

鉄道車両内におけるワンセグ受信環境 向上手法の検討

中村 一城* 竹内 恵一*
山口 大介* 川村 智輝*

A Study of Improvement Method of Receiving Environment of One-segment Broadcasting in Train Cabin

Kazuki NAKAMURA Keiichi TAKEUCHI
Daisuke YAMAGUCHI Tomoki KAWAMURA

To improve the reception quality of the one-segment broadcasting in the train cabin, we have proposed a passive retransmission method and a weak radio retransmission method to retransmit the broadcast wave received onboard, and we have shown that our proposed methods are effective by the simulation and field test. Moreover, we have proposed specifications and position of the antenna effective for implementing our proposed method.

キーワード：地上デジタル放送，ワンセグ放送，車内受信，再送方式，シミュレーション

1. はじめに

2003年12月に3大都市圏で試験放送が開始された地上デジタル放送は、2011年7月（一部地域のみ2012年3月）のアナログ放送の終了により、完全移行が完了した。さらに、携帯端末向けの地上デジタル放送「ワンセグ放送」が2006年4月から開始されるとともに、ワンセグ機能付き携帯電話やワンセグ端末が普及し、移動中にワンセグ放送を楽しむ機会が増えている。

しかし、ワンセグ放送は、列車内で受信することを前提に放送波が送信されておらず、列車の車体や車内設備による電波減衰も重なり、走行中の列車内における受信品質は必ずしも良好ではない。

鉄道総研では、これまでに鉄道沿線における地上デジタル放送の受信品質予測手法を開発してきた¹⁾。しかし、走行する列車内における地上デジタル放送受信の品質やワンセグ放送に限定した受信品質に関する検討は行っていない。そこで、本報告では、列車内におけるワンセグ放送の受信品質を向上するための環境を整える手法について検討を行った。

2. ワンセグ放送の概要

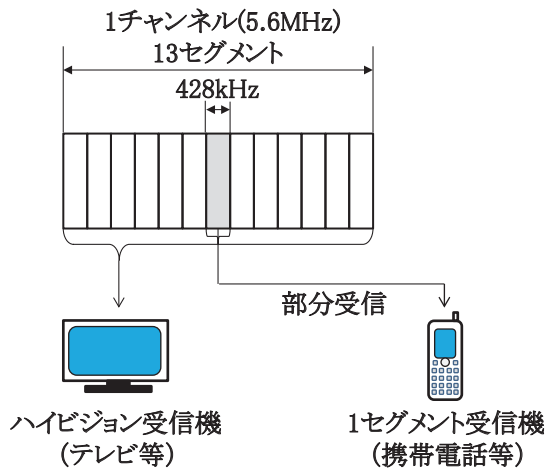
ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial) 方式と呼ばれる日本の地上デジタル放送は、1チャンネル分伝送帯域幅（約6MHz）を13個のセグ

メントに分けて伝送するOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) マルチキャリア変調方式を採用している。この方式では、セグメントごとに変調方式や誤り訂正符号化率などを変えることができ、1つのチャンネルで最大で3つの番組を同時に放送することが可能となっている（階層伝送）。さらに13個のセグメントのうち中央の1セグメントは、部分受信用セグメントとして携帯端末での受信用に割り当てることが可能となっており、簡易動画、音声、データのサービスを提供している。この部分受信用セグメントを利用した放送サービスを「ワンセグ放送」と呼んでいる（図1）。地上デジタル放送では、OFDM変調方式に加え、周波数インタリーブや時間インタリーブを採用することにより、ビルの反射等によるマルチパス妨害や移動受信の際に生じるフェージング妨害等に対して耐性が高くなっているのも特徴である。さらに、伝送するデータには二重の誤り訂正をかけており、情報に対して最初に符号化する訂正符号を外符号といい、リード・ソロモン符号が用いられている。また、2番目の訂正符号を内符号といい、畳み込み符号が採用されている²⁾。

なお、国内においては、規格で定義されている伝送パラメータ（モードや有効シンボル長、変調方式など）の中から、運用可能なパラメータが制限されており³⁾、現在の地上デジタル放送の運用は、携帯受信階層（1セグメント）と固定受信階層（12セグメント）の2階層伝送となっている。伝送パラメータは、表1の通りである。また、伝送容量はワンセグ放送が約416kbps、ハイビジョン放送が約16.8Mbpsとなっている。

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

特集：信号通信技術

図1 地上デジタル放送のセグメント構成²⁾表1 実際に運用されている伝送パラメータ²⁾

	固定受信 (12セグメント)	携帯受信 (1セグメント)
モード	モード3	
有効シンボル長	1.008ms	
ガード・インターバル比	1/8	
ガード・インターバル長	126 μ s	
キャリア変調方式	64QAM	QPSK
内符号	畳み込み符号 (符号化率:3/4)	畳み込み符号 (符号化率:2/3)
外符号	(204,188) リードソロモン符号	

3. 鉄道車両内におけるワンセグ受信環境

地上デジタル放送波を屋内で受信する場合については、放送波がガラスを透過して屋内でも受信でき、その際には約5dB電界強度が低下することが報告されている⁴⁾。また、鉄道車両での検討例としては、新幹線車内における地上デジタル放送(12セグメント)の受信特性の測定事例はあるが⁵⁾、ワンセグ放送に限定した検討事例や受信環境の向上に関する観点での検討はこれまでにされていない。

そこで、鉄道車両内でどの程度ワンセグ放送波が受信でき、どの程度受信環境を向上させれば安定した受信が可能となるかについて把握するため、走行する列車の車両内において、ワンセグ放送波の受信電界強度の測定試験を実施した。

試験では、列車の客室の窓に地上デジタル放送用のアンテナを仮設し、シグナルレベルメータ(リーダ電子製:LF986)により受信電界強度の変化を測定した。試験の構成を図2に、試験結果の一例を図3に示す。

試験の結果、車内における受信品質は、沿線の地形や建造物の影響により、最大で30dB程度変動があることが確認された。また、対向列車によって送信所と受信アンテナの見通しが阻害されるエリアでは、対向列車

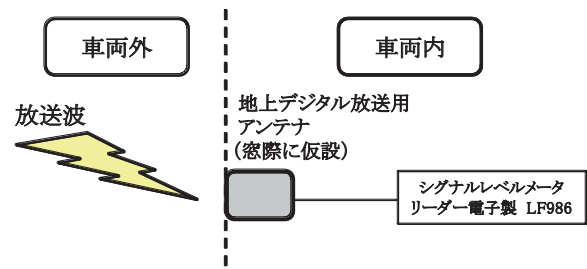


図2 車内試験構成図

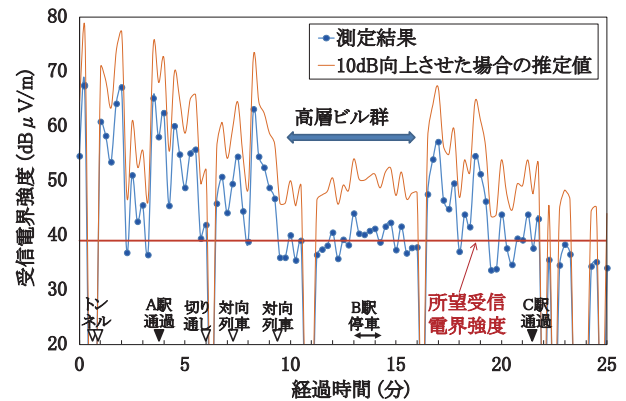


図3 ワンセグ放送受信電界強度の車内実測例

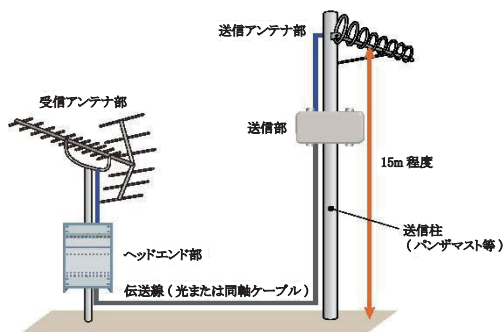
通過時にワンセグ放送波の受信電界強度が8dB程度低下する現象が確認された。さらに、図3の区間を対象に、受信電界強度がワンセグ放送の所望の受信電界強度(39dB μ V/m)以上である割合を算出したところ、約59%であった。そこで、車内全体の受信電界強度が10dB向上したと仮定して、所望受信電界強度を上回る割合を試算したところ、約88%に向上できることが分かった。よって、車内における受信電界強度を10dB向上させることを一つの目安とすることとした。

4. 車両内におけるワンセグ受信品質向上手法の検討

ワンセグ受信品質を向上させるための手法については、送信出力の増大、受信機の感度向上をはじめとして、様々な方法が想定される。それらの候補の中から、鉄道事業者において実施が可能な受信品質向上手法について検討することとした。なお、ワンセグ放送の品質は、符号誤り率(BER)で評価されることが多いが、所望の受信電界強度を確保できれば、BERが確保できることが分かっている。そこで、本報告では、受信環境の向上手法として、受信電界強度を向上させる手法について検討を行うこととした。

4.1 沿線における受信環境向上手法

鉄道車両内におけるワンセグ放送の受信品質を向上させるための前提条件としては、列車が走行する線路上がサービスエリア内である必要がある。サービスエリア

図4 ギャップファイラー方式の基本構成⁶⁾

外のような受信環境の悪い線路上をサービスエリア内とするための最も一般的な方法は、受信環境の良いところで受信した放送波の信号を増幅し、受信環境の悪いエリアに向けて再送信する方法（以下、ギャップファイラー方式）である。この方法は、一般的な地上デジタル放送の不感地帯対策として広く用いられている方法である⁶⁾。ギャップファイラー方式の基本構成を図4に示す。

鉄道沿線においても、トンネル内や明かり区間のサービスエリア外などの受信環境が悪いエリアに対してこのギャップファイラー方式を採用することで、列車が走行する線路上のサービスエリアの割合を向上させることが可能である。

4.2 車上における受信環境向上手法

次に、車上で受信環境を向上させる手法を検討した。車上における受信環境向上手法として、最初に考えられる方法は、前述したギャップファイラーを車上に導入し、車上で一旦受信した放送波を増幅して車内へ再送信する方法である。しかし、放送局は、固定地点からの送信を前提としており、鉄道をはじめとする移動体の車内において一旦受信した放送波を増幅して再送信することは想定しておらず、ギャップファイラーを車上に設置することが法律で認められていない。そこで、鉄道車両内で実現可能なワンセグ放送の受信環境向上手法について検討した。

車上にて、実現可能な方法について調査・検討を行った結果、屋根上や外壁、窓際などの外から到来する電波を受信しやすい位置で一旦受信した放送波を、増幅せずにそのまま再送信する方法（無給電再送方式）と、微弱無線として免許不要な範囲内の出力に増幅して車内に再送信する方法（微弱無線再送方式）の2方式を提案することとした。

4.2.1 無給電再送方式

無給電再送方式の構成イメージを図5に示す。この手法は、受信アンテナを車上の放送波が受信しやすい場所に設置し、同軸ケーブルで接続した車内のアンテナで再送信する方法である。なお、本手法では、同軸ケーブルが長くなると信号が大きく減衰して車内への再送信信号のレベルが小さくなるため、放送波受信アンテナと再送信アンテナの距離を短くする必要がある。

本手法の効果を確認するため、実際の車両内にて無給

電再送による実験を行った。実験では、鉄道車両外に設置した信号発生器とアンテナより送信した地上デジタル放送と同じ変調を掛けた信号を、車内において直接測定アンテナで受信した場合と、列車の窓の内側に設置した標準ダイポールアンテナで信号を一旦受信し、同軸ケーブルを介して壁の内側に設置した標準ダイポールアンテナで再送信した無給電再送方式を導入した場合の測定を行った。試験の様子と得られた無給電再送による受信環境向上効果を図6に示す。図6より、再送信用アンテナの近くにおいて、受信電界強度が向上する様子が見られ（測定点③④）、無給電再送方式に効果があることが確認できた。なお、それ以外の場所に効果がほとんど見られなかった理由としては、車内受信および再送信に用いたアンテナの利得が2.15dBiと低かったことによるものと考えられる。

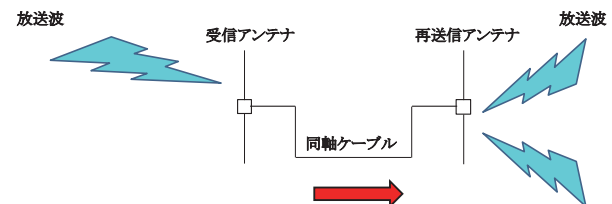
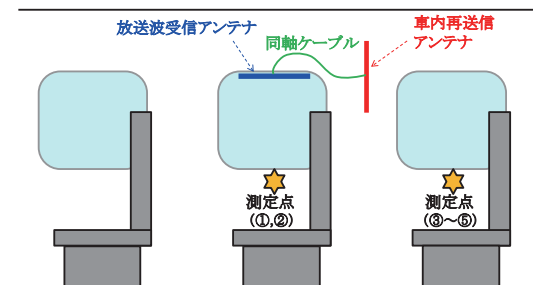
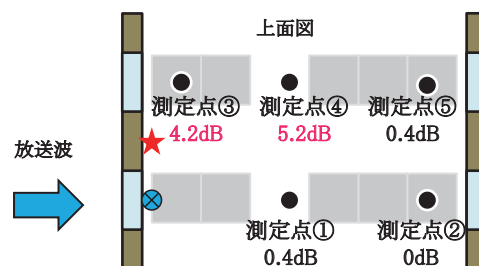


図5 無給電再送方式の構成例



(a) 無給電再送試験のアンテナ配置



⊗ : 放送波受信アンテナ(高さ1.3m)
★ : 車内再送信アンテナ(高さ1.3m)

(b) 試験結果

図6 無給電再送方式による受信電界強度の向上

4.2.2 微弱無線再送方式

微弱無線再送方式の構成イメージを図7に示す。電波法の規程により、地上デジタル放送の周波数帯域（470MHz～770MHz）では、無線局の免許が不要な微弱無線設備として、送信した電波の電界強度が、3m離れた地点で35μV/m（30.9dBμV/m）以下でなければならないことが決められている。そこで、微弱無線で認め

特集：信号通信技術

られている最大の出力で再送信した場合に、所望の受信レベルが確保できる範囲を机上計算で求めた。計算結果を図8に示す。検討結果より、微弱無線の範囲内で再送信した場合、ワンセグ放送の受信最低レベルを上回るのは、再送信アンテナから約1.2mの範囲までであることが分かった。このため、微弱無線方式を採用する場合には、約2mおきにアンテナを設置する必要があるといえる。

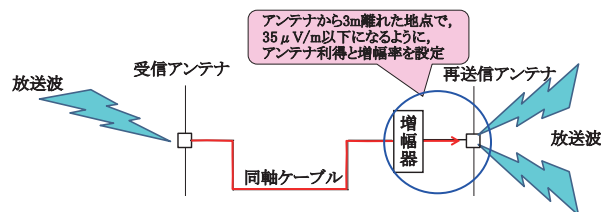


図7 微弱無線による再送方式の構成例

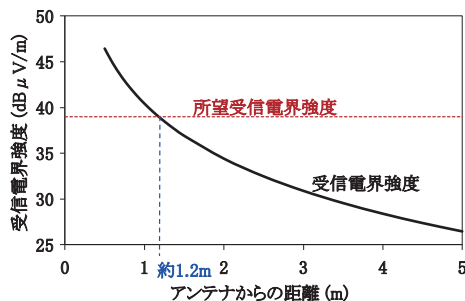


図8 微弱無線の範囲内で再送信した場合における受信電界強度の推定結果

5. 車両内で受信環境を向上させるためのアンテナ配置および仕様の検討

5.1 アンテナ設置位置の検討

5.1.1 放送波受信用アンテナ

放送波の受信アンテナを車上へ設置することを考えた場合、送信所からの見通しが最も良く確保できることから屋根上に設置することが望ましい。しかし、屋根上へのアンテナの設置は、その取付方法により車両の空力特性等に影響を与える可能性がある。そのため、新造車両であれば設計段階から計画することで屋根上への設置できる可能性があるが、既存車両への設置を考えた場合には、屋根上へのアンテナの設置は容易ではない。そのため、既存車両へも適用可能な車内への設置を前提に検討を行った。

その結果、車内において最も受信電界強度が確保できる場所としては、放送波が車外から車内に侵入する窓の内側が望ましい位置であるといえる。

5.1.2 車内再送信用アンテナ

次に、車内における再送信用アンテナの設置位置について検討を行った。1つのアンテナで、なるべく広い範囲をカバーしようとした場合、車内を広く見通せる場所が望ましい。そのような場所としては、車両中央付近の天井部分が候補の1つとして挙げられる。また、貫通路扉の上

部も設置場所の候補である。しかし、これらの設置箇所のみでは、受信環境の向上範囲が限定されてしまうことが推測される。さらに、前述したように同軸ケーブルでの減衰を少しでも小さくするため、受信アンテナと再送信アンテナの距離をなるべく短くする必要がある。そのため、受信アンテナを窓の内側に設置すると仮定すると、同軸ケーブルをなるべく短くできる位置としては、窓に近い側壁に再送信用アンテナを設置することが最も現実的であると考えられる。それにより、車外からの放送波が遮蔽される窓と窓の間のエリアの受信環境の向上も併せて期待できる。

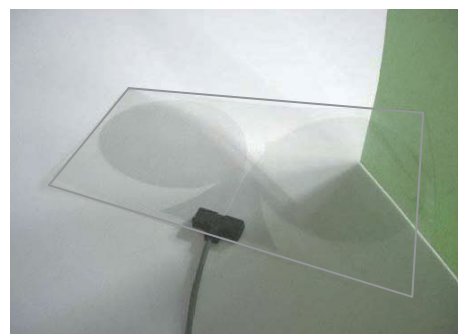
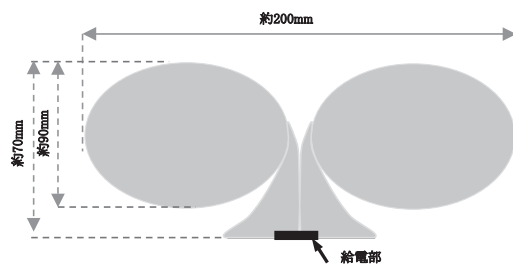
5.2 アンテナ仕様の検討

本節では、前節で検討したアンテナの設置位置に適したアンテナの仕様について検討を行う。

5.2.1 放送波受信用アンテナ

車上での放送波受信用のアンテナについては窓の内側への設置を前提とした場合、突起等がなく、窓の機能を損なわない形状のものが望ましい。その候補の1つとしては、ダイポールアンテナのような線状アンテナを窓枠に沿って設置することが考えられる。また、他の候補としては、自動車のフロントガラスやリアガラスへの設置を目的とした各種アンテナが挙げられる^{7) 8) 9)}。これらを鉄道車両の窓に設置することで、乗客の視界を大きく遮ることなくアンテナを設置することが可能になる。なお、ここで例に挙げたアンテナは、直接受信機につながくことを前提に増幅器と合わせて設計されているものが多いため、鉄道車両内へワンセグ放送波を再送信するために使用する場合には、増幅機能を省くなどの改良を加える必要がある。

さらに、受信感度を向上させる手法としては、過去の研究成果において、地上デジタル放送の屋内受信時に水平・



※三菱電線工業カタログより

図9 窓へ設置が期待されるアンテナの例⁹⁾

垂直両偏波による指向性ダイバーシチおよび素子間隔を1波長程度(60cm)広げた空間ダイバーシチを導入により、受信電界強度が改善できることが示されている¹⁰⁾。この効果は、鉄道車両においても期待できると考えられる。

5.2.2 車内再送信用アンテナ

車内での再送信用アンテナについては、設置位置によって、アンテナ形状(種類)を変えることが望ましいと考えられる。例えば、天井中央部に設置する場合には、車内に広く電波が放射されるよう、無指向性のアンテナが望ましく、貫通路上部や壁面に設置する場合には、背面方向(壁面方向)に電波を放射する必要がないため、指向性があるとともに、壁の表面への張り付けもしくは壁面に埋め込みが可能な平面アンテナが適していると思われる。さらに、平面アンテナを適用することにより、アンテナの小型・高利得化が期待できる。

5.3 車内におけるアンテナ設置位置の提案

前節までに検討した結果より、窓に設置したアンテナで放送波を受信し、増幅せずに車内壁面に設置したアンテナで再送信を行う構成が、実現可能性のあるワンセグの受信環境向上手法の1つであると考えられる。この場合の設置イメージを図10に示す。

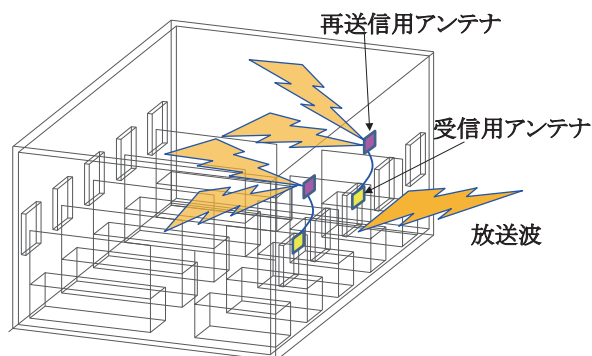


図10 車内受信環境向上のためのアンテナ配置の例

6. 鉄道車両内におけるワンセグ放送波の伝搬シミュレーション

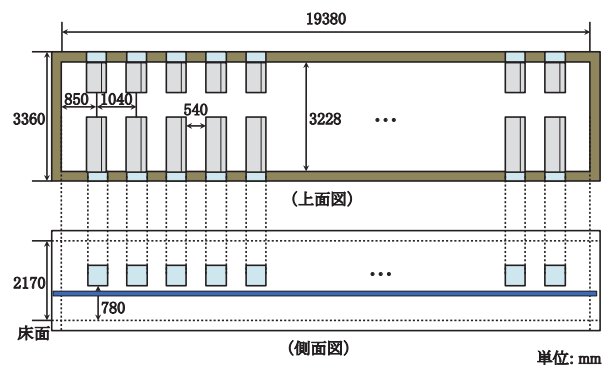
6.1 シミュレーションモデル

前章までに検討してきた車両内で受信電界強度を向上させるための手法の効果を確認するため、時間領域差分法(Finite-difference time-domain method: FDTD法)によるワンセグ放送波の鉄道車両内電波伝搬特性シミュレーションを実施した。

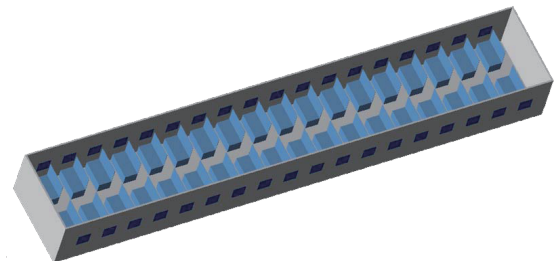
車両のシミュレーションモデルを図11に示す。モデル内の各電気定数は、以下の通りである。

- ・車体：導電率 $5.76 \times 10^7 \text{ S/m}$ 、比誘電率 1
- ・窓ガラス：導電率 $1.0 \times 10^{-12} \text{ S/m}$ 、比誘電率 5
- ・座席：導電率 $1.03 \times 10^7 \text{ S/m}$ 、比誘電率 1

シミュレーションでは、放送波が図11(a)上面図の



(a) 平面モデルと寸法



(b) 3次元モデル

図11 車両内電波伝搬特性シミュレーションモデル

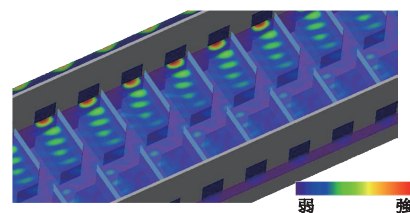


図12 車内におけるワンセグ放送波の伝搬例

上部方向(車両側面)から平面波にて入射するものとした。シミュレーションの結果を図12に示す。図12より、窓の延長線上には放送波が侵入している一方で、窓と窓の間の壁の内側付近は、入射波が遮られ、弱電界エリアとなっていることが分かる。

これにより、鉄道車両内における電波伝搬特性のシミュレーションが実施可能となったことから、本手法を用いて車内受信環境向上手法の検討を行った。

6.2 無給電再送方式による車内受信環境向上に向けた検討

無給電再送方式の効果を検証するため、窓側座席の受信電界強度が、ワンセグ放送の所望受信電界強度(39dB $\mu \text{ V/m}$)であった場合に、車内全体が所望受信電界強度を上回るために必要なアンテナ利得を、前節で述べたモデルを使って試算した。主な計算条件は表2の通りである。また、計算モデルでは、放送波の受信アンテナを窓の内側、再送信アンテナを壁の窓と窓の間の壁にそれぞれに設置している。

FDTD法によるシミュレーションより得られた車内に

特集：信号通信技術

表2 計算条件

周波数	600MHz (地上デジタル放送の周波数帯域のほぼ中央)
セルサイズ	50mm × 50mm × 50mm
アンテナ	受信：半波長ダイポール (利得 2.15dBi) 再送信：線状アンテナ (利得 17.85dBi)
計算点の高さ	座面より 600mm

おけるワンセグ放送波の受信電界強度を図13に示す。その結果、受信アンテナと再送信アンテナの利得の合計を約20dBi以上とすることで、車内全体を所望受信電界強度以上とすることができると分かった。さらに、再送信アンテナ周辺(④⑤⑦⑧)においては、当初の目安としていた10dBを上回る受信電界強度の向上効果が得られていることも分かる。なお、①については、座席の背もたれにより再送信アンテナからの電波が遮られているため、その効果が低く抑えられているものと推測される。一方、シミュレーション結果から分かるように、提案した手法で受信感度が向上できる範囲は限定されることから、車内全体の受信環境を向上させようとした場合には、受信アンテナと再送信アンテナを、全ての窓ごと、もしくは1つおき程度の間隔で設置することが望ましいといえる。

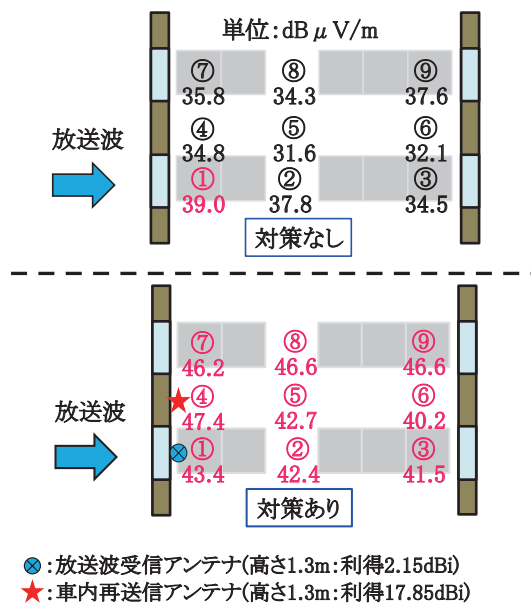


図13 FDTD法による提案手法の効果の確認例

7. おわりに

本報告では、列車内におけるワンセグ放送の受信環境を向上させるための手法として、車内の受信電界強度を向上させる手法について検討を行った。

まず、走行する列車内における受信環境の測定を実施し、周辺環境や対向列車に通過による影響を把握した。その結果、約10dB受信電界強度を向上することができれば、受信品質を大きく改善できることが分かった。

次に、車内における受信環境を向上させるため、トンネルや弱電界エリアへギャップファイラーを導入すること、ならびに、車上において一度受信した放送波を車内で再送信する無給電再送方式および微弱無線再送方式を提案するとともに、実験により無給電再送方式の効果を確認した。

そして、提案手法を実現するために有効なアンテナの仕様や設置位置について検討を行った。その結果、放送波の受信用として、視界の妨げとならないアンテナを車窓ガラスへ設置すること、車内再送信用として、車外からの放送波が遮蔽される壁の内側へ平面アンテナを設置する構成を提案し、FDTD法によるシミュレーションにより、効果があることを確認した。

ここで述べた受信品質の向上手法やシミュレーションモデルは、今回検討対象としたワンセグ放送だけでなく、マルチメディア放送や無線通信システムの鉄道車両内における通信環境の向上手法としての応用も期待できる。

文 献

- 1) 川崎邦弘, 中村一城: 鉄道沿線における地上デジタル放送の受信品質の予測手法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.3, pp.41-46, 2010
- 2) 高田政幸: ワンセグの伝送方式と送受信技術, NHK 技研 R&D, No.96, 2006
- 3) 電波産業会: 地上デジタルテレビジョン放送運用規定, 技術資料, ARIB TR-B14 4.9 版, 2012
- 4) 佐藤誠, 安藤聖泰, 岡田直紀, 鈴木寿晃: 地上デジタル放送の携帯受信環境における受信劣化要因の検討, 映像学技報, BCT2005-73, Vol.29, No.44, pp.1-4, 2005
- 5) 木村智, 土田健一, 森山繁樹: 地上デジタル放送の新幹線移動受信における伝送特性, 映像学技報, BCS2001-36, Vol.25, No.67, pp.7-12, 2001
- 6) ギャップファイラーハンドブック編修委員会編, “地上デジタルテレビジョン放送の“ギャップファイラー設置に向けて”～設置運用のためのハンドブック～, 2009
- 7) 重田一生, 谷口龍昭, 牛尾将雄, 諸橋敏将: フロントガラスを利用した地デジ受信用アンテナの開発, マツダ技報, No.25, pp.101-105, 2007
- 8) 佐藤太郎, 道下尚文, 山田吉英, 荻野和滋: 地上デジタルテレビ用車載Wループアンテナの電気特性測定, 信学論, Vol.J91-B, No.9, pp.1069-1071, 2008
- 9) 工藤敏夫, 柏原一之, 中村智一, 湖東雅弘, 那須章二: シート状広帯域ダイポールアンテナの開発, 三菱電線工業時報, No.106, pp.1-4, 2009
- 10) 武田優, 陳強, 澤谷邦男, 茂木智広: 屋内における地上デジタルテレビジョン放送波の測定とダイバーシチ受信の検討, 信学論, Vol.J95-B, No.9, pp.1151-1158, 2012