

バイモーダル交通システムの安全性評価結果について

水間 毅* 佐藤 安弘* 大野 寛之*

Establishment of safety evaluation result on bi-modal transportation systems

by

Takeshi MIZUMA* Yasuhiro SATO* Hiroyuki OHNO*

Abstract

For activation of local public transportation, bi-modal transportation systems are throwing into the limelight. In this meaning, bi-modal transportation means railway and bus system. In Europe, tram with using rubber tire can run only by battery without trolley and is realized in the part of line. In this case, tram usually runs as railway but in the particular area for example in the narrow space for trolley, tram can run as bus by removing pantograph with trolley. On the other hand, in Japan, IMTS(Intelligent Multi-mode Transportation System) and DMV(Dual Mode Vehicle) system are developing by TOYOTA and JR Hokkaido respectively. The former one is based bus carbody and can run automatically by magnetic nails installed in the ground and detection sensors onboard as railway. This system was realized as public transport in the World Exhibition of Ai-Chikyu haku held in 2005 under the new transportation law(Kaishakukijun). The latter one has 2 trucks with iron wheels and rubber tires in a vehicle. For bus system, this vehicle runs only by rubber tires and for railway system, this vehicle takes down 2 trucks put in the carbody and lift the front rubber tires. This system is now evaluated by the third party and through several running test DMV was realized actual proof test running in the actual railway line for example in the JR Hokkaido line and Minami-Aso railway line.

In this paper, we describe the outline of actual bi-modal transportation systems and safety evaluation method for these systems and shows the part of evaluation test results.

原稿受付：平成 20 年 8 月 15 日 再受付：平成 20 年 9 月 16 日

*交通システム研究領域

1. はじめに

バイモーダル交通システムは、一つの車両がバスと鉄道の2つのモードを走行するシステムのことを言い、ヨーロッパと日本を中心に開発が進んでいる。ヨーロッパでは、トラムが都市の装置として発展が進んでおり、都市中心部は、トラムと人とのトランジットモールにより賑わいを取り戻しているものの、郊外部においては、トラムの沿線以外については、未だにバス中心の地域が多い。従って、郊外地域をバスとして走行して、都心部に向けてはトラム路線として走らせれば、効率よい交通が実現できるということで、ゴムタイヤトラムを中心にバイモーダルシステムの開発が進んでおり、一部実用化されている地域もある。日本も、この思想により、ガイドウェイバスが名古屋市郊外で実用化（名古屋ガイドウェイバス・志段味線：平成13年3月）されているが、これは、新交通システムとしての特徴を活かすために建設された路線である。日本では、地方交通の活性化のために、バスと鉄道の利用効率を高めるためのバイモーダル交通システムの開発が行われている。その一つの例が、トヨタが開発したIMTSである。これは、バス型車両を利用し、地上に敷設した磁気ネイルを車上の検知センサで読み取り、アクセル、ステアリングを自動制御して自動運転させるシステムである。平成17年の愛・地球博で鉄道事業法により、会場内輸送を行った実績がある。一方、JR北海道では、バス型車両内に前後2つの車輪付きの台車（1軸構成）を格納して、普段は、ゴムタイヤでバスとして走行するが、レール上は、この車輪が下りてきて、後輪の一部のゴムタイヤと2軸の車輪で鉄道として走行するものである。これらは、バスとして走行したものが、そのまま鉄道で市内へ直結できるというメリットを有しており、地方交通の活性化として期待されている。

本稿では、これらのバイモーダルシステムの概要を紹介するとともに、安全性評価手法について述べ、実際に試験を行った結果例について述べる。

2. バイモーダルシステムの開発状況

バイモーダルシステムは、ヨーロッパでは、TVRがナンシー等で、日本では、ガイドウェイバスとIMTS（愛・地球博を走行）が実用化されたが、ここでは、現在、開発段階のシステムについて、その特徴

を述べる。

2.1 IMTS

このシステムは、既に愛・地球博で実用化されているものの、より、一般的な普及を狙ってさらなる開発を続けており、そのシステムの概要を述べる。

表1に、愛・地球博でのIMTSと現在開発中のIMTSの違いを整理したものを示す。

表1 愛・地球博と開発中のIMTS

	愛・地球博	開発中
車両の案内	磁気ネイルとセンサによるステアリング	磁気ネイルとセンサによるステアリング
案内フェイル時	案内輪と案内壁	案内輪とレール
車両の推進	CNGガスによるエンジン	電気モータ
車両の連結	無線	機械

愛・地球博のIMTS（写真1参照）は、案内制御がフェイルした場合に、案内輪と案内壁により車両を保護する役割を担っていたが、この方式だと、一般道路に導入する際に、案内壁を設けなければならず



写真1 会場内を走行中のIMTS

自動車交通にとっては障害となりうる。また、愛・地球博のIMTSは無線による列車間隔制御により隊列走行を行っていた（写真2参照）が、この方式だと、無線故障時等で隊列車両が停止する場合に、後続の車両が前方の車両に衝突しないために、ある程度の車間距離（愛・地球博の場合、速度30km/hの時に約20m程度離す。）が必要であった。そのため、隊列車両数に制限ができるとともに、駅の長さも冗長となり、効率的ではなかった。従って、機械連結（ただし、連結は自動）を行うことにより、列車に



写真2 隊列走行中(2車両)のIMTS

近い形での走行が要求されていた。

そのために、平成16年度以降、IMTSの改良型としてのバイモーダル交通システムの開発が進められている。

2.2 ゴムタイヤトラム

ヨーロッパで実用化されているゴムタイヤトラムは、車内のバッテリー等に十分な容量があれば、トロリー線がなくても、パンタグラフを降ろして、バスとしての走行が可能である。写真3に、ナンシー等で実用化されているTVRの車両を示すが、車両の案内は、地中に埋め込んだ1本レールと車両に搭載されている車輪(1輪)で行うため、トロリー線がないところでは、パンタグラフを降ろして、車輪をレールから外せば、バスとしての走行が可能となる。



写真3 バイモーダル走行が可能なTVR

また、同様にゴムタイヤ走行で1本レールによる案内を行うシステムとして、トランスロールもあるが、これについても、一部区間であれば、バスとしての走行は可能であり、開発会社(ロール社)内の搬送には、バスとして自走した例もある(写真4)。



写真4 工場内を自走中のトランスロール

2.3 DMV

JR北海道が開発中のDMVについては、そのプロトタイプ車両を写真5に示すが、レール上は、鉄輪(前後1軸ずつ)と後輪のゴムタイヤ1輪で走行し、道路上は、前後の鉄輪を車内に格納してゴムタイヤ(前後輪)で走行するシステムである。



写真5 JR北海道が開発中のDMV

このシステムは、平成19年より釧網線で実験的営業運行を、平成20年3月には南阿蘇鉄道で導入実証実験運行を実路線で行ったシステムで、ほぼ実用段階のものである。

3. バイモーダルシステムの安全性評価

3.1 基本的な考え方

一般的には、バイモーダル交通システムについて、バスとして走行する場合は、道路運送車両法、道路構造令等に準拠し、鉄道として走行する場合には、鉄道に関する技術上の基準に準拠することになる。

しかし、バイモーダルシステム特有の技術については、その評価方法も含めて、試験を実施して評価する必要がある。さらに、モードが変わる地点での安全性は、従来のシステムにないものであるため、十分にその安全性について試験、評価する必要がある。

表2に、バイモーダル交通システムの安全性に関する基本的な考え方を整理した結果を述べる。

表2 バイモーダル交通システムの安全性の考え方

自動車走行における安全性	道路運送車両法、道路構造令等に準拠しているかを確認
鉄道走行における安全性	鉄道に関する技術上の基準に準拠しているかを確認
デュアルモード特有の技術に関する安全性	評価方法、評価指針を策定して実走行により評価
モード変更時の安全性	構造、機能の評価方法、評価指針を策定して評価

3.2 各システムにおける安全性評価の概要

3.2.1 IMTS

IMTSは既に、省令において、磁気誘導式鉄道として定義されているシステムであり、上記のような手順を踏んで実用化されている。その安全性の評価結果の概要を表3に示す。

表3 IMTSの安全性評価結果概要

対象システム・機能	対象技術	評価結果概要
自動車としての安全性	案内輪	構造によりクリア
	バリアフリー	構造によりクリア
	CNGガス	実績によりクリア
鉄道としての安全性	脱線に対する安全性	案内輪と案内壁により確保
	衝突に対する安全性(隊列内)	車間距離を伸ばすことによりクリア
	衝突に対する安全性(列車間)	閉そく論理によりクリア
	非常時の脱出	係員の誘導によりクリア
特有の技術に関する安全性	磁気ネイルとセンサによる自動運転	多重系コンピュータによりクリア
	無線による車両間隔制御	多重系コンピュータと車間距離によりクリア
分岐・合流部の安全性	異線進入に対する安全性	防護壁によりクリア

一方、このIMTSでは、道路上に専用道を敷設する場合、案内壁が必要となり、道路空間の自由度を狭める(自動車の進入が不可能)こととなる。従って、道路上に障害物なく(自動車も進入可能)敷設可能な案内システムを有し、かつ、機械連結により、単位長さあたりの輸送量を拡大する新たなバイモーダルシステムを開発することとした。

新しい概念のIMTSの概要を図1に示す。



図1 機械連結一案内壁なしIMTS概要

この新システムにおける安全性評価の考え方を表4に示す。

表4 新IMTSの安全性評価の考え方

対象機能	対象技術	評価の考え方
自動車としての安全性	バリアフリー	構造の評価
	ホイールインモータ	走行・操舵制御
	キャパシタ	容量、安全性
鉄道としての安全性	連結器	強度、接続方法
	4WS案内制御	制御性、安全性
	ホイールインモータ	制御性、温度
特有の技術に関する安全性	自動式機械連結	強度、制御性、走行安定性
	逸脱防止機構	制御性、強度 安全性
分岐・合流部の安全性	機械連結	機械連結のため問題なし

3.2.2 ゴムタイヤトラム

ゴムタイヤトラムは、バス型車両をベースとして構成され、かつヨーロッパにおいては、路面電車としての実績があるので、自動車、鉄道としての安全性に関しては、特に問題はないと思われる。しかし、日本においては、ゴムタイヤトラムの路面電車としての実績がないため、この面からの評価が必要であ

る。

参考として、ヨーロッパで実用化されており、日本に導入しようとしたトランスロールシステムの概要を図2、3に示し、日本での安全性評価を行った評価の考え方を表5に示す。



図2 トランスロール車両外観



図3 従台車と案内構造

表5 トランスロール安全性評価の考え方

対象機能	対象技術	評価の考え方
自動車としての安全性	操舵性	操舵制御
	駆動電源	方式、容量
	車内電源	容量、安全性
鉄道としての安全性	走行性能	高速安定(直線) 集電性能(曲線)
	異常時走行	パンク、冠水
	信号システム	衝突
特有の技術に関する安全性	案内機能	強度、異物通過
	分岐機能	安全性
モード変換部の安全性	パンタグラフ降下、上昇	電氣的安全性

3.2.3 DMV

DMVはJR北海道が開発中の、小型バスに鉄車輪を内蔵して、道路上はバスとして走行し、線路上は、鉄車輪がレールの上に降りてきて、鉄道として走行するシステムである。写真6に、後輪とレールとの関係を示すが、前輪は鉄車輪(車両に内蔵)とレールで支えるのに対して、後輪は、鉄車輪とゴムタイヤ(自動車走行として使用するタイヤのうち後方の内側タイヤ2本)で支える仕組みとなっており、後輪ゴムタイヤがレールの上を走る構造となっている。



写真6 DMV 後輪とレールとの関係

表6に、このようなタイプのシステムの安全性評価の考え方の一例を示す。

表6 DMV 安全性評価の考え方

対象機能	対象技術	評価の考え方
自動車としての安全性	バリアフリー	構造の評価
	鉄車輪内蔵	強度、構造
鉄道としての安全性	脱線	継ぎ目、曲線
	ブレーキ	非常ブレーキ
	信号システム	列車検知
特有の技術に関する安全性	ゴムタイヤのレール走行	タイヤの安全性
	異常時対応	避難・救援方法
モード変換部の安全性	モードインターチェンジ	走行安全性

4. 安全性評価試験結果例

3. で述べた安全性評価の考え方に従って、実システムを対象として、安全性評価試験を行って評価していくこととなる。本章では、各システムにおける安全性評価試験結果の例を示すこととする。

4.1 IMTS⁽¹⁾

(1) 4輪操舵性能

新しいIMTSは機械連結を前提としているため、4輪自動操舵性能を磁気ネイルが敷設された軌道上で実施する必要がある。図4に、単独車両走行において、4輪自動操舵走行を行った場合の前輪と後輪の横偏倚の量を示す。

図中、区間Aは直線部、区間Bは曲線半径40m

の曲線部である。この結果より、ほぼ同軸制御が行われていることが確認できる。

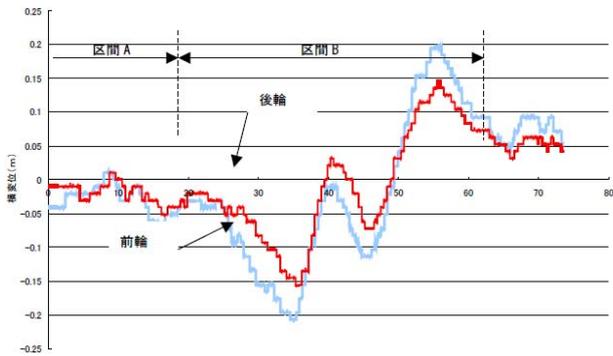


図4 4輪自動操舵性能結果例

(2) 逸脱防止機能

本システムは、案内制御（操舵）異常時には、従来の IMTS のように案内輪と案内壁による防護を行うのではなく、軌道中央に埋め込まれた逸脱防止レールと車内の内蔵している逸脱防止装置により行うこととしている（写真7、8参照）。



写真7 軌道内に埋め込まれた逸脱防止レール



写真8 車両に内蔵している逸脱防止装置

図5と図6に、18km/h 走行時に逸脱防止装置を動作させた時の、前側の逸脱防止装置（車輪）の鉛直方向の荷重と水平方向の荷重を示すが、水平方向の想定値 5kN に対し、最大で 8kN となっており、逸脱防止装置については、まだ課題が残されていることが確認された。

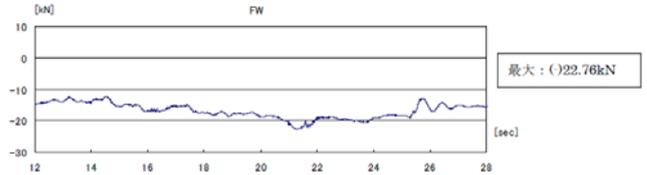


図5 前側逸脱防止装置 鉛直方向荷重

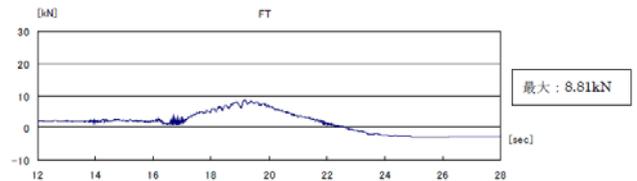


図6 前側逸脱防止装置 水平方向荷重

4.2 トランスロール

トランスロールは、バイモーダルシステムとしての可能性はあるものの、現在は、鉄道としての実績のみである。従って、ここでは、鉄道システムとして特徴的な安全性評価例を示すこととした。

(1) 案内機能

トランスロールは、鉄道として走行する場合、車両の案内は、地上に敷設された案内レールを車上の2つの案内輪で挟み込む形で行うのが特徴となっている（図3参照）。従って、この案内レール内に異物が存在した場合の走行安全性が重要な安全性評価項目の一つとなる。

案内レール上の異物として、金属棒（φ9mm、φ16mm 長さ200mm）、ペットボトル、空缶（元の形状、潰れた形状）、硬質ゴム（100 mm×100 mm×15 mm）を選定し、これらの異物を置いた状態で空車条件の車両を走行させることで、案内装置への影響（著大な応力等）の確認を行った。

結果として、案内レール直上に置かれた異物は案内装置の前方にある帰線シューのフレームに当たることでレール外へ排除され、案内装置への影響（著大な応力等）は見られなかった（写真9、10参照）。



写真9 案内レール上の異物挿入例



写真10 車両走行後の異物排障例

(2) ゴムタイヤパンク試験

トランスロールは、IMTSと同様にゴムタイヤで軌道を走行するが、IMTSは異常時には逸脱防止装置で防護するものの、トランスロールは、案内輪と案内レールで支えることとなる。従って、その安全性を確認する必要がある。

写真11にパンクしたタイヤの例を示し、写真12にその時のパンタグラフと集電線との位置関係を示す。

結果として、タイヤパンク時における案内装置にかかる応力、歪みは著大なものは見られず、また、集電性能に大きな影響はなかったと判断され、安全上の問題はなかった。



写真11 パンクしたタイヤ例



写真12 タイヤパンク時のパンタグラフと集電線の位置関係例

4.3 DMV⁽²⁾

(1) モードインターチェンジ部の走行安全性

DMVは、自動車モード走行時にはゴムタイヤで支持している車体を、鉄道モードに変更させる時に、車両内に内蔵していた鉄輪をレールの上に降下させ、レールの上を鉄輪と後方のゴムタイヤで支持する形を取る。従って、モードインターチェンジの安全性評価が重要である。写真13にモードインターチェンジ部の例（南阿蘇鉄道）を示し、写真14にそこを走行する車両の例を示す。

DMVのモードインターチェンジ部は、JR北海道車両工場内、釧網線内、南阿蘇鉄道内の何カ所か走行実験を行い、その都度、案内壁の強度、走行安全性を確認して、ほぼ実用段階に来ていると判断できる。



写真 13 モードインターチェンジ部(南阿蘇鉄道)



写真 14 モードインターチェンジ部走行中の DMV

(2) 信号システムの安全性

DMV は、鉄道モードで走行する場合、軽量な小径車輪とゴムタイヤがレールの上に乗っているため、従来の鉄道システムで用いられている軌道回路による列車検知機能、踏切制御機能が不安定になる可能性がある。走行実験においても、一部、検知性能が十分でない場合も見られているので、今後は、この信号システムの安全性の評価が重要となると思われる。場合によっては、GPS 等を利用した、軌道回路に依らない信号システムの開発、評価も必要となってくると思われる。

参考として、GPS を利用した列車位置検知、列車運行制御例を図 7 に示す。

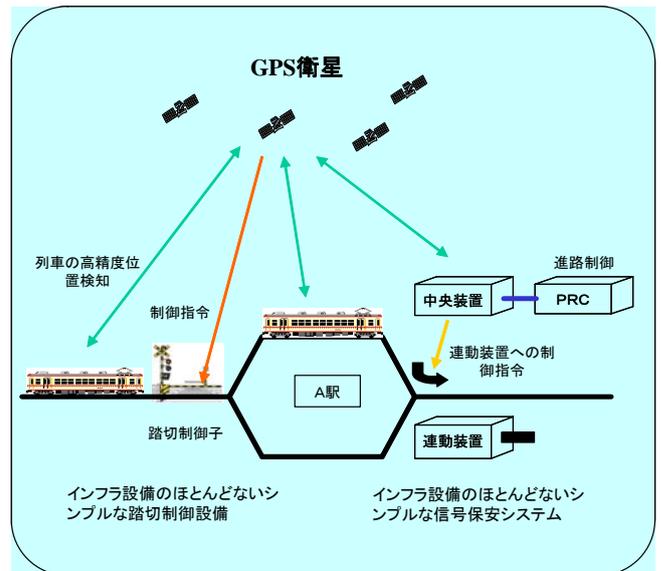


図7 GPS を利用した列車制御システム例

5. 今後のバイモーダル交通システム

以上、各種バイモーダルシステムの安全性評価方法について述べ、一部安全性評価結果例を示したが、バイモーダルシステムは、まだ本格的な実用化はされておらず、各種機能も改良が重ねられている段階である。従って、現在課題となっている機能についても、今後の技術進歩等により急速に解決可能なものもあると思われ、今後の発展がますます期待されている。

自動車交通の発展により、衰退を続けてきた日本の地方交通であるが、近年の環境運動の高まりを受けて、公共交通復活の機運も高まりつつあるものの、自動車中心の社会を根本的に変えるには至っていない。自動車のドアツードアの利点も有し、鉄道の高速度、定時性と言った利点も有するバイモーダル交通システムの早急な実現が、自動車交通に慣れた人の公共交通へのモーダルシフト促進の有効な手段となりうると思われる。そのためには、こうした安全性評価手法の確立、試験結果に蓄積が重要である。

6. おわりに

以上、日本で開発中のバイモーダル交通システムについて、その概要と安全性評価手法、試験結果例の一部について述べたが、このシステムは鉄道とバスの両方の機能を有していることで、両方の利点を発揮できる効果も期待される一方で、両方に係る課題（バスとして線路を走行する課題と、鉄道として

道路を走行する課題)も解決して行かなければならないという問題も有している。従って、安全性評価については、鉄道、自動車の個々について行うとともに、バイモーダル交通システム特有の課題についての安全性評価も考える必要がある。その一例として、今回、各種バイモーダル交通システムの安全性評価法を提案し、一部はその結果について報告したが、こうした試験結果についても、技術進歩に合わせて変わっていくものと思われるものの、データの蓄積は重要である。

環境負荷の低減のためにも、自動車としての利点を有する公共交通システムの実現が望まれている現在、バイモーダル交通システムはその有力な解決手段の一つであると思われるので、強力な開発の推進とそれに伴う、適切な評価体制の確立が望まれる。

参考文献

- (1)佐藤他；平成 17 年度 交通研発表会講演概要、PP105-108,2005
- (2)「デュアルモードの導入促進に関する調査業務報告書」 国土交通省 総合政策局 平成 20 年 3 月