

3-4 ITS 無線伝送技術

3-4-1 ミリ波車車間通信技術 - 電波伝搬特性 -

3-4-1 Technologies of Millimeter-wave Inter-vehicle Communications - Propagation Characteristics -

加藤明人 佐藤勝善 藤瀬雅行

Akihito KATO, Katsuyoshi SATO, and Masayuki FUJISE

要旨

ミリ波を用いた車車間通信の諸技術について、特にシステム設計に必要な路上走行条件における電波伝搬環境解明の観点から、これまでの実験等で明らかにした点を中心に述べる。はじめにミリ波車車間通信の概要と適用例について述べ、解決すべき課題を整理する。システム設計に必要な路上ミリ波電波伝搬特性として、静止時のマルチパス特性及び移動時のフェージング特性について実験結果を示し、伝搬モデルやフェージング発生メカニズムについて考察する。また、横須賀リサーチパークで進められているITSミリ波車車間通信の研究活動について紹介する。

In this paper, we introduce developed technologies for millimeter-wave inter-vehicle communication (IVC) system in intelligent transport systems (ITS), especially propagation characteristics of 60 GHz band for the system design of IVC. First we introduce the outline of an IVC system using millimeter wave and its research subjects. Next we show experimental results of propagation characteristics of radio wave at 60 GHz between running vehicles. The propagation model and mechanism of fading propagation are argued. The joint research activity of IVC system in Yokosuka Research Park (YRP) is also introduced.

[キーワード]

車車間通信, ミリ波, 電波伝搬, ITS

Inter-vehicle communication, Millimeter wave, Propagation, ITS

1 はじめに

携帯電話の加入数は、平成13年3月末で遂に6000万に達し、固定電話網の加入数を超えて更に伸び続けている。このように無線を利用した移動通信システムは、その物量の拡大もさることながら、新たな通信分野である高度道路交通システム(ITS)などへの広がり、またマイクロ波帯からミリ波帯への展開など、更にそのフィールドを広げつつある。これら移動通信の技術展望をにらみ、横須賀無線通信研究センター無線伝送グループでは、ITSにおける情報通信への新

たな展開として、未利用周波数帯であるミリ波帯を用いた無線通信技術の研究を平成10年度から進めてきている。また本センターが立地する横須賀リサーチパーク(通称YRP)には、世界を代表する移動通信機メーカーや研究機関が集まっており、次世代携帯電話に代表されるモバイル・マルチメディアシステムやITS無線通信システムなどの最先端の移動通信技術の研究が産学官の連携の下で強力に推進されている¹⁾。

本稿では、これらの研究活動の中で進められているミリ波車車間通信における路上電波伝搬の研究について報告する。まずはじめに、ミリ

波車車間通信の特徴とその適用例について述べ、解決すべき技術的課題について整理する。また、横須賀リサーチパークで進められている ITS ミリ波車車間通信の研究活動について紹介する。次に路上での電波伝搬特性の実験結果を示し、伝搬モデルやフェージング発生メカニズムについて考察する。最後に、今後の研究の方向性について示す。

2 ミリ波車車間通信の特徴と解決すべき課題

ミリ波車車間通信は、60GHz 等のミリ波帯電波を用い、路側のインフラを介することなく車両間で直接通信を行い、安全運転の支援や運転上の利便性の向上等を実現するための無線通信システムである。図1にミリ波車車間通信を用いたアプリケーション例を示す。

このような車車間通信にミリ波帯を利用した場合には、赤外光による通信システムなどと比較して霧や雪で減衰されにくく、太陽光による干渉の影響が少ないなどの特徴がある。また、ミリ波の中でも特に60GHz帯を利用する車車間通信システムを想定した場合、大気吸収が大きく回線の場所再利用効率が高い、広い帯域を利用した高速通信が可能、既に実用化されている車載レーダとの連係動作や回路共用が可能、など、短距離通信(DSRC)システムとして数々の利

点を持つことが期待できる。

ミリ波を用いた車車間通信では、プラトーン走行などの自動運転のための制御信号伝送を目的とした通信のように、同じ方向に走行していて、電波的に見通し内に存在する車両相互の通信を主に想定している。よって、各々の車両の対地速度は高速であるものの、通信を行う車両間の相対速度は比較的小さく、移動局間直接通信の形態の中でも従来の固定局間通信の形態に比較的近い。しかしながら、ミリ波帯は波長が短いことから、車両の相対的な動きがわずかであっても、大きな影響を受ける可能性がある。また比較的狭いビームのアンテナの利用が想定されることから、道路の周りの地物からのマルチパス到来は比較的少ないと予想されるが、路面からの反射は無視できない程強く、直接波と路面反射波との干渉のため、非常に強いフェージングが発生する。このように、ミリ波車車間通信を取り巻く電波伝搬環境は、これまでの形態の移動通信における伝搬環境とは大きく異なると考えられ、システム実用化のためには、その伝搬メカニズムの解明と、伝搬モデルの構築が非常に重要である[2][3]。

3 横須賀リサーチパークにおける ITS 共同研究¹⁾

横須賀リサーチパーク(通称 YRP)は、情報通

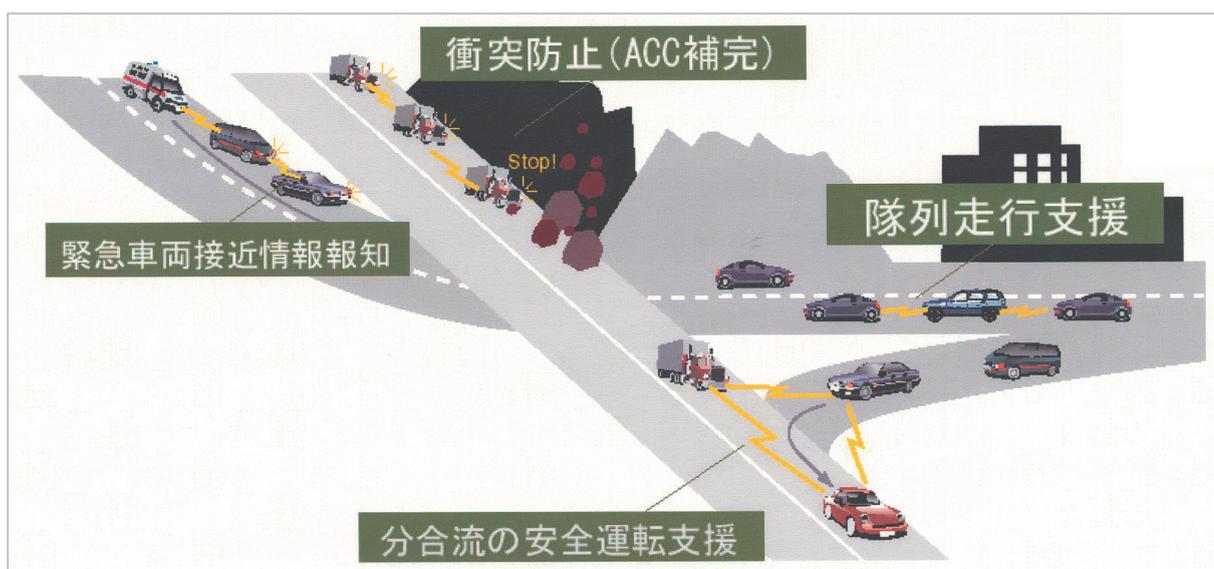


図1 ミリ波車車間通信のアプリケーション例

信技術の研究拠点を整備し、その基礎技術、先端技術等の研究開発を進めることにより、国内及び国際的な情報通信の発展に寄与するとともに、21世紀の高度で豊かな社会の構築に貢献することを目的として、平成9年10月にオープンした。現在は移動通信に特化したリサーチパークとしては世界的に類を見ない規模で展開しており、世界を代表する移動通信機メーカーや研究機関が集まって、21世紀のマルチメディア情報社会の実現に向け、次世代携帯電話に代表されるモバイル・システムなどの最先端の移動通信技術の研究が産学官の連携の下で強力に推進されている。その研究活動の一環として、平成10年度からはITS情報通信に関する研究開発が進められており、通信総合研究所を中心に民間企業(平成12年度は19社)が集まり、ミリ波利用によるITS無線通信技術(車車間通信、路車間通信)に関する共同研究を行っている。図2に平成12年度の研究体制を示す。

車車間無線通信共同研究分科会は、ミリ波を用いたITS車車間無線通信システムの創出と技術基準策定、標準化に資する知見を得ることを目的として、平成10年に活動を開始した。平成12年度には約12機関の参加を得て、具体的なアプリケーションを特定した研究開発を行うとともに、世の中に役立つシステムの普及を目指した活動を展開した。現在はより実用化に向けた活動に重点を置き、三つのサブ・ワーキング・グループに分かれて具体的な検討を進めている。

4 60GHz 帯屋外電波伝搬測定システム

ミリ波車車間通信における路上電波伝搬特性等の取得のため、当所では平成10年度から60GHz帯屋外電波伝搬測定システムを構築してきており、様々な測定を行ってきている。本システムの系統図を図3に、本システムの諸元を表1にそれぞれ示す。また、図4に本システムの無線部の外観とそれらを実験車両に設置した様子を示す。本システムは実験車両2台に無線部や測定機器を搭載し、2台1組で一般道路や高速道路等で走行して通信実験を行うことを想定した構成となっている。無線部は基本的に周波数分割多重で双方向通信を行うことが可能な構成となっているが、伝搬実験の際には、前方車を送信側、後方車を受信側とし、片方向の通信について測定を行っている。また、後方車には無線系を2系統用意し、高さ等を違えて搭載することにより、空間ダイバーシチの効果を検証できるような構成となっている。本ダイバーシチは、それぞれの受信系の受信電力の比較及び閾値との比較で条件が合致した後設定した遅れ時間後に切り替わる選択合成によるものであり、切り替わるタイミングについては復調シンボルには同期していない。受信電力はIF部にあるAGCの制御電圧を利用してデータを取得しており、2系統とも最大150kHz帯域で取得可能である。車車間通信の変復調方式等については現在検討中の段階であるが、本システムには暫定的にDFSK方式の変復調装置を備えており、1、5、10Mbpsの伝送レ

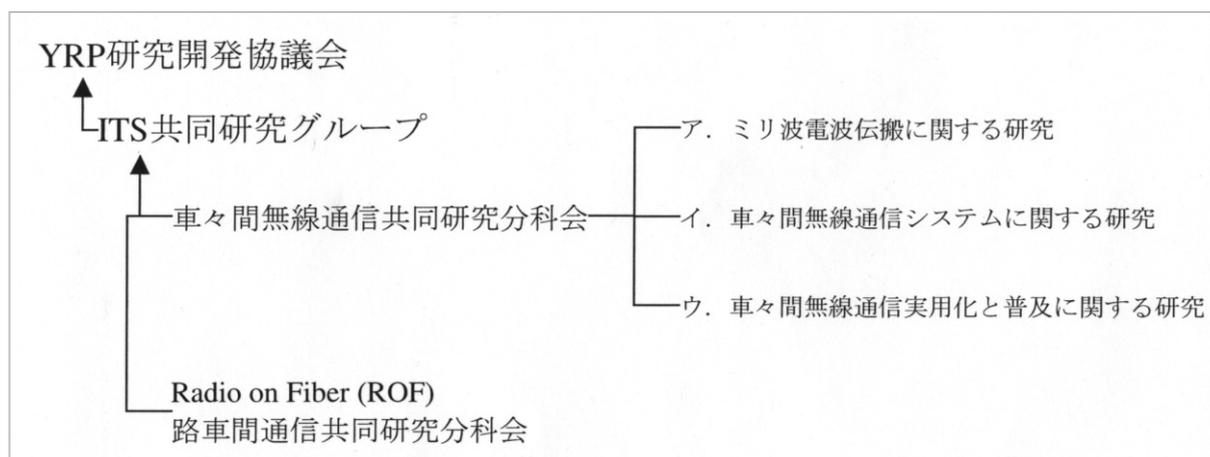


図2 YRPにおける共同研究の体制(平成12年度)

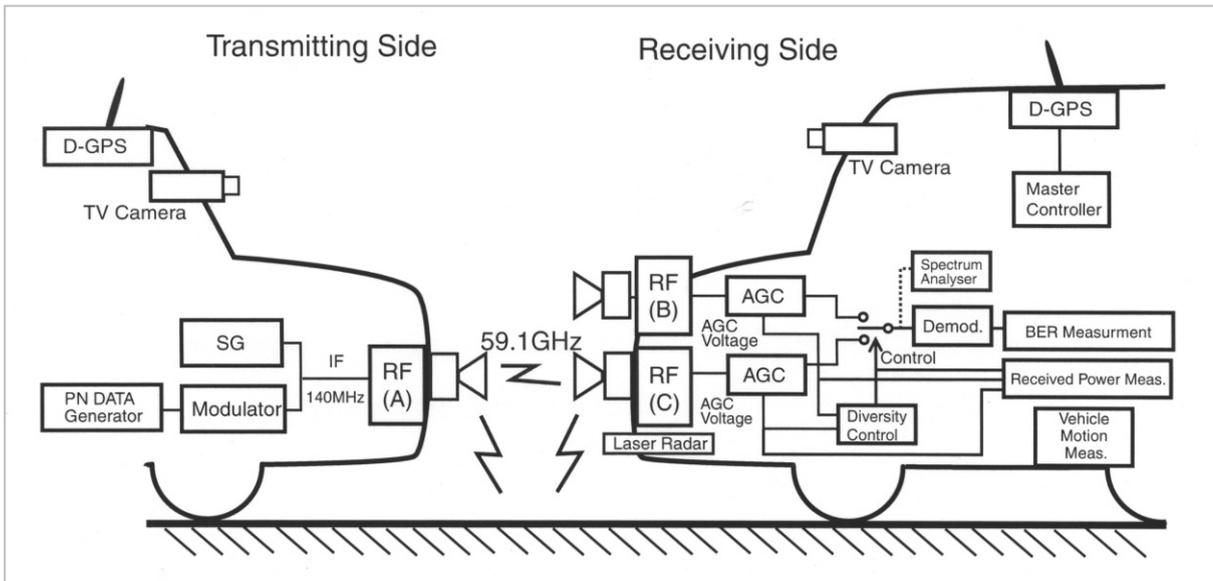


図3 60GHz帯屋外電波伝搬測定システムの系統図

ートでのデータ伝送特性について、1秒おき又は10msおきにビット誤り率を取得できる構成となっている。また、時々刻々と変化する測定環境を的確に把握するため、レーザレダによる車間距離測定系、光ジャイロ装置による車両の動きの3軸測定系、ビデオカメラによる周囲環境の記録系等を備えており、これらすべてのデータがGPS信号等により同期が取られ、測定後に同期が取れた状態でオフラインでの解析が可能である。

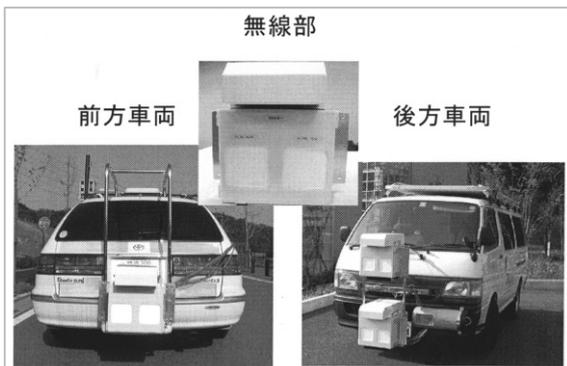


図4 無線部の外観と実験車両への搭載状況

表1 60GHz帯屋外電波伝搬測定システムの諸元

中心周波数	59.1GHz
最大送信電力	10dBm
データ伝送レート	1Mbps ~ 10Mbps
変復調方式	DFSK (manchester code)
検波方式	遅延検波
受信電力測定	AGC 電圧による
ダイバシティ方式	条件合致による選択合成

5 路上電波伝搬2波モデル

路上でのミリ波電波伝搬環境は、直接波と路面等周りの構造物からの反射波との多重波伝搬となることが指摘されている^{[2]-[5]}。今回の実験では周りに建物等の構造物が比較的少ないオープンな環境で測定を行ったことから、特に直接波と路面反射波とに着目して受信機への到来波をこれらの2波と仮定した2波モデルを想定し、そのモデルでの受信電力の計算結果と実測値との比較を行った。図5のように、水平距離 r_0 離れた位置に高さ h_t の送信機と高さ h_r の受信機を設置し、直接波と路面反射波との2波を想定した場合の受信電力 P_r は、次式で与えられる^[6]。

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L(r_d)} \left[D_d \left(\frac{\lambda}{4\pi r_d} \right) + D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r_r} \right) \Gamma_r e^{-j k(r_d - r_r) + \Phi} \right]^2 \quad (1)$$

ここで、 G_t と G_r はそれぞれ送受信アンテナの正面方向利得、 r_0 と r_r は直接波と路面反射波の光学的経路長、 $L(r_0)$ は60GHz帯における吸収項(15 dB/km)^[7]、 λ は搬送波の波長、 k は $(2\pi/\lambda)$

は路面反射時の位相回転(ここでは π と仮定)、 D_d と D_r は直接波と反射波の到来方向におけるアンテナ指向性利得、 Γ_r は路面の反射係数である。

次に、今回の実験状況を勘案すると、例えば、車間距離 r_0 が50mから100mの範囲で、アンテナ高さ h_t 、 h_r が50cmの場合、反射波の路面に対する入射角度は88.8度から89.4度の範囲となる。アスファルトの屈折率を $2.0 - j0.05$ とし^[8]、上記

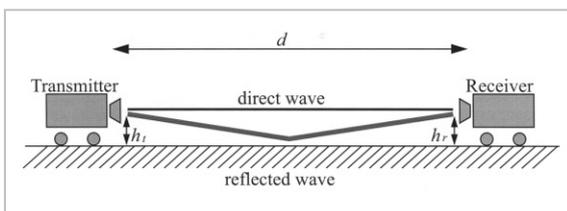


図5 路上電波伝搬2波モデル

入射角範囲での60GHzにおけるアスファルトの反射係数の絶対値を計算すると、0.9から0.99程度になると見積られる。実際の測定では様々な偏波のアンテナの利用が想定されるが、反射係数としては上記の範囲内に納まると考えられるため、今回の検討では路面反射係数の絶対値を1と仮定した。また今回の実験では、2台の実験車両はほとんどの時間同一車線を走行しており、直接波、路面反射波共にアンテナ半値幅よりはるかに小さい入射角度で入射すると考えられるため、アンテナ指向性はほとんど考慮しなくてもよいと考えられる。そこで、式(1)はアンテナ指向性を考慮しない簡単な近似式で表すことができ、次式で表される^[9]。

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L(r_d)} \left(\frac{\lambda}{2\pi r_d} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda r_d} \right) \quad (2)$$

今回は、路上電波伝搬2波モデルとして、上式を使って理論的な考察を行った。

6 路上ミリ波電波伝搬特性

実際に移動している車両間での電波伝搬では、車両の動きや周りの環境の変化など、電波伝搬の特性に関係する多くの要因が存在するが、ここでは路上電波伝搬の基本的特性を把握する目的で、車両の動きや周りの環境の影響をできるだけ受けたくないような状況で電波伝搬特性の測定を行った。実験では、見通しのある直線道路上でほぼ静止した状態の2台の車両間でミリ波の送受信を行い、送受信機間距離を200mから10m程度までゆっくり変化させ、各距離における受信電力とビット誤り率(BER) (距離特性)を測定した。

6.1 アンテナ高をパラメータとした距離特性^[10]

図6(a)(b)にアンテナ高をパラメータとした送受信機間距離に対する受信電力及びビット誤

り率の測定例を示す。実線は測定値であり、波線は直接波と路面反射波の2波を考慮した伝搬モデルでの理論計算値である。両図とも理論計算値は実測値とおおむね一致しており、本実験で測定したようなオープンな環境では、直接波と路面反射波を考慮した2波モデルが適用できることがわかる。また、アンテナ高を変えると2波の干渉により生じるヌルが現れる距離が変化することから、高さ方向の空間ダイバーシチの効果が期待できる。図7にダイバーシチを適用した場合の測定結果を示す。この図と前図の比較から、高さ方向の空間ダイバーシチを行うことにより深いヌルは消滅し、また誤り率特性が改善されていることが分かる。

6.2 アンテナビーム幅をパラメータとした距離特性^{[7][11]}

図8に、送受信アンテナのビーム幅を10度又

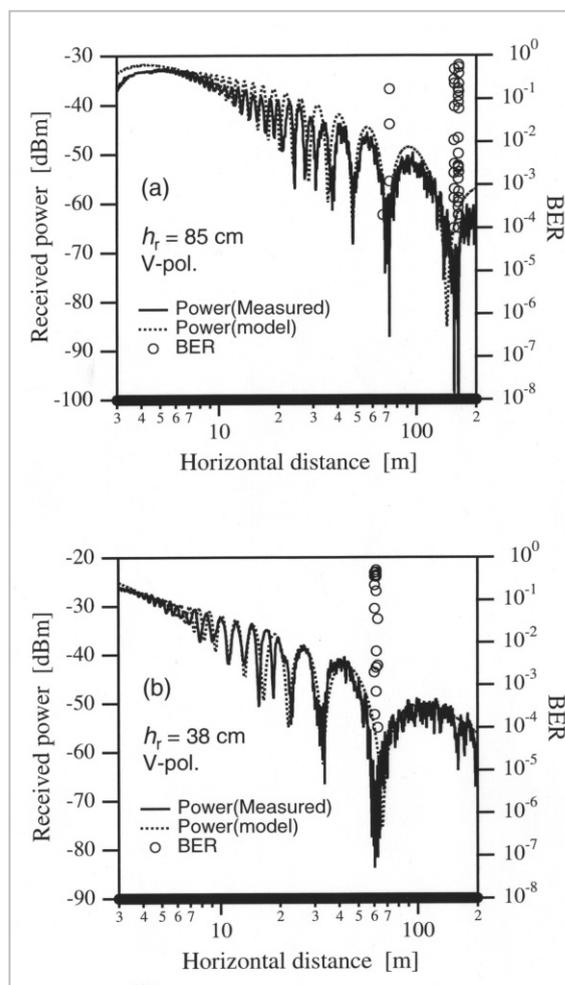


図6 アンテナ高をパラメータとした距離特性

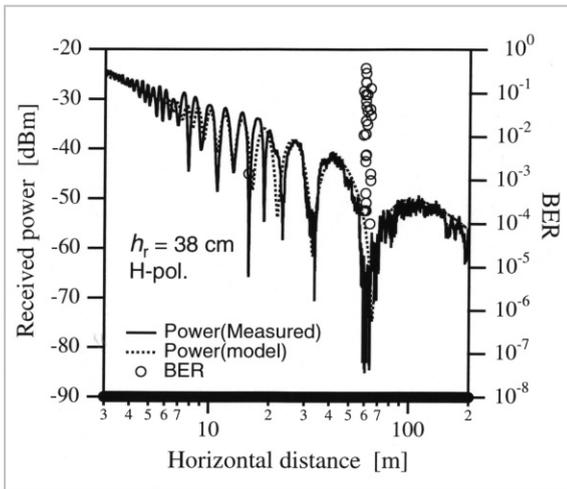


図7 ダイバーシチを適用した場合の距離特性

は4度とした時の送受信機間距離に対する受信電力測定結果を示す。実線は測定値であり、波線は方形開口アンテナの指向性を考慮に入れた2波モデルによる計算結果である。本図から分かる

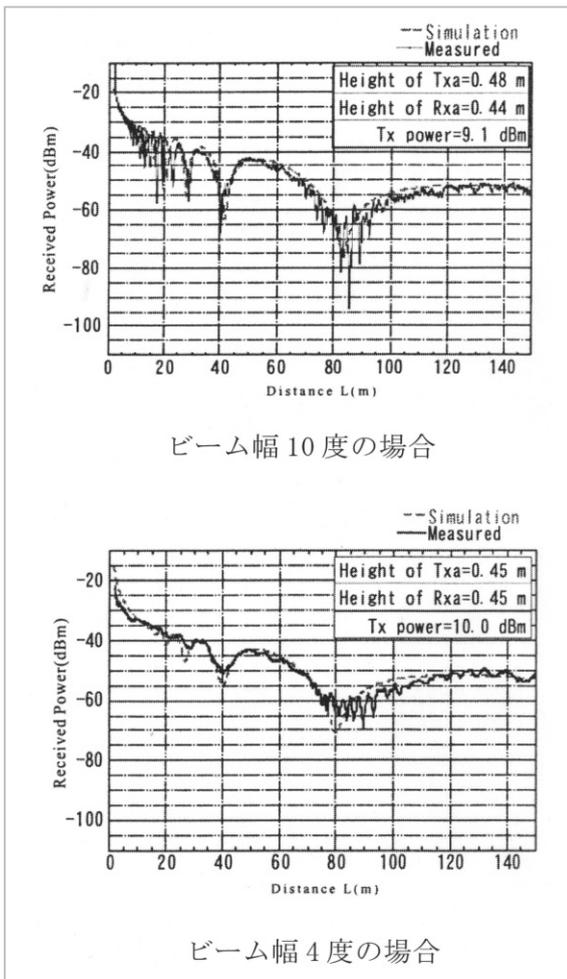


図8 アンテナビーム幅をパラメータとした距離特性

ように、指向性が鋭くなるほど反射波の影響が抑えられ、ヌル点における落ち込みが小さくなっている。したがって、アンテナの指向性をある程度狭く設計することで、路面反射波によるフェージングが抑制できると考えられる。

6.3 中間車両による遮蔽特性¹²⁾¹³⁾

この実験では、直線道路上に送受信機を取り付けた2台の車両を46mの間隔で配置し、送受信機間の伝搬パスを遮る中間車両(セダン)を受信機側から送信機側へゆっくり移動させ、受信電力の変化を観測した。図9に結果を示す。図中横軸は、受信機から中間車両までの距離を表している。

なお、遮蔽車両がなかった場合の受信電力は、-46dBmであった。図より、遮蔽車両が送受信機の間にある時に受信電力が最大となること分かる。これは、直接波は遮蔽されているものの、路面反射波が遮蔽車両の下部を股抜きで通過して受信されているためと考えられる。図中には反射波が股抜きで見通しとなる範囲をクリアランスから計算して縦線で示してある。図より、見通しとなる部分は、減衰量が比較的小さいことが確認できる。遮蔽による減衰量は僅か数dB程度の場合もある。すなわち中間車両が存在する場合でも遮蔽損が比較的小さい場合があると言え、回線断とならずに通信を継続できる可能性を示しているとともに、遮蔽損が大きいことを期待して数台連なる車群の各車両間で同じ周波数で独立した回線を確認するようなシステムの場合には、干渉が大きな問題になることを示している。

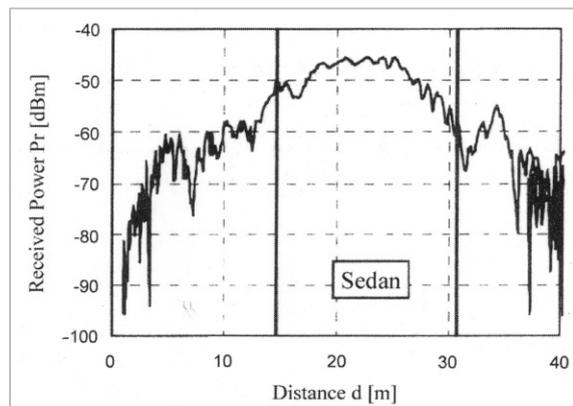


図9 中間車両による遮蔽特性

7 高速走行時の受信電力フェージング特性^[10]

前章では受信電力のアンテナ間距離及びアンテナ高さの依存性並びに車両の動き等を見捨てる瞬時の車車間伝搬特性への2波モデル適用の妥当性について述べたが、実際に移動する各車両の高さや車間距離などの位置関係は刻一刻と変化し、また周りの地物の環境も変化するため、実走行時の伝搬特性は簡単な2波モデルでは表しきれないような複雑な様相を呈する可能性もある。ここでは、2台の車両を一般的な高速道路で実走行させ、その時の車車間での伝搬特性及びデータ伝送特性について測定を行った。

実験では、横浜横須賀道路(佐原 - 並木間)を速度80km/h程度で大凡80mの間隔を保ちながら同一車線を2台で走行し、その時の瞬時受信電力及びビット誤り率を測定した。測定条件を表2に、測定風景を図10に示す。



図10 高速道路での測定風景

表2 測定条件

送信電力	10dBm
変復調方式	DFSK
データ伝送レート	1Mbps
アンテナ	パッチアレイ
アンテナゲイン	20dBi
ビーム幅(水平方向)	30度
”(垂直方向)	7.2度
偏波	斜め45度
送信機高さ	47cm
ダイバーシチ閾値(レベル)	-80dBm
”(レベル差)	20dB
ダイバーシチ切替遅延	10ns

7.1 受信電力及びBERの時間変動特性

図11に経過時間に対する、各受信機での受信電力の10msごとの短区間中央値、ビット誤り率(BER)、車間距離の時間変動特性をそれぞれ示す。測定開始は佐原インターの直前であり、測定終了は並木出口直後である。本図より、測定期間全般にわたり受信電力に20dB以上の激しいフェージングが生じていることが分かり、また、受信電力の減衰に伴って、BERも劣化していることが確認できる。図12(a)(b)に、車間距離に対する受信電力の短区間中央値の関係を示す。図中の曲線は、式(2)を用いた各車間距離における理論上の受信電力である。直接波と反射波との干渉により、車間距離に応じて受信電力が変化していることが理論曲線からも分かるが、実測値は、たとえ車間距離が一定であっても、かなりの受信電力の変動があることが示されている。これは、理論では各送受信機の高さが一定であるとの仮定の下に計算されているのに対して、実際には車両の高さが走行に伴って変動するため、たとえ車間距離が一定であっても、受信電力が変動するためと考えられる。

7.2 累積分布特性

図13に各受信機における受信電力の短区間中央値の累積分布特性を示す。図中、分布がレイリー分布になる場合と、対数正規分布(標準偏差を1と仮定)になる場合の理論値も併せて示した。測定から得られた累積分布は受信機の高さには特に依存せず、レイリー分布と対数正規分布の中間に位置することが分かる。路上走行時には、送受信機の地上高は厳密には一定とはならず、時間的に変動するばらつきを持った値となる。送受信機の縦揺れの分布は、おおむね正規分布に近いことが、光学ジャイロを用いた測定で分かっている。また、式(2)を用いた2波モデルによる計算結果から、送受信機の高さがわずか数cmでも変動すると、距離特性は大きく変化することが分かっている^[10]。つまり、ミリ波車車間通信におけるフェージングの発生メカニズムとして、車両の縦揺れが大きな要因の一つになっていると考えられる。

ここで、高速道路走行時に実測した車両の回転運動から各時刻における車両の高さを求め、

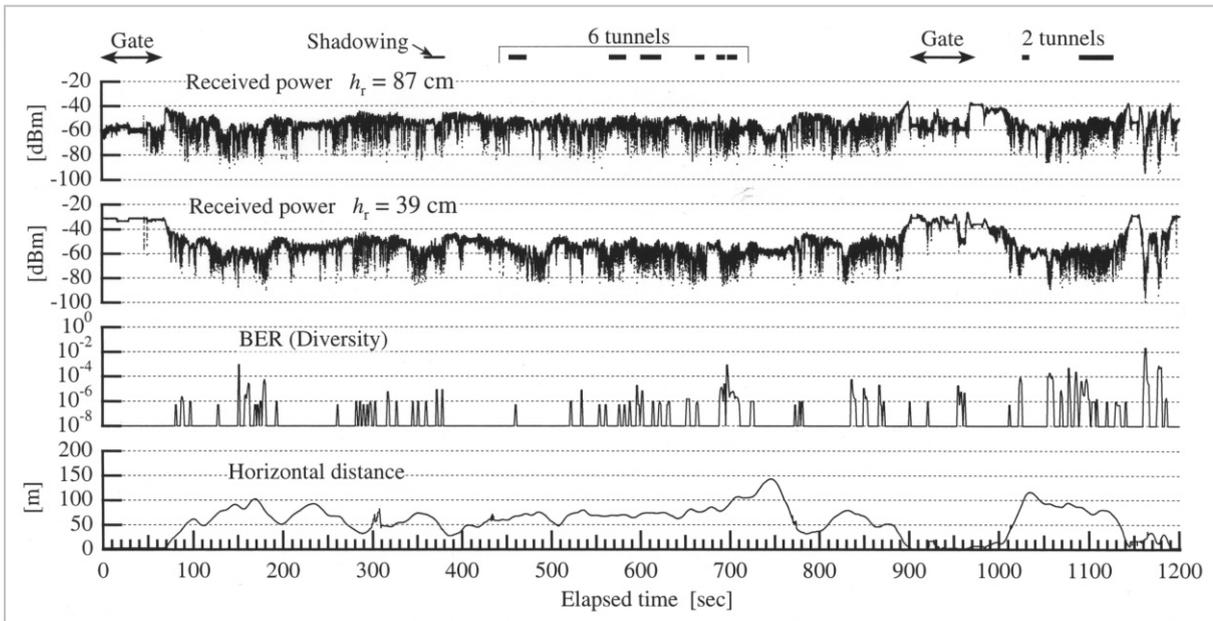


図 11 経過時間に対する受信電力の短区間中央値とビット誤り率および水平距離

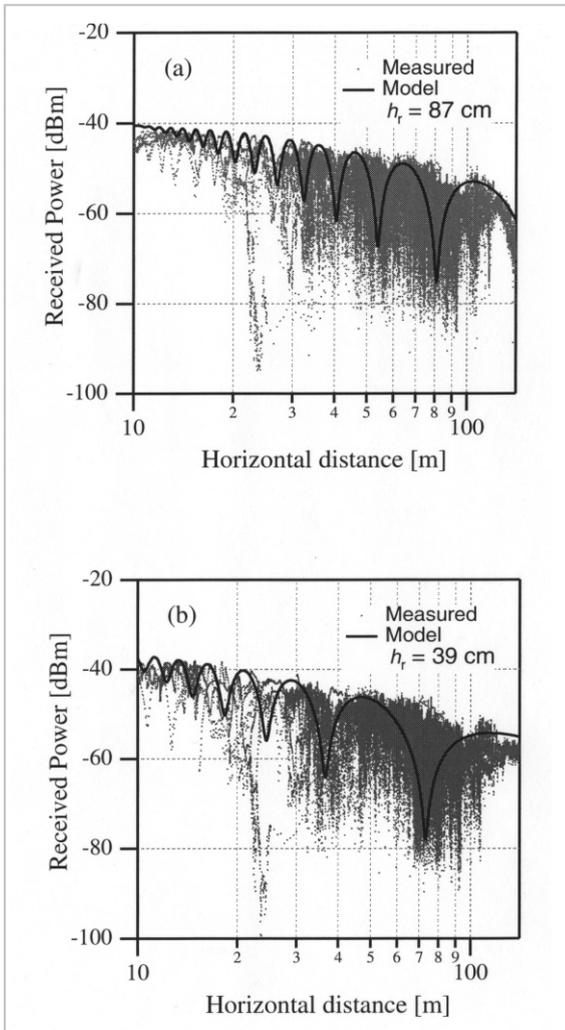


図 12 各受信機高さにおける水平距離に対する受信電力の短区間中央値の測定結果

その結果と車間距離の実測結果から、各受信電力の瞬時値を理論値を式(2)を用いて求めた。この時間変動値に対して累積分布を計算した。図14(a)(b)に前出の受信電力測定結果からの累積分布と、本解析による理論値の累積分布を示す。両者はおおむね良い一致を見ることから、フェージングの発生メカニズムとして、車両の縦揺れが大きな要因の一つになっていることが検証できる。

図15に1Mbpsデータ伝送時の各受信機及び選択合成ダイバーシチ時のBERの累積分布特性を示す。この図は、横軸に10を底としたBERの指

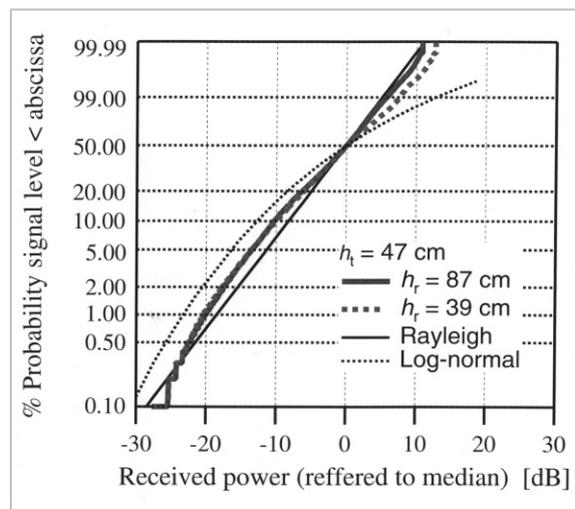


図 13 受信電力の短区間中央値の累積分布特性

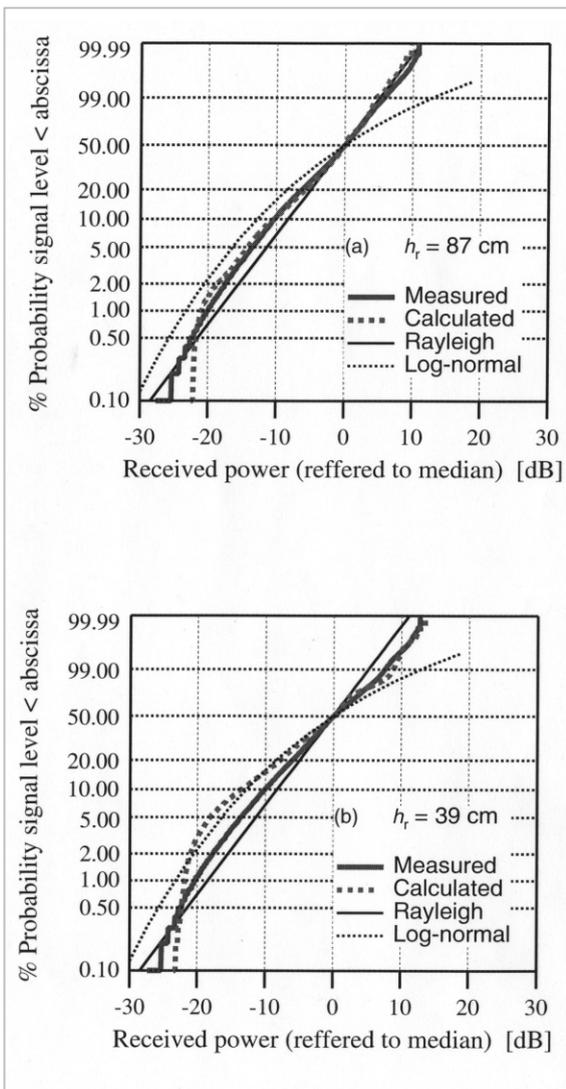


図 14 受信電力の累積分布の実測値と理論値の比較

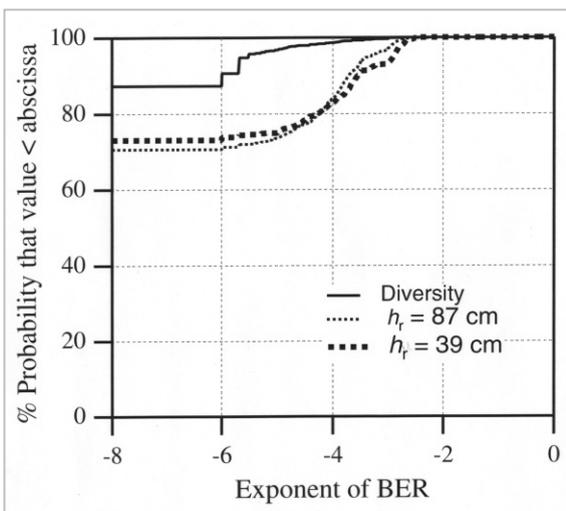


図 15 各受信機高さおよびダイバーシチ時のビット誤り率の累積分布特性

数部を示し、縦軸に横軸の値以下となる時間率を%値で示している。なお、横軸で - 8 と示されている所は、エラーなしを表している。この図より、時間率で 70% 以上エラーなしとなり、またダイバーシチ時には 87% の時間エラーなしであったことが確認できる。本結果から、垂直方向の空間ダイバーシチがミリ波車車間通信に有効であることが確認できる。

8 まとめ

ミリ波を用いた車車間通信システムの設計を行う上で必要となる路上電波伝搬特性について報告した。本研究は、平成 13 年度から新たな段階を迎えており、平成 15 年頃のミリ波車車間通信システムの実現を目指し、社会に受け入れられやすいと考えられる少数のアプリケーションにターゲットを絞って、個別のシステム設計や実証試験など、実用化に向けて集中的に開発を進めている。さらに、これらの実用性を示せるような実証実験を進めてサービス実現のめどをつけるとともに、例えば YRP 素案として技術基準に資するような成果を標準化機関に提示するなど、早期に標準化を進めるための活動に注力する予定である。

最後に、本研究における実験や解析を進めるに当たり、熱心に御議論いただきました車車間無線通信共同研究分科会参加メンバー各位に、深く感謝致します。

参考文献

- 1 加藤 他, “ YRPにおける60 GHz帯ミリ波車々間通信の研究,” 信学技報 ITS2001-6, 2001.
- 2 唐沢好男, “ ITSミリ波車々間通信の路面反射フェージングとスペースダイバーシティに関する基礎的検討,” 信学論 Vol.J83-B, No.4, pp.518-524, 2000.
- 3 徳田 他, “ 車々間通信におけるミリ波帯路面反射フェージングの解析,” 信学技報 AP98-134, 1999.
- 4 加藤 他, “ ミリ波車々間通信のための60GHz路上移動電波伝搬測定,” 信学技報 SST99-105, 2000.
- 5 和田 他, “ ミリ波車々間通信における信号伝搬特性,” 信学論 J81-B-II, No.12, pp.1116-1125, 1998.
- 6 N. Taguchi, et. al., “Propagation Characteristics of 60 GHz Millimeter Wave for ITS Inter-Vehicle Communications (3),” Proc. ITST2000 S9-3, pp.259-262, 2000.
- 7 “Attenuation by atmospheric gases,” Rec. ITU-R, P676-3, pp.244-260, 1997.
- 8 佐藤 他, “ ミリ波帯における各種アスファルト路面の反射特性,” 信学ソサ大 B-1-10, 1998.
- 9 細矢良雄監修, 電波伝搬ハンドブック, リアライズ社, pp.125-126, 1999.
- 10 A. Kato, et. al., “Propagation characteristics of 60-GHz millimeter waves for ITS inter-vehicle communications,” IEICE Trans. Commun., Vol. E84-B, No.9, pp.2530-2539, 2001.
- 11 田口 他, “ ITS車々間通信における60GHz帯路上電波伝搬特性(その3) - アンテナ指向性に対する距離特性 -,” 信学総大, A-17-32, 2000.
- 12 S. Noda, et. al., “Propagation characteristics of 60GHz millimeter wave for ITS inter-vehicle communications (4) - shadowing effect by interrupting vehicle -,” ITST2000, pp.263-266, 2000.
- 13 山本 他, “ 60GHz車々間通信の電波伝搬特性(2) - 遮蔽板があるときの伝搬モデルの提案 -,” 信学総大, A-17-26, 2001.



かとうあきひと
加藤明人
無線通信部門 横須賀無線通信研究センター無線伝送グループ主任研究員
博士(工学)
電波伝搬、移動無線通信



さとうかつよし
佐藤勝善
無線通信部門 横須賀無線通信研究センター無線伝送グループ主任研究員
電波伝搬



ふじせまさゆき
藤瀬雅行
無線通信部門 横須賀無線通信研究センター無線伝送グループリーダー 工学博士
光ファイバ通信、無線通信