

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)

関 馨[†]

本文は財団法人日本自動車研究所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/運転制御・隊列走行に向けた研究開発」における車車間通信の検討成果を紹介するものである。H20 年度は 5.8GHz 帯の電波に関して、大型トラック隊列内での通信実験、シミュレーションとの比較、トンネル内での通信実験などを実施し、その利用可能性を検討した。その結果、5.8GHz 帯電波がトラック隊列内での情報交換に利用できる見通しが得られた。

Inter-Vehicle Communication for Truck Platooning (Energy ITS Project)

Kaoru Seki[†]

This paper presents the study on inter-vehicle for truck platooning conducted by Japan Automobile Research Institute. The study is a part of "Energy ITS" project commissioned by New Energy and Industrial Technology Development Organization. In FY.2008, as for the usage of 5.8GHz band, we assessed the possibility of communication in large truck platooning, the availability of propagation simulation and the possibility of communication in expressway tunnel. Through this study, we can have a prospect that 5.8GHz band can be used in truck platooning on the expressway.

1. はじめに

財団法人日本自動車研究所 (以下 JARI) は、独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構 (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

[†] (財) 日本自動車研究所 ITS 研究部
Japan Automobile Research Institute ITS Research Division

中で、走行方法の改善を狙った「運転制御・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「運転制御・隊列走行」では、幹線道路での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立し、走行実験を実施する計画である。

トラックの隊列走行に関しては、かつて欧州の「CHAUFFEUR」計画の中で、実道において 2 台のトラックの隊列実験が行われたことは周知の通りであり、米国においても省エネ走行を目指したトラックの隊列走行の研究 (カリフォルニア PATH) が進められている。「運転制御・隊列走行」では、最終的にはトラック 3 台で、車速 80Km/時に車間距離 10m 以下を目指しており、これまでよりもさらに高い研究レベルが求められている。

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役割が想定される。さらに、こうした車両制御のための通信だけではなく、隊列を形成するための準備、隊列車両同士の情報交換、隊列への途中参加、周囲車両への注意喚起、などの車車間通信が必要になる。「運転制御・隊列走行」ではこれらを合わせて研究することとしており、現在、適用可能な通信方式の調査、通信リクワイアメントの整理を行っている段階である。

本稿では、「エネルギーITS 推進事業/運転制御・隊列走行に向けた研究開発」で利用を想定している車車間通信方式の考え方と、H20 年度に実施した車両制御のための通信基礎実験の結果を紹介する。

2. 隊列走行のための車車間通信方式

隊列走行を実現するために最低必要な車車間通信方式としては上述したように

- 車間距離制御のための通信
- 隊列運行管理のための通信

の 2 種類があると考えられる。限られた条件下での実験のためには“制御のための通信”のみで対応可能であるが、本研究では実道での運用を視野に入れ“運行管理用通信”も併せて検討することとした。

現在、国が主導する「IT 新改革戦略」の中で運転支援のための通信を利用したシステムが様々な地域で実験されている。こうした実験で利用される車車間通信方式は 5.8GHz 帯については「RC-005」、また 700MHz 帯については「RC-006」で実験用規格が整備されている。隊列走行用の車車間通信に関しては、上記 2 種類の通信リクワイア

メントに応じて方式を開発することになるが、可能な範囲でこれまでの研究成果を生かし、運転支援の通信方式との統合化を図りたい。

隊列走行用の通信方式の特徴をまとめると図1のようになる。

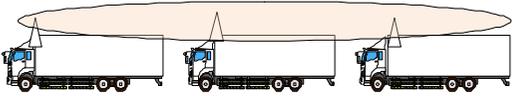
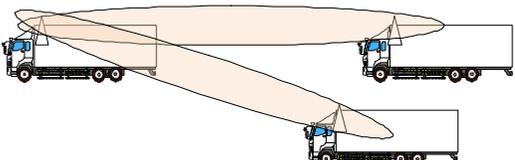
通信方式	役割	特徴
<p>車間距離制御のための通信</p> 	<ul style="list-style-type: none"> 車両制御のための走行情報交換 直接、制御装置に入力 	<ul style="list-style-type: none"> 低遅延 短い交信周期 隊列内での通信 高信頼性⇒通信の2重化
<p>隊列運行管理のための通信</p> 	<ul style="list-style-type: none"> プラトーン形成のための情報交換 運行管理者(ドライバー)への情報提供 	<ul style="list-style-type: none"> 遠距離通信(マルチホップ) イベント発生時のみの情報交換 認証機能など組み込み

図1 隊列走行における車車間通信方式

平成20年度の「運転制御・隊列走行」の研究では、単独の車両制御やセンシングの検討が先行して実施され、車車間通信へのリクワイアメントは明確になっていないが、通信メディア候補の一つである5.8GHz帯電波について、トラック隊列内通信の可能性、トンネル内での利用可能性、電波伝搬シミュレーションの適用可能性を確かめる基礎実験を行った。

以下、これらについて結果を報告する。

3. 隊列内通信の可能性検証

3.1 実験条件

「運転制御・隊列走行」ではH24年の最終デモストレーションで3台の大型トラック(日野プロフィア=最大積載時総重量25トン)の隊列走行を予定しているが、この隊列の中での5.8GHz帯域の通信可能性を同型のトラックを用いてフィールドで確認した。トラック3台を1列に並べ、前の2台は車間距離を一定にして固定し、最後尾の

1台のみ後方から移動させる。電波は前の2台が交互に出し受信電力強度とパケット到達率を計測した。実験場所は、JARIつくば構内の模擬市街路である。図2に実験場所概要と実験車両(現在改修中)を示す。

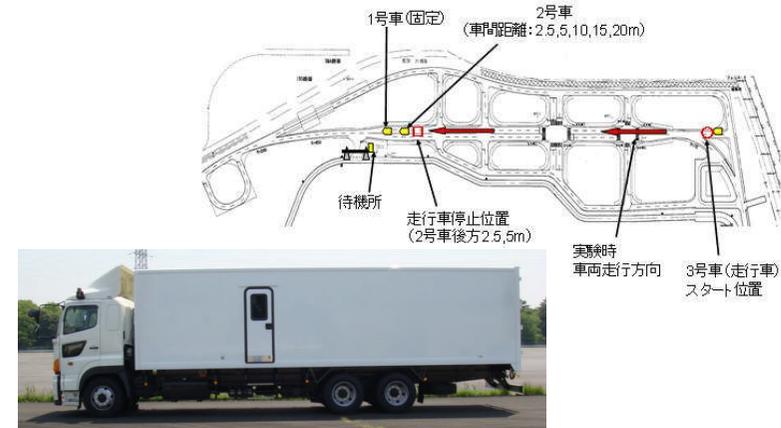


図2 電波伝搬実験場所(JARIつくば模擬市街路)と実験車両

また、実験における測定条件を表1に示す。

表1 電波伝搬実験測定条件

項目	内容	備考
測定項目	<ul style="list-style-type: none"> 受信電力測定(CW/パケット受信時) パケット到達率(1m区間で送信数100/パケット(3回走行の合計)) 	パケット到達率は1m区間で送信数100/パケット(3回走行の合計)
測定環境	JARIつくば模擬市街路(西コース)	
無線諸元	<ul style="list-style-type: none"> 周波数: 5.820MHz 送信出力: 10mW 変調方式: $\pi/4$ shift QPSK 	無線部仕様は、ITS FORUM RC-005に準拠
測定パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> 車間距離: 2.5m, 5m, 10m, 15m, 20m アンテナ位置: 全車両同一(ダイバーシチ適用) <ul style="list-style-type: none"> -オムニ: キャビン部ルーフ左右、左右ミラー上部 -指向性: 車両前後 	オムニ: 4dBi 指向性: 7dBi 半値角: 60°
使用機器	<ul style="list-style-type: none"> 大型車両: 3台 無線機: 3台 	各車両に1台ずつ搭載

測定パラメータとしては、車間距離 (2~20m), アンテナ (指向性/オムニ (無指向性)), アンテナ位置 (ルーフ上/ミラー上), 送受信車両を選択し、測定系 A~F として組み合わせを作り実験を行った。測定 A~F の組み合わせを表 2 に示す。また、アンテナ設置例としてルーフ上にアンテナを設置した例を図 3 に、トラック仕様、アンテナ設置高さを表 3 に示す。

表 2 測定内容

項目	アンテナ	アンテナ位置	1号車-2号車車間距離	内容	送信車両	受信車両		
測定A	オムニ	キャビン部 右:Tx/Rx 左:Rx	2.5m	受信電力	1号車	3号車		
				パケット到達率		2号車、3号車		
測定B			5m	受信電力	2号車	3号車		
				パケット到達率		1号車、3号車		
測定C			指向性	車両前後 前:Rx 後:Tx/Rx	15m	受信電力	1号車	3号車
						パケット到達率		2号車、3号車
測定D	20m	受信電力			2号車	3号車		
		パケット到達率				1号車、3号車		
測定E	オムニ	ミラー上部 右:Tx/Rx 左:Rx			2.5m	受信電力	1号車	3号車
						パケット到達率		2号車、3号車
測定F			5m	受信電力	2号車	3号車		
				パケット到達率		1号車、3号車		

測定 A~F のイメージは図 4 の通りである。1, 2 号車の車間距離を 2~20m まで設定を変え、3 号車はこの設定された距離まで 2 号車に接近して停止する。電波は 1,2 号車が交互に発信し、3 号車は受信のみ行う。

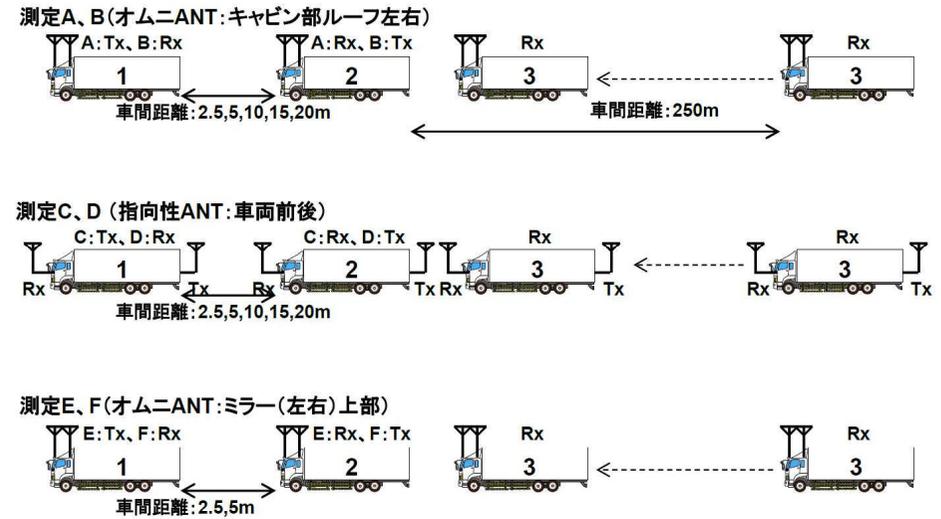


図 4 測定組み合わせと車両配置

表 3 トラック仕様、アンテナ高さ

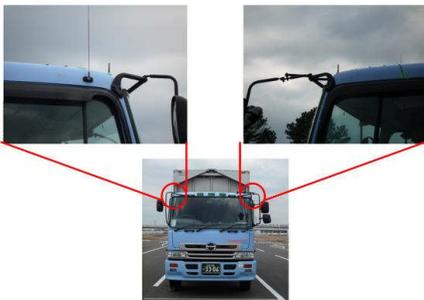


図 3 アンテナ設置 (ルーフ上)

項目			
車両 サイズ [cm]	全長		1,197
	全幅		249
	全高		378
アンテナ 高[cm]	オムニ (キャビン部 ルーフ)	右 (送受信)	273
		左 (受信)	273
	オムニ (ミラー 上部)	右 (送受信)	245
		左 (受信)	245
	指向性	後 (送受信)	163
		前 (受信)	163

3.2 測定方法

本試験では受信電力の測定方法として、下記の 2 通りを用いた。

(1) 搬送波での測定

停止している車両のアンテナから搬送波を送信し、受信する車両が 30km/時程度の速度で走行し、一定時間間隔 (10ms) 毎に、取得した受信信号強度 (RSSI) の値を車速パルス数と共にログに記録する。変換テーブルを用いて、ログに記録された RSSI 値から受信電力に変換する。

(2) パケット受信時の測定

以下に示すパケット到達率を測定する際、受信ログに記録したユニークワード受信時の RSSI 値から、変換テーブルを用いて受信電力を求める。

(3)パケット到達率の測定

パケットを送信する車両は、送信装置を識別する ID、送信パケットの通し番号、車速パルス数を埋め込んだパケットを1台のアンテナから3ms 毎に送信しながら30km/h 程度の速度で走行する。従って、走行中1m 当たり 40 パケット送信することになる。パケット到達率に関しては単一のパケットを送出した場合と、同一パケットを5 連送した場合（この場合1 回でも受信すれば受信成功としてカウントされる。）の受信率を計測した。

3.3 データについて

測定系 A～F についてそれぞれ結果を紹介すべきであるが、紙面の都合で、ルーフ上に無指向性アンテナを配置して、1号車をTx（送信車）とした場合の3号車のパケット到達率の変化（測定系 A）の結果を代表例として紹介する。なお、この条件における受信電力の変化は4 節のシミュレーションの結果と併せて紹介する。

図 5、図 6 は車両を移動しながら1 回パケットを送信した場合と同じパケットを5 回送信した場合の到達率をそれぞれ示している。

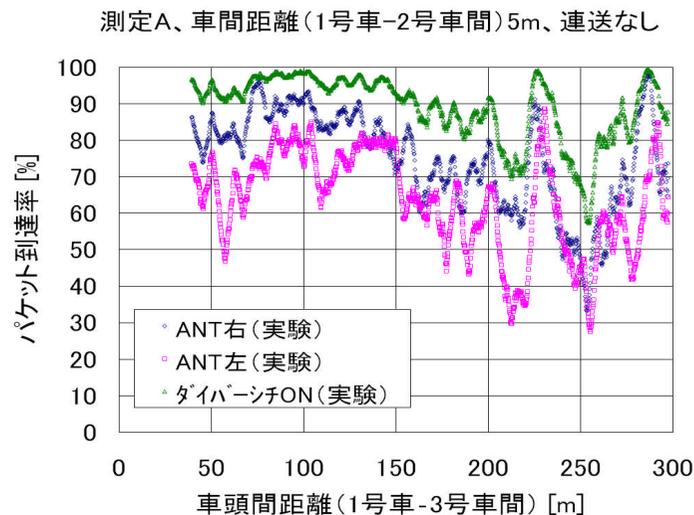


図 5 測定 A におけるパケット到達率（パケット送信1 回）

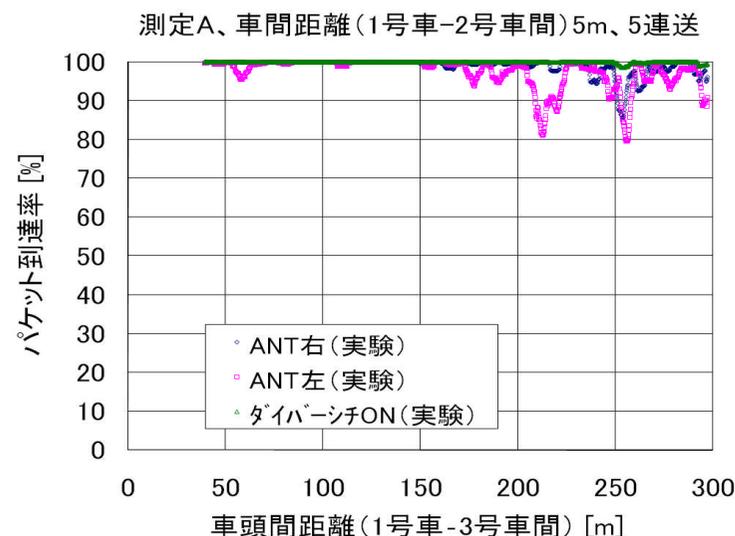


図 6 測定 A におけるパケット到達率（パケット連送5 回）

3.4 隊列内通信実験の結果

隊列内通信実験の結果をまとめると以下のようになる。

(1)パケット到達率

1号車送信アンテナが右側のため、3号車受信アンテナ位置は右側の方が至近距離では2～5dB 程度受信電力が高くなっており、パケット到達率も10%程度高くなっている。両方のアンテナを利用してダイバーシチを ON するとパケット到達率は100m 以内で90%以上を確保できる。したがって5 回のパケット連送を行うことでパケット到達率はほぼ100%に近づけることが可能と見られる。

(2)アンテナ位置

アンテナをミラー上部に設置した方が、キャビン部上部に比べ、全体的に2～5dB 程度高くなっている。このことから、5.8GHz を利用する場合はなるべく見通しの良い位置（ミラー上、あるいはコンテナ後部）にアンテナを設置することが望ましい。

(3)評価

こうしたことから、5.8GHz 帯域の電波を利用した場合、隊列形成時において90% 以上のパケット到達率が得られる見通しが得られた。

4. 電波伝搬シミュレーション

トラックの隊列内における通信の信頼性を確認するためには、実車を用いたフィールド実験が欠かすことができないが、全ての起こりうる状況についてフィールド実験が可能であるとは限らない。このため計算機による電波伝搬シミュレーションを併用し、フィールド試験を補間することを試みる。そこで3節で述べた JARI つくばの模擬市街路通信実験の環境をモデルとし、電波伝搬のシミュレーションを行い実測データと比較した。

4.1 シミュレーション条件

模擬市街路における車車間通信実験環境をモデル化し、レイトレス法を用いて電波伝搬シミュレーションの評価を行った。本評価では実験に準じてトラックの車両台数、車両サイズ及びアンテナ高を設定している。実験環境には模擬市街路付近の建物及び塀を含めている。シミュレーション条件を表4にまとめる。

表4 シミュレーション条件

諸元	設定値	備考
走行環境	つくば模擬市街路コース ・ 走行方向右側に金属板 ・ 走行方向左側に建物	・ 図2を参照
レイトレス方法	イメージング法	
回折モデル	UTD	Uniform Theory of Diffraction
最大反射回数	4回	
最大回折回数	2回	
中心周波数	5.820GHz	
送信電力	10.0dBm	
アンテナ利得 (送信/受信)	無指向性：全方向 4.0dBi	測定系 A, B, E, F 想定
	指向性：最大 7.0dBi	測定系 C, D 想定の場合
ケーブル/コネクタ ロス (送信/受信)	0.5dB	

4.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果の例として3節と同じく測定系Aの結果を実験データと比較させて示す。車間距離を5mとし、1号車から発した電波を移動する3号車で受信した場合の受信電力の変化を左右のアンテナ毎にシミュレートした。結果を図7に、また一部拡大したデータを図8に示す。

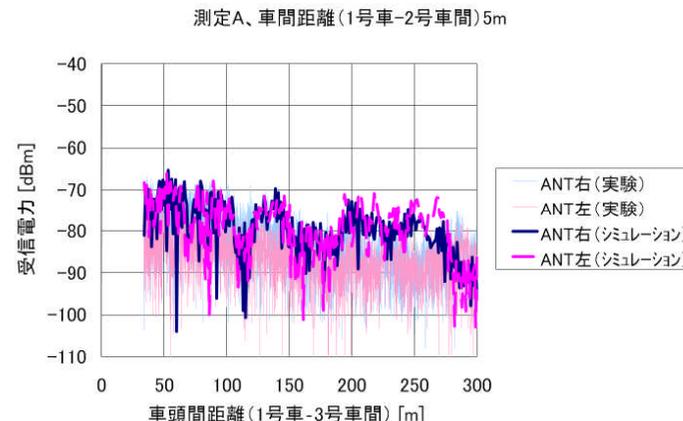


図7 受信電力のシミュレーション (実測データとの比較)

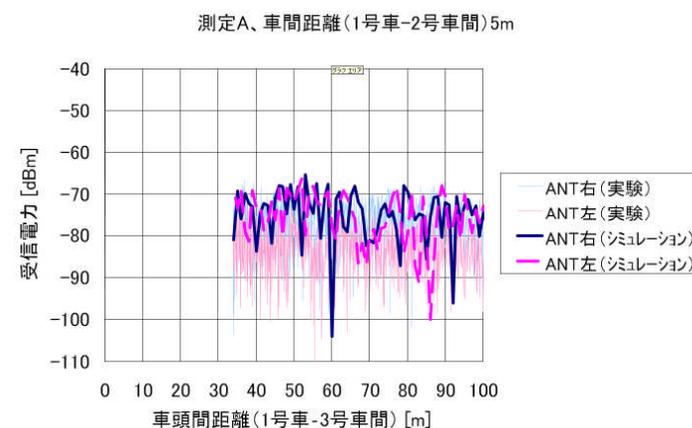


図8 受信電力のシミュレーション (実測データとの比較：拡大)

4.3 シミュレーションに関する考察

車間距離を 5m から 10m に変えてもシミュレーション、実測データともに電力の値はほとんど変化が無かった。図 7 から見られるように実測値に比べてシミュレーション値が高めの値を示している。特に車間距離が 100m を超えると差が大きくなるように見られる。一方、実用域となる車間距離 100m 以内では比較的合致している。ただし、この領域においてシミュレーションでは左右のアンテナの差が見られないが、実測データでは、送信アンテナに近い右側アンテナの受信電力が大きくなっている。

フィールド実験を補間するツールとして計算機シミュレーションを検討しており、電力レベルの推定にある程度有効であることがわかった。詳細なデータ分析は今後行うが、計算精度の向上についてはさらに工夫が必要と思われる。ただし、精度向上による計算時間の増大というデメリットも予想され、要求レベルを明らかにして利用すべである。

5. トンネル内通信可能性検証

隊列走行の実証実験は第二東名高速道路の未供用区間で実施が計画されている。走行区間内には比較的大きなトンネルがあることが予想されるが、トンネル内での通信実験は公開されたデータがほとんど無いことから事前にトンネルの電波伝搬環境を調査した。今回の実験場所とした富士川トンネルは、実証実験で予定している区間ではないが、トンネル形状はほぼ同じと考えられる。通信メディアは、模擬市街路実験と同じ 5.8GHz 帯電波である。

5.1 トンネル実験環境と測定条件

実験の目的はトンネル内の電波の伝播状況を調査することである。2 台の車両を用いて、電波強度、パケット到達率を測定した。測定条件は表 5 に示すとおりである。

実験場所として選んだ富士川トンネル（全長約 4Km）は工事中であり、壁部は形成されていたが、道路部は未舗装、空調、照明などは未設置であった。この一部を利用し、図 9 のように車両 A（固定）、車両 B（移動）の間で通信を行った。

工事中ということもあり、実験区域の両側に警備員車両を配置し、安全確保に十分留意して実験を行った。

表 5 トンネル実験 測定条件

項目	内容	備考
測定項目	<ul style="list-style-type: none"> 受信電力測定 (CW/パケット受信時) パケット到達率 	
測定環境	<ul style="list-style-type: none"> 第 2 東名 富士川トンネル 	
無線緒元	<ul style="list-style-type: none"> 周波数: 5,820MHz 送信出力: 10mW 変調方式: $\pi/4$ shift QPSK 	
測定パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> アンテナ高さ: 245cm, 275cm オムニアンテナ: 基地局, 移動局 	GAIN : 2.15dBi
使用機器	<ul style="list-style-type: none"> 車両: 2 台 (小型トラック, 乗用バン) 無線機: 2 台 	

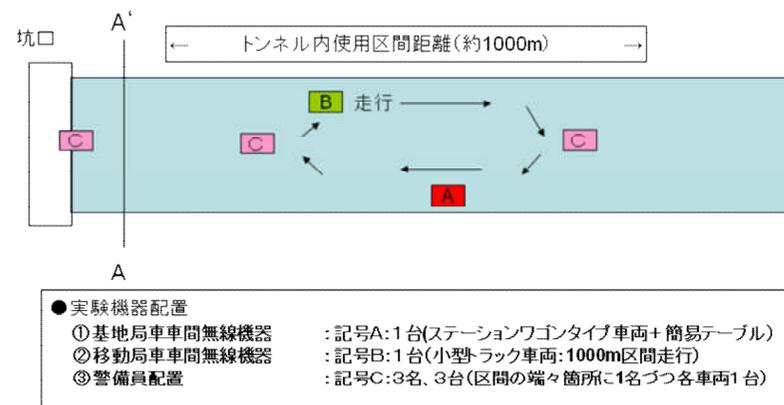


図 9 富士川トンネル電波伝搬実験車両配置図

トンネルの断面図（実測）を図 10 に示す。測定の方式は、基本的には模擬市街路の電波伝播実験に準じている。

トンネルは片側 3 車線であり、測定は側壁の影響をみるため側壁側の第 1 車線、中央の第 2 車線上でそれぞれ車を 1000m 往復させて行った。トンネル内では実験用大型ト

トラックの反転が不可能なことから、小型のトラックや乗用バンを使用した。アンテナの高さは、実験用トラックのアンテナ高さ（ミラー/ルーフ）を想定して車両上への櫓やポールを立てて 245cm または 275cm に設定した。実験の様子を図 11 に示す。

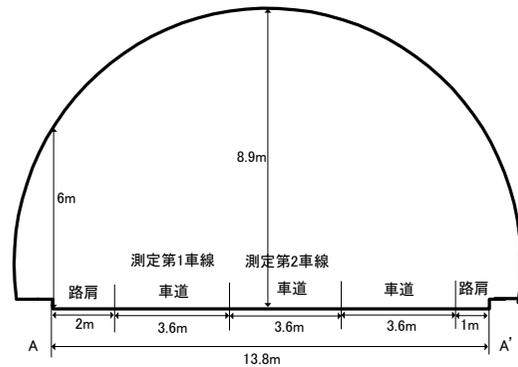


図 10 トンネル断面実測値



図 11 トンネル内実験の様子

5.2 データについて

代表的なデータ例を図 12, 図 13 に示す。図 12 は受信電力の特性で中央の 500m のところで送受信車両がすれ違うため、受信電力がピークを示している。送受信車両の距離が 500m までは受信感度が -80dBm をほぼクリアしている。また、パケット到達率をみると、個別のアンテナでは 200m 付近に大きな落ち込みがあるが、実用域 (100m 以内) では 95% 以上の到達率が得られている。さらにダイバシティーを ON することでほぼ 100% のパケット到達率が得られている。

アンテナ高2.45m 第2レーン 受信電力

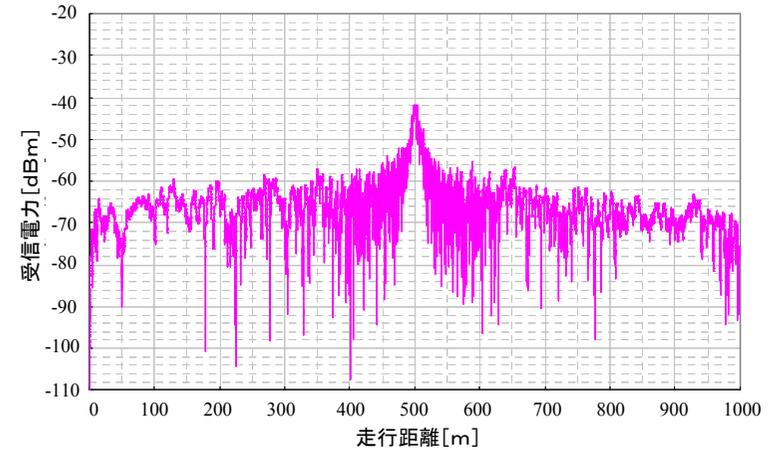


図 12 トンネル内受信電力

アンテナ2.45m 第2レーン パケット到達率

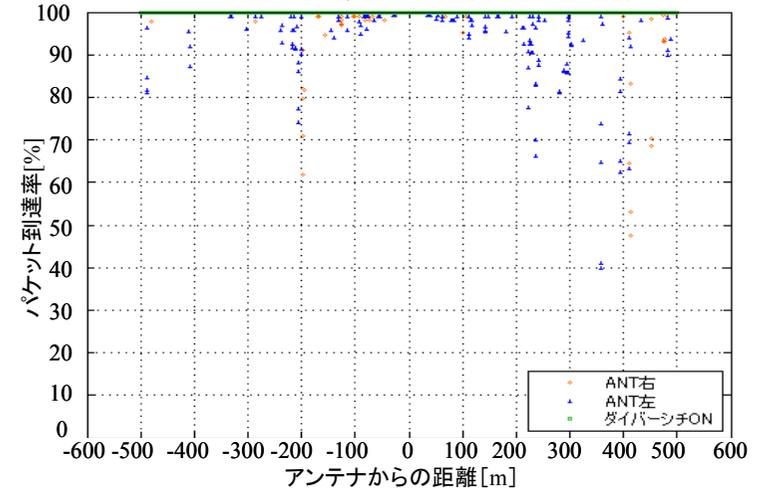


図 13 トンネル内パケット到達率

5.3 トンネル実験の結果と課題

(1)実験結果について

第二東名高速道路富士川トンネル内で 5.8GHz の電波を用いて伝播実験を行った。結果は以下のようにまとめられる。

- 自由（開）空間においてはアンテナ設置高が高いほど受信電力が高くなる傾向にあるが閉空間のため、トンネル天井面からの距離が近いほど（アンテナ設置高が高い）受信電力が低かった。この傾向は側壁に近い場合についてもいえる。
- 自由空間での受信電力の減衰と閉空間での減衰に差が見られなかった。
- 実験したトンネルは工事中であり、道路面の舗装が未完であった。このことは電波の路面反射に影響すると思われ、さらなる検証が必要である。

(2)実験における課題

今回のトンネル実験に関する課題は以下のとおりである。

- 路面反射の影響：未舗装（圧土）路面の影響（アスファルト路面での測定）
- トンネル内構造物の影響：排煙設備や消火設備等の反射／遮蔽の影響
- トンネル入口構造物の影響：ひさし型トンネル坑口の影響（広大な空間から狭小な空間への変化）
- 様々なトンネル形状の影響：車線数の少ないトンネル（高さも低い）での伝播これらについては追加の検証実験が必要である。

6. まとめと今後の進め方

エネルギーITS/運転制御・隊列走行における車車間通信の利用方針と H20 年度に実施した基礎検討について概要を紹介した。即ち、既に実験規格が策定されている 5.8GHz 帯電波の特性を

- JARI/つくばの模擬市街路における電波伝搬実験
 - 第 2 東名高速道路のトンネル内での電波伝搬実験
- によって調査した。また、

●Ray トレース法によるシミュレーションの利用について検討を行った。この他、高速道（東名高速道路）における 5.8GHz 外来電波の有無などを調査しているが紙面の都合で割愛した。

5.8GHz 帯の協調走行への利用に関しては、JARI/ITS 研究部は Demo2000（H12 年）を実施しており、通信周期の早い情報交換による車両制御の経験を有している。H20 年度の基礎検討の結果も併せて、5.8GHz 帯の電波を隊列走行の制御のため利用できるの見通しが得られた。

一方、国が進めている 700MHz 帯の利用に関しては、現在 ITS 以外の分野で使用中的であることもあり、その有効性の検証は簡単ではないと予想される。今後、関連機関

と調整を図りながら、隊列の運用管理、通信の 2 重化なども含め利用を検討したい。

謝辞

今回の第二東名高速道路・富士川トンネル実験に関しては、中日本高速道路（株）富士工事事務所殿の全面的な協力を得ることができた。謹んでお礼を申し上げます次第である。

参考文献

- 1) エネルギーITS 研究会:エネルギーITS の推進に向けて：（事務局（財）日本自動車研究所）（2008）
- 2) NEDO パンフレット:エネルギーITS 推進事業：（2009）
- 3) 野本和則，浜口雅春:低炭素社会の実現に向けた車車間通信システムの取り組み：OKI テクニカルレビュー214，Vol.76，No1，PP4-7.（2009.4）