

2304 磁気誘導式無軌条交通システムの安全性評価

Safety Evaluation Results of IMTS

正 [電] ○水間 毅 (交通研) 正 [土] 佐藤 安弘

正 [機] 大野 寛之 正 [電] 山口 友宏

Takeshi MIZUMA, National Traffic Safety & Environment Labo.
7-42-27, Jindaiji-Higashi cho, Chofu City
Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO, Tomohiro Yamaguchi

The intelligent Multi-mode Transit System (IMTS) based on fully automated bus system has been developed as the medium-scale transit system for the next generation transport system. This system will start revenue service as the public transportation system in Aichi-world exhibition that will be held on March of 2005. This paper describes the outline of the safety and reliability evaluation results for confirming the real operation of the system by our laboratory.

Keyword: railway, ITS, automated operation, wireless communication, public transport

1. はじめに

トヨタ自動車が開発中の IMTS はバス型の車両を利用した自動運転システムであり、2003 年 8 月に磁気誘導式無軌条交通システムとして鉄道事業法で認められたシステムである。このシステムの特徴は、地上に敷設した磁気レーンマーカを読み取ることにより自車両の位置を特定し、車上コンピュータにより自動走行を行うとともに、その情報を無線により後続車両に伝送して、車間距離を制御しながら隊列走行を行うところにある。

本稿では、IMTS に関する安全性、信頼性評価を試験等を通じて実施したのでその概要を報告する。

2. IMTS の概要

図 1 に IMTS の概要を示す。本システムは磁気レーンマーカを車上センサで読み取り自動運転を行うが、車両間の安全は車車間通信（無線や光通信）により確保し、編成間の安全は路車間通信を利用した閉そくにより確保するシステムである。

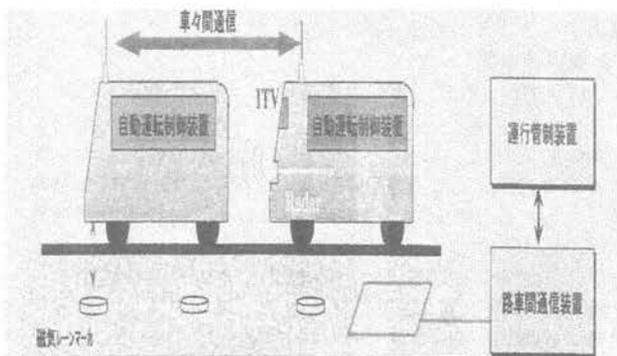


Fig.1 Construction of IMTS

また、隊列走行の概念を図 2 に示すが、TDMA 同報通信により、先行者の位置、速度、加減速度を送信し、車両間の間隔を制御する方式である。ただし、無線は 2 重系や光通信を利用した多重系構成として信頼度を確保している。そして、無線通信が断されれば非常ブレーキにより、編成内の全車が一齐に停止することにより安全を確保している。

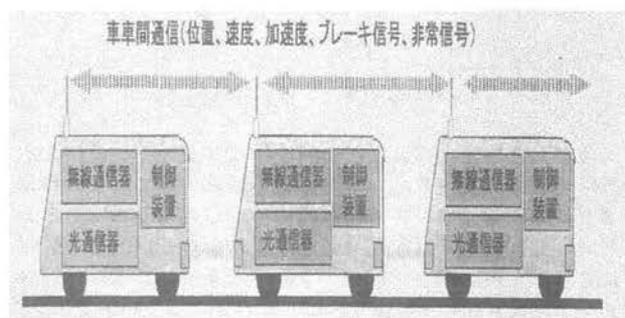


Fig.2 Platoon operation by communication system

自動運転は、駅における発車指令に基づき自動的に走行を開始し、走行中は車両制御コンピュータ内に記憶された地図情報と現在の走行位置により、ステアリング、スロットル開度、ブレーキの制御を行い、速度制御、案内方向の制御を行っている。

3. IMTS の安全性評価例

IMTS を鉄道という公共輸送で実用化させるためには、まず安全性に関する評価を実施する必要がある。その中で、特に無線を利用して車間距離制御を行うことの安全性、分岐・合流を行う際の安全性、編成間のすれ違いにおける安全性を評価することが重要である。

3.1 無線による隊列走行の安全性

隊列走行を行う際の安全性は、駅における定位置停止精度、走行中における安全な車間距離の確保で評価できる。

走行中の安全な車間距離とは、故障、異常が発生した場合にも、車両間の衝突がなく安全に停止できることであり、それを実車（3両隊列）により確認した。

図3に、車両に故障、異常が発生して非常ブレーキで全車が停止した場合の、停止時の各車間の車間距離を示す。

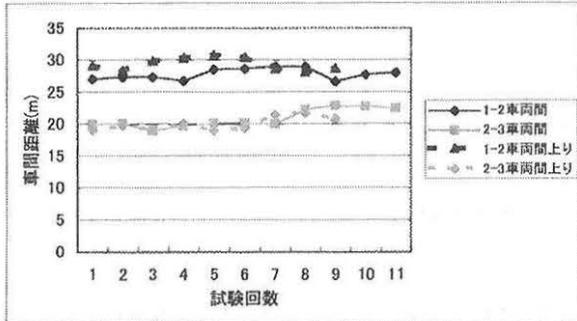


Fig. 3 Distance between vehicles at emergency

これによると、各車両は十分な間隔を持って停止することが確認され、また、ブレーキ性能のばらつきも少ないことが確認される。

図4には、無線機の故障を含む、想定した最悪の故障を発生させた場合における、停止時の車間距離を示す。

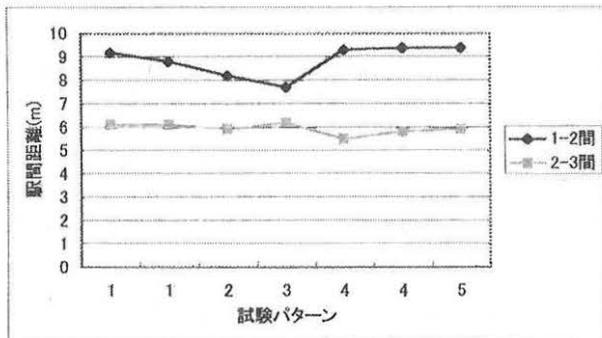


Fig.4 Distance between vehicles at worst case

想定した故障とは、先行車両に保安ブレーキが動作する故障を発生（1重故障）させ、その情報と非常ブレーキ指令を車車間通信機で送信した際に、通信機も故障（2重故障）し、後続車は非常ブレーキ動作を行うが、その最中にさらに車両制御コンピュータ故障を発生（3重故障）させて、保安ブレーキに切り替わって停止するモードである。これを故障発生タイミングをさまざまに変化させながら試験を実施した。

その結果、各車両は衝突することなく停止でき、無線を利用した車間距離制御であっても、適切な車間距離の設定と故障検知、ブレーキ制御論理によって安全に制御されることを確認した。

3.2 分岐・合流部における安全性

IMTSにおける分岐走行は、基本的には車上分岐方式であり、磁極(N,S)をそれぞれの軌道に割り当て、その磁極に従って車両が、当該軌道を走行する方式である。従って、基本的には、割り当てさえ間違えなければ異線進入の恐れのないシステムであるが、風等により走行レーンの逸脱を防止するため可動壁を設けている。

ここでは合流時における安全性を確認することとし、3

両1隊列の編成における合流論理を検証した。

ここでの合流論理は、本線走行の2車両に分岐部から1車両が合流して3両隊列を構成するもので、本線走行車両に、分岐部車両が追従する形で本線上で合流する。従って、合流のタイミング、追従性能の検証が重要であり、また、その論理が故障した場合の安全性の確認も必要である。

図5に追従車両の走行例を示すが、想定走行パターンに従って走行していることが確認された。

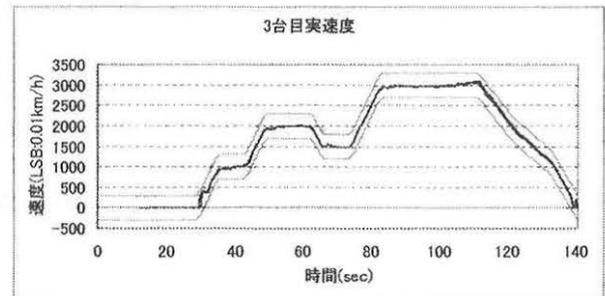


Fig.5 Running pattern and actual data of following vehicle

本線車両は15km/hで走行しているが、追従する車両はまず10km/hで本線に進入し、その後20km/hに加速して先行車両に追いつき、その後、15km/hで3両隊列走行を実現させる。さらに、3両隊列のまま30km/hまで加速して本線走行を継続するという論理で走行する。

追従する車両の出発タイミングや加速時において異常が発生した時には、車両は停止する制御を行うが、その場合にも車両間に衝突がないことを確認した。

図6に、さまざまな合流タイミングに異常を発生させた時の停止時における車両間の直線距離を示す。

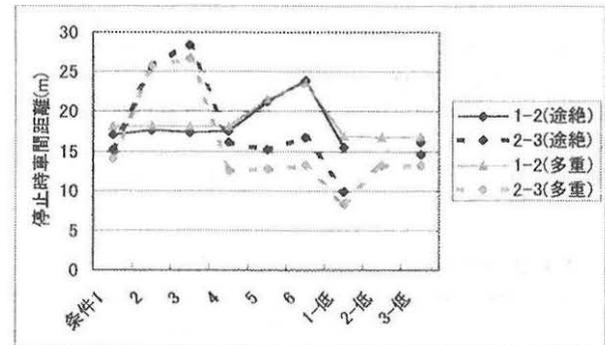


Fig.6 Distance between vehicles at switching section

これによると、合流部において異常が発生しても安全に停止できることが確認された。

3.3 編成列車間の安全性

IMTSでは、編成列車間の安全性は、地上に敷設したループコイルと車両との路車間通信により閉そく論理を構成して確保する方式となっている。従って、鉄道における自動閉そく等の考え方を踏襲していれば安全性については問題ないと言える。ただし、鉄道におけるリレーや連動の考えをそのまま利用はしていないので、実際の試験による確認を行い、さらに、実際のコイル配置、車両走行を模擬し、車両走行中に任意に故障を発生させ、車両が停止するかを確認する動的シミュレーションも実施した。

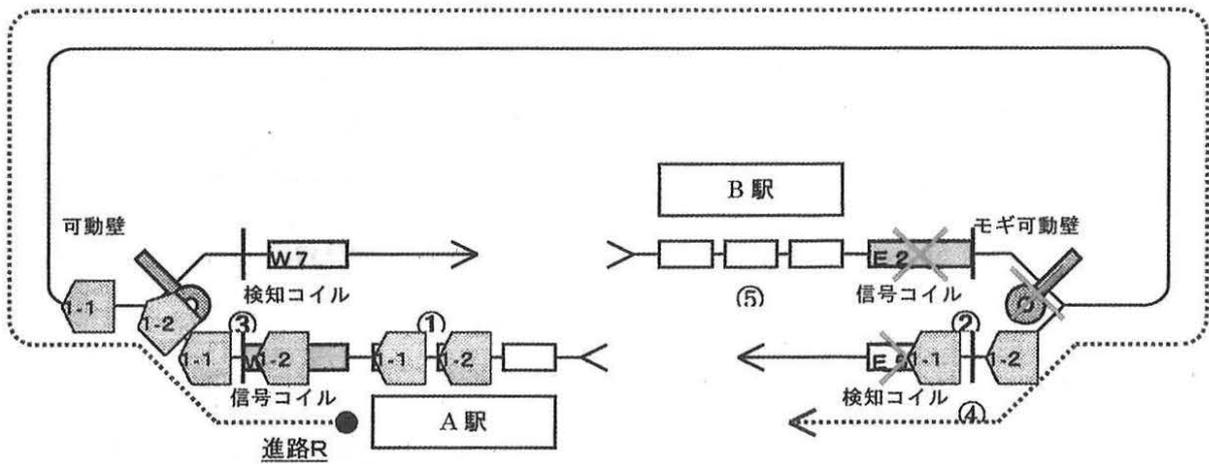


Fig.7 Vehicle operation in the case of failure of on ground computer

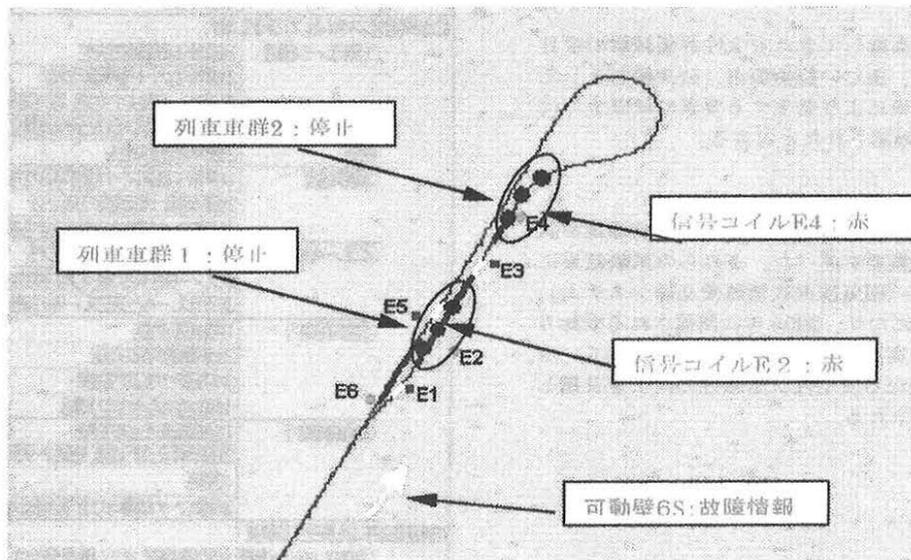


Fig.8 Simulation results of vehicle operation in case of failure

図7に、編成1(1-1,1-2)が進路Rを獲得した後に、地上側のB駅のコンピュータが故障した場合に、編成1が検知コイル上で故障を検知し、編成2が反対側の進路Lを獲得できない例を示す。

これは以下の手順で確認された。

- ① 進路Rの獲得(可動壁、信号状態、鎖錠状態の確認)
- ② B駅側地上コンピュータ故障発生(電源断)
- ③ 編成1出発(可動壁、信号状態、鎖錠状態の確認)
- ④ B駅側検知コイル上で故障を検知
- ⑤ 進路L要求不可(故障検知により獲得不可)

以上のような方法で、さまざまな異常を発生させ、実際の可動壁動作も含めて車両の安全を確認した。

また、実際のコイル配置や車両走行を模擬して、走行シミュレーションを実施し、その中で任意に故障を発生させて車両が停止するかを検証するシミュレータ(トヨタが開発)により、安全も確認しているが、その例を図8に示す。

これは、可動壁の故障情報を受けて、当該コイルが赤信号を現示したため、各編成列車が信号コイル上で停止した例を示している。

このような故障発生シミュレーションにより、約30万回

の故障(1箇所故障、同時2箇所故障、時間差2箇所故障)に対して、すべて車両が停止する側に信号が制御されたことを確認した。

4. IMTSの信頼性評価例

IMTSは無線制御と言う新しい概念を含むシステムであるので、安全性の検証の他に、鉄道としての安定した輸送を実現するための信頼性の検証も重要である。

従来、信頼性の検証には、試験線等における長期走行により実施されてきたが、どの程度走行すれば良いかという定量的な指標はなかった。しかし、近年、RAMS(Reliability, Availability, Maintainability and Safety)の概念が提案され、国際規格(IEC62278)として発効するに至り、これに準拠した評価も重要になってくると思われる。

この規格には、安全性目標レベル(SIL: Safety Integrity Level)が規定され、1時間に1回危険側故障が発生する確率を4段階に分けて整理(表1参照)しており、システム、部品の重要度に応じて、SILレベルを要求している。

この規格に、IMTSの試験結果を当てはめると、まだ1回も危険側故障は発生しておらず、SIL4であると判定できる。

Table1 SIL level regulated by IEC62278

SILレベル	1時間に1回危険側故障が発生する確率 (10 ⁻ⁿ /h)
4	10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁹
3	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁸
2	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁷
1	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁶

また、現在、IMTSは淡路島・ファームパーク内において走行を続けているが、総走行時分が10,000時間を超えても営業時間中の故障発生は0件であり、時間故障率（1時間あたりの故障確率）は0である。また、営業開始前に発見された故障も考慮した時間故障率でも2.8×10⁻⁴/hであり、首都圏で運行されている列車の時間故障率と同程度であり、信頼性は十分高いと判断できる。

5. 総合評価

これまでに交通研が実施してきた安全性評価試験の項目と結果を表2に示すが、新しい技術要素、公共輸送としての特性・能力、新規技術により発生する要素のほぼ全てにわたり問題ないことが確認されたと言える。

6. おわりに

以上、IMTSの走行安全性、信頼性に関して、交通権が試験して評価した結果の概要を述べた。これらの試験結果に基づき、鉄道事業法に「磁気誘導式無軌条交通システム」として加えられることになり、2005年に開催される愛知万博内の会場輸送として実用化が図られることとなっている。今後は本システムの更なる安全性、信頼性の向上を目指して万全を期すことが望まれる。

参考文献

- 1) 水間他：磁気誘導式無軌条交通システムの安全性評価、電気学会研究会資料、TER-03-27pp1-6 2003.7.24

Table2 Outline of evaluation results

技術要素	機能	平成2年 度評価	今年度 評価
(1) 新規技術要素			
① 自動運転	1 車に装置地上装置の機能	◎	◎
	2 自動運転時制動の適正性	◎	◎
	3 故障時制御の安全性	○	○
② 非線形特性	1 分散シークスの安全性	◇	◎
	2 突進抑制の安全性	◇	◎
	3 故障時制御の安全性	○	○
③ 非線形領域内	1 案内制御シークスの安全性	◎	◎
	2 故障時制御の安全性	○	○
	3 ガト機の鉄応力	○	○
	4 ガト機の鉄応力	△	○
④ 踏切走行	1 車に装置地上装置の機能	◎	◎
	2 踏切走行時安全確認の方法	◎	◎
	3 踏切走行時速度制御の安定	○	◎
	4 踏切閉鎖時の論理シークスの安全性の確認	○	◎
	5 故障時制御の安全性	○	○
	6 最大速度決定の論理シークスの安全性の確認	◎	◎
(2) 公共輸送システムとしての特性能力			
① 走行計画	1 標準的な路線の決定	○	○
	2 標準的な走行計画の決定	△	○
	3 磁気マナ取り付位置取り計画の決定	◎	◎
② 最高速度	1 最低速度磁気マナ設置場所の決定方法	○	◎
	2 最高速度最低速度の決定方法	◇	◎
③ レーキ構成	1 磁気マナ故障時の安全性	○	○
	2 レーキ構成時の乗り心地振動の軽減	◎	◎
	3 常用レキと保安レキの機能確認	◎	◎
④ 急勾配走行	1 制動性能	○	○
	2 仕舞込みの確認	◎	◎
	3 急勾配の走行性能確保	◎	◎
	4 制動距離の確保の確認	◇	○
⑤ 急曲線走行	1 急曲線通過の確認	◇	○
	2 曲線走行時速度磁気マナ設置場所の関係	◎	◎
	3 磁気マナ故障時の走行安全性	◇	○
(3) 新規技術により発生する事項			
① 保安システムの構築	1 車両側保安システムの構築の安全性	◎	◎
	2 イア側保安システムの構築の安全性	○	◎
	3 車両-イア間の通信の安全性	○	◎
	4 保安システム異常時故障時の安全性	○	◎
② 自動運転における安全性	1 運行管理システム構築法	○	○
	2 自動運転システムにおける運行管理システムの置き	○	○
	3 運行管理システムにおける安全性	△	○
③ ヘルセーブ性 信頼性確保の検討	1 ヘルセーブ性を確保するシステムとその考法の整理	○	◎
	2 信頼性向上により安全性が確保されるシステムとその考法の整理	○	◎
	3 多量に発生する故障が確保されるシステムとその考法の整理	○	◎
	4 一時的なシステム上の安全性確保を従来の鉄道技術によるヘルセーブ性による安全性確保	△	○
④ 異種システムの対応に関する評価		△	○

評価◎良い ○ 概ね良い △ 問題あり 試験による確認が必要 △ 問題あり 検討が必要