

連結・分離可能なバイモーダル・ハイブリッド交通システム開発プロジェクト

交通システム研究領域 ※佐藤 安弘 水間 毅

東洋電機 中村 雅憲 日本車輛 新村 通 トヨタ自動車 青木 啓二
トーニチコンサルタント 高田 知幸 住友商事 田淵 正朗

1. はじめに

「連結・分離可能なバイモーダル・ハイブリッド交通システム」（以下、BMH システムと略称）とは、併用軌道での自動運転・連結走行と一般道での手動運転・単独走行というバイモーダル走行を実現するシステムのことです。従来の公共交通システムに比べて利便性・経済性の向上により、マイカー交通からのモーダルシフトの促進、運輸部門における省エネルギー化の促進を目指すとともに、単体の省エネルギー化も実現しようとするシステムです。技術的には、愛知万博で走行していた IMTS(Intelligent Multimode Transit System)¹⁾と同様に磁気誘導案内を行う一方、機械連結、中央案内軌条式逸脱防止装置など、IMTS とは異なる技術を有する。交通研では、都市交通問題の技術的解決の一助となるため新たな交通システムの評価を行ってきたが、IMTS の技術評価実績をふまえ、平成 16 年度～17 年度の 2 力年に渡り、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の補助による標記モデル評価事業に参画したので、その成果を報告する。

2. システムコンセプト

地方都市における自動車交通の増加による渋滞の発生や環境負荷の増大に対する解決策として、LRT の新規導入やバス交通の改善が模索されている。

このうち LRT システムは、中大都市アーバン・サバーバン交通を対象とするが、中小規模都市での展開には万能とはいえない面もある。また、狭小地域での交通改善策として、小回りの利く小型電気バスに利用者のデマンド情報を系統的に提供する、電動デマンドバスシステム²⁾などが検討されている。一方、中規模都市においては、現在その中核となっているバス交通をベースとした、新しいシステムの開発が、即効的かつ効率的と考えられる。

しかしながら、現状のバスは単車運転のため、需

要が集中する幹線部分では、たとえバス優先レーンを導入しても、ダンゴ運転による輸送力・定時性・速達性の低下等により、利用者の減少、自動車交通の増加に繋がっていると考えられる。

BMH システムは、バスの長所である安価な導入コストと面的交通のカバーという長所を活かしつつ、路面電車が道路を併用軌道で走行するように、幹線部分には併用軌道を設置して連結走行することにより、輸送力・定時性・速達性の低下と運転手（人件費）の増加を防ぎ、LRT と同等の輸送力・定時性・速達性の確保をめざすものである。同時に先進ハイブリッドシステムの導入により、車両のバリアフリー化（低床化）とエネルギー効率の向上もねらう。さらにバイモーダル機能により、一般道を通常のバスとして走行させ、併用軌道と一般道の乗り換えが不要となることで、利便性の向上によるモーダルシフトをねらうものである。BMH システムでは、市街中心部と郊外を結ぶ幹線軌道 2～3 路線と一般道から構成し、幹線では車両は 2～3 両機械連結して走行する。図 1 に全体システム概要図を示す。

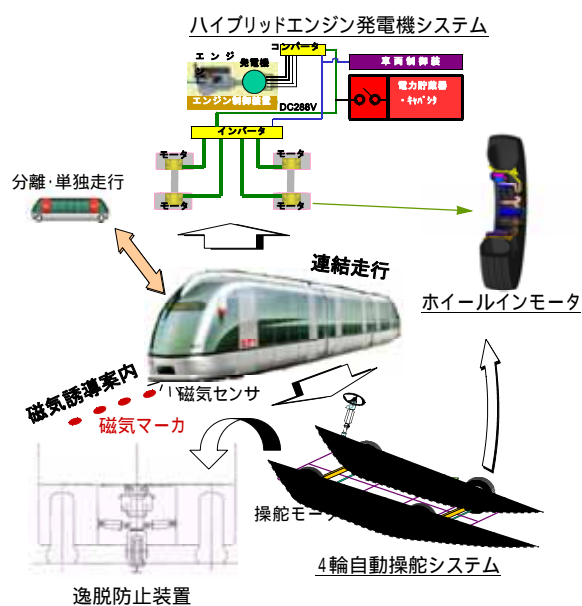


図 1 BMH システム

3. モデル事業概要

上記基本コンセプトを実現するための主要な技術課題と本モデル事業での実施概要を表1に示す。平成16年度は、全体システムの仕様や導入効果に関わる検討を行い、本システムを構成する個別要素機器であるホイールインモータ駆動システム、エンジン発電機システム及び逸脱防止装置の試作を行うとともに、4輪自動操舵システムの制御に関わる検討を行った。一方、平成17年度は、車両の連結・切り離しを実現するための自動連結器の開発を行ったほか、4輪自動操舵サブシステムや実車用逸脱防止装置を製作し、先進ハイブリッドシステムとともに、車両に組み込んで実験車を製作した。さらに、実験線での走行実験による安全性の評価を検討するとともに、導入効果や省エネ・時間短縮効果等の社会影響評価を行った。これらのうち、交通研は主としてシステム安全性評価にかかる事項を担当した。

表1 モデル事業実施概要

	平成16年度	平成17年度
併用軌道磁気誘導システムの開発・評価	4輪自動操舵システムの制御シミュレーション	4輪自動操舵システムの設計・製作
先進ハイブリッドシステムの開発・評価	逸脱防止装置の設計・製作	実車用逸脱防止装置の設計・製作
	ホイールインモータ駆動システムの設計・製作	実車用エンジン発電機製作・ベンチテスト
エンジン発電機システムの設計・製作		
自動連結器の開発・評価		自動連結装置の設計・製作
実験車の製作		実験車の製作・システム機器の構築
公共交通システムとしての評価	導入市場調査	社会影響評価
	安全性評価方法の検討	走行実験

4. 安全性評価

安全性評価を行うに当たり、まず本システムのコンセプトをもとに、システムとしての新規事項の抽出、類似システムとの共通点及び相違点について整理し特徴としてまとめた。次に、公共輸送システム一般に求められる基本的な性能、すなわち、安定した直線、曲線、勾配走行、ブレーキによる停止等に関する視点から評価を行うとともに、新しい技術要素をサブシステム毎に抽出して、その機能や信頼性等について評価する必要がある。

4.1. 技術的特徴

(1) 併用軌道磁気誘導システムの採用

IMTSでは、自動運転車両が走行するために、両側に高さ約20cmのガード壁を設置した専用軌道が設けられた。BMHシステムは、ガード壁に代わる

逸脱防止装置を開発することにより、ガード壁を設置しない併用軌道の走行を可能とする。

(2) 機械連結

LRTと同様の輸送力・定時性・速達性を確保するため、複数車両での機械連結走行を行う。また、容易に切り離し可能な構造とし、一般道では単車で小回りの利く走行を可能とする。

(3) 4輪自動操舵

IMTSのような2輪操舵では、曲線では内輪差により、機械連結された後尾車の走行軌跡が曲線内方にシフトしてしまい、軌道走行に適さないため、内輪差の発生しない4輪操舵とする必要がある。

(4) ホイールインモータの採用

自動車用のホイールインモータは、これまでに小型電気自動車に実験的に採用されたほかは、大型車両向けには世界的にもほとんどなく、通常のホイールインモータは内部に減速機を有していることから機械伝達ロスが発生する。そこで、ダイレクトドライブのホイールインモータにより、低床化と省エネルギー化を図る。

(5) 新型エンジン発電機システムの採用

2つのエネルギー貯蔵装置（リチウムイオン電池とキャパシタ）を搭載し、回生エネルギーを電池ではなくキャパシタに蓄積する新たなハイブリッドシステムを実現する。

以上、IMTSと比較したBMHシステムの特徴を表2に示す。

表2 BMHシステムの特徴

	BMHシステム	IMTS
車線誘導	磁気誘導システム 4輪（前後輪）自動操舵システム	磁気誘導システム 前輪自動操舵システム
車線逸脱防止	逸脱防止装置	ガード壁
複数車両走行	機械式自動連結	隊列走行システム
速度制御	運転手による注意運転	コンピュータによる無人自動運転
列車間隔及び連動制御	運転手による注意運転	通信による固定及び移動閉塞信号制御
原動機・駆動システム	ハイブリッド発電機システム及びホイールインモータ駆動システム	ディーゼルエンジン又はCNGエンジンによる通常バスに準じた構造

4.2. 評価の視点

公共輸送システム一般に求められる基本的な性能及び新しい技術要素に関する評価の視点を検討し、まとめたものを表3に示す。同表の上半（通常運転、ブレーキ性能、駆動性能）は、公共輸送システム一般に求められる基本的な性能に関するものであり、それ以下はサブシステム毎に抽出したものである。

表3 評価の視点

通常運転	単独走行	一般道路の単独走行が円滑に行えること
	連結走行	想定される軌道を所定の運転速度で円滑に走行できること
	連結・分離	車両の連結・分離は円滑に行えること
ブレーキ性能	横ずれ量	軌道における車両の横ずれ量は、所定値(10cm)以内であるとともに、常時は逸脱防止装置が作動しないこと
	通常時減速度	荷重条件や路面条件、車両の連結等の条件を踏まえ、通常のブレーキ時に、所定の減速度、制動距離で安定して停止できること
	異常時減速度	荷重条件や路面条件、車両の連結等の条件を踏まえ、異常時においても、所定の減速度、制動距離で安全に停止できること
駆動性能	駐車ブレーキ	勾配部での駐車に支障ないこと
	単独走行	一般道路をバス同等以上のタイヤで安定して運行できる駆動力を備えていること
	連結走行	荷重条件や路面条件、車両の連結等の条件を踏まえ、所定のタイヤで安定して運行できる駆動力を備えていること
ホイールインモータ駆動システム	勾配起動	勾配部での起動に支障ないこと
	出力及び伝達効率の達成	所定の出力及び効率を達成すること
	駆動特性の確認	荷重条件や路面条件、車両の連結等の条件を踏まえ、必要な駆動力が確保されていること
	温度上昇特性	荷重条件や気温、運転間隔、駅間距離等の条件を踏まえ、温度上昇は所定範囲内であること
	2輪駆動制御	1車両内における各モータの制御は協調が確保され操舵性能に影響を及ぼさないものであること
ハイブリッドエンジン発電機システム	他車両への影響	連結された各車両の駆動制御の協調が確保されること
	運転パターンの設定	荷重条件や運転間隔、駅間距離等の条件を踏まえた運転が安定して行えること
	回生エネルギー吸収率	所定のエネルギー吸収率を達成すること
4輪自動操舵システム	燃料消費量	想定される軌道、荷重条件や駅間距離等の条件を踏まえ、燃料消費量は所定値以内であること
	操舵制御	荷重条件や路面条件、車両の連結等の条件を踏まえ、想定される軌道に於いて、連結運転時の前輪と後輪の走行軌跡は所定の範囲内に収まり、かつ操舵時の最大横方向振動加速度が所定範囲以内であること
	連結・分離モード切替	連結運転時は4輪自動操舵に、分離運転時は2輪手動操舵に円滑に切り替えられるとともに、分離運転時は後輪操舵を確実にロックできるものであること
	制御異常時の対応	制御異常時には、所定の動作シーケンスにより安全に停止できること
	センサ等故障時の対応	舵角センサや操舵モータ等の故障を検知できるとともに、安全に停止できること
逸脱防止装置	他系への条件	磁気誘導システムの地上装置は、併用軌道を横断する歩行者や自動車等に支障を及ぼすものでないこと
	通常運行時	逸脱防止装置は、磁気誘導案内による通常の走行に支障するものでないこと
	動作シーケンス・信頼性	荷重条件や路面条件、車両の連結等の条件に関わらず、車両が走行レーンを逸脱する可能性の生じた場合に逸脱防止装置が確実に作動し、車両の逸脱を防止すること
	異常動作防止	磁気誘導により正常に走行している場合に不意に逸脱防止装置が動作をしないこと
	各部の強度	逸脱防止装置が作動した場合の地上側及び車上側装置の強度が十分であること
連結装置	動作時の衝撃	逸脱防止装置の動作に伴う車体への振動や衝撃が所定範囲以内であること
	案内時の動揺	逸脱防止装置が作動し車両を機械的に案内した際の最大横方向振動加速度が所定範囲以内であること
	他系への条件	逸脱防止装置の地上装置は、併用軌道を横断する歩行者や自動車等に支障を及ぼすものでないこと
	装置の強度等	連結装置及び車体への取付は、走行時や連結時の荷重条件等を踏まえ、所定の強度及び耐久性が確保されていること
	異常時の強度等	連結された車両の動力故障時、非常ブレーキ時等における強度が確保されるとともに、座屈等を起こさないこと
異常時対応	連結・解放	連結・解放は短時間で確実に実行、かつ、連結不完全等の状態で重直が運行することがないこと
	他系への条件	連結装置は、軌道の曲線、勾配、縦曲線等に円滑に追従するものであり、磁気誘導案内に支障を及ぼすものでないこと
	車両故障	車両故障発生時に故障を検知できるとともに、安全に停止できること
	ブレーキの冗長系	1系統のブレーキが故障しても他系のブレーキにより停止できること
	連結異常	連結異常時に故障を検知できるとともに、安全に停止できること
	異物の存在	軌道内に異物が存在した場合、安全に排障するか、又は乗り越えるか、もしくは停止できること
	磁気マーカー故障	磁気マーカー故障時に軌道から逸脱しないこと
	タイヤパンク	タイヤパンク時に安全に停止できるか、又は、乗客を下車させるまで運転を安全に継続できること
救援	車両故障時等の乗客の救援及び車両の移動を安全かつ円滑に行えること	
車両火災対応	火災発生時の延焼防止及び乗客の避難に配慮したものであること	
異常発生後の対応	故障車両の収容、運行再開までの復旧手順等が困難でないこと	

4.3.3 実験概要

本システムの基本的な機能がコンセプト通りに発揮できるかを主眼に試験項目を選定し、評価の視点

として挙げたうち、異常時対応、信頼性などに関する試験については次の機会に譲ることとした。また、社会影響評価に当たり、モデル都市を想定し、省エネルギー効果等を定量的に評価する必要があるため、エネルギー消費量等に関する実験を実施した。

走行実験に当たっては、全長約7mの中型バス2台を改造し、実験車とした(図2参照)。一方、実験線線形を表4に示す。実験線の軌道中央には車線誘導制御のための磁気マーカーが埋設されており、設置間隔は直線区間で2m、曲線区間で約1mである。なお、区間F,Gは逸脱防止装置の性能評価に使用するため逸脱防止用レールが敷設された。その他の区間は逸脱防止装置以外の性能評価に使用された。



図2 連結走行状況

表4 実験線線形

区間	A	B	C	D	E	F	G
曲線半径(m)		40		100			60(S字)
勾配(%)	0	-20	0	10	-60	0	0
区間長(m)	80	130	200	30	150	50	40

4.4 評価概要

走行実験結果による評価の概要をまとめたものを表5に示す。

(1) 公共輸送システムとしての機能

通常運転では、曲線通過中の軌道に対する輪軸の横ずれ量が大きいものの、試作車の単独走行、連結走行がそれぞれ可能であり、連結・分離が可能であることを実証した。また、駆動性能・ブレーキ性能については、改造後の車両重量の増加等により、設計値通りとならなかった面はあるが、今後の設計見直しにより改善が可能であると考えられる。

(2) サブシステム評価

ホイールインモータシステムについては、駆動特性が改造後の車両重量の増加等により、設計値通りとならなかった面はあるが、温度上昇特性には特に問題は見られなかった。ハイブリッドエンジン発電機システムについては、エネルギー回収率等の目標を若干下回ったものの、路面電車の駅間距離等の条件

を踏まえた走行に支障がないことを確認した。4輪自動操舵システムについては、各輪軸の横ずれ量が目標値に収まらなかったものの、前輪と後輪の走行軌跡のずれが目標値を満足していることから、機械連結に必要な同軸制御を実現できたといえる。逸脱防止装置については、単独走行、速度 20km/h までの範囲で逸脱防止効果を確認した。連結装置については、装置の強度、連結・分離時間等特に問題は無いものと思われる。

表5 実験結果に基づく評価概要

評価の視点		評価概要
通常運転	単独走行	単独走行時、55km/hまで円滑に走行できることを確認した
	連結走行	連結走行時、25km/hまで円滑に走行できることを確認した
	連結・分離	車両の連結・分離は円滑に行えた
	横ずれ量	軌道に対する各輪軸の横ずれ量は、曲線区間で最大±25cmとなり、目標値(10cm)に収まらなかった。また、逸脱防止装置の誤作動は見られなかった
ブレーキ性能	通常時減速度	単独走行時の最大減速度は0.09Gであり、設計値通りであった。一方、連結走行(4WS)時の最大減速度は0.03Gであり十分とはいえない
	駆動性能	単独走行時、最大加速性能は0.078Gであり、設計値(0.09G)を若干下回った
ホイールリンクモータ駆動システム	連結走行	連結走行時、最大加速性能は0.06Gであり、LRT(0.07-0.10G)より若干低い程度であった
	勾配起動	勾配部での起動に支障ないことを確認した
	駆動特性の確認	単独走行時の最大加速性能は0.078G、連結走行時の最大加速性能は0.06Gであり、設計値を若干下回った
	温度上昇特性	パターン走行時のモータ温度は最大105℃であり、特に問題は無いものと思われる
ハイブリッドエンジン発電機システム	2輪駆動制御	各モータの制御が操舵制御に影響を及ぼすことがあり、4WSと駆動・制動の連成についてさらに検討する必要がある
	他車両への影響	連結された各車両の駆動制御の協調に問題は見られなかった
	運転パターン設定	路面電車の駅間距離等の条件を踏まえた走行が安定して行えることを確認した
4輪自動操舵システム	再生エネルギー吸収率	エネルギー吸収率は70.4%であり、目標(80%)を若干下回った
	燃料消費量	燃料消費量は5.8km/lであり、改造前のディーゼル車に比べ21%向上した
	操舵制御	単独走行時、前輪と後輪の走行軌跡のずれは最大5cmであり、連結走行時に走行軌跡のずれは若干拡大するものの、目標値(10cm)を満たしている
逸脱防止装置	連結・分離モード切替	連結所要時間、解結所要時間ともおおむね15秒以内で、特に問題は見られなかった。但し、自動でのモード切替は未実施
	動作シーケンス・信頼性	逸脱防止装置動作状態で半径60m曲線を走行(20km/h)した結果、車両の逸脱を防止することを確認した
	各部の強度	半径60m曲線走行時(20km/h)における横方向荷重は最大24.4kNであったが、各部の変形等の異常は見られなかった
連結装置	案内時の動揺	逸脱防止装置による案内時の最大横方向振動加速度は、0.1Gであり、特に問題ないものと思われる
	装置の強度等	連結時の車体応力は最大22MPaであり、特に問題ないものと思われる
	異常時の強度等	連結された車両の動力故障時、連結器力は最大3.6tであり、特に問題ないものと思われる
	連結・解放	連結所要時間、解結所要時間ともおおむね15秒以内で、特に問題ないものと思われる
他系への条件	連結装置は、軌道の曲線、勾配、縦曲線等に円滑に追従することを確認した	

5. 社会影響評価

中規模都市の幹線交通や大都市の幹線補助交通としては、図3に示すように鉄道や地下鉄では輸送力が過大で採算性確保は困難と考えられ、BMHシステムやLRTのような中量輸送システムが適当と考えられる。そこで、現行の新交通システムや路面電

車、またはそれらの計画・構想路線、高密度な運行本数や輸送量を有する既存のバス路線から、代替可能性が考えられる候補路線を(計 391 路線)抽出し、これらのうち複数のモデル路線を設定して、事業採算性や費用便益分析を実施した。路線導入パターンにより結果は異なるものの、便益(B)と費用(C)の比 B/C は総合で 4 以上が見込まれると試算された。

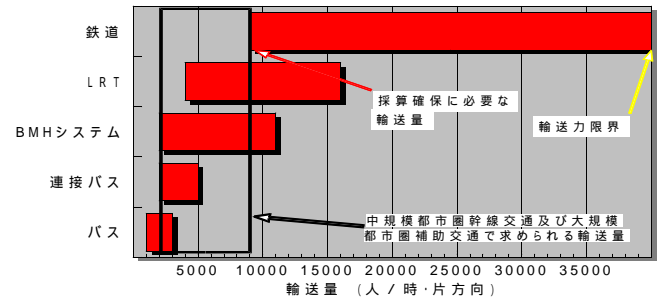


図3 交通機関の輸送力比較

6. まとめ

走行実験の結果、BMHシステムの基本コンセプトを実現するための基本となる要素技術(併用軌道磁気誘導システム、先進ハイブリッドシステム、自動連結装置)の機能については、おおむね確認することができ、本システムを実現していく上で技術的に大きな障害はないものと思われる。

社会影響評価に関しては、導入可能性のある都市候補を基本に、候補路線の抽出を行い、複数のモデル都市でモデル路線を設定し、試算した結果、BMHシステムによる費用対効果及び省エネルギー効果が認められた。

実験車製作は今回初めてであり、期間も限られていたことから、本システムの基本的な機能に関する実験に限定し、特に、異常時対応、信頼性などに関しては未実施である。今後、公共輸送システムとして実現するために、技術基準への適合などの検討を行う必要があり、異常時対応、信頼性などを始めとする実験をさらに実施することが望まれる。また、実験結果を受けて必要な改良を行い、より完成度の高いシステムにしていくことが想定される。

最後に、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構に対し、深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 橋野; 日本鉄道施設協会誌, vol.2005-3, pp33-35, 2005.
- 2) 林田ほか; 平成 17 年度交通発表会講演概要, pp109-114, 2005.