

新幹線向け静電アンテナの小形化

Miniaturization of Electrostatic Antenna for Shinkansen

要 旨

新幹線の先頭車両の屋根上に搭載されている静電アンテナは、新幹線の架線電圧検知とVHF(Very High Frequency)帯無線通信を行う二つの機能を持った共用アンテナである。走行速度の高速化が進む新幹線では、車両外部に取り付けられた静電アンテナも騒音源の一つになっており、低騒音化が求められていた。

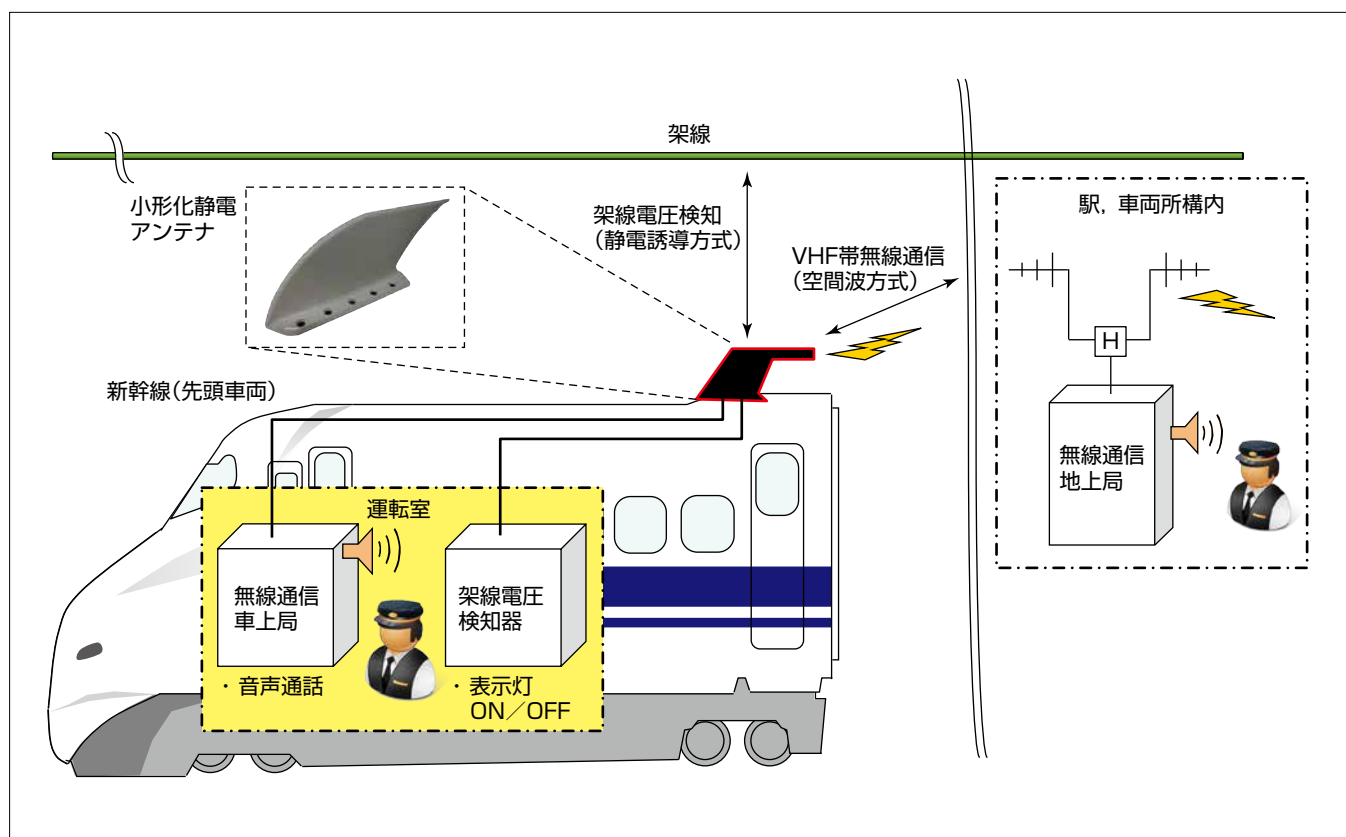
低騒音化のために必要になる滑らかな外形・小形化をアンテナ性能を維持した上で実現し、また高速走行時の風圧に耐える機械的強度を備えた構造を確保する必要がある。

そこで従来よりも小形化しつつ強度を確保し、架線電圧検知とVHF帯無線通信の性能を維持した静電アンテナの小形化開発を行った。架線電圧検知については、小形化に

よる検知棒の短縮化での性能劣化を補うためアンテナ基板面積の拡張を行った。VHF帯無線通信については、小形化形状でのインピーダンス特性の最適化のため、折り返しモノポール構造の採用及び並列共振回路の付加を行った。

開発した静電アンテナの単体性能評価を行い、計算機シミュレーション結果と同様の実測値が得られ、設計の妥当性を確認した。さらに新幹線車両に搭載して走行試験を行った結果、従来よりも低騒音化を実現していることを確認し、また従来と同等以上の電気的及び機械的な性能を持っていることを確認した。

今回開発した静電アンテナによって、高速走行する新幹線の低騒音化に貢献できる。



新幹線向け静電アンテナを用いる各種システム

新幹線向け静電アンテナは新幹線の先頭車の屋根上に搭載されており、高速走行時の騒音源の一つになっている。低騒音化のため、静電アンテナの架線電圧検知とVHF帯無線通信の性能を維持しつつ、滑らかな外形・小形化を実現した低騒音の小形化静電アンテナを開発した。

1. ま え が き

東海道新幹線の先頭車両(1, 16号車)の屋根上に設置されている静電アンテナ⁽¹⁾は、架線の加圧状態を確認するための架線電圧検知機能及び駅や車両所構内の入換えに伴う、新幹線(車上)と扱い所(地上)との間で連絡通話を行うためのVHF帯無線通信機能を持ち、1964年の東海道新幹線開業以来、継続して使用されている。この突起した形状が高速走行する新幹線の騒音発生源の一つになっている。低騒音化のためには、滑らかな外形・小形化、特に上方に位置する検知棒の短縮化が求められた。近年の新幹線の高速走行(300km/h以上)時の風圧やトンネル内の圧力変動等にも耐える機械的強度も必要である。

本稿では、低騒音化のために検知棒の長さを短縮して小形化した静電アンテナの開発について述べる。

2. 従来の静電アンテナ

2.1 アンテナの構成

図1に従来の静電アンテナ(以下“従来アンテナ”という。)の構成を示す。 λ_c はVHF帯の使用帯域 $f_1 \sim f_2$ の中心周波数 f_c での自由空間波長である。アンテナは、地板に垂直に配置されたアンテナ基板と検知棒で構成しており、端子1は無線通信用、端子2は架線電圧検知用の端子である。アンテナ基板上には、平面状のアンテナ導体が形成されている。架線電圧検知には、交流架線と検知棒、アンテナ導体との間に生じる静電誘導をアンテナ動作に利用している。また、無線通信には、アンテナ導体がVHF帯のモノポールアンテナとして動作し、約1/4波長の電気長を保つようデザインされている。2種類のアンテナ機能を一つのアンテナで実現するために、架線電圧検知として機能する検知棒及び端子2にはVHF帯の無線信号を混入させない、また、無線通信用の端子1には交流周波数を混入させないように電氣的に遮断している。

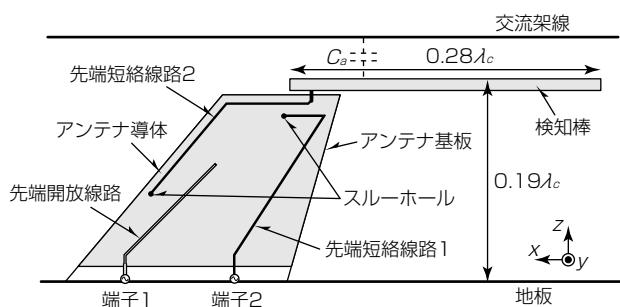


図1. 従来の静電アンテナの構成

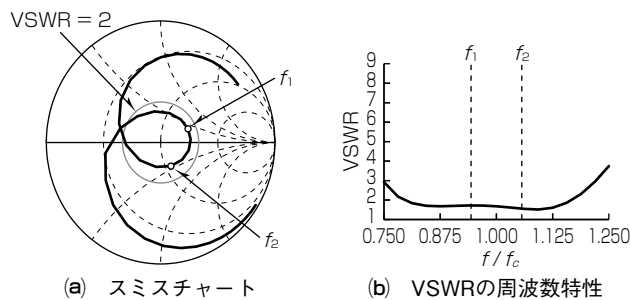


図2. 従来アンテナのインピーダンス特性

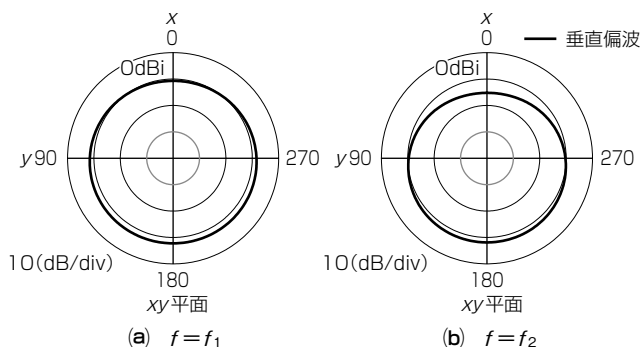


図3. 従来アンテナの放射パターン特性

2.2 架線電圧検知機能

架線とアンテナ導体との間の静電容量を C_a 、交流架線の電圧及び角周波数をそれぞれ V_0 、 ω 、静電アンテナに接続された架線電圧検知器の内部抵抗を R_d とすると、 R_d の両端に誘起される電圧 V は、式(1)で表される。

$$V = \frac{R_d}{\sqrt{R_d^2 + 1/(\omega C_a)^2}} V_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

誘起された交流電圧は架線電圧検知器の内部回路で直流電圧に変換され、その電圧があらかじめ設定されたしきい値以上の場合、架線電圧を検知したことを通知する。

2.3 VHF帯無線通信機能

VHF帯無線通信の電氣的特性を示す。無限地板設置時において、インピーダンス特性は、使用帯域 $f_1 \sim f_2$ で $VSWR$ (Voltage Standing Wave Ratio) < 2 であり(図2)、水平面(xy面)での垂直偏波の放射パターンの平均化利得は、 f_1 で1.3dBi、 f_2 で-0.3dBiである(図3)。

3. 小形化静電アンテナ

3.1 アンテナの外形

従来アンテナと小形化静電アンテナ(以下“小形化アンテナ”という。)の外形を図4に示す。低騒音化を実現するため、従来アンテナと比較して滑らかな外形にして、検知棒の短縮化及びアンテナ低背化等の小形化を行った。この低

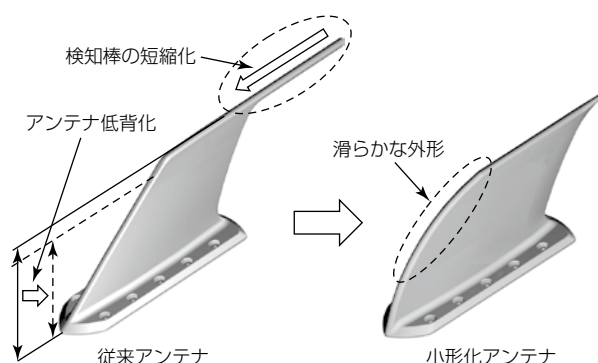


図4. 従来アンテナと小形化アンテナの外形

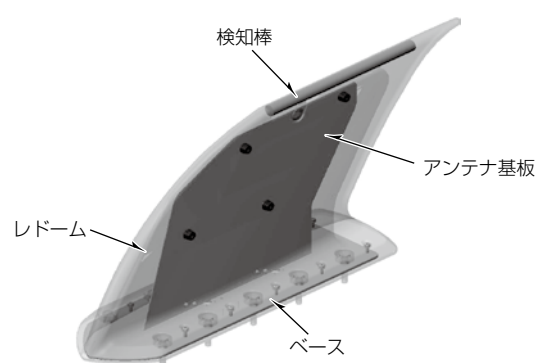


図5. 小形化アンテナの3D設計モデル

騒音化形状を維持しつつ、構造的な目標値(最新の高速走行条件での設定安全率)を満足させるために強度計算モデルの詳細化及び強度設計の最適化が必要になり、電気性能の目標値(架線電圧検知性能: 従来比1以上, VHF帯無線通信: 利得従来比1以上, $VSWR < 2$)を満足させるために従来と異なるアンテナ方式の検討及び形状と性能のトレードオフ設計の最適化が必要になった。

3.2 アンテナの構造設計

新幹線の走行速度は、1964年の開業当初は最高速度210km/hであったが、最近では300km/h以上へと高速化が続いている。新幹線の屋根上に取り付けられた静電アンテナは、走行速度に応じた風圧の影響をじかに受け、さらにトンネルへの進入・脱出時には新幹線車内と車外の差圧の影響を受ける。今回のアンテナ筐体(きょうたい)の構造設計では、図5に示すアンテナ全体の3D設計モデルを作成し、内外差圧力と風圧(片面の差圧力)の強度解析を行い、使用環境下で必要な強度を確保できることを確認した。

風圧解析は、車速300km/h以上で横風を考慮した風洞実験で得られた片面に掛かる荷重から、レドーム片面に投影した差圧力の解析仕様にした。環境の種類と仕様に基いてレドーム、ベース、基板のそれぞれの最大応力点を抽出し(図6)、疲労限度の材料強度との比率から安全率を算出し、その結果、目標の安全率を十分に満足させた。

3.3 アンテナの構成

小形化アンテナの構成を図7に示す⁽²⁾。低騒音化及び小形化のため、従来アンテナよりも検知棒を短縮化し、アンテナを低背化しなければならないが、従来と同等のアンテナ性能を確保する必要がある。

3.4 架線電圧検知性能確保の設計

検知棒の短縮化とアンテナ低背化によって、架線～アンテナ間の静電容量が低下するが、アンテナ基板面積を拡張して静電容量の減少量を軽減し(図8)、架線～アンテナ間

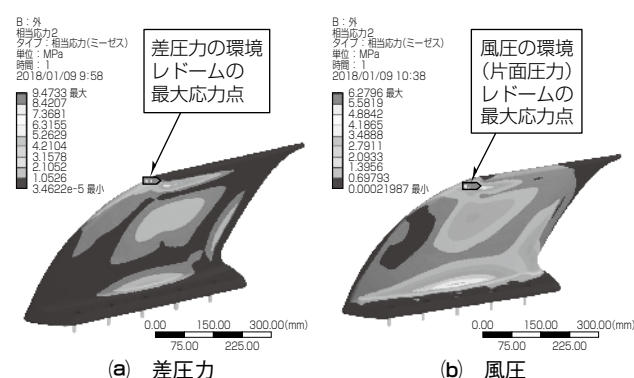


図6. 差圧力と風圧の解析結果

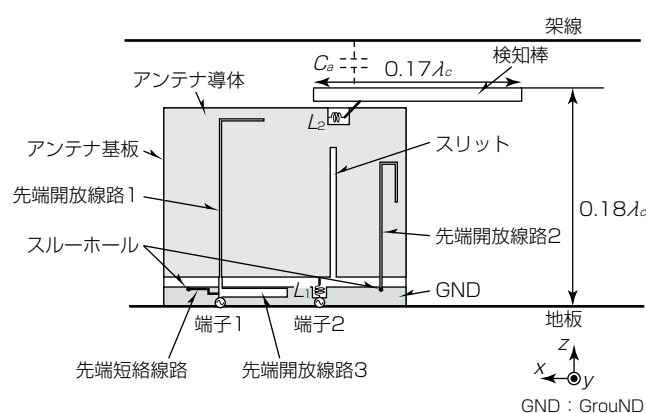


図7. 小形化アンテナの構成

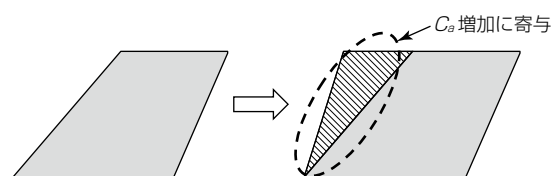


図8. アンテナ基板面積の拡張

の距離変動等の影響を検討して検知判定のしきい値を最適化することで、従来と同等の検知性能を確保した。

3.5 VHF帯無線通信性能確保の設計

低背化によって、アンテナが地板に近づきVHF帯のインピーダンス特性が劣化するので、従来のモノポール構造

ではなく、インピーダンス特性が調整可能な折り返しモノポール構造を採用した(図9)。また、従来は検知棒とアンテナ基板の電磁界結合によってインピーダンス広帯域化を実現していたが、今回は検知棒の長さが短くなってアンテナ基板の特性が支配的になることから、新たに並列共振回路を追加し、インピーダンス特性の広帯域化を行った(図10)。

3.6 小形化アンテナの性能評価結果

試作した小形化アンテナを図11に示す。アンテナ基板はFRP(繊維強化プラスチック)レドーム内に収まるよう最適化した。

また、試作アンテナの電気性能測定に用いた地板の条件を図12に、試作アンテナのインピーダンス特性を図13に、水平面(xy面)の放射パターン特性を図14に示す。イ

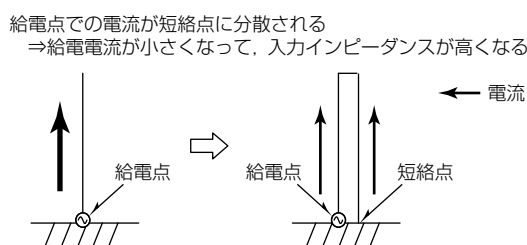


図9. 従来のモノポール構造と今回の折り返しモノポール構造

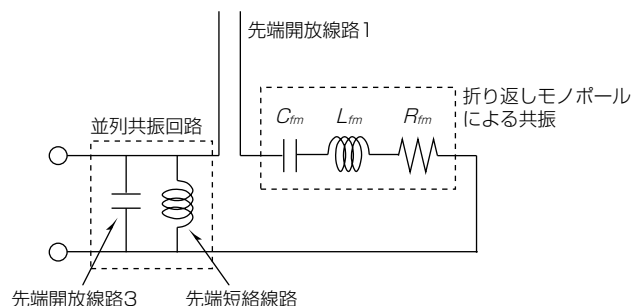


図10. インピーダンス特性広帯域化のための並列共振回路

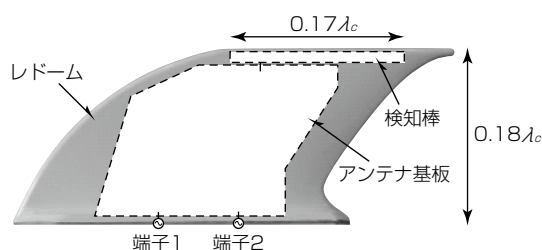


図11. 試作した小形化アンテナ

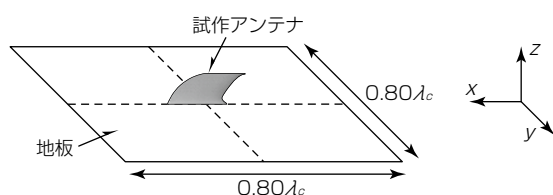


図12. 試作アンテナ測定時の地板の条件

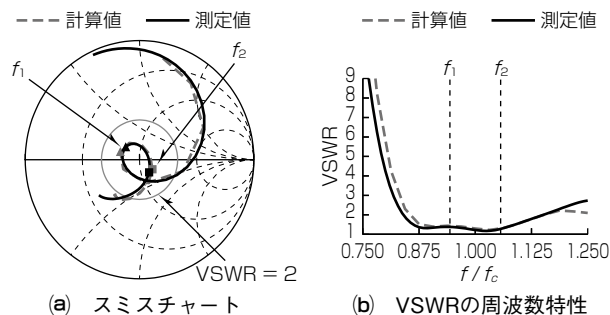


図13. 小形化アンテナのインピーダンス特性

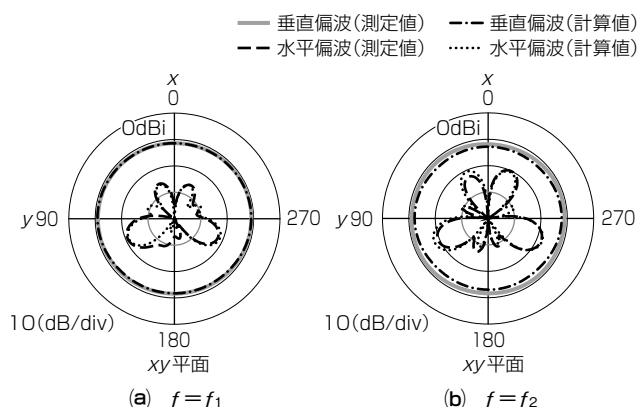


図14. 小形化アンテナの放射パターン特性

ンピーダンス特性は、使用帯域 $f_1 \sim f_2$ で $VSWR < 2$ である。また、水平面ではほぼ無指向な放射パターン特性が得られている。実測値は計算値とほぼ一致する結果が得られた。

4. 走行試験結果

試作した小形化アンテナを東海道新幹線の車両に設置し、走行試験で各種性能評価を行った。

4.1 騒音測定

走行試験でアンテナの騒音特性の測定を行った。従来アンテナに比べて、アンテナ部分からの騒音は6.0dB低減した。今回の小形化アンテナ開発の目的である、低騒音化の効果を確認した。

4.2 応力測定

走行試験で応力測定を行った。事前の解析結果で応力が大きかった部位のひずみを測定し、環境仕様での応力値に換算することで評価した。走行試験では風圧と差圧力が合成されるが、風圧が速度の自乗に比例する想定で、応力値を換算した。その結果、最も安全率が低下したのはトンネル内の高速走行時であったが、レドーム、ベース、基板とも、目標の安全率を十分に満足した。また、走行試験では作り出せない高速走行+横風の最大風速環境を想定した風

洞試験を行い、走行試験より厳しい条件であったが、目標の安全率を十分満足していることを確認した。

4.3 架線電圧検知性能

試作アンテナを新幹線の車両に搭載し、新幹線の走行エリアに敷設された架線で静電誘導される架線電圧検知性能を測定・解析した。測定は晴天時及び雨天時に実施し、解析はアンテナで得られた誘起電圧を、架線電圧検知のシステム設計のしきい値に対する比率(しきい値比)として求めた。従来アンテナと小形化アンテナでシステム設計から要求されるしきい値は異なっている。解析結果のうち、晴天時を図15(a)、雨天時を図15(b)に示す。最小のしきい値比は、従来アンテナでは4.01(晴天時)、3.43(雨天時)、小形化アンテナでは4.76(晴天時)、4.80(雨天時)であり、従来と同等以上の架線電圧検知性能を確保できていることを確認した。晴天時と雨天時のどちらでも、東海道全区間での使用に問題がないことを実証できた。

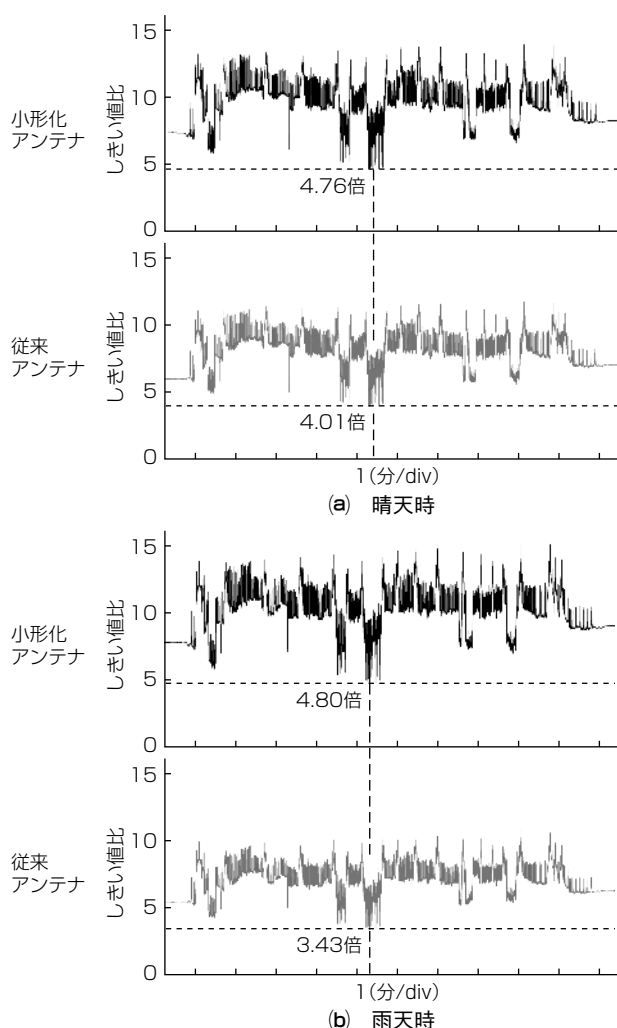


図15. 架線電圧検知の特性比較

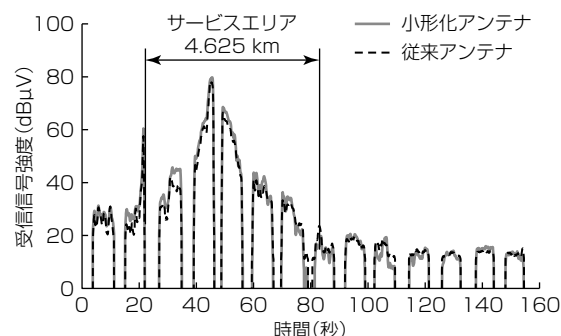


図16. VHF帯無線通信の受信信号強度測定結果例

4.4 VHF帯無線通信性能

新幹線の走行中に、VHF帯無線通信サービスエリアでの受信信号強度(Received Signal Strength Indicator : RSSI)を測定した。無線性能の測定は、地上→車上の通信方向で、間欠送信(送信10秒、休止5秒の繰り返し)の条件で行った。測定結果の一例を図16に示す。車上のアンテナが地上の送信アンテナに最も近づくサービスエリア内の中央付近でRSSIが最大になって、車上アンテナが地上アンテナから離れると徐々にRSSIが小さくなっていく。サービスエリアの境界地点でも、無線通信システムが要求する基準値以上のRSSIが得られていることを確認した。また、小形化アンテナで測定したRSSIは、従来アンテナの値と比べて同じか少し大きい(0~2.6dB高い)という結果が得られた。これらの試験結果から、小形化アンテナがVHF帯無線通信アンテナとして、従来と同等以上の性能を持っていることを確認した。

5. む す び

高速化する新幹線の低騒音化のため、車両の屋根上に搭載された従来の静電アンテナよりも滑らかな形状・小形化した小形化静電アンテナを開発した。

試作アンテナの単体測定による設計の妥当性を確認後、走行試験による実証を行うことで、開発したアンテナは、高速走行時の風圧等に耐える強度を十分確保し、従来と同等以上の架線電圧検知性能及びVHF帯無線通信性能を実現した上で、低騒音化を成し得たことを検証した。

今回開発した小形化静電アンテナは東海道・山陽新幹線用新車両N700Sに搭載され、低騒音化に貢献する。

参考文献

- (1) 黒田忠光, ほか: 東海道新幹線架線電圧検知・構内無線共用アンテナ, 三菱電機技報, 38, No.4, 680~683 (1964)
- (2) 西本研悟, ほか: 新幹線向け架線電圧検知/無線通信共用アンテナの小形化, 電子情報通信学会技術研究報告, A・P2019-115, RCS 2019-207 (2019)