文の10章では技術的な概説だけでなく、新機軸導入時の手続きフローや責任体制についても定められている。また、いかなる状況においても到達してはならないピーク電圧が定められており、その値はDC 750V き電システムで1300V、DC 1500V き電システムで2600V、AC 25kV き電システムで50kVである。この数値は過電圧に関するEN規格であるEN 50124-2で示された数値を切り上げた値である¹⁹⁾。

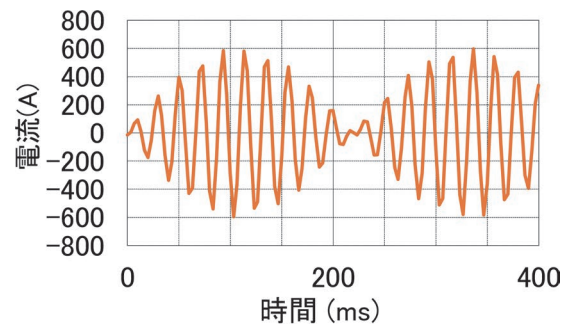
高調波及び動的影響の要件はEN 50388-2として改訂される予定である。

3.2.4 保護協調

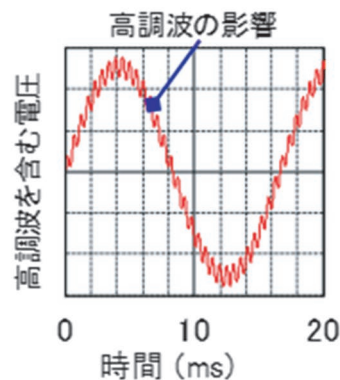
EN 50388 では変電所の遮断条件、電気車の観点から停電時および再加圧検知時における車両側のシーケンス (電力設備の観点から再閉路運動)、突入電流勾配を定めている。

(1) 変電所の遮断条件

EN 50388 では本文で変電所の遮断条件がそれぞれのき電システムに対して具体的に定められている。この表はIEC 62313では附属書Gに Informative (参考) の扱いで定められている。2022年版のEN 50388-1では本文で定められているため、今後のIEC化では現行のIEC 62313と同様に本文の扱いを Informative (参考)



(a) システムの不安定に起因する低周波振動



(b) 高調波に起因する過電圧

図2 高調波および動的影響の具体例

である附属書の扱いにするなどの対応が必要であろう。

- (2) 電気車の観点から停電時および再加圧検知時における車両側のシーケンス（電力設備の観点から再閉路連動）

EN 50388 に定められたシーケンスは以下のようになっている。

- ・変電所の遮断器の自動再閉路は、き電区間内の全列車の車載遮断器が開放された後に行う。
- ・車載遮断器は、架線の停電を検知してから3秒以内に開放する。したがって、変電所の自動再閉路は3秒以上経過後に行われる。
- ・変電所の再閉路後、き電システムに故障が無いか確認するため、車載遮断器は架線の再加圧後3秒以内に投入してはならない。

日本では電気車のシーケンスとして、停電検知時に遮断器動作とせず接触器動作や主回路制御装置のゲート停止とする運用もある。IEC 62313 では遮断器動作有無の観点で場合分けする形をとることで、日本の実態を反映している。2022年版のEN 50388-1では電気車のシーケンスとして遮断器動作のみを想定しているため、IEC化に際しては現行のIEC 62313と同様に遮断器動作有無の観点で場合分けした形の記載形式にするなどの対応が必要になるであろう。

- (3) 突入電流勾配

直流き電システムにおける故障電流の時間勾配について、60A/msに到達したら20ms以内に20A/ms以内に抑制するよう具体的数値で定めている。欧州における直流き電システムの変電所保護装置が電流変化率(di/dt)で整定するのに対し、国内では電流変化量(ΔI)で整定する。そのため当時のIEC化においては、変電所保護装置を不要動作させないように突入電流の変化率「またはピーク値」を制限することとした。電流変化率(di/dt)に関する要件はIEC 62313では附属書HにInformative(参考)の扱いで定められている。2022年版のEN 50388-1では本文で定められているため、今後のIEC化では現行のIEC 62313と同様に本文の扱いをInformative(参考)である附属書の扱いにするなどの対応が必要であろう。

さらに、2022年版のEN 50388-1では交流き電システムにおける保護協調に関する数値規定が加わり、突入電流対策として、車載遮断器再閉路後20ms後から40ms後まで(2周期目に相当)の実効値はAC25kV50Hzき電システムにおいて800A未満である旨が定められた。IEC化に際しては具体的数値自体の扱いが論点となるであろう。本条項では駆動ユニットの値として定められている。規格の性質上、具体的数値について、列車レベルの数値か駆動ユニットレベルの数値かは一つの論点となる。また、交流電気車の突入電流に具体的数値を定め

られることは主変圧器の仕様にも影響することになるため、主変圧器の観点でも具体的数値の精査が必要になる。

3.2.5 回生制動

き電システムで短絡または地絡故障が生じた場合、架線電圧が U_{max2} を超えたとき、または架線での回生エネルギー吸収不可の場合(直流き電システムで回生電力を吸収する他の列車負荷や蓄電装置等が無い状況と想定される)に電力回生を停止するようEN 50388の12章で定められている。日本で実装される回生絞り込み制御に関する要件はない。類似する概念は欧州域内の任意規格であるEN 50641に存在するものの²⁰⁾、「回生絞り込み制御」に相当する用語が国際的には周知されていない可能性がある。日本国内における回生絞り込み制御のパターンは3.2.2項で記載した力行絞り込み制御同様に、鉄道事業者や路線により異なるものと想定される。そのため、回生絞り込み制御の扱いは難しく、長期的な議論が必要になる可能性がある。

2022年版のEN 50388-1では、低電圧時における回生停止条件(架線電圧 U_{min2} 未満、DC 1500Vき電システムは1200V未満)も加筆された。この要件が加筆された経緯、および日本国内において低電圧時に回生停止を行うか否かはIEC化における論点の一つとなるであろう。

4. おわりに

日本国内では国内基準等で具体的な技術仕様が明文化されていない電気車と電力設備の協調に関する要件について、欧州で既に一部が強制力を有する運用が行われているEN 50388を中心に概説した。EN 50388に代表される電気車と電力設備の協調に関する規格の理解は海外向けの業務だけではなく、国内における要求仕様の明示を通じた車載電機品の新規要素導入時の業務効率化にもつながることが期待される。本解説が電気車と電力設備の協調に関する規格の理解、および日本国内における具体的仕様・数値の精査への一助となれば、幸いである。

文献

- 1) 国土交通省鉄道局：解説 鉄道に関する技術基準(車両編) 第四版, 2022
- 2) 国土交通省鉄道局：解説 鉄道に関する技術基準(電気編) 第五版, 2022
- 3) European Railway Agency (ERA), "Technical Specification for Interoperability relating to the 'rolling stock - locomotives and passenger rolling stock (TSI ROC&PAS)," 2014.
- 4) 国土交通省 技術基準・規格体系表 <https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001493017.xlsx>(参照日: 2022年12月26日)
- 5) 石原嘉一: 日EU経済連携協定に基づく安全注釈撤廃を機

- に調達業務の改革を, JR Gazette, Vol.78, No.2, pp.59-61,2020
- 6) IEC 60850 Ed. 4.0: "Railway applications - Supply voltages of traction systems," 2014.
 - 7) EN 50163: "Railway applications Supply voltages of traction systems," 2004.
 - 8) IEC 62497 - 1 Ed. 1 . 0 : "Railway applications - Insulation coordination - Part 1: Basic requirements - Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment," 2010.
 - 9) EN 50124-1: "Railway applications -Insulation coordination Part1: Basic requirements -Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment," 2017.
 - 10) IEC 60077-1 Ed. 2.0: "Railway applications Electric equipment for rolling stock Part 1: General service conditions and general rules," 2017.
 - 11) EN 60077-1: "Railway applications - Electric equipment for rolling stock - Part 1: General service conditions and general rules," 2017.
 - 12) JIS E 5004-1 : 鉄道車両—電気品—第 1 部 : 一般使用条件及び一般規則, 2022
 - 13) IEC 62313 Ed. 1 . 0 : "Railway applications - Power supply and rolling stock - Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock," 2009.
 - 14) EN 50388-1: "Railway Applications - Fixed installations and rolling stock - Technical criteria for the coordination between electric traction power supply systems and rolling stock to achieve interoperability - Part 1: General," 2022.
 - 15) 渡邊朝紀 : 国際規格 鉄道の絶縁協調の国際規格 高電圧機器からプリント基板まで絶縁性能を規定する, JREA, Vol.51, No.4, pp.54-56, 2008
 - 16) 松村泰幸 : 国際規格 鉄道の絶縁協調に関する国際規格の制定, JREA, Vol.56, No.7, pp.58-60, 2013
 - 17) EN 50388 : "Railway applications - Power supply and rolling stock - Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability," 2012.
 - 18) 岡健一郎・児玉大輔・深野友紀・小口紀男 : 首都圏直流電化区間の変電所異常時の運転再開方法の見直し, 鉄道と電気技術, Vol.30, No.4, pp.35-41, 2019
 - 19) EN 50124-2: "Railway applications -Insulation coordination Part2: Overvoltages and related protection," 2017.
 - 20) EN 50641 : "Railway applications - Fixed installations - Requirements for the validation of simulation tools used for the design of electric traction power supply systems," 2020.

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

谷村幸裕

■企画・監修

川崎邦弘	長倉 清	日比野有	高橋紀之
石毛 真	神田政幸	重枝秀紀	桃谷尚嗣
布川 修	新井英樹	福田光芳	松井元英
上半文昭	斉藤実俊	水上直樹	富田 優
小島謙一			

鉄道総研報告 第37巻 第7号

2023年7月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2023 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先
総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

Vol. 37 No. 7

Jul. 2023

PAPERS

- Improvement of Flame Retardancy of Seat Cushion Materials for Railway Vehicles Using Intumescent Flame Retardant
..... T.TOYOHARA, S.YAMANAKA, M.ITO (1)
- Application of Cylindrical Roller Bearings with Ribs to Gear Units of Railway Vehicles
..... K.TAKAHASHI, D.SUZUKI, Y.OKAMURA, T.NAGATOMO (9)
- Estimation Method of Lateral Vibration Acceleration of Car Body used for Safety Evaluation of Railway Vehicles against Crosswind
..... H.KANEMOTO, Y.HIBINO (17)
- Wind Tunnel Test to Reproduce Track Surfaces Flow When Shinkansen Trains Pass for Ballast and Ballast Screen Scattering
..... T.INOUE, T.NAKANO, A.IDO (27)
- Concept of Storage Battery Electricity Source Railcar and Power Supplying Procedure to e.m.u.-trains
..... M.OGASA (35)
- Examination of Wireless Acceleration Measurement for Ballasted Track
..... I.KURITA, S.RYUO, N.IWASAWA, A.KONO (43)
- Relationship between Levels of Urban Railway Services and Residential Location Preference in Metropolitan Area
..... T.WATANABE, N.FUKASAWA, D.OKUDA, T.SUZUKI (51)

REVIEW

- Relevant Standards and Requirements of Coordination between Electric Railcars and Power Supply Systems
..... T.NAKAMURA, M.AKAGI, S.HATSUKADE (59)

