

隊列走行のための車車間通信（第2報）

関 馨[†] 浜口 雅春^{††}

本報告は財団法人日本自動車研究所及び沖電気工業株式会社が独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）殿から委託されて進めている「エネルギーITS 推進事業/自動運転・隊列走行技術の研究開発」における車車間通信の検討成果を紹介するものである。2009年度は5.8GHz帯の電波を用いた隊列内通信実験をフィールドで実施し、隊列維持のための高頻度、高信頼性の情報交換が可能であることを確認し通信方式を決定した。あわせて、トンネルを含む高速道路で電波伝搬実験を行い実走行環境での通信の可能性を検証した。本報告はこうした研究成果をまとめたものである。

Inter-vehicle Communication for Truck Platooning (2nd report)

Kaoru Seki[†] Masaharu Hamaguchi^{††}

This report introduces the results of a study on inter-vehicle communication that was conducted by the Japan Automobile Research Institute and Oki Electric Industry Co., Ltd. for the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) as part of the commissioned “Research and Development on Energy Promotion Project/Autonomous Driving and Platooning”. In FY2009, the development team conducted platoon communication field tests using the 5.8 GHz band, which showed that it was possible to exchange information with the frequency band and reliability required to maintain a platoon. With those tests, inter-vehicle communication method was established. The team also conducted radio propagation tests in expressway with tunnels, and verified that communication was possible. This report summarizes these research results.

1. はじめに

財団法人日本自動車研究所（JARI）は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）殿から委託を受けて、省エネルギー効果の高いITSの実用化を促進するため、2008年度から「エネルギーITS推進事業」に携わっている。具体的にはこの中で、走行方法の改善を狙った「自動運転・隊列走行」と「国際的に信頼される効果評価方法」の2つの研究テーマについて、関連機関の協力を得ながら研究を進めている。

テーマの一つである「自動運転・隊列走行」では、幹線道路におけるトラック運行の省エネルギー化を図るため、複数のトラックが車間を詰めて走行する隊列の実現を目指しており、5年間の事業実施期間の中で基礎技術を確認し、走行実験を実施する計画である。中間目標として2010年度に3台のトラックによる隊列走行実験を未供用の高速道路の一部で実施する予定である。

車車間通信は、隊列を維持するために必須の技術とみなされており、車間距離の適性な維持のため先行車のブレーキ情報などを後方に伝達するなどの役割が想定される。隊列を維持するための車車間通信は、高頻度、高信頼性の特徴を有しており、現在、沖電気工業（OKI）が5.8GHz帯の電波を用いた通信システム開発を担当している。2009年度は、JARI及びOKIが共同で通信実験を実施し、隊列内通信の仕様を確認することができた。

2. 2009年度車車間通信開発の位置づけ

2009年度の車車間通信に関する研究の目的は2008年度の研究成果をもとに、トラックの隊列制御に必要な車車間通信仕様を検討し、これに則ったシステムを試作して、その動作をフィールドで確認することである。2008年度から2010年度までの車車間通信の開発に関わる実施内容を図1に示す。

本報告では、特に2009年度の実施内容のうち通信仕様の検討と車両を用いた実験の結果を紹介するもので、通信シミュレーションの検討結果については別の機会に譲りたい。

[†] （財）日本自動車研究所 ITS研究部

^{††} 沖電気工業株式会社 社会システム事業本部 無線技術研究開発部

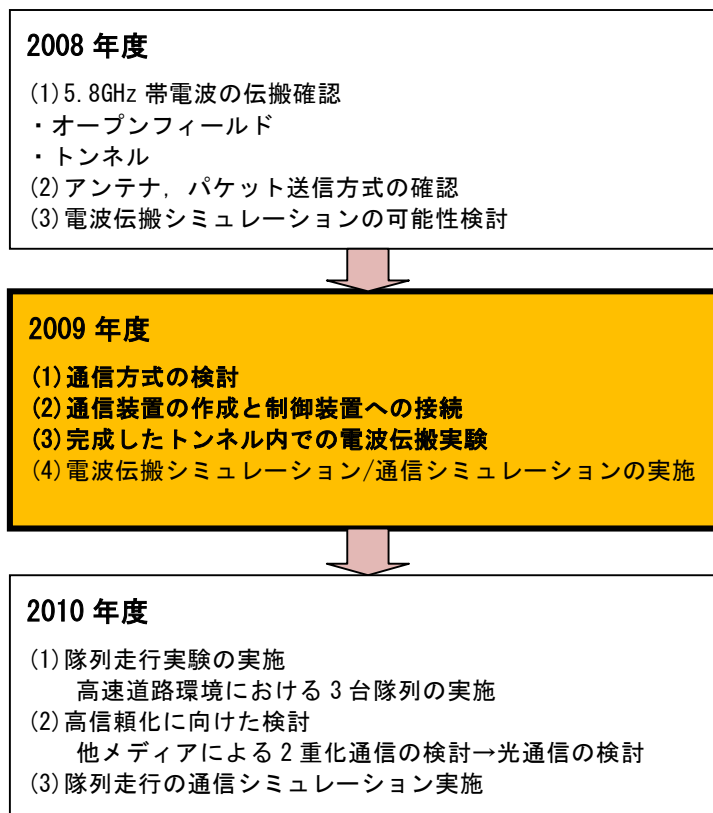


図 1 本発表の位置づけと内容

3. 通信方式の検討

本プロジェクトでは、2009 年度時点の計画で大型トラック 3 台で隊列走行を行うこととしており、車両制御の詳細を検討している。車車間通信の仕様に関しては、車両制御に必要な情報を 20msec の間隔で伝達することが求められている。

実験で用いる車両（日野プロフィア：最大積載量 25 トン）の概要は図 2 に示すとおりで、車両の動作性能（例えばブレーキ性能等）は揃えられている。各車両は目標速度を車車間通信により共有しながら通常の走行を行う。



全長	約 12m
幅	約 2.5m
高さ	約 3.8m

図 2 実験用トラックの外観及び代表寸法
(コンテナ部は実験室として改装されている)

一方、例えば緊急時への対応としては次のような動作を行う。

3 台の車両が隊列走行を行いながら緊急停車する場合、まず先頭車が停車する意志を後続車（2 台目）に伝える、後続車はこの情報を後尾車両（3 台目）に伝達し、最後尾車は減速を開始する。同時に最後尾車は先行車（2 台目）に対し減速開始を伝える。この情報を受けて 2 台目も減速を開始し先頭車にそのことを伝える。最後に先頭車が減速する、この情報のキックバックは 100msec 内に行うことが通信の要件となっている。

データの大きさは、走行実験を繰り返しながら決めており、現状では後に示す表 3 のような項目が候補となっている。データサイズは暫定的に 50byte とした。

パケットの信頼性は 100msec 間にデータ抜けが無いこと（暫定目標：一日のパケット伝達に対しデータ抜けが 10^{-8} 以下）と設定した。パケット伝達範囲は以上の信頼性を維持しながら隊列の長さをカバーできることとなるが、隊列形成時まで含めて 100m 程度あれば十分と考えられる。こうした通信要件を表 1 にまとめる。

利用周波数帯は日本の ITS 専用通信である 5.8GHz 帯を使用する．現在日本では安全運転支援のための車車間通信用として 700MHz 帯の利用が検討されているが，本プロジェクトの実験期間中は 700MHz 帯の利用には制限があること，及び，隊列内通信は殆ど近距離の見通し通信となることから，あえて 700MHz 帯域の電波は利用しなかった．即ち，通信の仕様は日本の車車間通信（5.8GHz）の実験規格である RC-005 に準拠しており，表 2 のようにまとめられる．

表 1 隊列走行のための通信要件

項目	隊列走行通信要件
システム要件	・車間距離 :5～10m ・走行速度 :80km/h ・隊列 :1 列・3 台(大型)
通信データ量	最大 50byte
通信距離	車間距離最大 60m に対応
情報更新周期	20msec
許容伝送遅延	キックバック伝送遅れ時間 100msec(3 台隊列の場合) 先頭車送信データが先頭車にキックバックされる遅れ時間)
通信品質	継続して検討(無通信連続許容時間 100msec)
通信の相手方	特定車両

表 2 通信仕様

項目	通信仕様
無線周波数	5.8GHz 帯のアップリンク
変調方式	$\pi/4$ シフト QPSK
無線伝送速度	4096kbps
送信電力	10mW 以下
ネットワーク構成通信形態 (検討中)	・自律分散型 ・Broadcast/Unicast ・確認ありデータリンクコネクション型 ・ホッピング
アクセス方式	CSMA/CA を基本

また，2009 年度においては，車車間通信装置は暫定的な車両制御装置（dSPACE）と接続されているが，今後は専用の制御装置に置き換えられる予定である．(図 3) 通信で送受するデータを表 3 に示す．これはあくまで 2009 年度の予備的な実験用であり，実験の状況によってさらに付加される可能性がある．ただし，このサイズのデータを 20msec で交換すると dSPACE とのインターフェースで不整合が発生することがわかり，2010 年度の隊列走行実験では 40msec 周期でのデータ交換が行われる予定である．

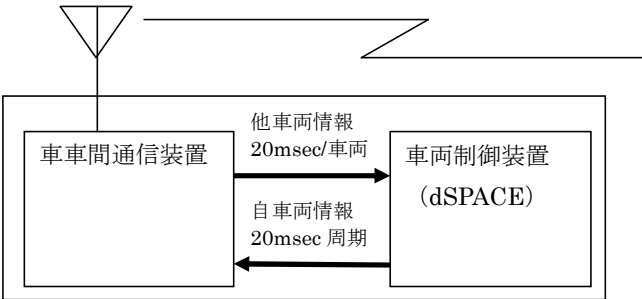


図 3 制御装置との接続

表 3 車車間通信のデータ（暫定）

主なデータ項目（予備実験用データ）
車両制御ステータス
隊列内順番
実速度，実加速度，実走行位置座標
目標速度，目標加速度
ハンドル操舵角度
回頭角度，ヨーレート

4. 通信装置の開発

日本の 5.8GHz の車車間通信実験規格に準拠した既存の通信装置を利用し、さらに通信品質を向上させるため以下の対策を行った。

- 車両制御装置から 20ms 周期で送られる最大 50 バイトの情報を他車へ送信する際、無線通信品質を向上させるために同一情報を 5 回送信（5 連送）する。他車両に搭載された車車間通信装置からのパケットを受信する毎に同一パケットであるかどうかを判断して車車間通信装置の状態（1 バイト）を付加し車両制御装置へ渡す。

さらに、無線機等の故障については今後以下の対策を行う予定である。

- 無線送信部異常の際には、他車両への干渉とならないように、連続送信状態の回避を行い、検知した障害を専用のインタフェースで上位装置に通知する。
- 無線受信部異常の際には、受信を停止し、検知した障害を専用のインタフェースで上位装置に通知する。



図 4 車車間通信機外観

5. 高速道路のトンネル区間での実験

制御装置と車車間通信装置を連結させた隊列走行実験は独立行政法人産業技術総合研究所つくばテストコースで実施されたが、ここでは高速道路のトンネル区間での通信実験について紹介する。

(1) 目的と方法

神奈川県と愛知県を結ぶ新東名高速道路は 2020 年に全線開通を目指して工事が進められている、この一部の完成された区間を利用して通信実験を行った。トンネル内の電波伝搬実験については 2008 年度末（2009 年 3 月）にも工事中のトンネル区間で実施しているが、路面の舗装が未完であり、その影響が十分確認できなかったこと、トンネル出口近傍の伝搬の連続性が確認できなかったなどの課題が残り、あらためて大型トラックを用いた実験を行った。実験区間は掛川市北部のトンネル（全長 4Km）である。

実験の狙いは下記の通りである。

- ・ほぼ完成されたトンネル内部における電波伝搬、パケット到達率の確認
- ・トンネル開口部における電波伝搬の乱れの有無の確認

このトンネル実験では隊列用トラックと同型のトラック（日野：プロフィア）2 台を用い、車間距離を変えながら電波強度とパケット到達率を測定した。

実験システムの構成を図 5 に示す。また、測定用通信緒元は表 2 に準じている。送信側は、車速パルス、装置を識別する ID、送信パケットの通し番号をデータに埋め込み、走行しながら周期的にパケットを送信した。受信側は、車両の異なる位置に設置した複数のアンテナで受信した。図 6 にトラックのアンテナ位置を示す。

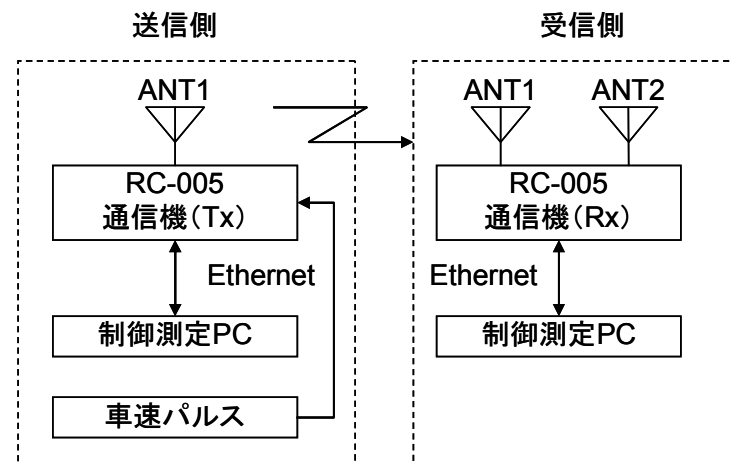


図 5 トンネル実験測定系

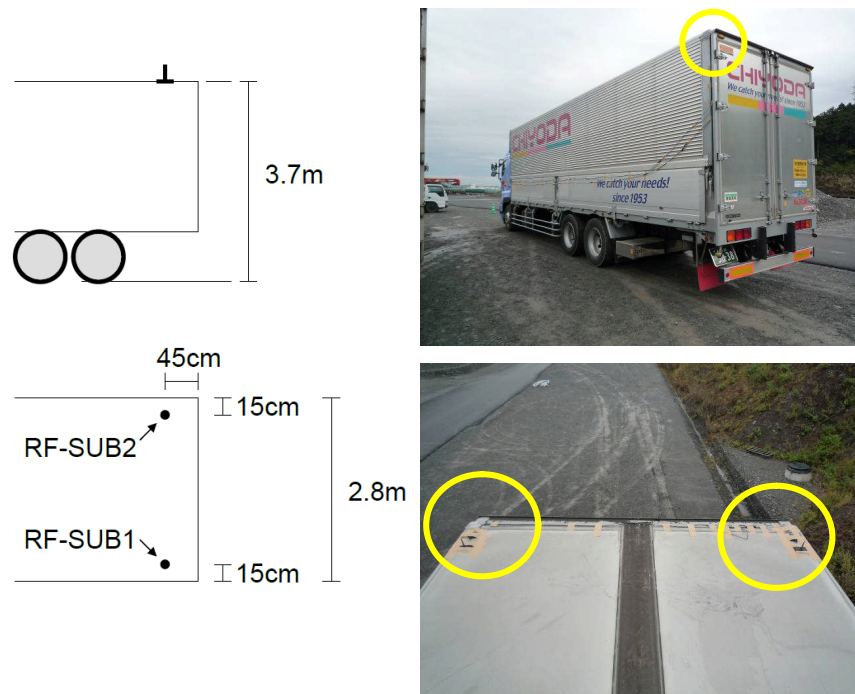


図6 アンテナ位置

(2) 実験環境と実験状況

実験に利用したトンネルの概略断面寸法（実験時計測）と実験シーンを図7、図8に示す。実験中は他の車両の通行を止めており、他車両の影響は無いと考えられる。

トンネル内の舗装はほぼ完璧に施されており、照明などの付帯設備も取り付けられていた。

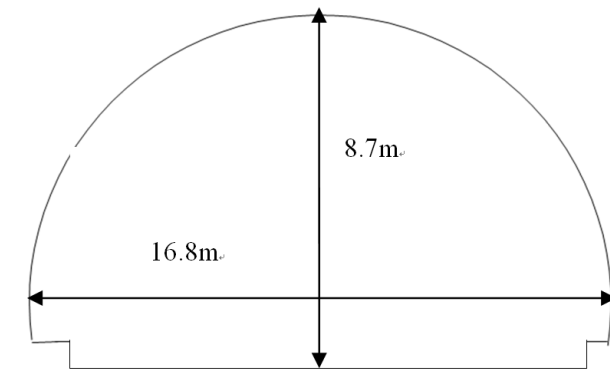


図7 トンネル断面の概略寸法



図8 トンネル実験シーン

(3) 実験条件と結果例

実験はいくつかの測定条件のもとで行ったが、代表的な例を2つ紹介する。

●測定 A

測定 A の走行条件を図 9 に示す。先頭車両はトンネル内で停車状態でパケットを送信し、後方車両はそれを受信しながらトンネル外の遠方より 30km/h 程度で走行しながら先頭車両に近づき車間距離 2.5m の地点で停止する。これはトンネル入り口部における電波伝搬の特異性の有無を確認する実験である。

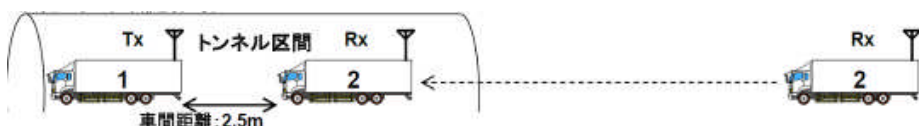


図 9 測定 A の走行条件（トンネル開口部の影響確認）

この条件下での受信電力の測定結果、パケット到達率測定結果をそれぞれ図 10、図 11 に示す。受信電力はパケット受信時に車速パルスと RSSI を記録し、車速パルス数に対応した横軸に対して RSSI から受信電力に変換した値をプロットしたものである。

パケット到達率は連続して送信された 5 のパケットの内の 1 個でも正しく受信された場合は受信成功としてカウントしている。

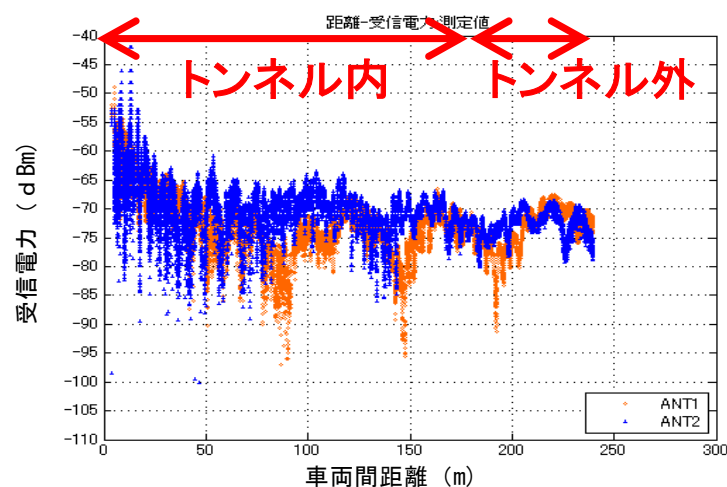


図 10 トンネル開口部における距離-受信電力特性

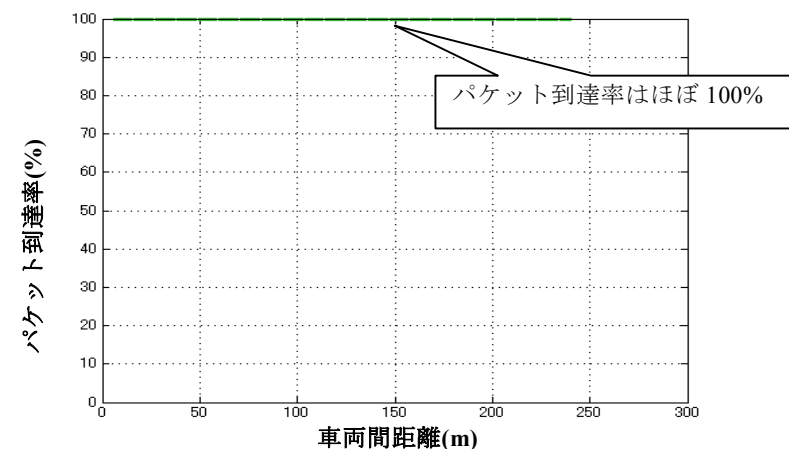


図 11 トンネル開口部におけるパケット到達率（パケット 5 連送）

●測定 B

測定 B の走行条件を図 12 に示す。先頭車両はトンネル内で停車状態でパケットを送信し、後方車両は受信しながらトンネル内の遠方（約 1.6Km）より 30km/h 程度で走行し、先頭車両に近づき車間距離 2.5m の地点で停止する。これはトンネル内部における電波伝搬を確認する実験である。

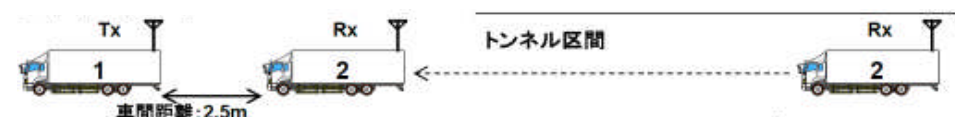


図 12 測定 B の走行条件（トンネル内部の通信実験）

測定したトンネル区間は緩やかにカーブしており、車間距離が 500m 以上離れると見通し通信が成り立たなくなる。受信電力測定結果の全体図及び近距離域での拡大図を図 13、図 14 に示す。パケット到達率については実用区間（100m 以内）ではほぼ 100%であった。

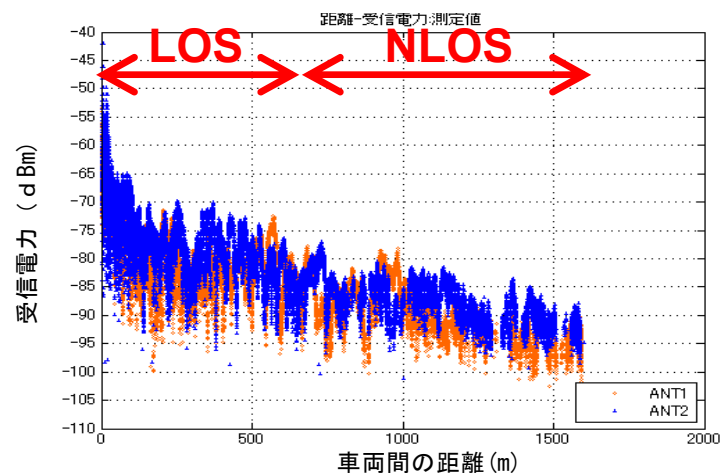


図 13 トンネル内部の電波伝搬特性

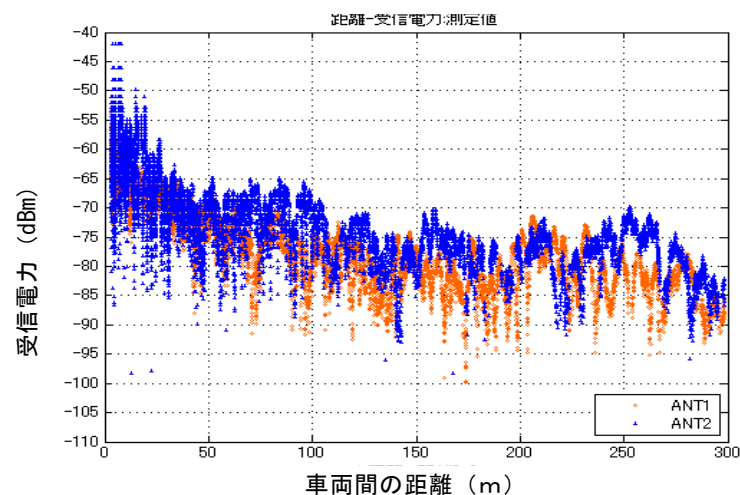


図 14 トンネル内部の電波伝搬特性（拡大）

(4) 実験結果まとめ

新東名高速道路のトンネル区間内の電波伝搬実験の結果をまとめる。

- トンネル内は受信電力の変動が大きい、反射の影響と見られる
- トンネル内の電波伝搬は良好で、通常道路よりパケットが良く届く傾向がある
- トンネル開口部での電力変動は他の場所と同じ程度であり、大きな変化はみられなかった
- 他の測定においても実用区間（車間距離 60m 以下）におけるパケット到達率はほぼ 100%であった

なお、他の車両が走行している一般高速道路（常磐道及び東京外環道）においても車間距離できるだけ詰めた車車間通信実験を行っており、トンネル及び遮音壁区間の電波伝搬を調査している。

定性的には、電波強度の平均的な値は今回実施したトンネル実験あるいはその他のフィールド実験とほぼ同レベルであるが、変動幅がやや大きくなるという結果が得られている。

以上から、トンネル区間においても十分な信頼性を持った隊列通信が可能であることが示された。

6. 隊列走行制御システムと車車間通信

2009 年度は、プロトタイプ実験車に搭載する隊列走行制御システムの詳細設計が行われた。必要とされる制御機能を車線保持、隊列車間距離、速度、障害物衝突回避とし、安全を確保するため可能な範囲でシステムの冗長化を確保したシステム設計となっている。この中で車車間通信は隊列車間距離、速度、障害物衝突回避（緊急停止）などの制御機能に関与し、制御に必要な情報を交換する機能を果たす。図 15 に車車間通信の役割を示す。

2010 年度には先頭車も含めて自動運転による隊列走行の実施を目指しており、白線認識による操舵、障害物の自動検知と緊急停車などの機能の検証を進める予定である。

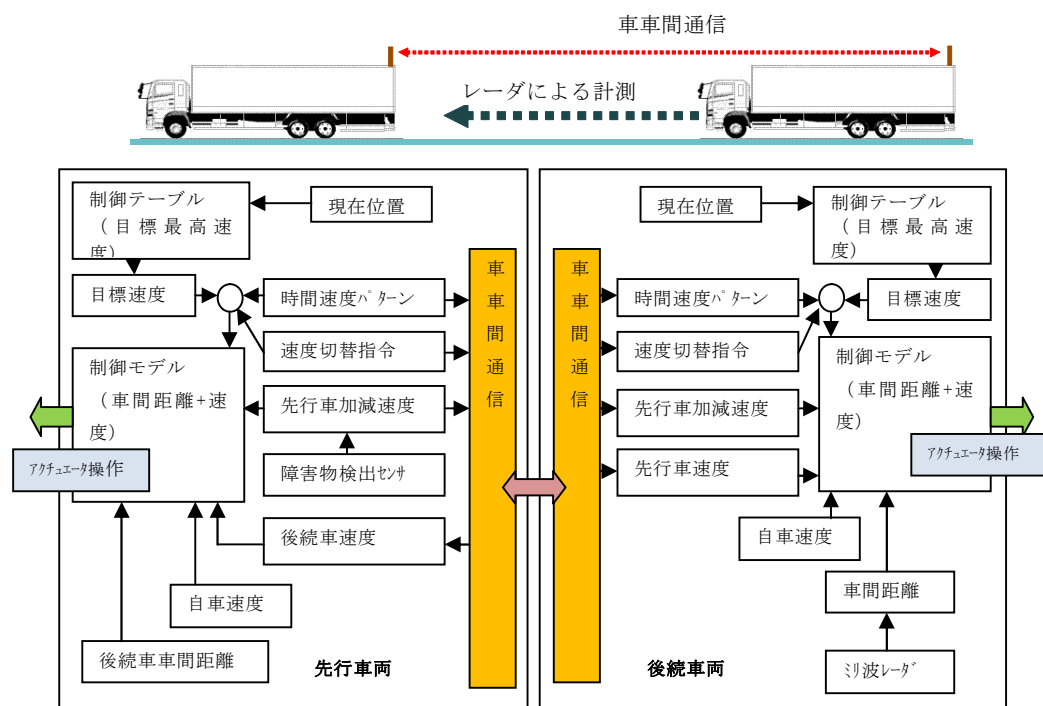


図 15 車車間通信の役割

7. まとめ

エネルギーITS 事業の「自動運転・隊列走行」テーマにおける車車間通信関連の研究状況について報告した。2009 年度は隊列走行の要件を満足する通信仕様に沿って装置を開発し、実道路環境における基本的な通信試験を実施した。

2010 年度は車車間通信機と制御機器 (dSPACE) を接続して 3 台のトラックによる予備的な自動運転による隊列走行試験を実施する予定である。車車間通信に関しては、他のシステムの 2 重化に対応して電波方式の通信の 2 重化を実施する他、異なるメディアによる通信システムを検討する。

参考文献

- (1) 関, 浜口” 隊列走行における車車間通信 (エネルギーITS プロジェクト) 情報処理学会研究報告 (ITS) Vol2009-ITS-037
- (2) K.Seki and M.Hamaguchi ” A Study on Inter-vehicle Communication for Truck Platooning” Proceedings of 16th ITS World Congress (Stockholm Sept.2009)
- (3) ” 5.8GHz を用いた車々間通信システムの実験用ガイドライン” ITS FORUM RC-005 1.0 版