

次世代高速鉄道のための 無線通信システムに関する研究

2022年2月

松 村 善 洋

学位論文 博士（工学）

次世代高速鉄道のための
無線通信システムに関する研究

2022年2月

慶應義塾大学大学院理工学研究科
総合デザイン工学専攻

松 村 善 洋

目 次

概要	7
第 1 章 導入.....	10
1.1 本研究の背景	10
1.2 新幹線における無線通信方式の変遷	11
1.3 東海道新幹線における現在の列車無線方式とその課題	13
1.4 新幹線の架線電圧検知・構内無線共用アンテナ（静電アンテナ）の機能	15
1.5 ミリ波の鉄道利用に向けた検討の変遷	18
1.5.1 ドイツにおけるミリ波利用の取組み	18
1.5.2 日本における鉄道へのミリ波利用の検討	18
1.5.3 駅構内などスポットにおいてミリ波通信を鉄道に応用したシステムの例	19
1.5.4 ミリ波におけるレイトレースシミュレーションと鉄道への適用	19
1.6 研究の位置づけ	19
1.7 参考文献	23
第 2 章 新幹線静電アンテナの低騒音化	25
2.1 はじめに	25
2.2 従来アンテナの構成と計算結果	26
2.2.1 静電アンテナの機能	26
2.2.2 従来アンテナの構成	26
2.2.3 架線電圧検知性能	27
2.2.4 無線通信アンテナ性能	28
2.3 提案アンテナの構成と計算・測定結果	33
2.3.1 提案アンテナの外形	33
2.3.2 提案アンテナの構成	34
2.3.3 架線電圧検知性能の計算結果	35
2.3.4 無線通信アンテナ性能の計算結果	37
2.3.5 測定結果	40
2.4 積雪・降雨の影響	42
2.5 結論	46
2.6 参考文献	46
第 3 章 新幹線環境での活用を想定したミリ波の 45 GHz 帯伝搬特性の測定と 解析	49
3.1 はじめに	49
3.2 ミリ波列車無線の実現に向けた要素技術	50
3.2.1 OFDM 技術	51

3.2.2	ダイバーシティ技術，時空間ブロック符号技術.....	52
3.2.3	ミリ波の降雨減衰.....	52
3.2.4	レイトレーシング法.....	53
3.3	曲線区間におけるミリ波通信の課題と伝搬測定結果.....	54
3.3.1	電波到達エリアの考え方と課題.....	54
3.3.2	測定環境.....	55
3.3.3	測定に用いた無線機.....	57
3.3.4	曲線区間における受信レベルの目安.....	58
3.3.5	電波伝搬測定結果の一例.....	59
3.4	レイトレース法によるシミュレーションと測定結果の比較.....	61
3.4.1	シミュレーションの概要.....	61
3.4.2	計算モデル及び計算条件.....	61
3.4.3	曲線区間①（R = 2500m 防音壁無）.....	62
3.4.4	曲線区間②（R = 2500 m 防音壁有）.....	64
3.4.5	曲線区間③（R = 395 m 防音壁無）.....	66
3.4.6	シミュレーションにおけるレール有無比較.....	68
3.4.7	シミュレーション結果のまとめ.....	70
3.5	結論.....	70
3.6	参考文献.....	70

第 4 章 新幹線環境におけるミリ波列車無線システムの提案と，地上局配置

	間隔の決定.....	73
4.1	はじめに.....	73
4.2	新幹線で適用可能な無線装置構成の提案と豪雨対策の検討.....	74
4.2.1	新幹線に適用可能なミリ波無線装置の構成.....	74
4.2.2	提案方式のフレーム構成とスロット構成.....	76
4.2.3	高利得モードの動作.....	77
4.3	適切な地上局配置間隔の検討.....	80
4.3.1	回線設計.....	80
4.3.2	高利得モードの効果を含めた回線設計.....	81
4.3.3	曲線半径に応じた適切な地上局配置間隔.....	83
4.4	結論.....	85
4.5	参考文献.....	86

第 5 章 N700S 確認試験車による走行試験での性能確認..... 87

5.1	はじめに.....	87
5.2	低騒音化した静電アンテナの走行試験結果.....	88
5.2.1	提案静電アンテナの走行試験概要.....	88
5.2.2	架線電圧検知性能.....	88
5.2.3	無線性能.....	90
5.2.4	騒音特性.....	92

5.3	提案したミリ波列車無線システムの走行試験結果	93
5.3.1	ミリ波列車無線システムの走行試験概要.....	93
5.3.2	セル内ハンドオーバ試験.....	93
5.3.3	セル間ハンドオーバ試験.....	94
5.4	結論	96
5.5	参考文献	96
第 6 章	本論文の結論	98
6.1	新幹線静電アンテナの低騒音化（第 2 章）	98
6.2	新幹線環境での活用を想定したミリ波の 45 GHz 帯伝搬特性の測定と解析 （第 3 章）	99
6.3	新幹線環境におけるミリ波列車無線システムの提案と，地上局配置間隔の決 定（第 4 章）	99
6.4	N700S 確認試験車による走行試験での性能確認（第 5 章）	100
6.5	全体のまとめ	100
付録 A	著作一覧	102
A.1	査読付き論文.....	102
A.2	国際学会	102
A.3	国内研究会	103
A.4	その他	105
A.5	表彰	105

目次

図 1.1	新幹線における無線システムの概要	10
図 1.2	新幹線列車無線方式（空間波方式，LCX 方式）の概要	11
図 1.3	新幹線列車無線方式の変遷	12
図 1.4	構内無線の概要	12
図 1.5	東海道新幹線デジタル LCX 列車無線システム構成	14
図 1.6	無線局の回線容量	14
図 1.7	静電アンテナの機能	16
図 1.8	架線電圧検知機能の動作モデル	16
図 1.9	構内無線アンテナとしての動作原理	17
図 1.10	研究の位置づけ	22
図 2.1	従来の静電アンテナの構成	27
図 2.2	静電容量 C_a の計算モデル	28
図 2.3	従来アンテナの S_{11} 計算結果	29
図 2.4	キャラクタリスティックモード解析における計算モデル	29
図 2.5	従来アンテナで線路と誘電体を削除した時の S_{11} 計算結果	30
図 2.6	キャラクタリスティックモード解析による表面電流計算結果 ($f = 1.25 f_c$) ..	31
図 2.7	mode significance の周波数特性	32
図 2.8	従来アンテナの放射パターン計算結果	33
図 2.9	従来アンテナと提案アンテナの外形	34
図 2.10	提案アンテナの構成	35
図 2.11	アンテナ導体の幅 w_a を変化させた時の計算モデル	36
図 2.12	w_a を変化させた時の静電容量 C_a の計算結果	37
図 2.13	アンテナ導体の形状変更イメージ	37
図 2.14	モデル A, B と S_{11} 計算結果	38
図 2.15	提案アンテナ（図 2.10）の S_{11} 計算結果	39
図 2.16	提案アンテナ（図 2.10）の S_{21} 計算結果	39
図 2.17	提案アンテナ（図 2.10）の放射パターン計算結果	40
図 2.18	試作した提案アンテナ	41
図 2.19	試作アンテナ測定時の地板，架線の条件	41
図 2.20	試作アンテナ（図 2.18）の S_{11} 測定・計算結果	42
図 2.21	試作アンテナ（図 2.18）の水平面（xy 面）の放射パターン測定・計算結果 ..	42
図 2.22	積雪時の静電容量 C_a の測定・計算モデル	44
図 2.23	積雪時の静電容量 C_a の測定・計算結果	44
図 2.24	ϵ_{rsnow} を変化させた時の C_a の計算結果 ($h_{snow} = 300 \text{ mm}$)	45
図 2.25	積雪時の架線電圧検知の等価回路	45
図 3.1	OFDM システムの送信機構成	51
図 3.2	イメージング法とレイラウンチング法の概要	54
図 3.3	通信エリアの例	55

図 3.4	測定時の無線機設置条件	56
図 3.5	曲線半径と地上局の設置角度	57
図 3.6	電波測定方法（地上局，車上局）	57
図 3.7	地上局，車上局の角度の関係	59
図 3.8	$R = 2500\text{m}$ 曲線区間（防音壁無）の受信電力	60
図 3.9	シミュレーションモデル例（ $R = 395\text{m}$ ）	61
図 3.10	レイトレース法の電界強度シミュレーション結果と実測値の比較 （ $R = 2500\text{m}$ 防音壁無）	63
図 3.11	レイトレース法のシミュレーション結果 レイの表示 （ $R = 2500\text{ m}$ 防音壁無，地上局車上局間 500 m ）	64
図 3.12	レイトレース法の電界強度シミュレーション結果と実測値の比較 （ $R = 2500\text{ m}$ 防音壁有）	65
図 3.13	レイトレース法のシミュレーション結果 レイの表示 （ $R = 2500\text{ m}$ 防音壁有，地上局車上局間 500 m ）	66
図 3.14	レイトレース法の電界強度シミュレーション結果と実測値の比較 （ $R = 395\text{m}$ 防音壁無）	67
図 3.15	レイトレース法のシミュレーション結果 レイの表示（ $R = 395\text{ m}$ 防音壁 無，地上局車上局間 150 m ）	68
図 3.16	図 3.10 の条件でレールがある場合とない場合の比較（ $R = 2500\text{ m}$ 防音壁 無）	69
図 3.17	図 3.14 の条件でレールがある場合とない場合の比較（ $R = 395\text{ m}$ 防音壁 無）	69
図 5.1	架線電圧検知の走行試験結果	89
図 5.2	架線の重複区間	90
図 5.3	新幹線における標準的な架線構成	90
図 5.4	掛川駅における構内無線受信レベルの比較	91
図 5.5	各試験駅サービスエリア境界での受信レベル	92
図 5.6	アンテナの音圧レベル比較	92
図 5.7	走行試験時の地上局の配置（セル内ハンドオーバ）	94
図 5.8	走行試験時の受信信号電力（セル内ハンドオーバ）	94
図 5.9	走行試験時の地上局の配置（セル間ハンドオーバ）	95
図 5.10	走行試験時の受信信号電力（セル間ハンドオーバ）	95

表目次

表 1.1	本論文の構成の概要	20
表 2.1	mode significance の計算結果 ($f=1.25 f_c$)	30
表 2.2	降雨時の静電容量 C_a (pF) の測定・計算結果	46
表 3.1	伝搬環境測定の測定条件	56
表 3.2	無線機の諸元	58
表 3.3	計算モデルの構成及び材料係数	62
表 3.4	無線機の設置条件	62
表 5.1	無線機の仕様	93

概要

新幹線をはじめとする高速鉄道の世界的な広がりと共に、高速鉄道の車内から地上へのデータ通信に求められるニーズは今後更に高まる傾向にある。このため、高速に移動する鉄道における地上車上間通信インフラを高速化することは重要な課題である。

東海道新幹線は開業当初から列車無線装置が設置された。開業当初から列車あたり 8CH の電話回線を有しており、公衆電話とも接続され旅客サービスにも寄与していた。東北・上越新幹線開業時に列車無線は漏えい同軸ケーブル（Leakey Coaxial Cable : LCX）化され、列車発信の公衆電話に自動交換方式が採用されるなど、移動体通信方式としては充実した設備であった。その後、東北・上越新幹線や東海道新幹線の列車無線は LCX デジタル方式が採用され更に進化してきた。東海道新幹線における車内インターネット方式では 1 列車あたり最大 2.3 Mbps 程度の通信が実現されたが、インターネット技術とスマートフォンの発展により、利用者が要求する回線容量の水準を満たさなくなった。このように、高速走行する新幹線において、安定して大容量の通信を確保するのは大変困難な課題である。現在の列車無線が利用する LCX は 400 MHz 帯を用いているが、この帯域は各種無線局により混雑しており 10 MHz 以上の帯域を確保するのは大変難しい。

そのような中、東海道新幹線のサービス水準の向上、お客様の安全・安心・快適な旅行のサポート、今後の労働力不足に対応する保守の実現に向けて、地上車上間の大容量通信インフラの確保が重要な課題である。具体的には、新幹線車内から車両の状態や車内の状況、先頭映像などを地上に伝送することなどが可能なインフラが今後も求められる。このため、数百 MHz 幅の周波数帯域を比較的確保しやすいミリ波を新幹線の無線通信システムに適用することが考えられ、ミリ波帯活用の検討を続けてきた。ミリ波は直進性が高く、降雨減衰が大きいことが課題であるが、地上局間隔を短くすれば列車無線システムの構築は可能と考えられる。しかし、地上局間隔は設置コストに反映されるため、伝搬環境を明らかにし、適切な地上局間隔を算出することが、ミリ波列車無線システムを設備する上で重要であり、本論文の大きなテーマの 1 つである。

一方、新幹線をはじめとする高速鉄道は、高速化を続けている。高速で走行する列車の大きな課題は、列車からの騒音であり、車両形状に対して様々な工夫がなされてきた。しかし、東海道新幹線の先頭車両および最後尾車両の屋根上に設置されている架線電圧検知／無線通信共用アンテナ（静電アンテナ）は、60 Hz の架線電圧を検知する機能と、VHF 帯の無線通信を行う機能の双方を有しており、東海道新幹線の開業以来、外部形状の変化があったものの、内部構造は変わっていない。高速走行する新幹線では、このアンテナ形状が突起しているため騒音源の一つとなっており、低騒音化が必要となった。低騒音化のためには、形状円滑化、小形化が必要となり、特に架線電圧を検知する検知棒を短縮することが必要となった。このため、従来アンテナと同等で低騒音化を満たすアンテナの開発が本論文のもう 1 つのテーマである。

本論文は以下のように構成されている。まず、第 1 章では、新幹線における無線通信方式の変遷、現在の列車無線方式の課題と、新幹線の静電アンテナの機能について述べる。また、ミリ波の鉄道利用に向けた検討の変遷と、海外、国内の取組の推移について述べると共に、研究の位置づけについて述べる。

第 2 章では、新幹線静電アンテナの低騒音化について検討する。折返しモノポール構造と並列共振回路の採用により、本アンテナを小型化することを検討・提案し、提案静電アンテナを製作した。提案静電アンテナの有効性を計算と測定により実証し、また、降雨・積雪に対する影響を実験と計算で確認する。

第 3 章では、新幹線環境におけるミリ波伝搬環境の解明を試みる。曲線区間においての 45 GHz 帯における実測伝搬測定結果とレイトレースシミュレーションとの比較を行った。曲線区間においては、無線機アンテナのメインビーム範囲外まで電波が到達することが分かり、その原因は、主にレールによる反射によるものであることであると分析した。レールは曲線区間を連続的にカーブしていること、レールの材質が鉄であり反射が大きく表れることから、レールによる反射の影響が大きいことが把握できた。

第 4 章では、新幹線に適用するミリ波列車無線システムの構成について提案している。新幹線ミリ波列車無線システムとして、セルを構成する周波数配置やセル間ハンドオーバーなど実用化を想定したシステム構成の検討と、それに伴う曲線区間における地上

局配置を検討した。また、ミリ波の弱点である降雨減衰の影響を低減する高利得モードの適用を前提とした回線設計例を示し、地上局間隔を広げられることを確認した。

第 5 章に、東海道新幹線 N700S 確認試験車による走行試験結果を記載している。第 2 章で試作した新幹線用の新型静電アンテナの走行試験の結果、提案静電アンテナによる低騒音化の効果を確認すると共に、提案静電アンテナの無線通信の受信レベルは、従来アンテナより 0～2.6 dB 高く、両アンテナの利得の差分が走行試験結果に現れている。また、第 4 章で提案したミリ波無線機の走行試験の結果、セル内ハンドオーバー、セル間ハンドオーバーを円滑に実施できることを確認した。この結果、LCX 方式に比べ地上車上間通信を改善できるミリ波通信を新幹線環境に適用可能で、大容量無線通信インフラの無線装置として列車無線システムを構成できることを示している。

最後に第 6 章では、本論文のまとめを述べる。

第1章 導入

1.1 本研究の背景

新幹線をはじめとする高速鉄道の世界적인な広がりと共に、高速鉄道の車内から地上へのデータ通信に求められるニーズは今後更に高まる傾向にある。このため、高速に移動する鉄道における地上車上間通信インフラを高速化することは重要な課題である。しかし、高速走行する新幹線において、安定して大容量の通信を確保するのは大変困難な課題である。現在の列車無線が利用する漏えい同軸ケーブル（Leakey Coaxial Cable : LCX）は 400 MHz 帯を用いているが、この帯域は各種無線局により混雑しており 10 MHz 以上の帯域を確保するのは大変難しい。そのため、周波数帯域を比較的確保しやすいミリ波を新幹線システムに適用することが考えられるが、ミリ波は直進性が高く、降雨減衰が大きいことが課題である。

また、新幹線は時代に応じて高速化してきている。新幹線が高速化するにつれて騒音が大きくなるため、新しい新幹線車両には様々な空力改善の工夫がされており、それにより高速走行が実現されている。そのような中、新幹線の先頭車両の屋根上に設置された静電アンテナの空力抵抗の低減が求められており、もう一つの課題である。

本研究においては、これらの新幹線における無線通信の課題を解決することを目的として、新幹線列車無線システムに対するミリ波の適用に向けた検討と、新幹線走行騒音の原因の一つである、新幹線静電アンテナの形状改善に取り組むこととした。

本研究が対象とする新幹線における無線システムの概要を図 1.1 に示す。

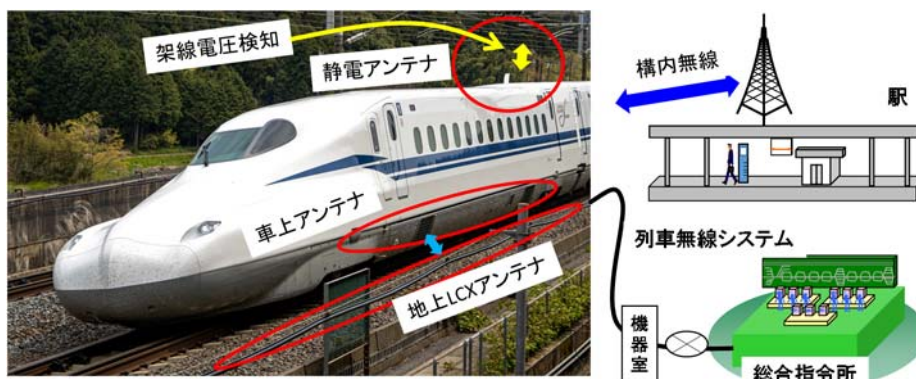


図 1.1 新幹線における無線システムの概要

1.2 新幹線における無線通信方式の変遷

高速鉄道の歴史は東海道新幹線の開通から始まった。東海道新幹線は 1964 年（昭和 39 年）に東京～新大阪間で開通した。その東海道新幹線においては開業当初から、東京に設置された総合指令所と運転士の間の直通回線として列車無線装置が設置されていた。総合指令所と運転士の間の直通回線である東海道新幹線の列車無線設備は、400 MHz 帯 8 CH の電話回線を有する空間波方式で、そのうち 2CH を運転指令系、6CH を業務公衆系に用いた。車上→地上については位相変調（Phase Modulation : PM）方式の 8CH を用い、地上→車上については多重無線方式で 8 CH に 1 波を使用し、隣接基地局間の相互干渉、オーバーリーチを避けるため、3 波を繰返し配置した。運転指令系は総合指令所と運転士の直通回線に、業務公衆系は新幹線車内に設置された公衆電話に接続され、国鉄の交換台と電電公社の交換台における手動交換を経て一般公衆回線に接続された[1.1]。

1978 年（S53）東北・上越新幹線開業時に列車無線は LCX 化され、列車発信の公衆電話については自動交換方式が採用された。また、東海道新幹線の列車無線設備は、1988 年（S63）に LCX 化され、公衆電話回線に 12 回線を割当可能とするほか、64 kbps × 6 CH のデータ通信回線も実用化するなど通信容量を増加させた[1.2]。その後 2002 年（H14）には、東北・上越新幹線の列車無線が LCX デジタル化され、2008 年（H20）には東海道新幹線の列車無線が LCX デジタル化された。図 1.2 に主な新幹線列車無線方式（空間波方式、LCX 方式）の概要を、図 1.3 に新幹線列車無線の変遷を示す。

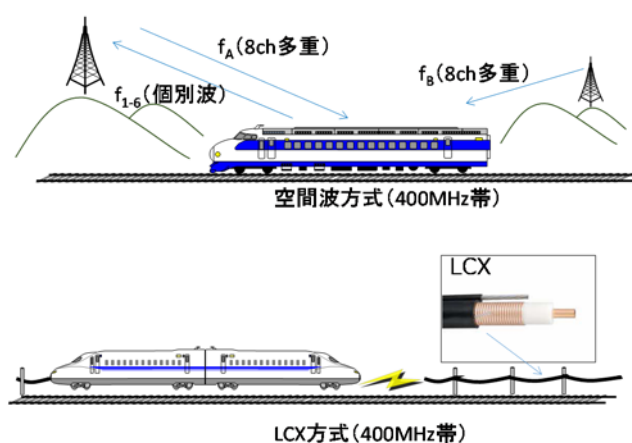
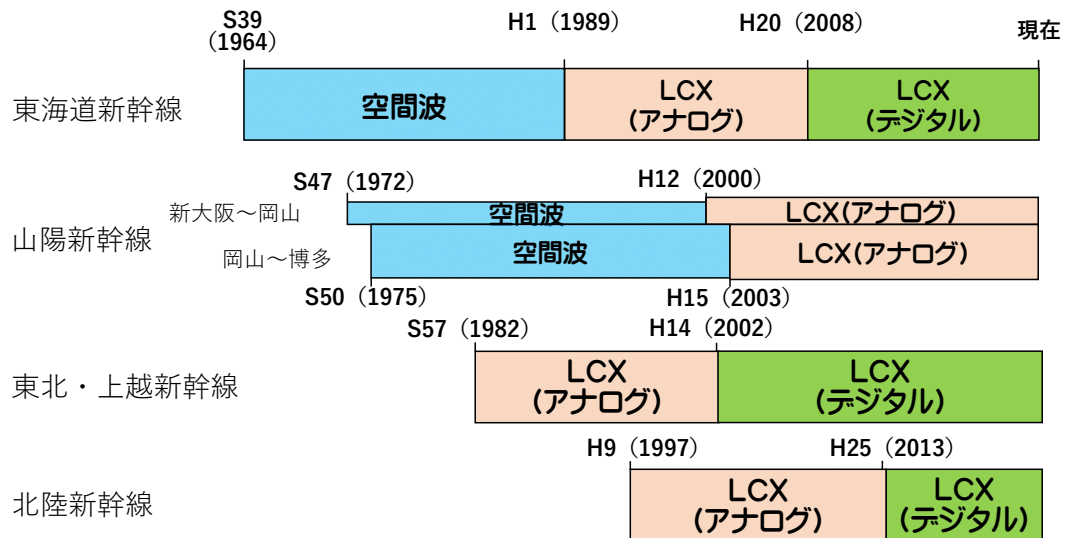


図 1.2 新幹線列車無線方式（空間波方式、LCX 方式）の概要

新幹線列車無線の変遷（400MHz帯）



九州新幹線（2011～）北海道新幹線（2016～）は開業時からLCXデジタル方式

図 1.3 新幹線列車無線方式の変遷

一方、駅構内や車両所構内における新幹線車両の移動（入換とも呼ばれる）にあたっては、駅や車両所の車両の移動経路を設定する信号扱所と呼ばれる場所と、運転士の間での通信が必要になる。これは、通常の本線における運転と違い、時刻、進入、進出ルートが複雑であり作業計画の変更、取消などが多数あることにより、1作業ごとに信号扱所と運転士の間で打合せをしなければならないためである。その連絡専用に構内無線と呼ばれる無線装置が設備されており、東海道新幹線の開業以来同じシステムが用いられている（図 1.4）。

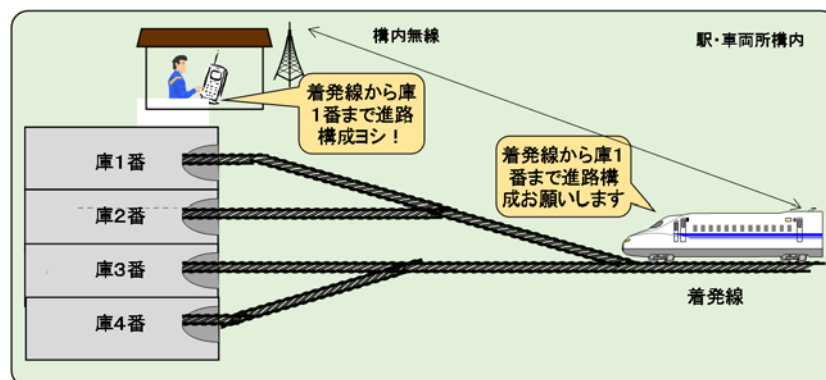


図 1.4 構内無線の概要

この連絡には、150 MHz 帯の PM 方式が用いられており、複信方式はプレストーク方式の半二重通信が用いられている[1.3]. この構内無線に用いられるアンテナが静電アンテナであり、静電アンテナは構内無線アンテナの役割の他に架線電圧検知の役割を持っている。架線電圧検知の機能は、静電アンテナの名前の通り静電誘導を利用して架線電圧を検知する。架線電圧検知機能の目的は、運転士が新幹線にパンタグラフを上げ電源を投入する前に架線加圧の有無を確認するためのものである。この静電アンテナの内部構造は、新幹線運行開始直後より同じであり、今回の静電アンテナ改良の研究を開始するまで、改良を加えられることが無かった。

1.3 東海道新幹線における現在の列車無線方式とその課題

現在の東海道新幹線においては、前述の通り、LCX デジタル方式の列車無線システムが用いられている。LCX はケーブル状のアンテナであり、その通信エリアを一次元的（線に沿って）に構成できる。LCX 方式は、沿線に布設された LCX と移動局アンテナが近接した状態で無線通信を行うため、フェージング変動が少なく安定的に高品質な回線が得られるほか、隣接ゾーン干渉がほとんどなく同一周波数の繰り返し使用が可能となり電波利用効率が高いという特徴がある [1.4]。2009 年 3 月に導入された東海道新幹線のデジタル LCX 列車無線システムの構成を図 1.5 に示す。東京総合指令所と第 2 指令所に設置された中央局、東京・静岡・名古屋・大阪の 4 拠点に設置される統制局、概ね各駅単位に設置される基地局、沿線に設置される中継機より構成される。中継機はおよそ 1～1.5 km 毎に設置されている。

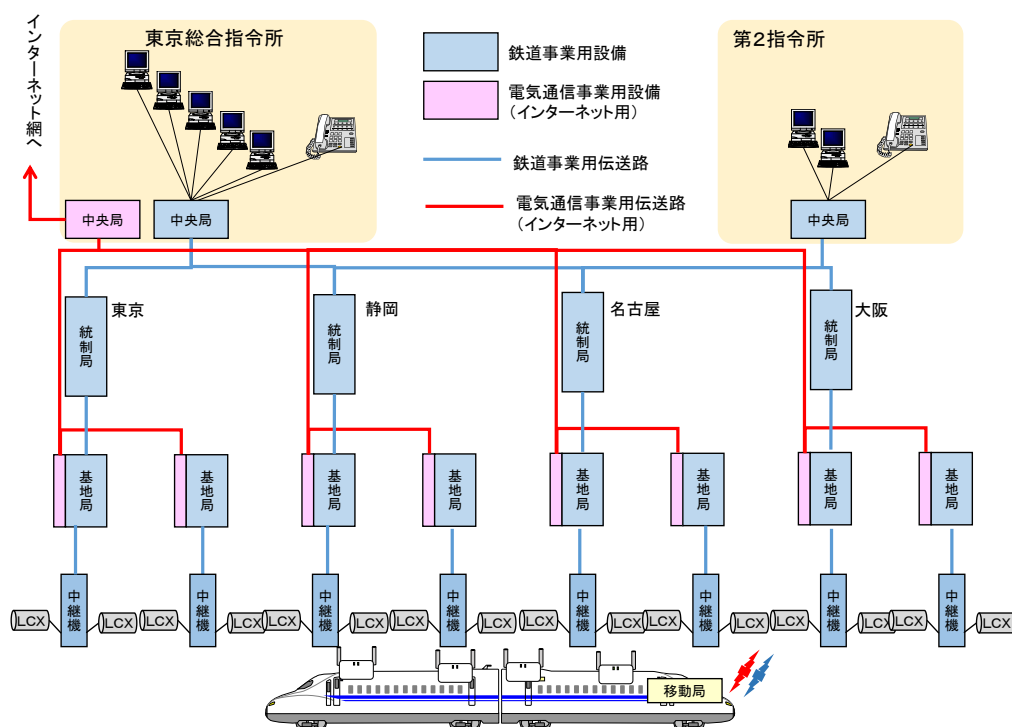
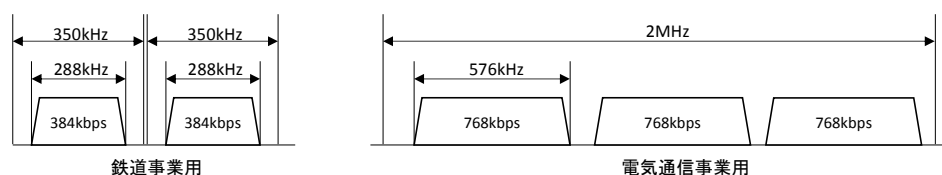


図 1.5 東海道新幹線デジタル LCX 列車無線システム構成

本方式では、指令電話、業務電話、公衆電話（令和 3 年 6 月 30 日サービス終了）、鉄道運行に関する業務遂行用のデータ通信回線の他、車内インターネット接続（平成 30 年 3 月 30 日サービス終了）用に 2.3 Mbps の回線容量を確保していた。本方式における無線局の回線容量を図 1.6 に示す。

(1) 基地局送信



(2) 移動局送信

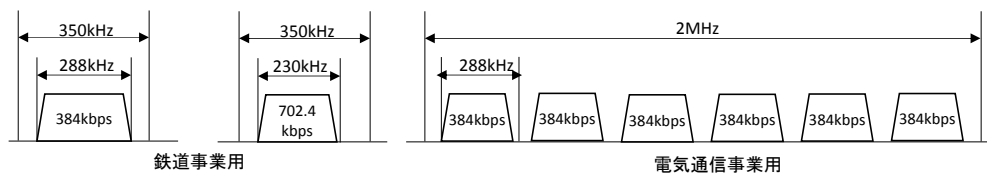


図 1.6 無線局の回線容量

本方式は、新幹線車内においてインターネット接続を実現するものであったが、1編成あたり 2.3 Mbps という伝送速度であったため、インターネット技術とスマートフォンの発展に伴い、利用者が要求する回線容量の水準を満たさなくなった。このため、代替方式としての携帯キャリア回線を利用した新幹線フリーWi-Fi サービスの整備完了に伴い、インターネット接続サービスは終了した。

しかし、東海道新幹線のサービス水準の向上、お客様の安全・安心・快適な旅行のサポート、今後の労働力不足に対応する保守の実現に向けて、地上車上間の大容量通信インフラの確保が重要な課題である。具体的には、新幹線車内から車両の状態や車内の状況、先頭映像などを地上に伝送することなどが可能なインフラが求められる。しかし、UHF 帯を用いる現在の列車無線方式では、周波数帯域の更なる割当を受けることは困難である。

そのため、より大きな周波数帯域の割当を受ける可能性がある、ミリ波の活用の検討が続けてきた。ミリ波は直進性が高く、降雨減衰が大きいという課題があるが、数百 MHz 幅の帯域の割当を受ける見込みがあり、地上局間隔を短くすれば列車無線システムの構築が可能と考えられる。しかし、地上局間隔は設置コストに反映されるため適切な地上局間隔を算出することが、ミリ波列車無線システムを設備する上で重要である。

1.4 新幹線の架線電圧検知・構内無線共用アンテナ（静電アンテナ）の機能

東海道新幹線の先頭車両および最後尾車両の屋根上に設置されている架線電圧検知／無線通信共用アンテナ[1.3]（以下静電アンテナという）は、細長い棒状の検知棒を備えることで、60 Hz の架線電圧を検知する機能と、VHF 帯の無線通信を行う機能の双方を有している。東海道新幹線の開業以来、外部形状の変化があったものの、内部構造は変わっておらず、その形状が騒音源の一つである。東海道新幹線では、留置車両のパンタグラフを上昇する前にトロリ線の加圧状態を確認する取扱いとしているが、パンタグラフの下降時は車両主回路の電圧検知器を用いて電車線の加圧状態の確認ができないため、別の方法で加圧状態の確認を行う必要があり、静電アンテナの架線電圧検知機能を用いている。また、この静電アンテナは、駅や車両所構内での入換に伴う駅信号扱

所との通話を行うための VHF 帯アンテナ機能（構内無線機能）を有している（図 1.7）．
 運転士はこれらの機能を用いて、留置車両を整備し、乗客を乗せて運転することが可能な営業列車の状態では始発駅に回送する．

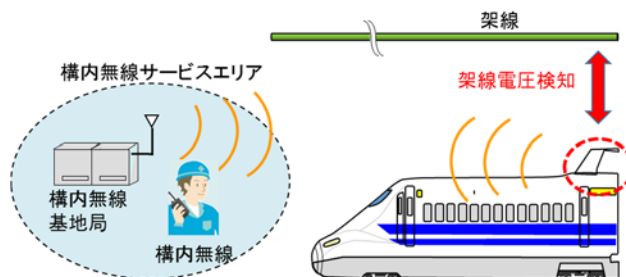


図 1.7 静電アンテナの機能

現行アンテナにおける架線電圧検知の動作原理を図 1.8 に示す。交流電化区間において電圧が架線に加圧された状態では、架線と検知棒の間の静電容量、架線と平面導体の間の静電容量（あわせて C_a ）により、平面導体と検知棒に電圧が誘起される。この誘起電圧を検知器内部にある抵抗（ R_d ）の両端電圧（ V ）で検知し、架線の加圧有無を運転台に表示させる。運転士は表示を確認し、パンタグラフの上昇等の操作を行う。

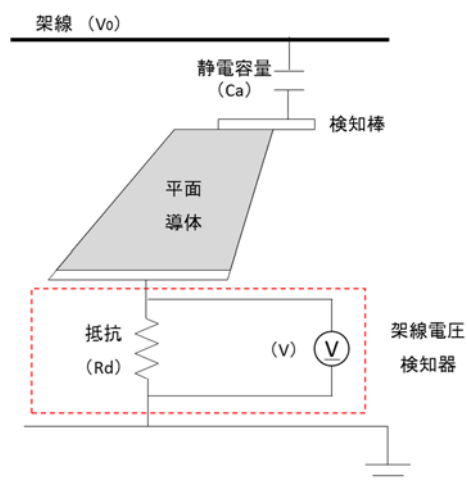


図 1.8 架線電圧検知機能の動作モデル

アンテナと架線との静電容量を C_a 、検知部の内部抵抗を R_d 、架線電圧を V_0 、 $\omega=2\pi f$ (f :周波数) とし、検知電圧 V は以下の式(1.1)より計算される。

$$V = \frac{R_d}{\sqrt{R_d^2 + 1/(\omega C_a)^2}} V_0 \quad \text{----- (1.1)}$$

構内無線アンテナとしての動作原理を示す (図 1.9)。車上→地上は、無線用端子に
入力された送信信号を伝送路 #2 経由で平面導体から送信電波として放射する。地上→
車上は、平面導体にて受けた電波を伝送路 #2 経由で無線用端子へ出力する仕組みとな
っている。この平面導体がモノポールアンテナの役割をすることにより、無線信号を空
間に伝え、電波の放射と電波の受信を行う。

なお、この無線アンテナの伝送路 #2 は先端が開放 (平面導体と絶縁状態) している
ため VHF 帯を通過させ、60 Hz を遮断している。一方伝送路 #1 と #3 は先端が短絡
(平面導体と導通状態) しており、60 Hz の信号を通過させ、その長さを波長に応じた
適切な長さとする事で VHF 帯の無線信号を遮断している。この仕組みにより、架線
電圧検知と構内無線アンテナの双方の機能を共用している。

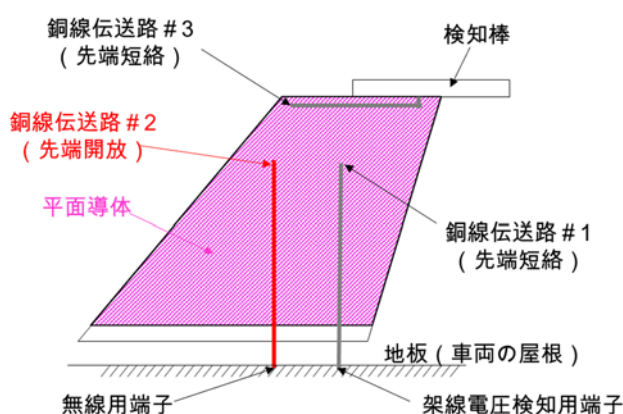


図 1.9 構内無線アンテナとしての動作原理

高速走行する新幹線では、このアンテナ形状が突起しているため騒音源の一つとなっ
ており、低騒音化が必要となった。低騒音化のためには、形状円滑化、小形化が必要と

なり、特に架線電圧を検知する検知棒を短縮することが必要となった。このため、従来アンテナと同等で低騒音化を満たすアンテナの開発に取り組んだ。

1.5 ミリ波の鉄道利用に向けた検討の変遷

ここでは、ミリ波の鉄道利用に向けた検討の経緯を述べる。ミリ波の鉄道への利用を想定した検討自体は 1980 年頃から開始されている。ドイツでは早くからミリ波の検討がなされており、日本においても 1980 年代後半から開始されている。この変遷について述べる。

1.5.1 ドイツにおけるミリ波利用の取組み

鉄道におけるミリ波通信試験について、古くは 1980 年代のドイツにおける実験結果が報告されている。1981 年 11 月～12 月ドイツにおいて伝送試験が行われた。40 GHz 帯において 1.2 kbps 及び 64 kbps の伝送試験が行われ、2 km 毎にアンテナを沿線 3 箇所を設置した区間で通信できたことが報告されている[1.5]。この成果はその後、2004 年上海に開業したトランスラピッド方式の常電導リニアモーターカーに活用されている [1.6]。

1.5.2 日本における鉄道へのミリ波利用の検討

日本国内においては、鉄道総合技術研究所、東北大学、三菱電機などが 1990 年頃からミリ波の鉄道における活用について検討を続けてきた。文献[1.7]においては中央線立川国立間、及び東海道新幹線新丹那トンネル、青函トンネルでの測定結果が示されている。文献[1.8]においては、上越新幹線燕三条駅付近の直線部及び曲線部において測定が実施され、見通し外まで比較的良好に伝搬することを示している。

また、文献[1.9]においては、新幹線におけるミリ波利用システムの提案がされており、サブキャリア多重化（Subcarrier Multiplex：SCM）光ファイバ伝送を用い、約 300 m 置きにミリ波無線アンテナを設置することで安定的な通信を確保できる旨の提案がされている。更に、2002 年には山梨リニア実験線においてもミリ波方式列車無線システムを設置した旨が文献[1.10]にて報告されている。

その他，建設中の北陸新幹線における実験[1.11]，100 GHz 帯無線機による北陸新幹線間の試験[1.12]など複数の報告があるが，新幹線曲線区間におけるミリ波の伝搬特性をシミュレーションにより解明する研究は実施されていない。

1.5.3 駅構内などスポットにおいてミリ波通信を鉄道に応用したシステムの例

一方，ミリ波を鉄道に応用した例は，いずれもある拠点における通信の例は複数紹介されている。一つは，ワンマン運転の列車において運転士が列車のドアを開閉する際に，運転席から容易にホームの状況を確認できるように，複数の監視カメラの映像を運転席に無線で伝送し運転席に取り付けられたモニタに表示するものである。映像を送信するために広い無線帯域が必要であり，このシステムでは 40 GHz 帯のミリ波を用いて伝送している[1.13]。また，JR 東海でも N700S 量産車の導入にあたり，主要駅と車両所において特定小電力無線方式による 60 GHz ミリ波を活用したデータ伝送をスポット的に利用している[1.14]。

1.5.4 ミリ波におけるレイトレースシミュレーションと鉄道への適用

5G 方式を想定したミリ波の伝搬特性を調査する検討は，中国，韓国で進められてきている。文献[1.15]においては，韓国大邱市における，28 GHz 帯 5G 方式の高速鉄道への活用に向けて，5G 移動通信システムの鉄道沿線における実測とレイトレースシミュレーションの比較が報告されている。これによると，高速鉄道環境においてレイトレースシミュレーションにより，現実の伝搬環境の方向に応じた経路減衰，遅延スプレッド，ライスフェージングにおける K ファクタ，コヒーレンスな帯域幅を予測することが可能であることが示されている。

1.6 研究の位置づけ

1.1 節で述べたような新幹線における無線通信における課題を解決することが，本研究の目的である。本研究にて，新幹線の低騒音化に向けたアンテナの改善と，新幹線に

おけるミリ波を活用した高速な通信の実現に取り組み、本論文にまとめた。本論文のおおまかな構成を表 1.1 に示す。

表 1.1 本論文の構成の概要

2章	目的	新幹線静電アンテナの低騒音化(小型化)
	既存技術の課題	新幹線登場当時は、架線電圧検知と無線の共用アンテナとして屋根上に出る部分が少なく効果の高いアンテナであったが、その後、内部構造を大きく改良せずに使用してきた。
	提案方式	インピーダンス整合を取りやすくした折返しダイポール構造のアンテナを提案。
	効果	高さを低く、検知棒を短くすることで、空力騒音が低減された。
3章	目的	新幹線沿線におけるミリ波伝搬特性の解明
	既存技術の課題	ミリ波電波が鉄道にとって有用であることは分かっていたが、曲線区間において電波の放射角の外でも電波が到達する理由が不明であり、全ての曲線区間において同じ条件が適用できるかどうか不明であった。
	提案方式	レイトレースシミュレーションにより、電波の放射角の外側においても電波が到達する理由を明らかにした
	効果	鉄道における全ての曲線区間において一定の効果があることを示した。
4章	目的	新幹線環境におけるミリ波列車無線システムの実用化
	既存技術の課題	高速ハンドオーバー機能の実装、ミリ波で顕著になる降雨減衰への対策
	提案方式	ミリ波列車無線システムを実用化するための高速ハンドオーバー機能、180mm/hの降雨時においても対応可能な降雨減衰対策
	効果	新幹線に適用できるミリ波列車無線システムを実用化した。
5章	目的	N700S確認試験車による走行試験での改善効果確認
	既存技術の課題	実際の新幹線列車に搭載して試験を未実施
	提案方式	提案した新型静電アンテナと新方式の列車無線システムを、実際の新幹線列車に搭載して試験を実施し、改善効果を示す。
	効果	提案方式の実用化が可能であることを確認した。

本論文では、最初に、新幹線の騒音低減のため、内部構造を大幅な改良した提案静電アンテナについて論ずる。

さらに、ミリ波列車無線の実現に向けての課題とその解決について論じる。前述の通り、新幹線に対する大容量通信手段を確立するためには、まとまった帯域が確保できるミリ波の利用が必要であった。しかしミリ波は直進性が高く降雨減衰が大きいため、曲線区間においては地上局の配置数が多くなる。これを解決するためには、曲線区間における伝搬環境を解明すること、多数の地上局とシームレスに通信を継続するための高速ハンドオーバ技術、豪雨環境における最低限の通信の継続のための降雨減衰対策が必要となる。

そして、提案された新幹線の新型静電アンテナと、新幹線用ミリ波列車無線システムの実現性を実際の新幹線車両による走行試験により確認し、その結果について論じる。以上が本論文の構成となる。

続いて本研究の各章における研究内容の位置づけを図 1.10 に示す。第 2 章では、新幹線静電アンテナの低騒音化について検討している。1.4 節で示した通り、新幹線の静電アンテナは、東海道新幹線車両の屋根から突起しているため騒音源の一つであるにも関わらず、新幹線の開業以来その外形は少し変化しているが、内部構造に変化はなかった。本アンテナの低騒音化のためには、特に架線電圧を検知する検知棒の短縮が必要である。そこで第 2 章では、折返しモノポール構造を採用と並列共振回路の採用により、本アンテナを小型化することを検討し、新型静電アンテナを製作した。本新型静電アンテナの有効性を計算と測定により実証し、また、降雨・積雪に対する影響を実験と計算で確認した。

続いて第 3 章では、新幹線環境におけるミリ波伝搬環境の解明について検討している。鉄道にミリ波を用いる検討は従来から実施されおり、古くは過去 1980 年代のドイツにおける実験結果が報告されている[1.5]。日本においても鉄道総合技術研究所が 1980 年代後半において鉄道におけるミリ波伝搬環境の測定を実施している[1.7,1.8]。しかし、鉄道環境におけるミリ波帯近傍のレイトレースシミュレーションは、5G を想定されたものは実施[1.15]されているが、鉄道専用無線を想定した 45 GHz 帯に関しては実施されていない。そこで、第 3 章では曲線区間における 45 GHz 帯における実測伝搬測定結果とレイトレースシミュレーションとの比較を行った。

第 4 章では、新幹線に適用するミリ波列車無線システムの構成について検討している。ミリ波での新幹線を想定した試作、試験結果については 40 GHz 帯については文献[1.11]、100 GHz 帯においては、文献[1.12]で検討されている。しかしこれらのいずれもが、試作と試験にとどまっており、セルを構成する周波数配置やセル間ハンドオーバーなど実用化に繋がるシステム構成までの検討に至っていない。そこで、第 4 章では新幹線ミリ波列車無線システムとしての実用化を想定した、実システムの検討、提案及びそれに伴う曲線区間における基地局配置を検討した。

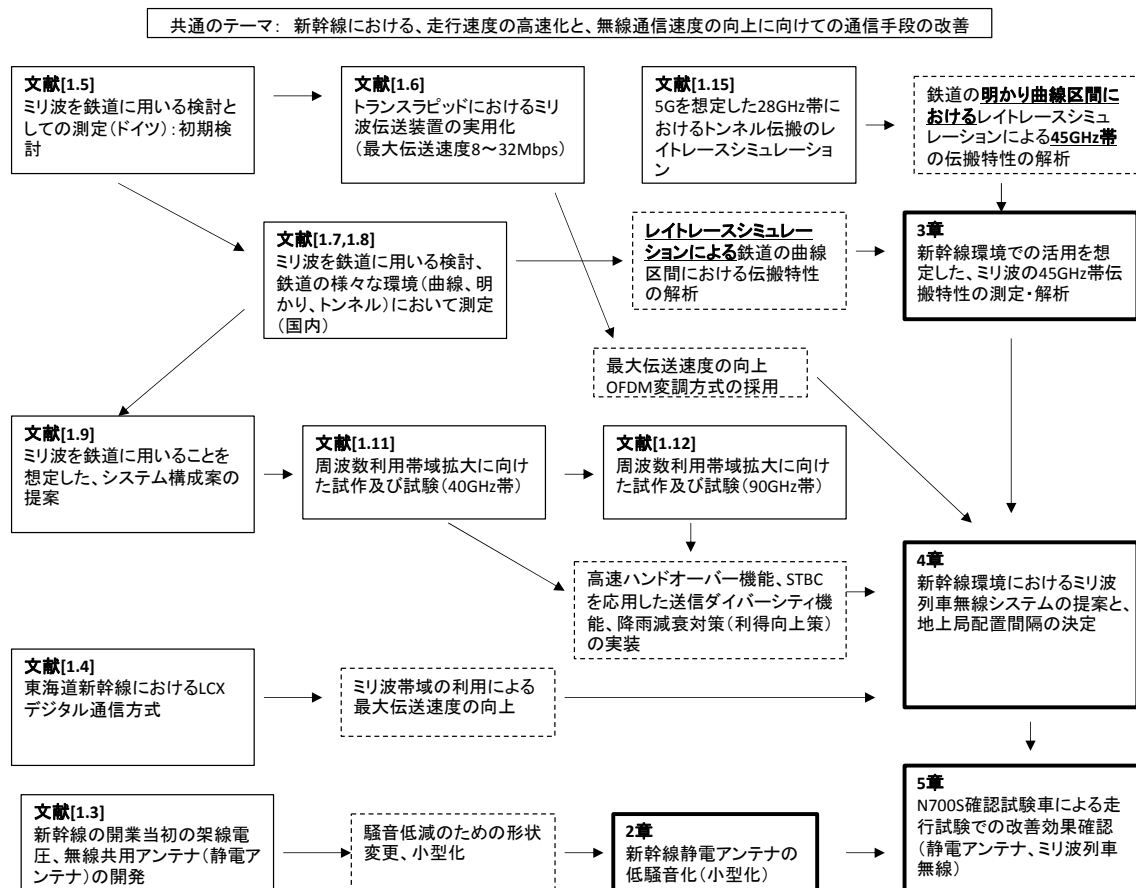


図 1.10 研究の位置づけ

第 5 章では、東海道新幹線 N700S 確認試験車[1.13]による走行試験結果について検討している。第 2 章で試作した新幹線用の新型静電アンテナと、第 4 章で検討、試作した新幹線ミリ波列車無線システムについて、東海道新幹線 N700S 確認試験車に搭載し、実際の新幹線列車において採用されることを想定し、走行試験によりその性能を評価し、要求性能を満足することを確認した。

最後に第 6 章において、本論文の研究成果をまとめている。

1.7 参考文献

- [1.1] 新幹線支社運転車両部列車課（信号通信課編抜粋），新幹線通信設備，日本国有鉄道，東京，1964.
- [1.2] 北原文夫他，最新の国鉄通信技術，社団法人鉄道通信協会，東京，1987.
- [1.3] 黒田忠光，久保田肇，永岡 栄，喜連川隆，武市吉博，”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，vol.38, no.4, pp.102-105, Apr. 1964.
- [1.4] 杉山寛之，”東海道新幹線車内インターネット接続サービスの導入，” 日本鉄道電気技術協会，鉄道と電気技術，vol.11, pp.10-14, Nov. 2008.
- [1.5] H. Meinel, A. Plattner, and G. Reinhold, “A 40 GHz railway communication system,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.SAC-1, No.4, pp.615-622, Sept. 1983,
- [1.6] J. Schlichting and M. Müller, "The Transrapid Radio System, " SIGNAL+DRAHT INTERNATIONAL, pp.34-39, Eurailpress, 1-2/2005.
- [1.7] 佐々木伸，山村博，川村武彦，”ミリ波による対列車通信，” 鉄道総研報告 Vol.3, No.5, pp.17-25, May 1989.
- [1.8] 山村博，林秀一，鈴木尚子，佐々木達也，”大容量ミリ波無線システム，” 鉄道総研報告 Vol.9, No.11, pp.37-42, Nov. 1995.
- [1.9] K. Abe, T. Hattori, and H. Koizumi, “Millimeter-wave radio communication system between trains and ground facilities,” IEEE Proc. 12th International Conference on Information Networking, pp.363-368, Jan. 1998.
- [1.10] 秋山良夫，新倉弘久，”山梨リニア実験線の列車無線システム，” 信学誌，Vol.85, No.1, pp.54-56, Jan. 2002.

- [1.11] 塚本薫, 加藤泰典, 梅田周作, 河原伸幸, 永山博幸, 川崎邦弘, 中村一城, 辻宏之, 岡崎彰浩, 石津文雄, "40GHz 帯を用いた移動体無線通信システムのフィールド試験," 信学技報, RCS2013-149, pp.43-48, Oct. 2013.
- [1.12] 中村一城, 岩澤永照, 岩城詞也, 竹内恵一, 川崎邦弘, 柴垣信彦, 梁取勝也, 佐藤洋介, 藤井誠人, 加島謙一, 菅野敦史, 山本直克, 川西哲也, "100GHz 帯ミリ波による対列車通信システムのフィールド試験," 信学技報, RCS2019-10, p45, Apr. 2020.
- [1.13] 川本真紀夫, "解説 鉄道向け無線システムの概要," 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, No.42, 2017 年秋号.
- [1.14] JR 東海ニュースリリース, "次期新幹線車両「N700S」量産車の仕様および投入計画について," Jan. 2019.
- [1.15] D. He, B. Ai, K. Guan, Z. Zhong, B. Hui, J. Kim, H. Chung, and I. Kim, "Channel measurement, simulation, and analysis for high-speed railway communications in 5G millimeter-wave band," IEEE Trans. On Intelligent Transportation Systems, Vol.19, No.10, pp.3144-3158, Oct. 2018.

第2章 新幹線静電アンテナの低騒音化

東海道新幹線車両の屋根上に設置されている架線電圧検知・無線通信共用アンテナ（以下静電アンテナと呼ぶ）は、車両の屋根から突起しているため騒音源の一つであるにもかかわらず、新幹線の開業以来その内部構成に変化がなかった。本章では、本アンテナの低騒音化のため、折り返しモノポール構造の採用と並列共振回路の付加により、検知棒を短縮し小形化したアンテナを提案する。検知棒を短縮すると架線電圧検知性能が劣化するが、騒音を低減するアンテナレドーム形状内でアンテナ基板面積を可能な限り大きくすることで架線電圧検知性能の劣化を実用上問題無い範囲に収めた。本アンテナの有効性を計算と測定により実証するとともに、積雪・降雨の架線電圧検知性能への影響を実験と計算により確認した。

2.1 はじめに

東海道新幹線の先頭車両および最後尾車両の屋根上に設置されている架線電圧検知／無線通信共用アンテナ[2.1]（以下静電アンテナという）は、60 Hz の架線電圧を検知する機能と、VHF 帯の無線通信を行う機能の双方を有している。高速走行する新幹線では、このアンテナ形状が突起しているため騒音源の一つとなっており、低騒音化のため、形状円滑化、小形化が必要であり、特に架線電圧を検知する検知棒の短縮が必要である。

これまで、LCX を用いた誘導無線方式以外の列車無線用アンテナとしては、屋根上に設置する低姿勢の容量装荷モノポールアンテナ[2.2]や環状スロットアンテナ[2.3]が知られている。また、容量装荷モノポールを素子アンテナとした八木宇田アンテナ[2.2, 2.4-2.5]や、ビーム切替型アレーアンテナ[2.6]が検討されている。しかし、これらのアンテナは VHF 帯／UHF 帯の無線通信専用である。架線電圧検知との共用アンテナは[2.1]の報告のみであり、本アンテナの内部構造の改善は初めての検討である。また、海

外の鉄道では架線電圧検知機能を用いておらず、諸外国においても検討例は見当たらない。

本章では、折り返しモノポール構造[2.7]の採用と並列共振回路の付加により、検知棒の長さを短縮し小形化した架線電圧検知／無線通信共用アンテナ[2.8]を提案する。検知棒を短縮すると架線電圧検知性能が低下するが、騒音を低減するアンテナレドーム形状内で、アンテナ基板面積を可能な限り大きくすることで低下を最小限に抑制する。本アンテナの有効性を計算と測定により確認するとともに、積雪・降雨時の影響を検討する[2.9, 2.10]。

2.2 従来アンテナの構成と計算結果

2.2.1 静電アンテナの機能

東海道新幹線では、留置車両のパンタグラフを上昇する前にトロリ線の加圧状態を確認する取扱いとしているが、パンタグラフの下降時は車両主回路の電圧検知器を用いて電車線の加圧状態の確認ができないため、別の方法で加圧状態の確認を行う必要があり、静電アンテナの架線電圧検知機能を用いる。また、この静電アンテナは、駅や車両所構内での入換に伴う駅信号扱所との通話を行うための VHF 帯アンテナ機能（構内無線機能）を有している。無線通信では、垂直偏波を使用する。

2.2.2 従来アンテナの構成

図 2.1 に、従来アンテナの構成を示す。図 2.1 において、 λ_c は VHF 帯無線通信（比帯域 11.3%, $f_1 \sim f_2$ ）の中心周波数 f_c における自由空間波長である。port 1 は無線通信の端子、port 2 は架線検知電圧の端子である。アンテナは、地板に垂直に配置された両面基板（厚み $0.001\lambda_c$, $\varepsilon_r = 4.4$, $\tan\delta = 0.02$ ）と検知棒（材質：アルミニウム、直径 $0.01\lambda_c$ ）から構成され、基板の裏面全体に基板外形と同じ形状の平面状のアンテナ導体が形成されている。検知棒の長さは $0.28\lambda_c$ 、アンテナ導体の高さは $0.17\lambda_c$ である。60 Hz では、検知棒とアンテナ導体に、架線との間の静電容量 C_a により、交流電圧が誘起される。なお、図 2.1 に示す静電容量 C_a は、架線とアンテナの間に発生する静電容量を等価的に表したものである。VHF 帯では、アンテナ導体がモノポールとして動作する。基板

の表面には、先端開放線路、先端短絡線路 1, 2 が形成されている．先端開放線路は、port 1-アンテナ導体間を 60 Hz で遮断させ、VHF 帯で直列リアクタンスを介して接続するために設けている．また、電気長が約 $\lambda_c/4$ の先端短絡線路 1, 2 により、それぞれ、port 2-アンテナ導体間、アンテナ導体-検知棒間を 60 Hz で短絡し VHF 帯で遮断させている．

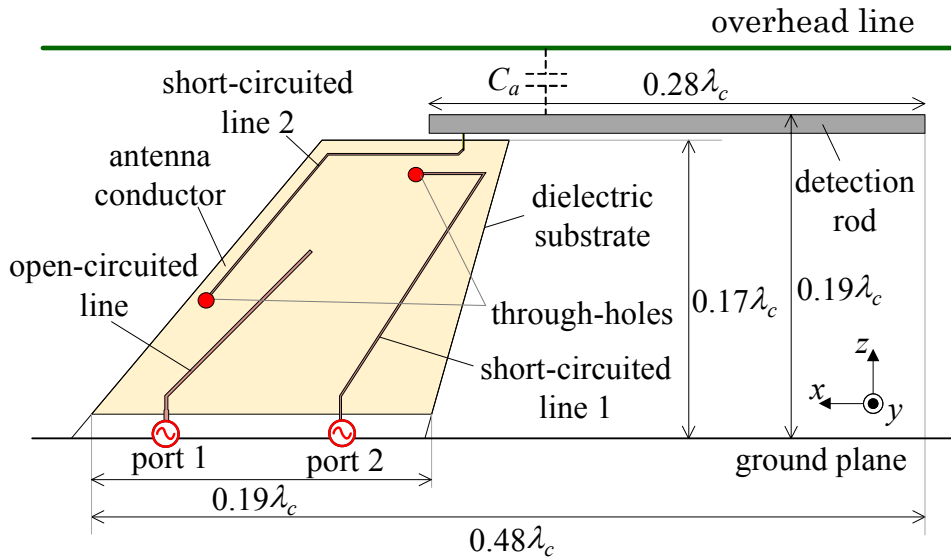


図 2.1 従来の静電アンテナの構成

2.2.3 架線電圧検知性能

新幹線の交流電化区間においては、静電容量 C_a により、アンテナに 60 Hz の交流電圧が誘起され、これを内部抵抗 R_d の検知器（図 2.1 の port 2 に接続）で検知する．架線の電圧, 角周波数をそれぞれ V_0, ω とすると、検知電圧 V_d は下式で表される（式(1.1)の再掲）．

$$V_d = \frac{R_d}{\sqrt{R_d^2 + \frac{1}{(\omega C_a)^2}}} V_0 \quad (2.1)$$

式(2.1)から分かるように、検知電圧 V_d は静電容量 C_a を大きくするほど高くなる．

図 2.2 に、静電容量 C_a の計算モデルを示す．静電容量の計算は、準静電磁界解析（境界要素法）により行う．車両(GND)の屋根から 1.4 m 上方に長さ 1000 m の架線を設

け，車両屋根上にアンテナを設置する．アンテナは架線の長さ方向の中心に配置する．図 2.2 のモデルの中で，図 2.1 における架線と検知棒・アンテナ導体の間の静電容量 C_a を算出し，先端開放線路は省略する．架線と車両(GND)，検知棒・アンテナ導体と車両(GND)の間にも静電容量が発生するが，前者は内部抵抗 R_d にかかる電圧 V_d には無関係であり，後者は内部抵抗 R_d と比較して非常に大きいリアクタンスとなるため無視できる．従来アンテナの静電容量の計算結果は 1.27 pF であり，これを本章でのアンテナ小型化検討の参考値とする．

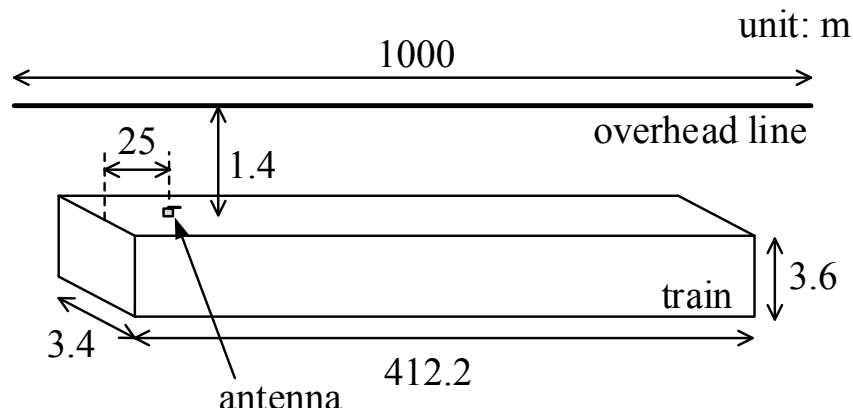


図 2.2 静電容量 C_a の計算モデル

2.2.4 無線通信アンテナ性能

本アンテナは更に，VHF 帯無線通信アンテナとして機能する．従来アンテナの電気的特性を把握するため，無線通信性能（VHF 帯）の計算を行う．地板は無限地板とし，計算には有限要素法を用いる．実使用状態を模擬するため，図 2.1 のモデルに厚み $0.001 \sim 0.003 \lambda_c$ の FRP 製アンテナレドーム（ $\epsilon_r=3.7$, $\tan\delta=0.012$ ）を被せた条件としている．また，計算の簡単化のため，port 2 と先端短絡線路 1，架線は削除する．図 2.3 に S_{11} の計算結果を示す．入力インピーダンス軌跡にキंकがあり，これにより広帯域化していることが分かる．使用帯域 $f_1 \sim f_2$ において， $VSWR \leq 2$ である．

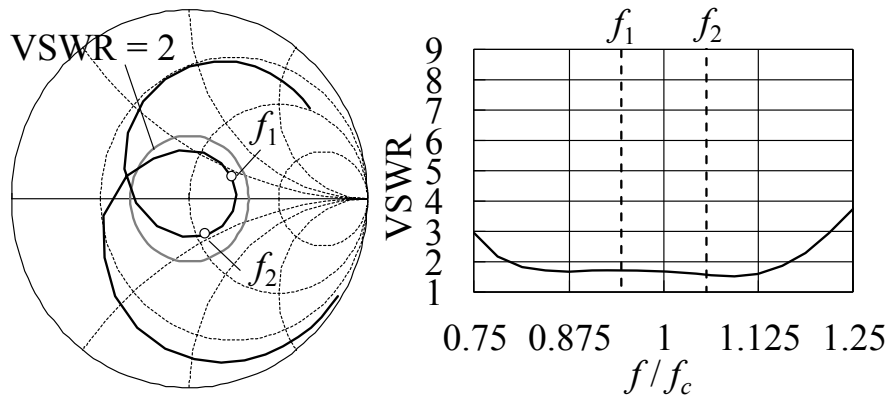


図 2.3 従来アンテナの S_{11} 計算結果

従来アンテナの動作を考察するため，キャラクタリスティックモード解析[2.11]を行う．キャラクタリスティックモード解析では，簡単のため図 2.1 の導体部分のみで計算を行う．また，放射に寄与する電流の分布を確認するため，先端開放線路と先端短絡線路 2 を削除し，port 1 とアンテナ導体を最短経路で接続するとともに，アンテナ導体と検知棒は非接続とする（図 2.4）．図 2.5 に S_{11} の計算結果を示す．

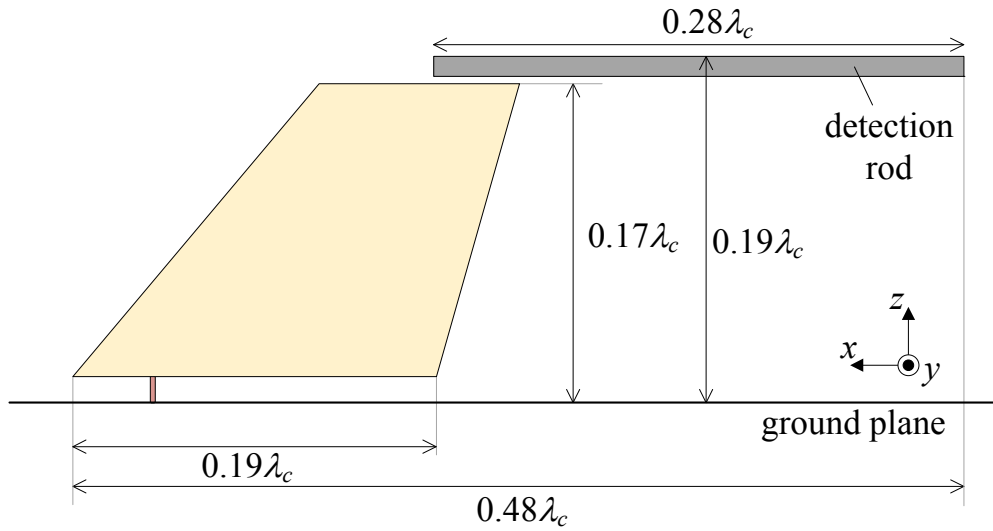


図 2.4 キャラクタリスティックモード解析における計算モデル

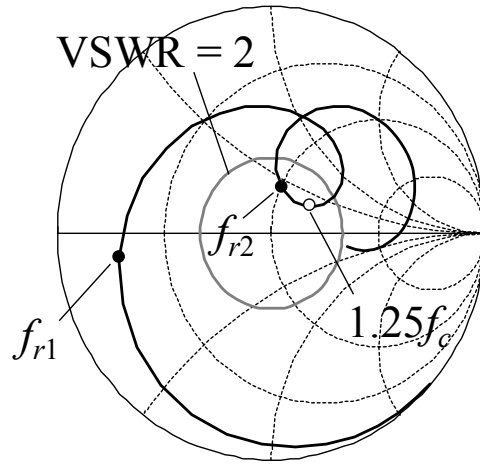


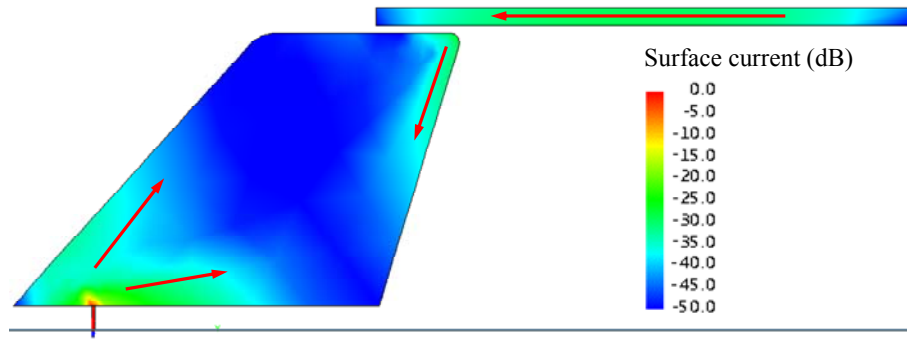
図 2.5 従来アンテナで線路と誘電体を削除した時の S_{11} 計算結果

線路と誘電体部分を削除すると入力インピーダンスのキンクが高周波数側にシフトするため、キンクのある周波数 $1.25f_c$ でキャラクタリスティックモード解析を行う．表 2.1 に，mode significance の計算結果を示す．

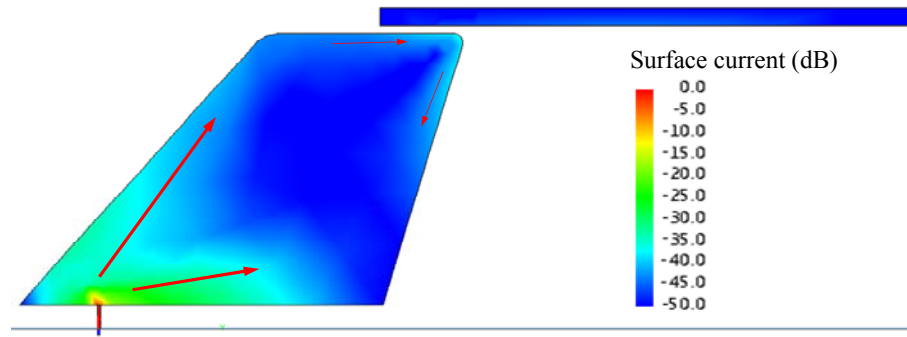
表 2.1 mode significance の計算結果 ($f = 1.25 f_c$)

mode index	mode significance
1	0.53
2	0.17
3	0.01

mode significance の大きい mode 1, 2 の表面電流密度分布を図 2.6 に示す．なお，図 2.6 の表面電流密度は最大値で規格化しており，矢印の向きは位相を表している．モード 1 はアンテナ導体の左下に流れる電流と，アンテナ導体の右上及び検知棒に流れる電流が逆相となっており，アンテナ導体と検知棒が $3/4$ 波長のモノポールとして動作していると考えられる．検知棒が長い場合に，検知棒とアンテナ導体が空間を介して電磁結合しモード 1 が生じると考えられる．モード 2 はアンテナ導体が $1/4$ 波長のモノポールとして動作するモードである．



(a) mode 1



(b) mode 2

図 2.6 キャラクタリスティックモード解析による表面電流計算結果 ($f = 1.25 f_c$)

図 2.7 に、mode significance の周波数特性の計算結果を示す。mode significance が最大となる周波数は、モード 1, 2 においてそれぞれ $1.41 f_c$, $0.75 f_c$ である。図 2.5 において、アンテナが直列共振する周波数をアドミタンス実部が極大となる周波数と定義すると、直列共振周波数は低い方から $f_{r1} = 0.72 f_c$, $f_{r2} = 1.31 f_c$ である。モード 1, 2 の mode significance が最大となる周波数は、それぞれ f_{r2} , f_{r1} におおむね対応している。したがって、モード 1, 2 の 2 つの共振により従来アンテナの入力インピーダンスが 2 共振特性になっていると考えられる。

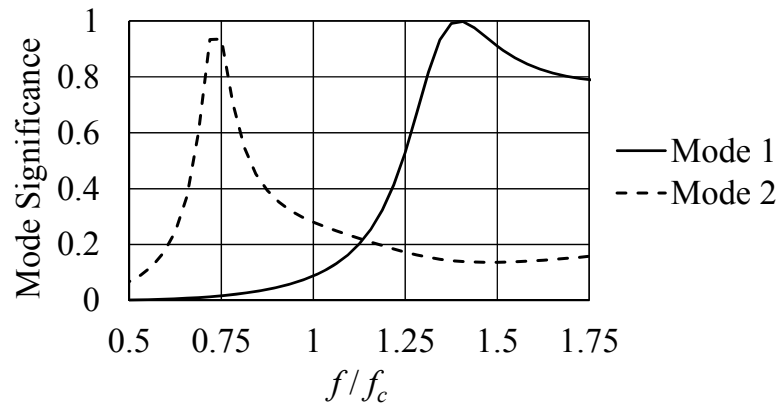


図 2.7 mode significance の周波数特性

図 2.8 に、従来アンテナ（図 2.1 でレドーム有り，無限地板とした場合）の放射パターン計算結果を示す．無線通信においては，基地局が水平方向付近にある場合が多いため，水平面の利得が重要となる．垂直偏波 E_θ の水平面（ xy 面）内平均化利得は， f_1 で 1.3 dBi， f_2 で -0.3 dBi である．従来アンテナでは，アンテナ導体と検知棒が電磁結合し，検知棒からの放射が大きくなる．したがって，図 2.4 における z 軸方向（天頂方向）の利得が高くなり，これにより水平面内利得が低下している．

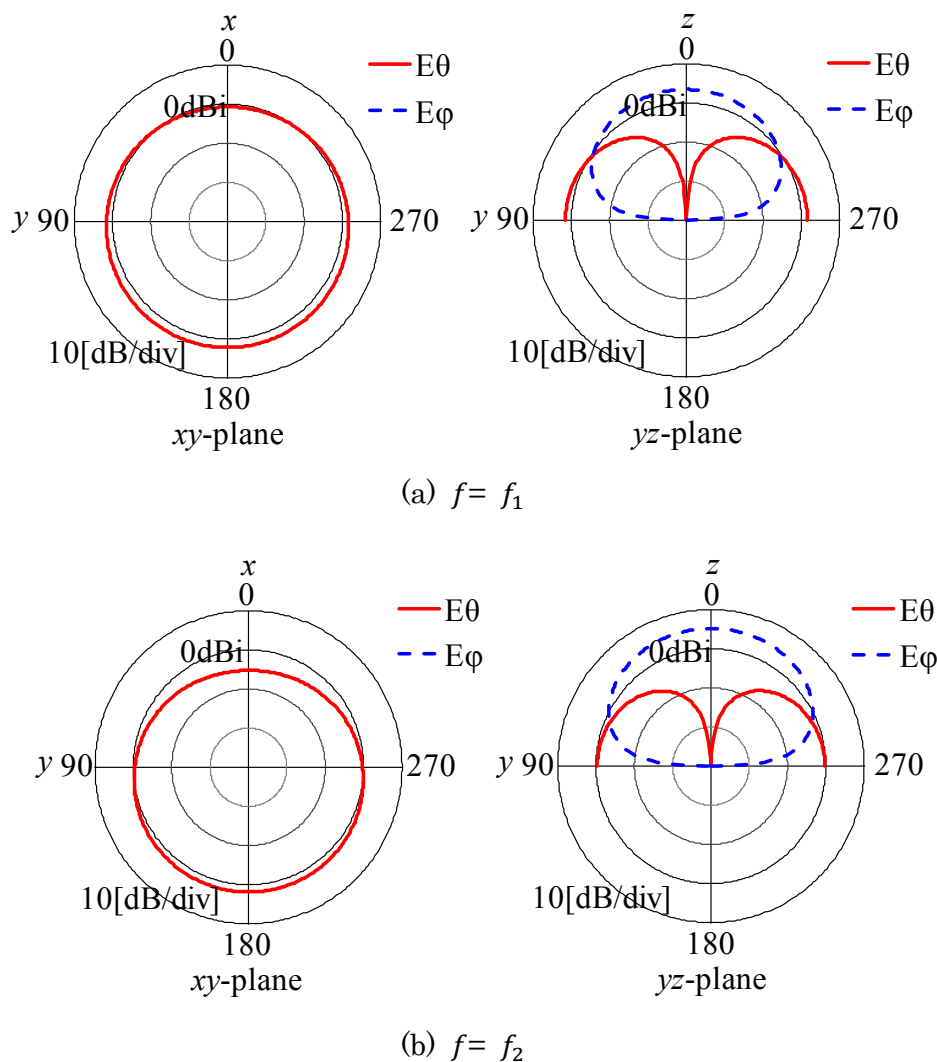


図 2.8 従来アンテナの放射パターン計算結果

2.3 提案アンテナの構成と計算・測定結果

2.3.1 提案アンテナの外形

図 2.9 に、従来アンテナと提案アンテナのレドーム外形を示す。提案アンテナでは、従来アンテナを低騒音化するにあたり、空気力学の知見を踏まえ、レドーム形状を円滑化するとともに、検知棒の長さを 41 %短縮する。また、積雪時にも架線電圧検知機能を確保するため（積雪時の影響は 2.4 節参照）、アンテナの高さを 5%だけ低背化する。

この形状の制約の中で, 架線電圧検知性能と無線通信アンテナ性能を確保することを目的とする.

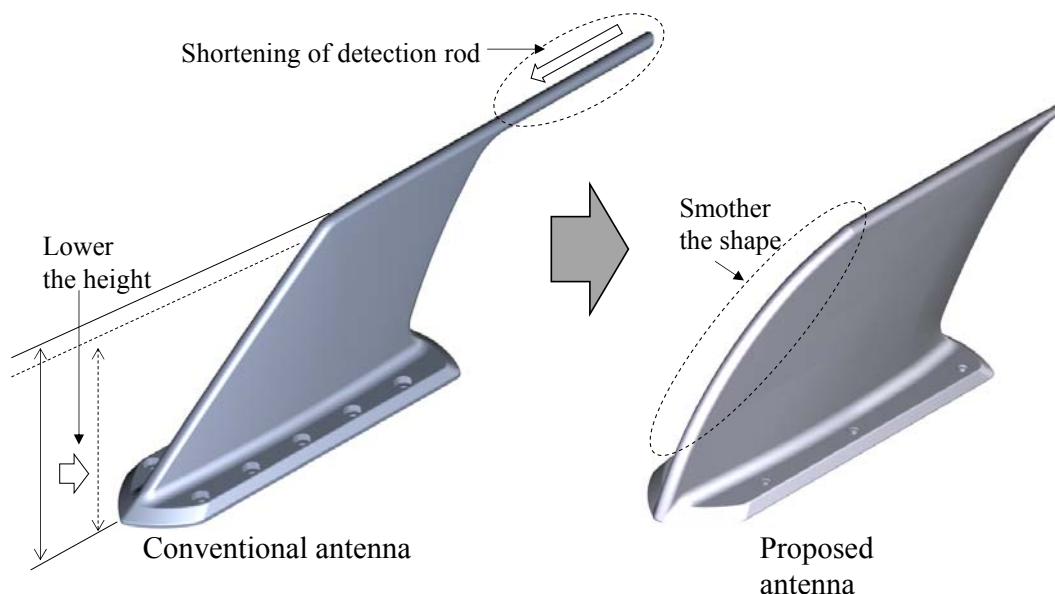


図 2.9 従来アンテナと提案アンテナの外形

2.3.2 提案アンテナの構成

図 2.10 に, 提案アンテナの構成を示す. 検知棒の長さを $0.17\lambda_c$ とし従来アンテナから 41 % 短縮すると同時に, 検知棒を +x 方向に $0.08\lambda_c$ 移動させアンテナの横幅を小型化する. また, アンテナ高さを $0.18\lambda_c$ とし, 従来アンテナより 5% 低下させる. 提案アンテナでは, 検知棒を短縮したため, 図 2.6 における検知棒とアンテナ導体が共振するモード 1 が使用帯域から大きく外れ, キンクが消滅するとともにインピーダンス実部が低くなる. 一方で, 架線検知電圧を高くするためには, アンテナ導体の面積を大きくする必要がある.

そこで, 架線電圧検知性能と無線通信性能を両立するため, 平面状のアンテナ導体にスリットを設け, 折り返しモノポール構造とすることで, インピーダンス実部を高くする. そのため, 基板裏面の下部に, 平面状の GND 導体を設ける. また, 電気長が約 $\lambda_c/4$ の先端開放線路 1, 2 は, それぞれ, port 1-アンテナ導体間, GND 導体-アンテナ導体

間を 60 Hz で遮断し VHF 帯で短絡させるために設ける．そして，インダクタ L_1 , L_2 により，それぞれ，port 2-アンテナ導体間，アンテナ導体-検知棒間を 60Hz で短絡し VHF 帯で遮断させる．更に，port 1 の近傍に先端開放線路 3，先端短絡線路から成る並列共振回路を設置することで，広帯域整合させる．なお，インダクタ L_1 , L_2 は，基板上のスパイラル状導体により形成し， $L_1=2.4\ \mu\text{H}$, $L_2=2.5\ \mu\text{H}$ とした．これにより，インダクタのリアクタンスは，60 Hz では $0.9\ \text{m}\Omega$ と無視できるほど小さくなり，VHF 帯では $2\ \text{k}\Omega$ 以上とほぼ開放になる．

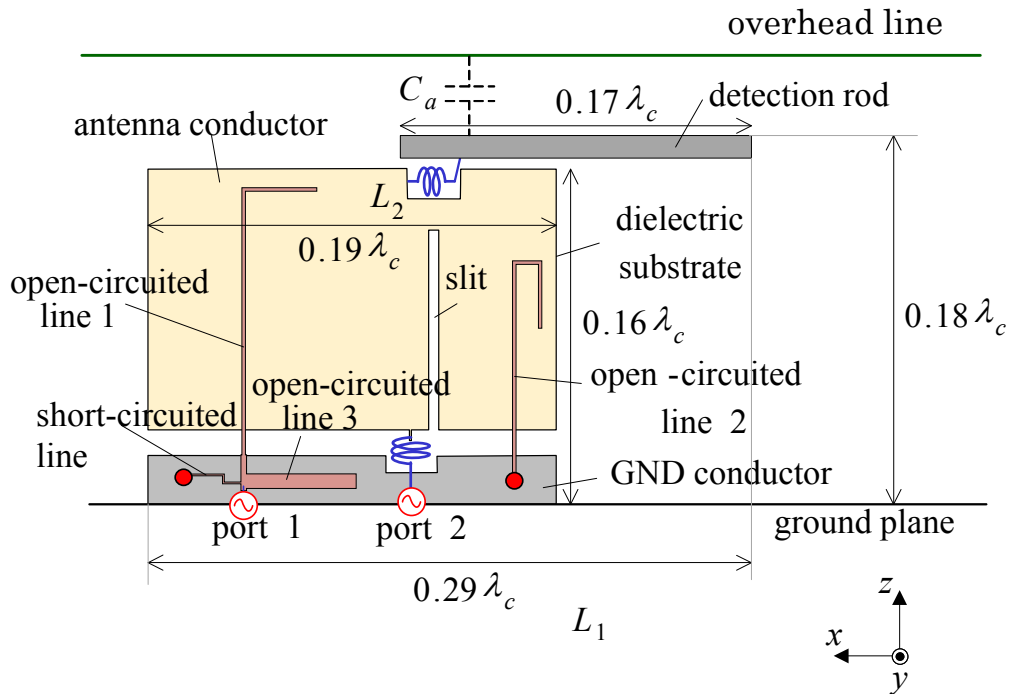


図 2.10 提案アンテナの構成

2.3.3 架線電圧検知性能の計算結果

図 2.11 に示すように，アンテナ導体の幅 w_a を変化させて，静電容量 C_a の計算を行う．なお，図 2.10 の各種線路，スリット，インダクタの影響はほとんど無いため，ここでは省略する．架線，車両の条件は図 2.2 と同じである．図 2.12 に， w_a を変化させた時の C_a の計算結果を示す．アンテナ導体の横幅を大きくするほど，静電容量 C_a が大きくなることを確認できる．すなわち，検知棒の短縮による C_a の減少を抑制するため

には、アンテナ導体を可能な限り大きくする必要がある．そこで、図 2.9 のアンテナレドームの内部に基板を収める条件で静電容量 C_a を確保するため、アンテナ導体の形状を従来アンテナから変更している．具体的には、図 2.13 に示すように、もともと台形であったアンテナ導体の形状について、架線に近い上部側を大きくすることにより静電容量 C_a をできるだけ大きくする．図 2.18 に示す最終的な基板の面積は、図 2.10 で $w_a = 0.19 \lambda_c$ の場合とほぼ等価であり、この時、 $C_a = 0.99 \text{ pF}$ である．従来アンテナ (1.27 pF) に対し、検知棒短縮・移動により約 34%劣化し、基板拡大により約 19%改善する．結果的に静電容量は 0.78 倍に低下するが、降雨降雪や新幹線周囲環境等の影響を考慮し、架線加圧の有無の確認という目的は達せられるようシステム設計しており実用上は問題ないことを確認した．

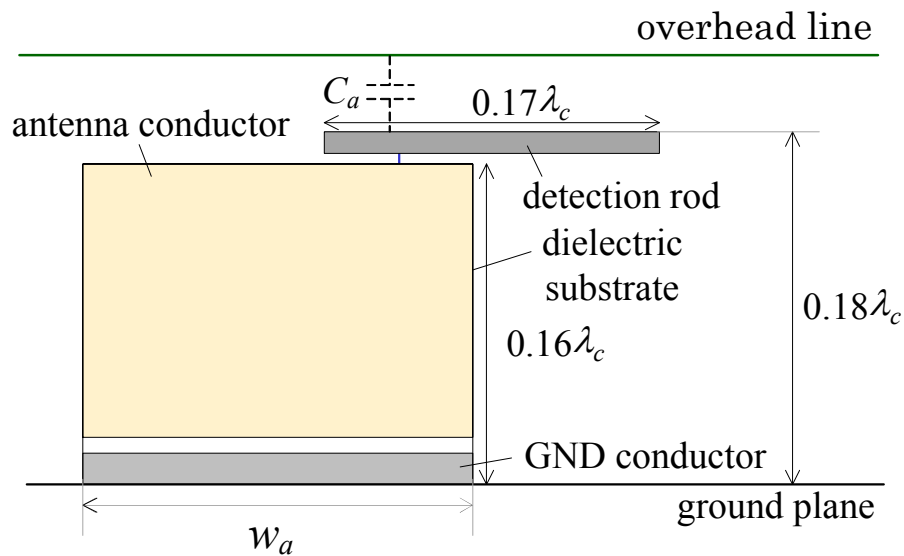


図 2.11 アンテナ導体の幅 w_a を変化させた時の計算モデル

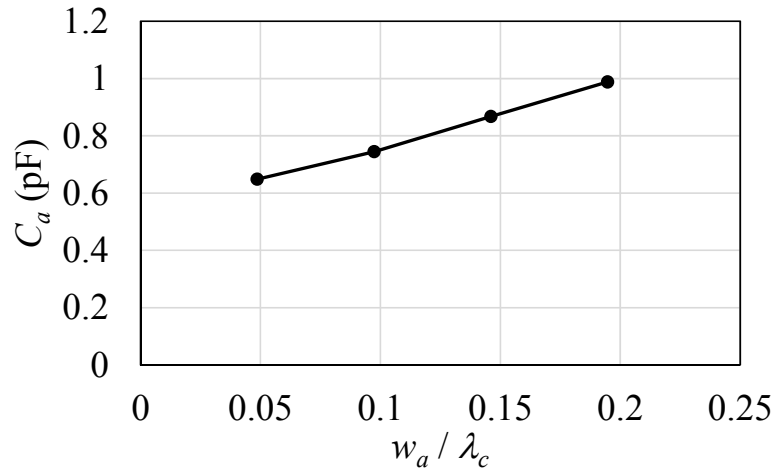


図 2.12 w_a を変化させた時の静電容量 C_a の計算結果

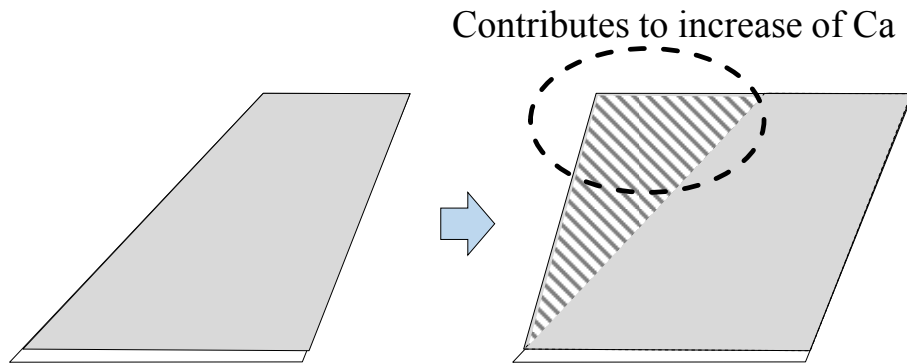


図 2.13 アンテナ導体の形状変更イメージ

2.3.4 無線通信アンテナ性能の計算結果

本項では、地板は無限地板とする．提案アンテナの動作を説明するために、まず、図 2.14 に示すモデル A, B について計算を行う．図 2.14 には、モデル A, B の S_{11} 計算結果を併せて示す．モデル A は、従来アンテナにおいて検知棒の長さを短くした場合におおよそ相当しており、図 2.10 において、先端開放線路 2, 3, 先端短絡線路、スリットを削除したモデルである．提案アンテナでは検知棒を短縮したため、従来アンテナにあったキंकが消滅するとともにインピーダンス実部が低くなることが確認できる．モデル B は、モデル A にスリット(長さ $0.10 \lambda_c$ 、幅 $0.005 \lambda_c$)と先端開放線路 2 を設け、折り返しモノポール構造としたモデルである．折り返しモノポール構造とすることで、

インピーダンス実部を高くできることが分かる．最後に，図 2.10 に示すように，port 1 の近傍に先端開放線路 3，先端短絡線路から成る並列共振回路を設置する．図 2.15 に，図 2.10 のモデルの S_{11} 計算結果を示す．並列共振回路の付加により，入力インピーダンスにキंकが現れ広帯域化することが確認できる．VHF 帯の比帯域 26.4% で $VSWR \leq 2$ が得られている．図 2.16 に，提案アンテナのポート間結合 $|S_{21}|$ の計算結果を示す． $|S_{21}|$ は VHF 帯において -30 dB 以下であり，インダクタ L_1 により十分低減されていることが確認できる．

図 2.17 に，提案アンテナの放射パターンの計算結果を示す．垂直偏波 E_θ の水平面 (xy 面) 内平均化利得は f_1 で 4.4 dBi, f_2 で 4.2 dBi であり，従来アンテナより f_1 で 3.1 dB, f_2 で 4.5 dB 向上している．これは，検知棒を短縮することにより，検知棒からの放射を小さくして z 軸方向の利得を低くできたためである．

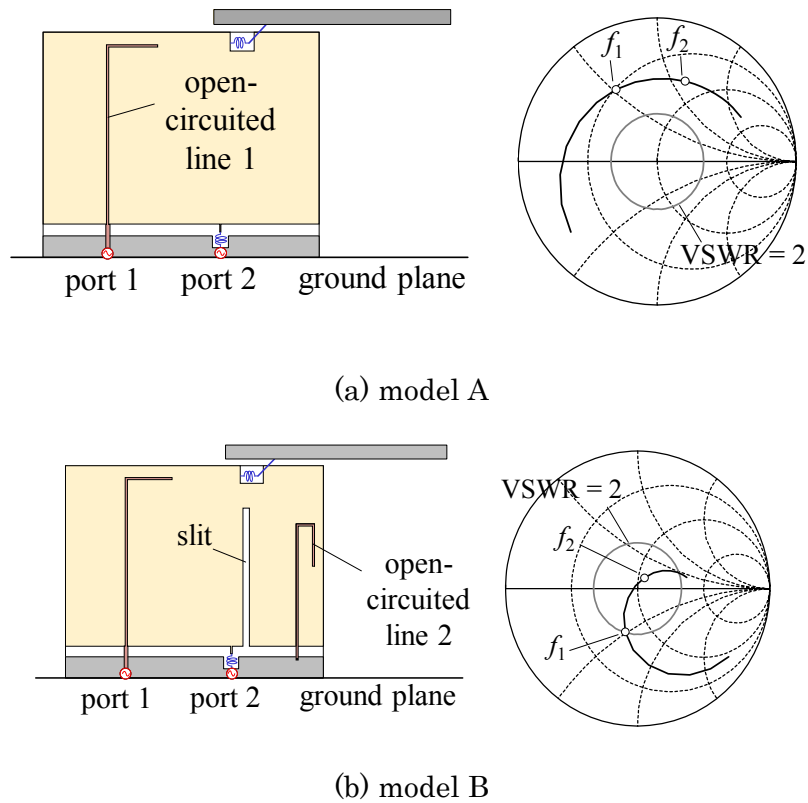


図 2.14 モデル A, B と S_{11} 計算結果

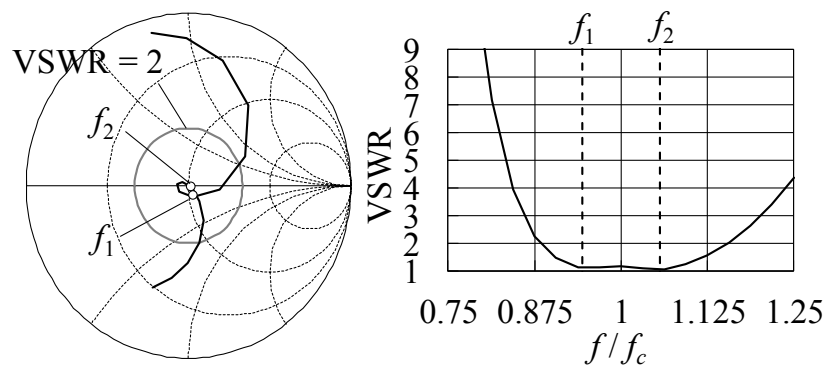


図 2.15 提案アンテナ (図 2.10) の S_{11} 計算結果

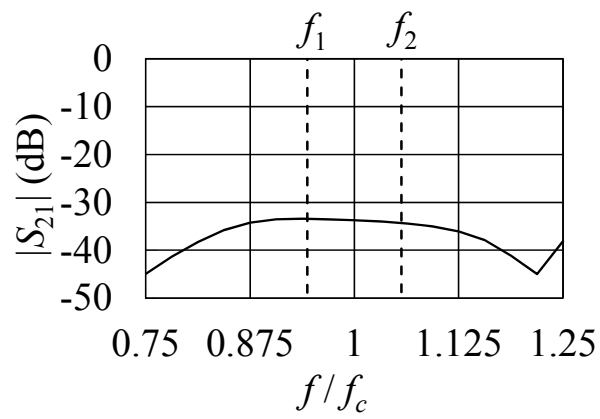


図 2.16 提案アンテナ (図 2.10) の S_{21} 計算結果

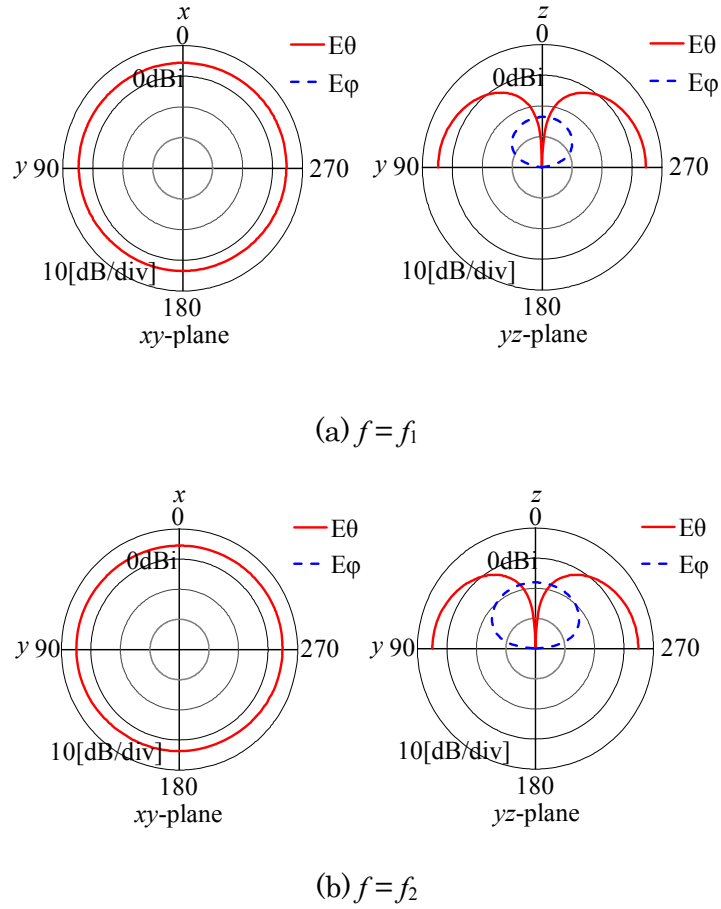


図 2.17 提案アンテナ (図 2.10) の放射パターン計算結果

2.3.5 測定結果

図 2.18 に試作した提案アンテナを示す．FRP 製アンテナレドームを考慮した再設計を行い，基板上の導体パターンを微修正しているが，アンテナの基本構成は図 2.10 と同じである．

図 2.19 に，試作アンテナ測定時の地板，架線の条件を示す．架線検知電圧測定時には， $d_g = 2.4 \text{ m}$ とし，測定設備の都合により，架線が地板に対して垂直となる部分を設けている．測定した検知電圧から，式(2.1)より静電容量 C_a を逆算すると 0.74 pF となる．準静電磁界解析による C_a の計算値は 0.78 pF であり，測定と計算はほぼ対応していることが分かる．本モデルでは架線の長さが図 2.2 のモデルより短いため，静電容量 C_a が小さくなる．

無線性能測定時には、図 2.19 において、 $d_g=0.80\lambda_c$ とし、架線を除去する。図 2.20 に、 S_{11} の測定・計算結果を示す。測定は計算と良く対応していることが確認できる。また、2重共振により広帯域化しており、VHF 帯の比帯域 31.1%で $VSWR \leq 2$ が得られている。

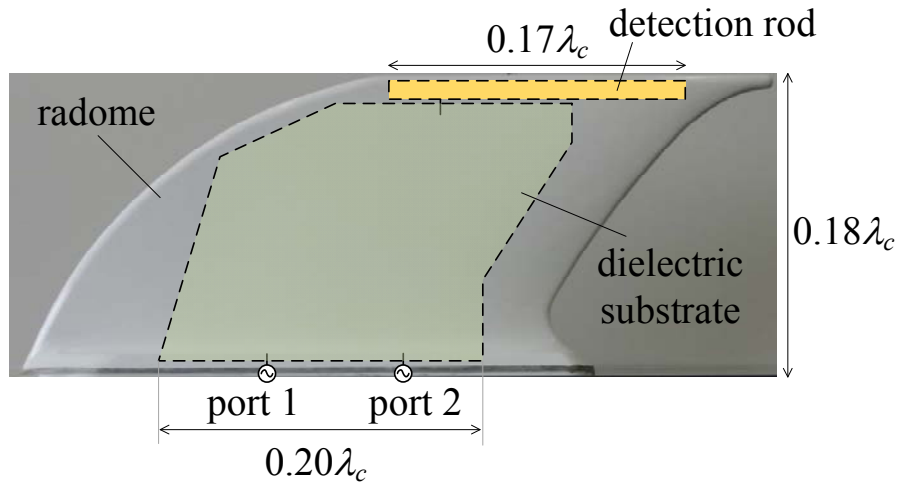


図 2.18 試作した提案アンテナ

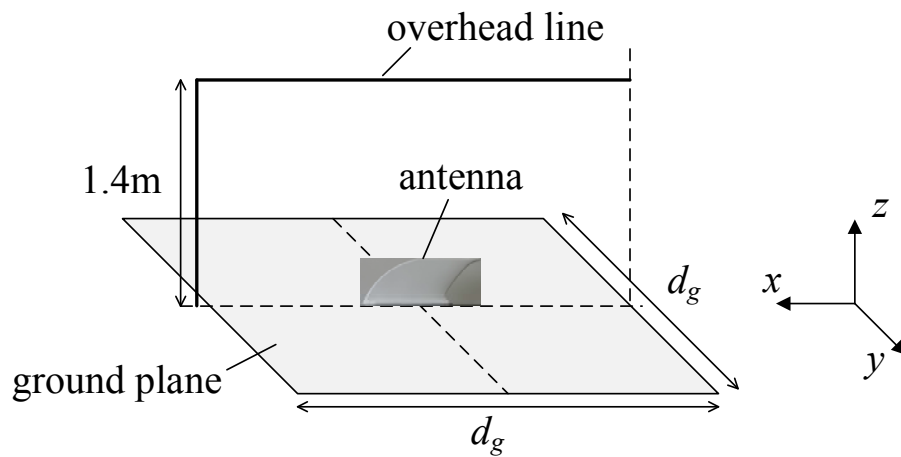


図 2.19 試作アンテナ測定時の地板，架線の条件

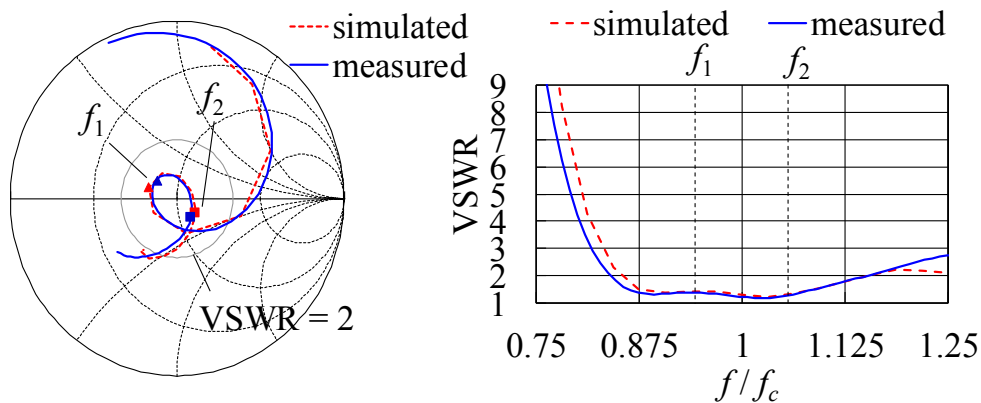


図 2.20 試作アンテナ（図 2.18）の S_{11} 測定・計算結果

図 2.21 に、水平面（ xy 面）の放射パターン測定・計算結果を示す．測定は計算と傾向が対応しており，垂直偏波 E_θ の水平面内平均化利得の測定値は， f_1 で -1.2 dBi， f_2 で -1.3 dBi である．

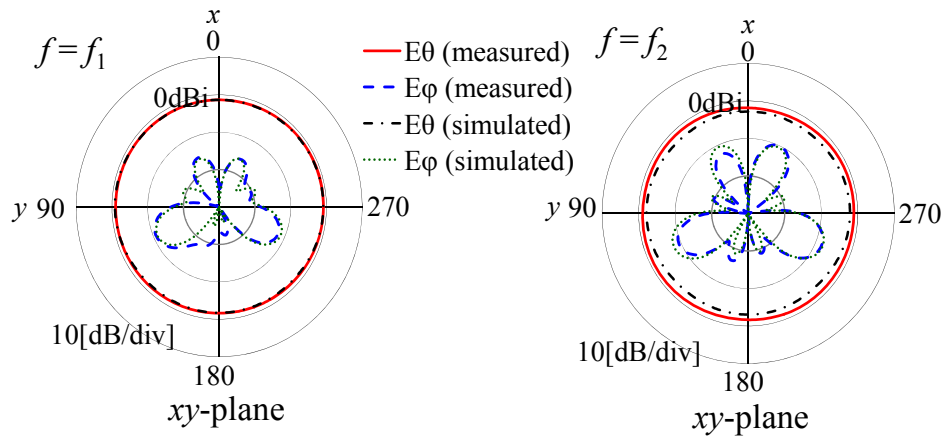


図 2.21 試作アンテナ（図 2.18）の水平面（ xy 面）の放射パターン測定・計算結果

2.4 積雪・降雨の影響

新幹線向け静電アンテナに影響のある気象条件として，積雪・降雨時のアンテナ性能を確認する．特に，これまでに報告例の無い，架線電圧検知性能に対する積雪・降雨の影響を実験と計算により検討する．

まず、積雪の影響について述べる．図 2.22 に、積雪時の静電容量 C_a の測定・計算モデルを示す．発泡スチロールの壁で囲った中に雪を入れることで積雪を模擬し、氷を砕いたものを雪と見立てて使用する．積雪の高さ h_{snow} を 0～300 mm の範囲で変化させて、検知電圧を測定する．従来アンテナ、提案アンテナの高さはそれぞれ 350 mm, 330 mm であり、積雪 300 mm の場合には検知棒以外はほぼ雪に埋もれることとなる．測定した検知電圧から、式(2.1)より静電容量 C_a を逆算する．屋外実験となる都合により地板形状を 2.3.5 項の場合より小さくしている．

図 2.23 に、積雪高 h_{snow} を変化させた時の C_a の測定結果を示す． h_{snow} を高くするにつれて、 C_a が小さくなることが確認できる．また、積雪が無い場合には、提案アンテナの C_a は、従来アンテナより僅かしか低下していない．これは、図 2.22 のモデルにおいては、架線の地板に対して垂直の部分がアンテナ前方に近く、アンテナ導体と架線との間の静電容量が大きくなることで検知棒短縮の影響が小さくなるためと考えられる．

積雪時の測定結果について考察する．雪の比誘電率は、60 Hz において約 33 である [2.12]．一方、60 Hz 付近の低周波数においては、水の比誘電率は 10000 以上になるという報告がある [2.13-2.15]．実験時の気温が高く、雪が一部融解していたと考えられるため、雪の誘電正接を $\tan \delta_{snow} = 1$ として [2.12, 2.14]、雪の比誘電率 ϵ_{rsnow} を 33～10000 まで変化させた場合の計算を準静電磁界解析により行う．図 2.24 に、 $h_{snow} = 300$ mm の時の計算結果を示す． ϵ_{rsnow} を大きくするにつれて C_a が小さくなり、 $\epsilon_{rsnow} = 1000$ でほぼ収束し、 C_a の計算値が測定値とほぼ対応することが分かる．そこで、 $\epsilon_{rsnow} = 1000$, $\tan \delta_{snow} = 1$ として、積雪高 h_{snow} を変化させた時の静電容量 C_a の計算を行い、計算結果を図 2.23 に併せて示す．測定と計算は傾向が良く対応していることが確認できる．積雪による C_a の低下を説明するために、図 2.25 に示すように、積雪時の静電容量の等価回路を考える． C_1 , C_2 はそれぞれ、架線とアンテナの積雪していない部分の間、架線と雪上面の間の静電容量である．また、 C_{snow_ant} , C_{snow_gnd} はそれぞれ、雪の中の雪上面とアンテナ側の面、雪上面と地板側の面の静電容量である．アンテナはレドームで覆われているため、雪から一定の距離がありその部分の静電容量を C_3 とする．積雪高が低い場合には、 C_2 より C_1 が大きく、積雪による劣化は小さい．積雪高が高くなるにつれて、

C_1 より C_2 が大きくなる．また，積雪時には，雪の比誘電率が大きい場合に C_{snow_gnd} が非常に大きくなり， C_{snow_gnd} の部分のインピーダンス虚部が非常に小さくなる．したがって，検知電圧 V_d が低くなると考えられる．以上のように，積雪高が高い場合には，雪を介して架線と地板の間の静電容量が大きくなるために，架線とアンテナの間の静電容量が小さくなると考えられる．すなわち，アンテナが雪に埋もれる場合には，検知電圧は非常に低くなると考えられる．図 2.23 より，提案アンテナの積雪による静電容量の劣化は，従来アンテナと同程度であることが確認できる．アンテナ高さをより低背化すると積雪時の検知電圧が劣化すると考えられるため，提案アンテナの高さは従来アンテナの 5 %減に留めている．

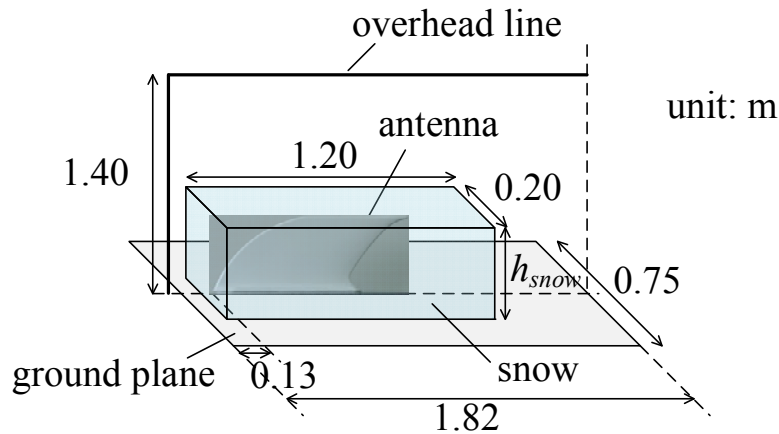


図 2.22 積雪時の静電容量 C_a の測定・計算モデル

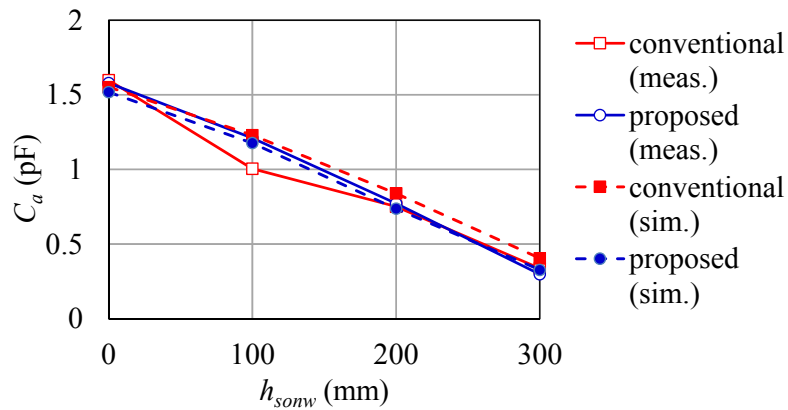


図 2.23 積雪時の静電容量 C_a の測定・計算結果

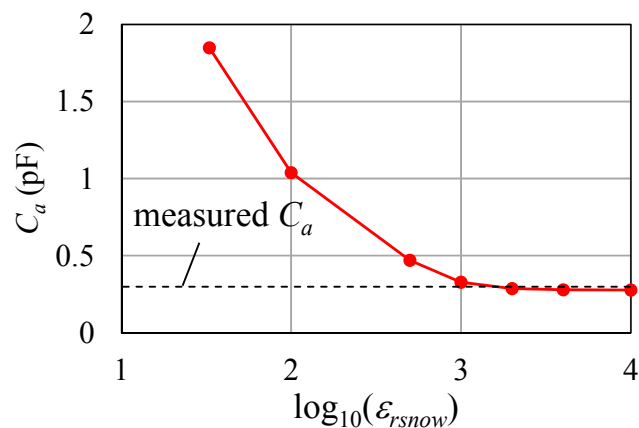


図 2.24 ϵ_{rsnow} を変化させた時の C_a の計算結果 ($h_{snow} = 300$ mm)

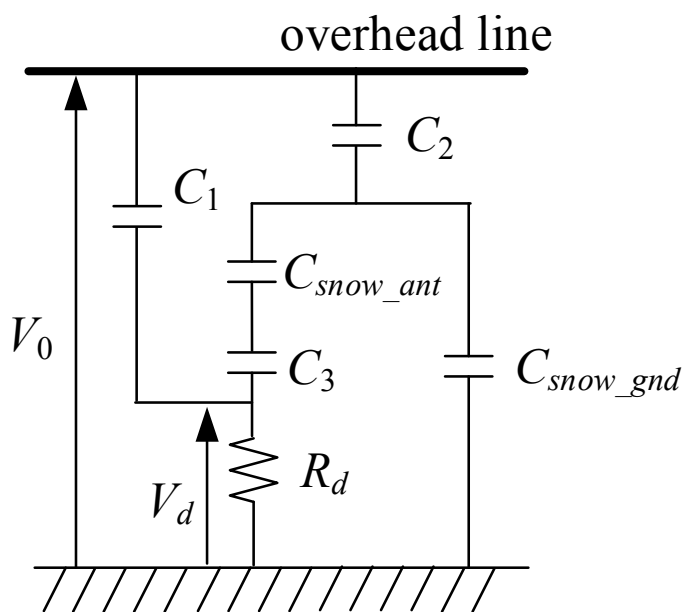


図 2.25 積雪時の架線電圧検知の等価回路

次に，降雨の影響について述べる．降雨時の C_a の測定・計算は，図 2.22 で雪を削除したモデルで行う．測定では，降雨をシャワーで模擬し，最悪条件を想定して時雨量 150 ～180 mm 相当の降雨とする．計算は，図 2.22 のモデルにおいて雪を削除し，アンテナと地板の全体を一様に厚み 3 mm の雨で覆って行う．雨は，図 2.24 の結果より，比誘電率 1000，誘電正接 1 とする．表 2.2 に，降雨時の静電容量 C_a の測定・計算結果を

示す．雨の厚みは非常に小さいため，降雨による C_a の変化は小さいことが測定と計算により確認できる．

表 2.2 降雨時の静電容量 C_a (pF) の測定・計算結果

	conventional		proposed	
	meas.	sim.	meas.	sim.
w/o rain	1.60	1.55	1.58	1.52
w/ rain	1.56	1.39	1.51	1.54

2.5 結論

本章では，従来アンテナを小形化し騒音低減効果を得るために，従来アンテナと比較して検知棒の長さを 41 % 短縮するとともに高さを 5 % 低背化したアンテナを提案し，その有効性を計算と測定により実証した．検知棒を短縮すると架線電圧検知性能が劣化するが，騒音を低減するアンテナレドーム形状内で，アンテナ基板面積を可能な限り大きくすることで実用上問題ない架線電圧検知性能を確保した．また，無線通信アンテナ性能については，検知棒を短縮し，折り返しモノポール構造の採用と並列共振回路の付加により広帯域整合を実現することで，検知棒からの放射を抑制し水平面内の利得を 3.1～4.5 dB 向上させた．

更に，実使用を考慮して積雪・降雨の架線電圧検知性能への影響を実験と計算により評価・考察した．積雪高が高くなるほど検知性能は低下するが，提案アンテナの高さは従来アンテナの 5 % 減に留めているため，提案アンテナの積雪による検知性能の劣化は従来アンテナと同程度であることを確認した．雪の比誘電率が大きく積雪高が高い場合には，雪を介して架線と地板の間の静電容量が大きくなるため検知性能が低下すると考えられる．また，降雨の影響は小さいことを確認した．

2.6 参考文献

- [2.1] 黒田忠光，久保田肇，永岡 栄，喜連川隆，武市吉博，”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, vol.38, no.4, pp.102-105, 1964.

- [2.2] 喜連川隆, 武市吉博, 水沢丕雄, ”東海道新幹線列車無線用アンテナ,”電気通信学会 アンテナ研究会資料, Aug. 1964.
- [2.3] 喜連川隆, 武市吉博, 水沢丕雄, ”列車無線用環状スロットアンテナ,” 電気四学会連合大会, no.1157, 1960.
- [2.4] 喜連川隆, 武市吉博, 水沢丕雄, 阿部 修, 大林愛弘, ”東海道新幹線 列車用 400Mc 帯指向性埋込み形アンテナ,” 三菱電機技報, vol.38, no.3, pp.488-491, 1964.
- [2.5] 亙理 達, 岡田茂生, 安達芳男, 平沢 稔, ”150MHz 帯列車無線車上アンテナ,” 電子通信学会全国大会, no.553, 1975.
- [2.6] 近藤幹雄, 佐々木伸, 松本和臣, 沼崎 正, 茶谷嘉之, 真野清司, 武田文雄, ”新幹線用ビーム切換型列車アンテナ,” 信学技報, A・P85-32, pp.57-62, Jul. 1985.
- [2.7] 内田英成, 虫明康人, 超短波空中線, コロナ社, 1961.
- [2.8] 西本研悟, 坪 浩行, 西岡泰弘, 米田尚史, 松村善洋, 笹木栄志, 西山武志, ”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,” 信学技報, A・P2019-115, RCS 2019-207, Nov. 2019.
- [2.9] 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, 西本研悟, 坪 浩行, 眞田 幸俊, ”新幹線向け架線電圧検知／無線通信共用アンテナの降雨降雪対策と性能評価,” 信学技報, A・P2019-114, RCS2019-206, Nov. 2019.
- [2.10] Y. Matsumura, E. Sasaki, T. Nishiyama, K. Nishimoto, H. Akutsu, and Y. Sanada, ”Performance evaluation of miniaturized antenna of the Shinkansen used for overhead line voltage detection and wireless communication,” Proceeding of the 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, (WPMC2020), Online, Oct. 2020.

- [2.11] R. F. Harrington and J. R. Mautz, "Theory of characteristic modes for conducting bodies," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.19, no.5, pp.622-628, Sept. 1971.
- [2.12] 竹井 巖, 前野紀一, "融点近傍における雪および霜の誘電的性質," 北陸大学紀要, 第 23 号, pp.13-24, 1999.
- [2.13] M. Bittelli, M. Flury, and K. Roth, "Use of dielectric spectroscopy to estimate ice content in frozen porous media," Water Resources Research, vol.40, Issue 4, W04212, Apr. 2004.
- [2.14] N.S. Shah, P.S. Shah, and V.A. Rana, "Dielectric and electrical properties of coconut water and distilled water in the frequency range 20 Hz to 2 MHz," Ionics, vol.21, pp.3217-3222, 2015.
- [2.15] A.A. Sherman and H.M. Uribe, "Dielectric spectroscopy of water at low frequencies: the existence of an isopermittive point," Chemical Physics Letters, vol.503, Issues 4-6, pp.327-330, Feb. 2011.

第3章 新幹線環境での活用を想定したミリ波の 45 GHz 帯伝搬特性の測定と解析

従来、鉄道における車上地上間の移動体通信には 150～400 MHz 帯の無線回線を用いた、音声通信や数 Mbps のデータ通信が用いられてきた。しかしながら、近年、様々な分野で映像伝送や膨大なデータを活用した新たなサービスが実用化されており、新幹線においても通信伝送路の大容量化が求められている。そこで、無線回線の大容量化を目指して、45 GHz 帯ミリ波を新幹線に適用する検討を開始した。しかしながら、線路の曲線半径が小さくなるに従い、ミリ波の直接波を用いた直線的な通信エリアのみでは線路をカバーすることが困難になる。本章では、曲線区間において 45 GHz 帯の伝搬特性を測定するとともに、レイトレース法を用いたシミュレーションにより伝搬特性を評価し、アンテナのメインローブの外であっても一定の距離まではミリ波の電波が届くことを明らかにした。

3.1 はじめに

鉄道における列車と地上を通信するための通信手段には、運転士・車掌と総合指令所との間の通信を確保する列車無線、駅・車両所構内における入換作業のため、運転士と駅員又は車両所係員との間の打合せに必要な構内無線などがあり、従来から主に VHF/UHF 帯が用いられている。最近の情報通信技術の進展に伴い、車上地上間の通信容量の大容量化が求められており、そのための手法としてミリ波帯の活用が考えられる。ミリ波帯は従来から用いられている VHF/UHF 帯に比べ、広い周波数帯域を確保できるため大容量通信に適している[3.1,3.2]。新幹線は線形が直線に近いので、指向性の強いアンテナによるミリ波の直進性を活かした直線的な通信エリア構成が可能となる[3.3]。しかし

曲線区間に対しては直線的な通信エリアを切れ目なく配置するために、地上局の配置間隔が短くなる。鉄道におけるミリ波通信試験は従来から行われており、古くは 1980 年代のドイツにおける実験結果が報告されている[3.4]。その他にも 40~50 GHz 帯における測定結果[3.1, 3.2, 3.5, 3.6]、及び 100GHz 帯における通信試験[3.7]が報告されている。更に、新幹線との通信にミリ波通信を適用するための地上局配置の提案 [3.8]や、高速鉄道への OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) および MIMO (Multiple Input Multiple Output) 方式の適用提案[3.9]、5G 移動通信システムの鉄道適用に向けた鉄道沿線における実測とレイトレースシミュレーションの比較についても報告されている[3.10]。

ところが、鉄道の曲線区間における 45 GHz 帯の実測伝搬測定結果とレイトレース法によるシミュレーションとの比較はこれまで報告されていない。今回、曲線半径が小さい区間におけるミリ波の適用可能性を検討するため、45 GHz 帯において $R=2500\text{ m}$ (R は曲線半径) 及び $R=395\text{ m}$ の曲線区間における伝搬測定を行い、レイトレースシミュレーション結果との比較を行うことにより曲線区間での電波到達状況について検証した [3.11]。

本章では、ミリ波列車無線の実現に向けた要素技術を説明した後、鉄道の曲線区間における電波到達エリアに関する課題と測定条件、測定に用いた無線機の構成を説明する。そして、鉄道の曲線環境における伝搬測定結果の一例を示し、シミュレーションによる解析を実施するに至った必要性を説明する。そして、伝搬測定結果とシミュレーション結果の比較を行うと共に、鉄道の曲線区間の電波伝搬について明らかになった特徴を示す。

3.2 ミリ波列車無線の実現に向けた要素技術

ミリ波列車無線システムを実現するにあたって活用できる無線通信の要素技術として OFDM 技術、ダイバーシティ技術、及び降雨減衰対策がある。また、ミリ波の伝搬環境解明のためにレイトレーシング法が用いられる。これらについて以下に記述する。

3.2.1 OFDM 技術

ミリ波活用にあたりデータ伝送速度が増大するが、それに従い、高速移動通信においてはシンボル間干渉（Intersymbol Interference : ISI）が増加する。OFDM は、マルチパスに強く、有限である周波数資源を有効に利用できることから、地上デジタル放送、無線 LAN、携帯電話 LTE（Long Term Evolution）方式などに導入されている。OFDM 方式は、高速なデータを複数の搬送波（サブキャリア）に乗せて、並列に多重化して伝送する方式であり、1 キャリアあたりの伝送速度を低くすることができることから、移動通信に適している[3.12]。また、OFDM は各サブキャリアを直交させることで周波数利用効率を向上させている。OFDM システムの送信機構成を図 3.1 に示す。

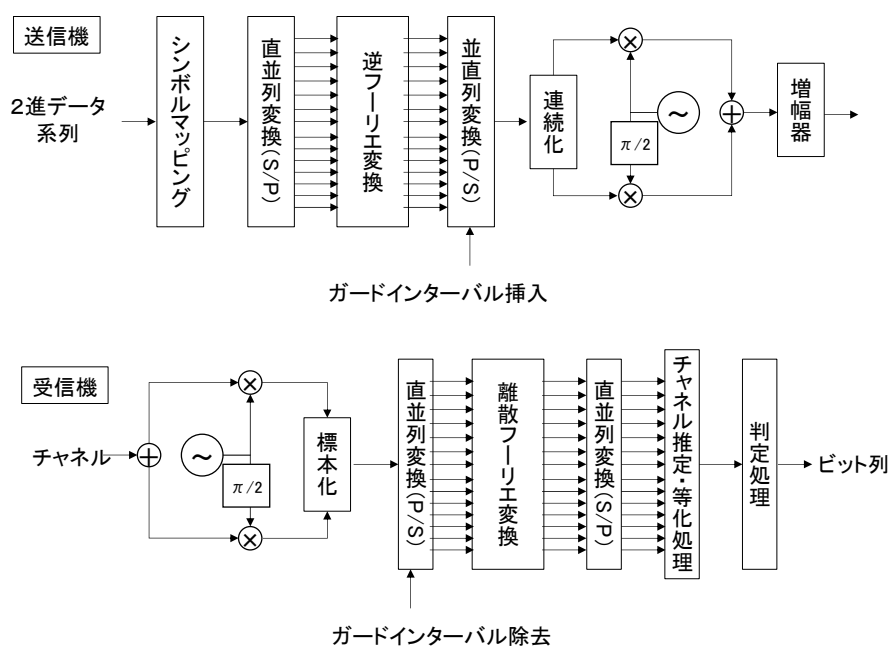


図 3.1 OFDM システムの送信機構成

新幹線の環境においても遅延波が存在する環境が発生することが想定されるため、ガードインターバルを適切な値に設定することも重要である。

3.2.2 ダイバーシティ技術，時空間ブロック符号技術

新幹線の移動環境においても無線通信の安定性の確保は重要である．移動通信と同様に，通信品質を安定させるために，複数のアンテナを用いて送受信することで通信品質を高めるダイバーシティ技術が用いられてきた．LCX デジタル方式では，前後左右の LCX アンテナを用いたダイバーシティ受信が採用されており，無線回線品質の向上が図られている[3.13]．その後ダイバーシティ技術の発展があり，その中の一つの技術として時空間ブロック符号が開発された．送信アンテナが $N=2$ 本の場合にフルダイバーシティを達成する手法として，Alamouti が提案した時空間ブロック符号（Space-Time Block Code : STBC）がある[3.14]．Alamouti の STBC では，2 シンボルを 2 本のアンテナから，2 シンボル時間にわたって送信する．2 シンボル X_1 , X_2 を 2 本のアンテナ 1,2 により送信する場合を述べる．1 番目のシンボル時間にはアンテナ 1 から X_1 を，アンテナ 2 から X_2 を送信し，2 番目のシンボル時間にはアンテナ 1 から $-X_2^*$ を，アンテナ 2 から X_1^* を送信する．受信アンテナ数 $M=1$ の場合，送信アンテナ 1, 2 からの通信路応答をそれぞれ H_1 , H_2 とした場合，2 シンボル時間での受信信号を y_1 , y_2 とすると，Alamouti の STBC は，以下の簡単な線形演算で送信符号 X_1 , X_2 が求められる．

$$X_1 = H_1^* y_1 + H_2 y_2^* \quad (3.1)$$

$$X_2 = H_2^* y_1 + H_1 y_2^* \quad (3.2)$$

これにより，送信ダイバーシティ効果が得られるため，シンプルな方法で送信ダイバーシティ効果を得ることが出来る[3.15]．

3.2.3 ミリ波の降雨減衰

ミリ波の特徴は，直進性が高いことと，降雨減衰が大きいことが挙げられる．ミリ波の降雨減衰は ITU-R にて勧告がされており，数式(3.3)で表されることが示されている．

$$\gamma^R = k R_{ain}^\alpha \quad (3.3)$$

ここで γ^R dB/km は 1km あたりの降雨減衰量, R_{ain} mm/h は降雨量 (時雨量換算) を表し, k と α は, 垂直偏波, 水平偏波それぞれに対する周波数依存の係数となっている. 例えば, 45 GHz の垂直偏波の場合, $k=0.5135$, $\alpha=0.8123$ となり, 180mm/h の降雨量の場合, 1 km あたりの降雨減衰は 36.50 dB/km となる[3.16].

3.2.4 レイトレーシング法

レイトレーシング法は電磁界理論の一つである幾何光学理論 (幾何光学近似および幾何光学回折理論) に基づくものである. レイトレーシング法では送信点から放射される電波をレイ (Ray) とみなして, まず, 周辺構造物で反射・透過・回折を伴い受信点に到達するレイを幾何学的にトレース (Trace) する. 次に, トレースしたレイによる電界を幾何光学理論により求める. ここで, 各レイの伝搬距離と受信点への入射角度の情報をを用いることにより, 移動通信システムの評価に必要な伝播損失・伝播遅延・到来角度の特性を推定できる[3.17,3.18]. レイトレーシング法には主にイメージング法とレイラウンチング法がある. イメージング法とレイラウンチング法の概要を図 3.2 に示す. イメージング法では, レイが伝搬する経路を送信点, 受信点, 及び考慮する壁面の組合せから設定し, 各経路に対して反射点を幾何学的に探索することによりレイをトレースするため, レイの反射点を厳密に求めることが出来る. 一方, レイラウンチング法では, まず送信するレイの出射方向を設定し, それぞれの出射レイに対して壁面との交差判定を行いながら幾何学的に軌跡を追跡することで, 所望の受信点に到達するレイを求める. 本研究では, 主にレイラウンチング法を用いる.

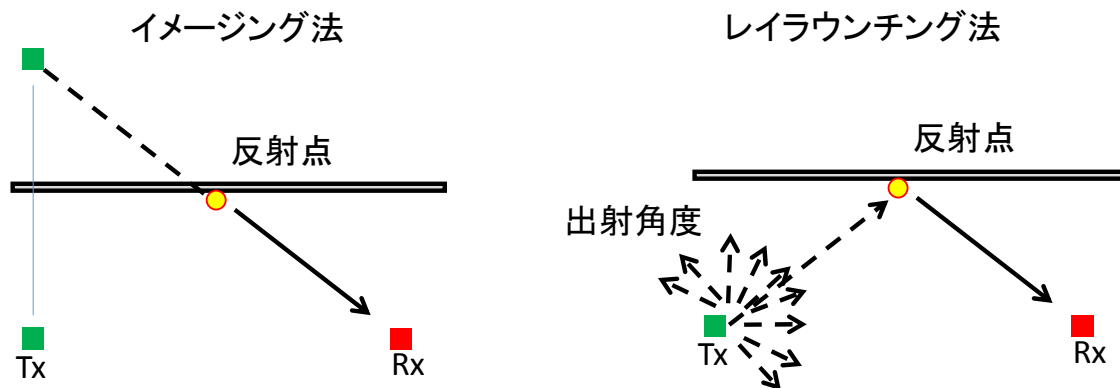


図 3.2 イメージング法とレイラウンチング法の概要

3.3 曲線区間におけるミリ波通信の課題と伝搬測定結果

3.3.1 電波到達エリアの考え方と課題

新幹線の線路は高速に走行することを想定しているため、曲線半径が大きくなるように設定されている。但し、昭和 39 年に開業した東海道新幹線は、例外的な箇所を除き最小曲線半径を $R=2500\text{ m}$ としたため、原則的に最小曲線半径を $R=4000\text{ m}$ とした他の新幹線に比べ、ミリ波の電波到達エリアが短くなる。図 3.3 に周波数が高いミリ波の特徴である直進性を活かした通信エリアの構成例を示す。

ミリ波は周波数が高く自由空間損失が大きいため、送受信機に指向性の強い（半値角の小さな）アンテナを利用して電波の到達距離を長くすることにより鉄道の直線区間では通信距離を長くとることが可能である。しかし鉄道の曲線区間においては指向性を強くすることによりメインローブの幅が小さくなり通信可能距離が短くなる。列車と地上との通信を想定する場合、車上局のアンテナ放射方向は線路に平行となるため、電波到達距離は更に短くなることが課題として挙げられる。

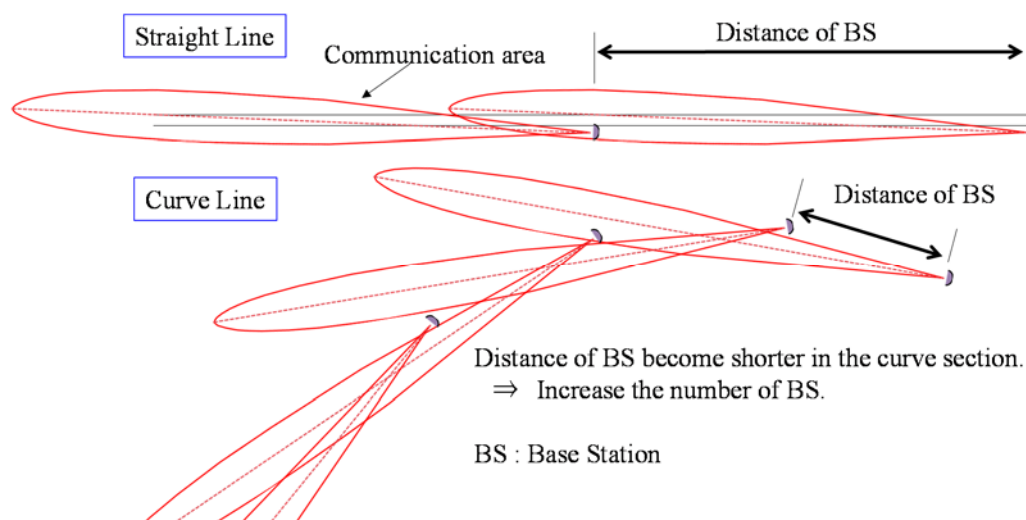


図 3.3 通信エリアの例

但し実際の鉄道沿線環境においては、防音壁や電化柱など電波を反射する物体が多数存在するため、列車と地上の間の無線通信システムを構築するには、これらの反射波の影響を考慮する必要がある。このため 45 GHz 帯を想定し伝搬環境の測定を実施した。

3.3.2 測定環境

曲線区間の電波伝搬環境の測定のために、防音壁のない $R=2500$ m の曲線区間（区間①）、防音壁のある $R=2500$ m の曲線区間（区間②）、そしてより半径の小さな曲線区間として防音壁のない $R=395$ m の曲線区間（区間③）の計 3 か所で測定した（表 3.1）。測定時の無線機の設置環境を図 3.4 に、測定した区間の曲線半径と無線機の設置方向を図 3.5 に示す。以降、地上に固定した無線機を「地上局」（Base Station : BS）、線路上に設置したトロ（線路上を走行できる手押し台車）に搭載した無線機を「車上局」（Mobile Station : MS）（図 3.6）とする。

表 3.1 伝搬環境測定の実験条件

	曲線区間①	曲線区間②	曲線区間③
曲線半径	R=2500m		R=395m
防音壁	無	有	無
無線機の向き	接線内側2°		接線内側3°
測定範囲	750m	900m	270m

$R = 2500 \text{ m}$ の曲線区間（区間①，②）の場合は地上局を曲線外側に設置し，レール接線方向から 2 度内側に向けた方向に設置した． $R = 395 \text{ m}$ の曲線区間の場合（区間③）はレール接線方向から 3 度内側に向け設置した（図 3.5）．車上局のアンテナの指向角は線路接線方向とした．

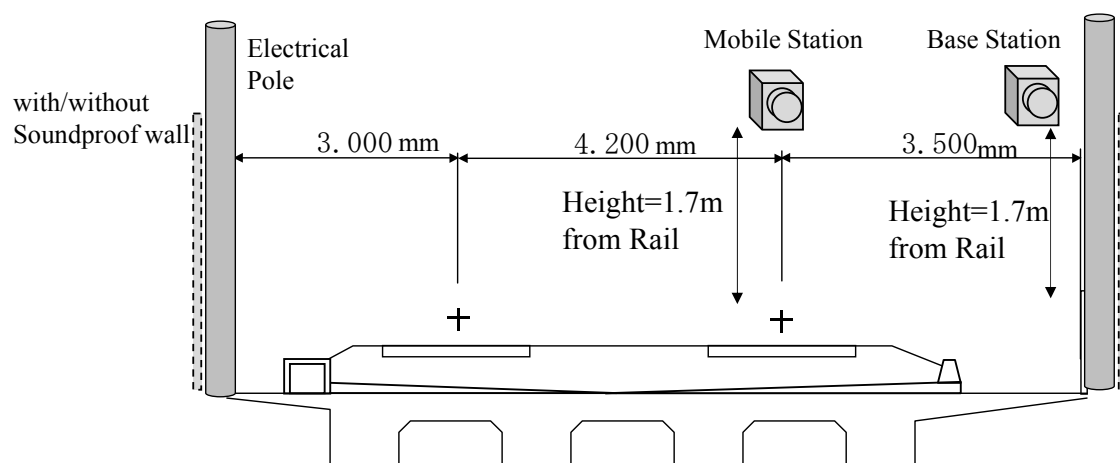
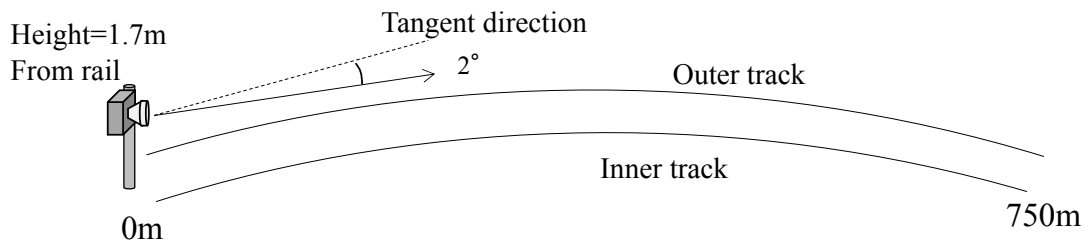


図 3.4 測定時の無線機設置条件

Track Condition

Curve radius $R=2500\text{m}$ with/without Soundproof wall



Track Condition

Curve radius $R=395\text{m}$ without Soundproof wall

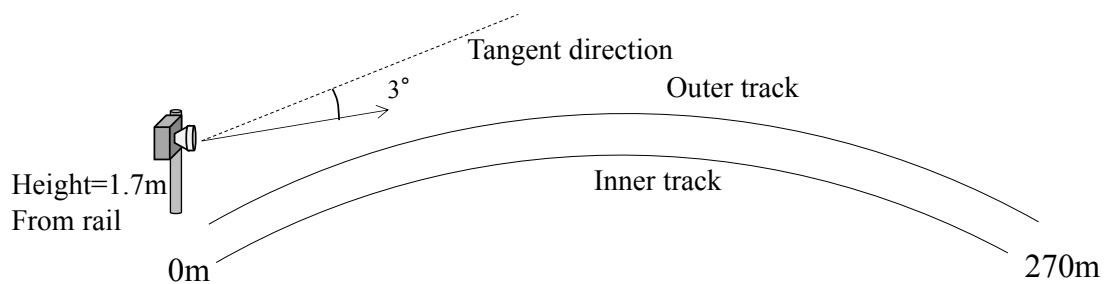


図 3.5 曲線半径と地上局の設置角度

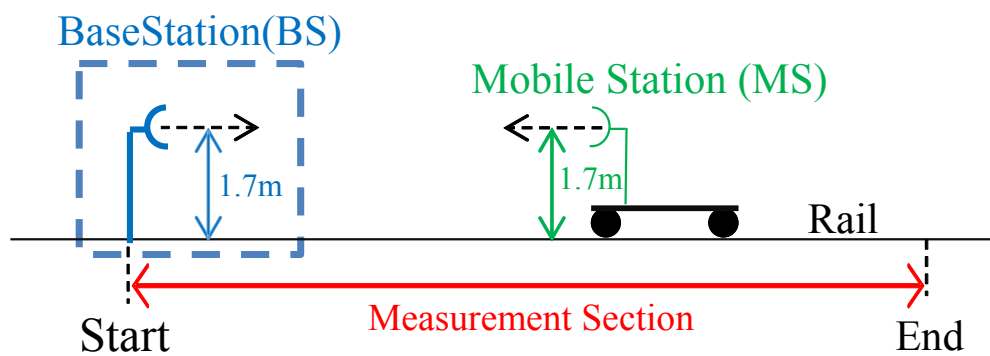


図 3.6 電波測定方法（地上局，車上局）

3.3.3 測定に用いた無線機

本試験では表 3.2 に示す諸元の無線機（地上局，車上局）を使用して，45 GHz 帯の受信レベル測定を行った．本無線機は，測定時点で入手可能であった無線機を利用して測定したものである．測定条件は表 3.1 に示した通りであり，測定区間長としては，

$R = 2500$ m 曲線区間の防音壁がある区間は 900 m, $R = 2500$ m 曲線区間の防音壁が無い区間は 750 m, $R = 395$ m 曲線区間（防音壁なし）は 270m とし, いずれも見通し内の区間の 2 倍以上の長さまで受信電力を測定した.

表 3.2 無線機の諸元

項目	実験条件	備考
中心周波数	45GHz帯	2ch (地上→車上, 車上→地上)
送信電力	10mW	地上局, 車上局とも同一
車上局高さ	1.7m	
地上局高さ	1.7m	
アンテナ利得	33dBi	送受信とも
アンテナ半値幅	3.15°	送受信とも

3.3.4 曲線区間における受信レベルの目安

曲線区間における車上局無線機の受信電力 P_R は, 直接波のみを考慮した場合, 指向性アンテナの指向方向を ϕ として, 地上局アンテナの利得を $G_T(\phi)$, 車上局アンテナの利得を $G_R(\phi)$, 地上局の送信電力を P_T , 地上局車上局送受信機間の距離を L , 波長を λ とすると式(3.4)の通り表される. ここで送受信機のアンテナの指向特性 G_T , G_R (アンテナパターン) には工場内にて測定した結果を用いる. この際の, 車上局位置の線路曲線の中心角 θ , 地上局の設置角 α , 地上局車上局間の角度 β , 線路と地上局の線路からの距離 x の関係を図 3.7 に示す.

$$P_R = G_T(\beta - \alpha) G_R(\theta - \beta) (\lambda/4\pi L)^2 P_T \quad (3.4)$$

$$\text{なお } L = \sqrt{(R(1 - \cos \theta) + x)^2 + (R \sin \theta)^2}$$

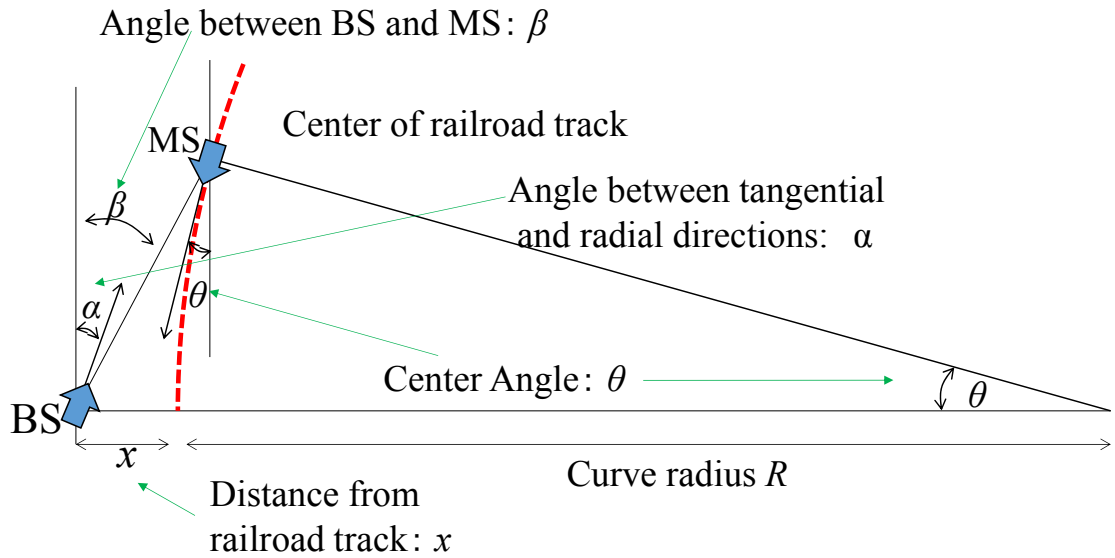


図 3.7 地上局，車上局の角度の関係

ここで，送受信機間の減衰量 L_{oss} [dB]は式(3.5) で表される．

$$L_{oss} = -10 \log_{10} \{ -10 \log_{10} \{ G_T(\beta - \alpha) G_R(\theta - \beta) (\lambda/4\pi L)^2 \} \} \quad (3.5)$$

ミリ波無線機では，高いアンテナ利得を得ようとする半値角が狭くなり角度 $\beta - \alpha$ や $\theta - \beta$ が常にアンテナの半値角の中に入る関係を保つのは難しいため，曲線区間においては，送受信機間距離が大きくなるにつれて減衰量も大きくなり，受信電力は小さくなる．

3.3.5 電波伝搬測定結果の一例

$R=2500$ m の曲線区間で防音壁無し（区間①）の場合の受信電力の測定結果の一例を図 3.8 に示す．その他の条件での測定結果については，第 3 節において，シミュレーション結果と合わせて示す．受信電力は送受信機間距離で 0 m～750 m まで測定した．図 6 の「Measurement」と記載した青実線は無線機の受信電力（dBm）を示し，「Calculation (Direct Wave)」と記載した緑点線は式(3.4)で示される受信電力の計算値 $10 \log_{10} P_R$ (dBm) を示す． P_R には直接波のみ含まれ，反射等による受信信号は含まれない．図 6 には見通し内の区間と見通し外の区間を示した．ここでいう見通し

は線路両脇の電化柱・防音壁等に遮られることなく、地上局車上局間に遮る物体が無く通信できる場合であり、見通し外は電化柱や防音壁等により見通しが遮られる状況を指す。ただし、見通しは実際に曲線区間に測定員が立って目で見える範囲により確認しており、無線信号にとっては通過可能な区間もあると想定される。

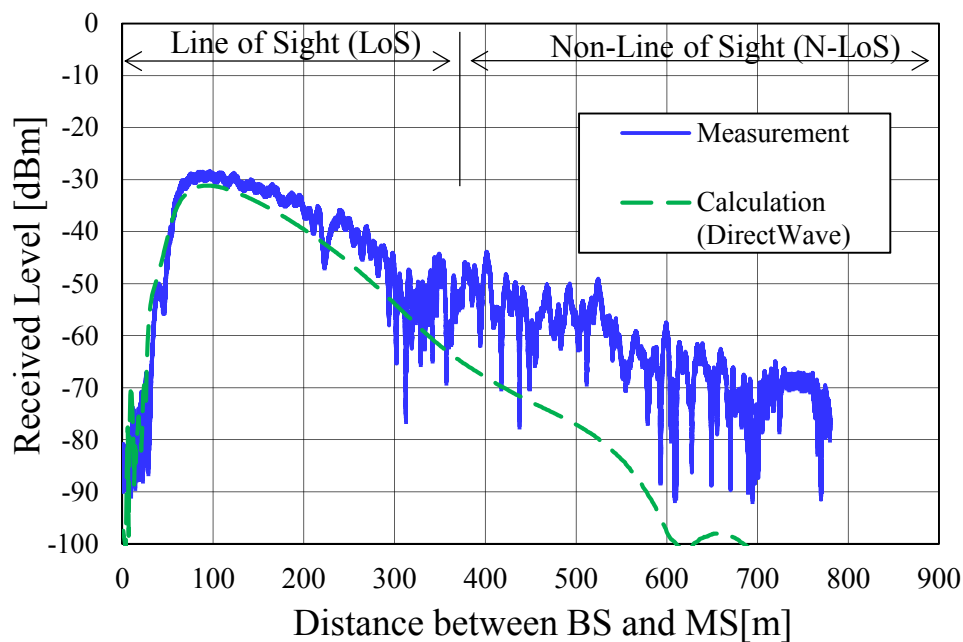


図 3.8 $R=2500\text{m}$ 曲線区間（防音壁無）の受信電力

この時は、見通し外となる地上局から 700 m 先を超えた区間においても電波が車上局に到達しており、受信電力は計算値より大きかった。送受信機のアンテナパターンと位置関係から計算すると 700 m 先においては受信レベルが -100 dBm 以下となるが、実際の受信レベルはそれより 20 dB 以上高かった。これは何らかの原因により直接波以外の電波が到達していたことによるものと想定される。この曲線では 300 m 付近を境に、フェージングなどによる変動が顕在化するとみられ、反射波等の存在が想定される。

ミリ波の適用を考慮すると、電波の放射角より外側の指向角において反射波等の影響により想定より受信レベルが高いことは、無線通信距離を増加させるため、有利である。ただし、今回測定した区間のみにこの傾向が見られるのか、常に有利な方向に伝搬特性

が得られるのか明確ではないため、その要因を解明するために、レイトレース法によるシミュレーションを実施した。

3.4 レイトレース法によるシミュレーションと測定結果の比較

3.4.1 シミュレーションの概要

実際の線路環境をモデリングした上でレイトレース法のシミュレーションにより受信レベルの解析を行った。本検討においては、レイラウンチング法を用いた電波伝搬シミュレータ（Remcom 社製 Wireless Insite）により、シミュレーションを行った。

3.4.2 計算モデル及び計算条件

シミュレーションモデルの例を図 7 に示す。線路上の構造物としてレールと電化柱、防音壁をモデル化した。計算モデルはモデリングソフトウェアを用いて作成した。計算モデルの構成及び材料係数を表 3.3 に示す。

アンテナは半値角 3.15° のレンズアンテナとし、実測したパターンを使用した。

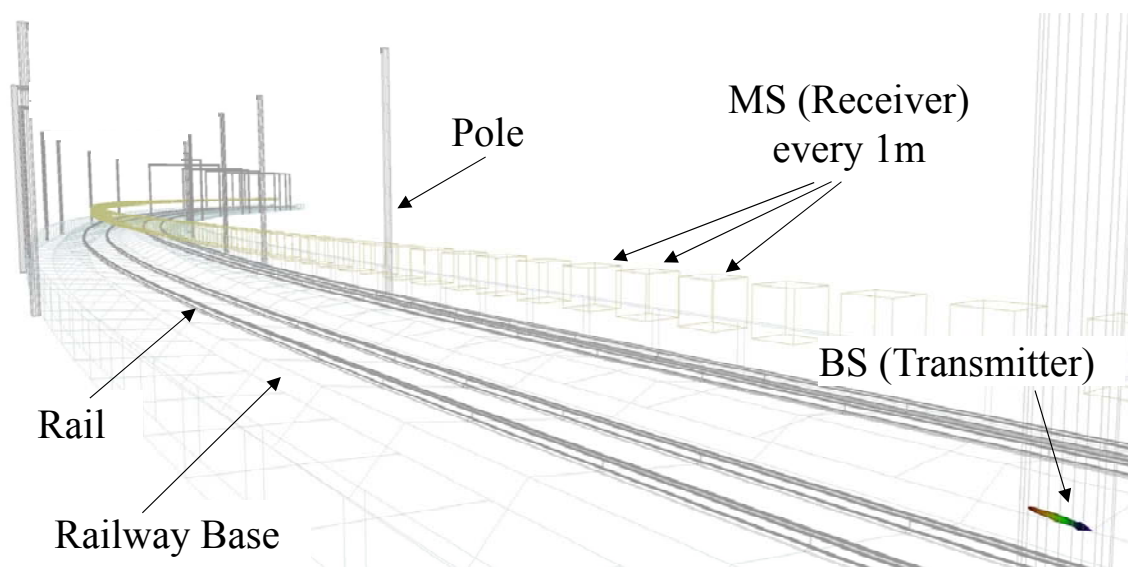


図 3.9 シミュレーションモデル例 (R = 395m)

表 3.3 計算モデルの構成及び材料係数

(1) 構造物

構造物	材料
路盤	コンクリート
防音壁	コンクリート
レール	鉄
電化柱	鉄（鋼管柱）

(2) 材料係数

材料	誘電率	導電率
コンクリート	6.2×10^{-11} F/m	1.5×10^{-2} S/m
鉄	8.85×10^{-12} F/m	1.03×10^7 S/m

(3) 計算条件

反射	20回
回折	0回（考慮しない）
透過	0回（考慮しない）

(4) 送受信点

送信点アンテナ高	レール上面から1.7m
受信点アンテナ高	レール上面から1.7m

3.4.3 曲線区間①（ $R=2500\text{m}$ 防音壁無）

$R=2500\text{m}$ の曲線区間における計算条件は，実測時におけるアンテナの配置条件と同じようになるようにした．無線機の設置条件を表 3.4 に示す．

表 3.4 無線機の設置条件

	地上局（BS）	車上局（MS）
配置	線路方向：曲線の始点 断面方向：外側線路中心より3.2m 外側	曲線の外側の線路上1m おき
アンテナ向き	仰角方向：水平 水平方向：曲線の法線方向より2° 内向き	仰角方向：水平 水平方向：線路方向

まず $R=2500\text{m}$ の曲線区間（防音壁無し）（区間①）における受信電力の実測結果，直接波計算結果及びレイトレースシミュレーションによる受信電力の計算結果を図 3.10 に示す．図 3.10 は，図 3.8 にレイトレースシミュレーションによる計算結果である「Calculation（Ray-trace）：赤実線」を重ねたものである．ここで，図 3.10 の計算

結果（赤実線）は実測値（青線）と同様な傾向を示していることがわかる．特に実測がフェージング等の影響により大きく変動していた 300 m～600 m の区間において，実測結果とシミュレーション結果がよく一致する傾向がみられており，実際の反射状況でも本シミュレーションと同様の現象が発生していると考えられる．

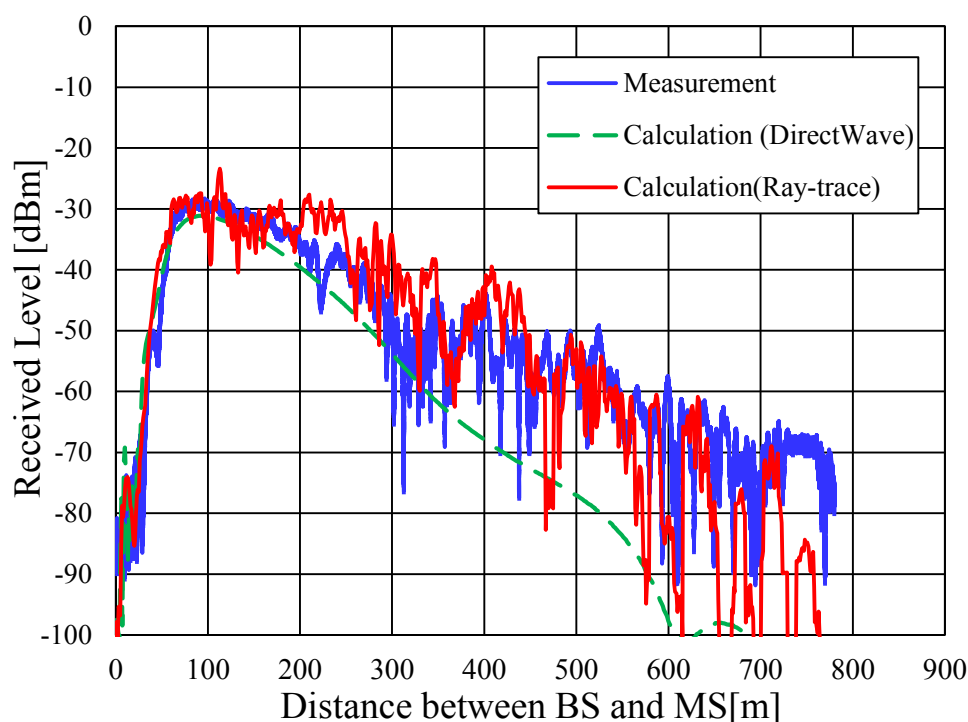


図 3.10 レイトレース法の電界強度シミュレーション結果と実測値の比較
($R=2500\text{m}$ 防音壁無)

レイトレースシミュレーションにおける地上局車上局間のレイを表示したものを図 3.11 に示す．このときの地上局車上局間の距離は 500 m とした．図 3.11 では，地上局から車上局に直接到達する直接波は見られず，レールを反射箇所とした反射によるレイのみで構成されている．これらのレイはレール及び路盤における反射のみで地上局から車上局まで到達している．これは，後述する防音壁による反射がなくてもレール及び路盤のみの反射により見通し外の区間にも電波が到達することを示している．なお，図 3.10 の条件のシミュレーションによって求めた通信距離 750m における遅延スプレッドは約 1.5 nsec となり，想定する無線機のガードインターバルである 133 nsec に収ま

るため、反射波による干渉は軽微であり、これらの反射波を有効に活用できる。また、誤り訂正符号の使用を想定しており周波数ダイバーシティ効果も期待できる。

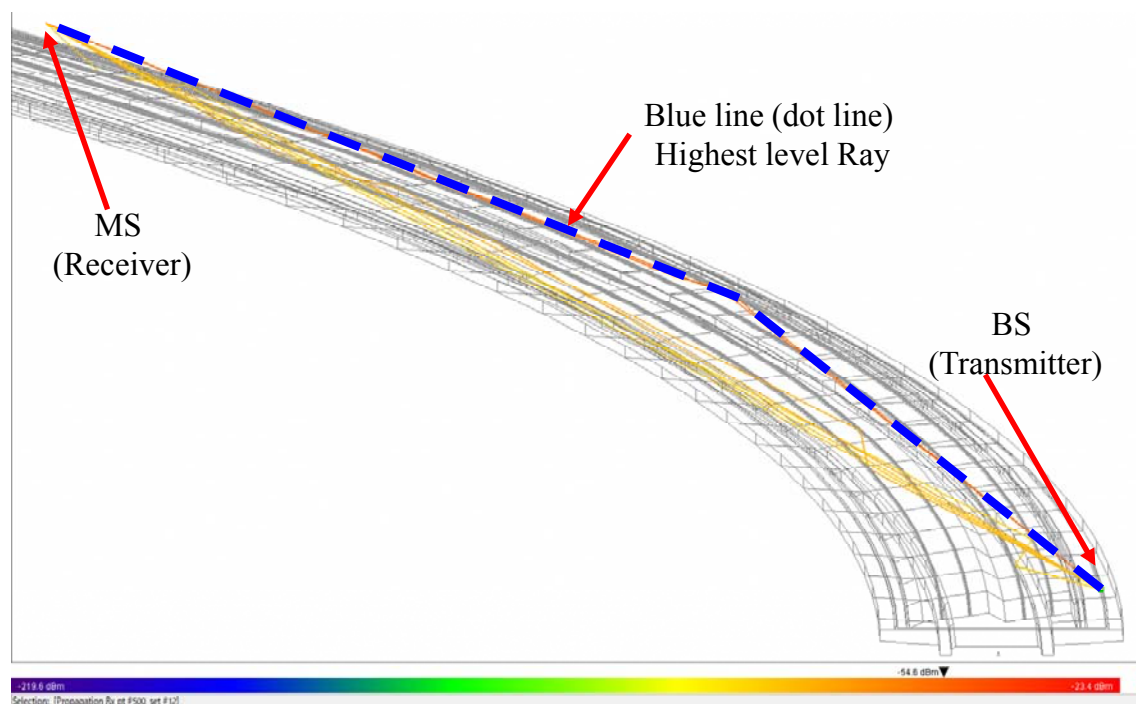


図 3.11 レイトレース法のシミュレーション結果 レイの表示
($R = 2500$ m 防音壁無，地上局車上局間 500 m)

3.4.4 曲線区間② ($R = 2500$ m 防音壁有)

次に曲線区間（防音壁あり）について、受信電力の実測結果、直接波計算結果及びレイトレースシミュレーションによる受信電力の計算結果を図 3.12 に示す。また、レイトレースシミュレーションにおける地上局と車上局間のレイを表示したものを図 3.13 に示す。レイトレースシミュレーションによる計算結果と実測の結果を比較すると、計算結果は実際の通信環境の傾向をある程度表しているものの、実測結果がレイトレースシミュレーションによる受信電力の計算結果より低くなっている。これは、防音壁の反

射係数が、経年劣化や防音壁の隙間などにより、シミュレーションでの想定値より低かったことが原因であると考えられる。

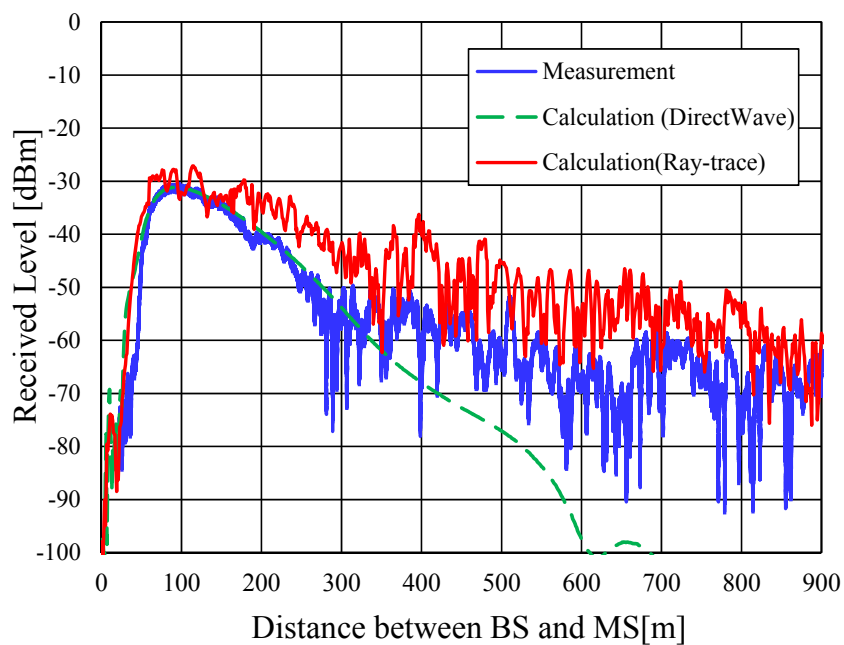


図 3.12 レイトレース法の電界強度シミュレーション結果と実測値の比較
($R = 2500$ m 防音壁有)

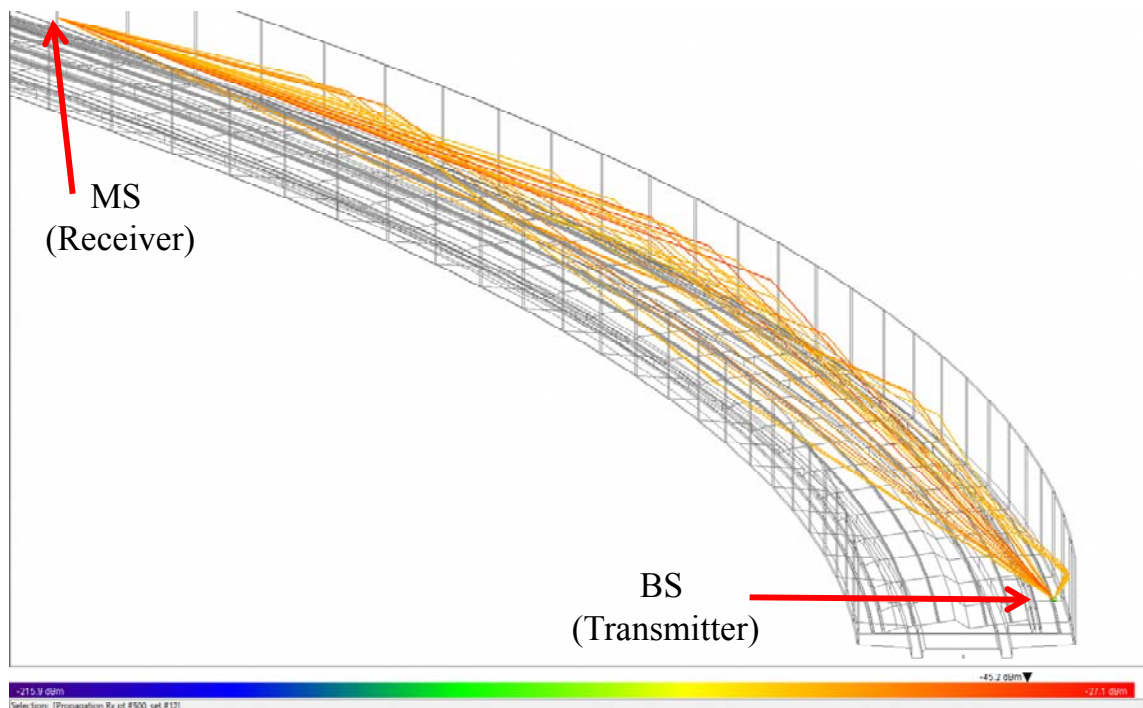


図 3.13 レイトレース法のシミュレーション結果 レイの表示
($R = 2500$ m 防音壁有, 地上局車上局間 500 m)

3.4.5 曲線区間③ ($R = 395$ m 防音壁無)

更に半径の小さな曲線区間における受信電力の計算と実測を行った。 $R = 395$ m の曲線区間におけるアンテナの配置条件を表 5 に示す。 $R = 395$ m の曲線区間においての車上局受信電力の実測結果, 直接波計算結果及びレイトレースシミュレーションによる受信電力の計算結果を図 3.14 に示す。地上局車上局間距離として 10 m～270 m まで測定及び計算を行った。

まず実測による受信電力測定結果について評価する。 $R = 395$ m という急曲線においては電波の到達範囲は短くなる。これは地上局と車上局の向きが正対する区間が短いためであり, 直接波の計算結果や実測結果からメインローブでの通信は約 30 m～80 m の区間となることがわかる。なお現地での見通し環境は 90 m 程度であったが, 実際の電波は 250 m 地点まで到達している。レイトレースシミュレーションによる受

信電力の計算結果と比較すると、実測値がシミュレーション結果より高いレベルを示している部分もあることがわかる。

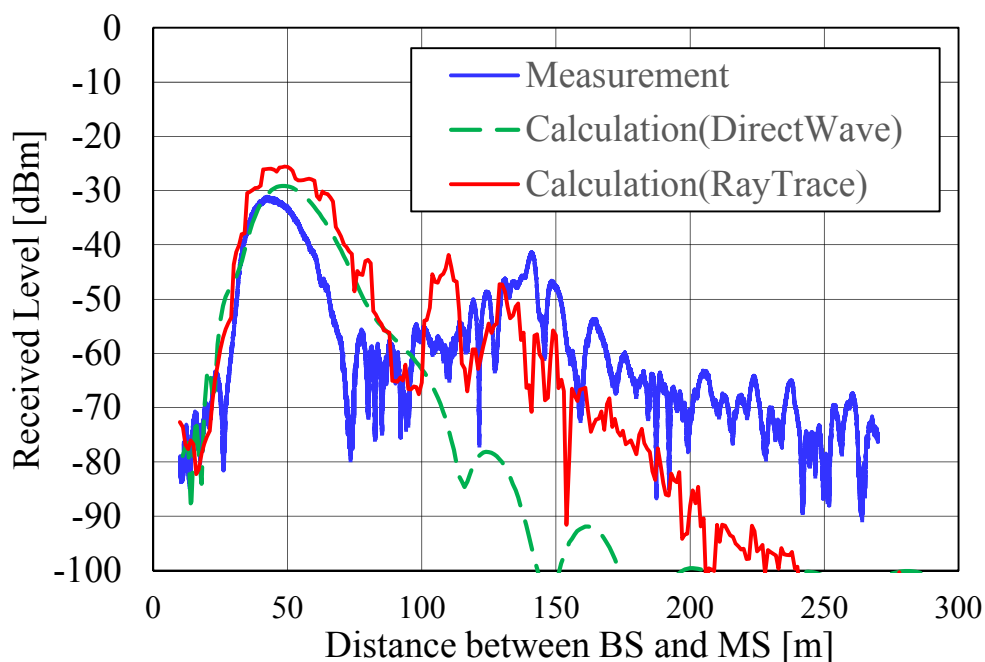


図 3.14 レイトレース法の電界強度シミュレーション結果と実測値の比較
($R = 395\text{m}$ 防音壁無)

次に地上局から 150 m 離れた場所に車上局を置いた場合のレイトレース法で解析したレイを表示したものを図 3.15 に表す。 $R = 395\text{m}$ の曲線においても、レールによる反射の影響がみられる。さらに、レールと路盤の反射により、100 m～250 m の区間においては直接波のみの計算結果に比べ、受信レベルが増加していることが分かる。これらの結果から、直接波だけでは 100 m 程度の区間しか通信できないと想定されるような区間においても、200 m 以上の距離においても電波が到達することがあることを示している。

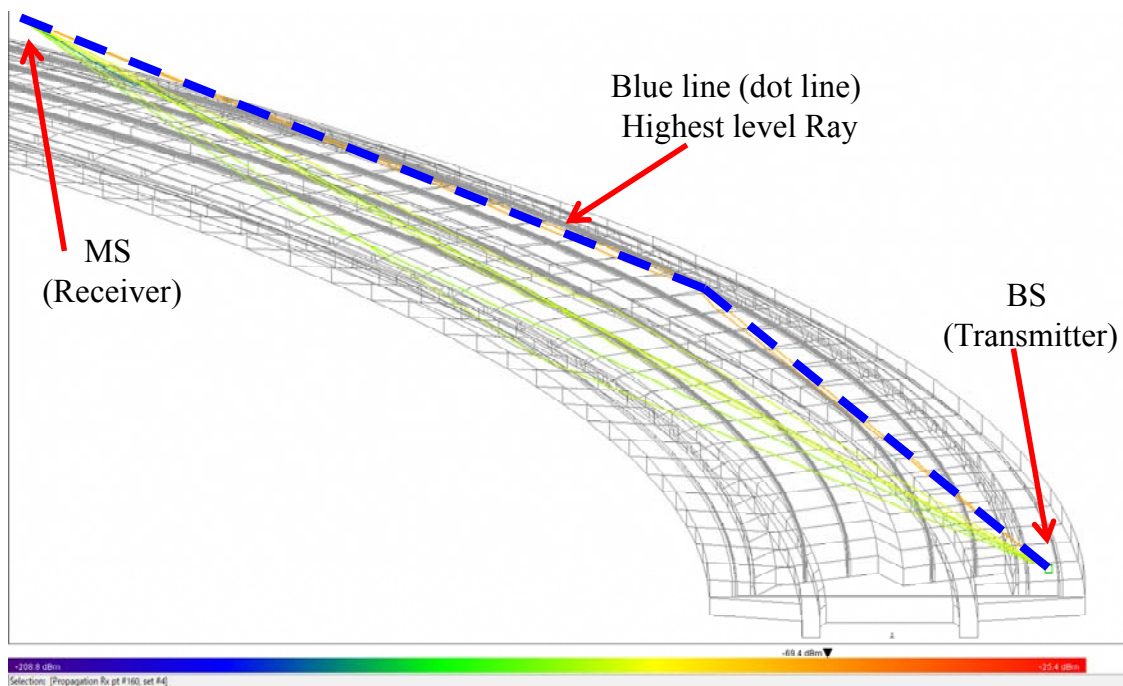


図 3.15 レイトレース法のシミュレーション結果 レイの表示
($R = 395$ m 防音壁無，地上局車上局間 150 m)

3.4.6 シミュレーションにおけるレール有無比較

レールが原因で受信電力が増加することを確認するため，シミュレーションモデルにおいてレールが有る場合とレールが無い場合の比較を行った．図 3.16 に $R = 2500$ m の曲線区間の場合を，図 3.17 に $R = 395$ m の曲線区間の場合を示す．図 3.16 の場合は図 3.10 の条件でのレイトレースシミュレーション結果（赤線）と，図 3.10 の条件においてレールのみモデルから削除した場合のシミュレーション結果（緑線）を比較している． $R = 2500$ m の曲線区間の場合は地上局車上局間距離約 400 m～700 m， $R = 395$ m の曲線区間の場合は，地上局車上局間距離約 100 m～150 m においてレール有無の差が有意に現れており，レールによる受信電力増加効果が確認できる．

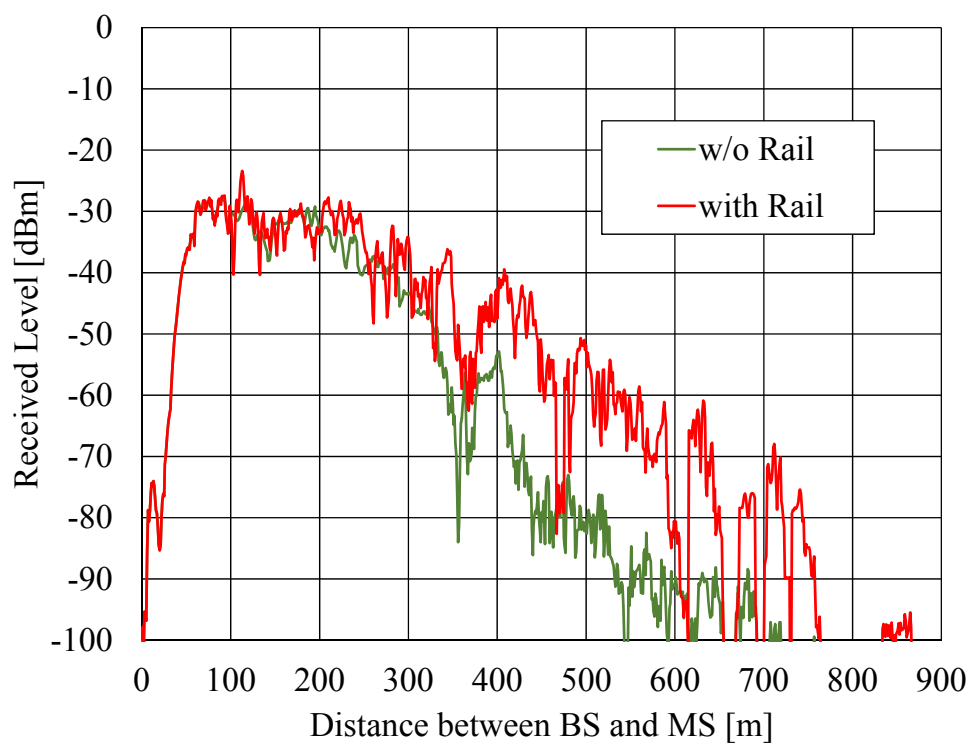


図 3.16 図 3.10 の条件でレールがある場合とない場合の比較
($R = 2500$ m 防音壁無)

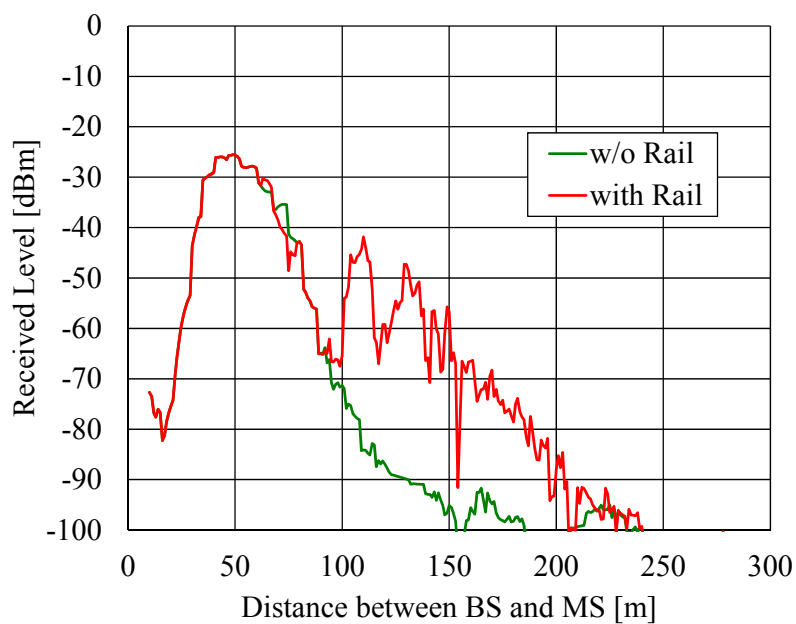


図 3.17 図 3.14 の条件でレールがある場合とない場合の比較
($R = 395$ m 防音壁無)

3.4.7 シミュレーション結果のまとめ

シミュレーションの結果により、曲線区間においてのレールでの反射により、電波の放射角より外側の指向角の区間でも受信レベルが高くなることが分かった。第5章で計算する最低受信レベル - 81.2 dBm を想定し、 $R = 2500\text{m}$ の曲線で約 600 m 先まで、 $R = 395\text{ m}$ の曲線で約 180 m 先まで通信可能な受信レベルが確保でき、地上局間隔を広げることができることが分かった。これにより、新幹線で適用可能なミリ波無線システムを構成できる見込みを得た。

3.5 結論

鉄道における 45 GHz 帯ミリ波無線の伝搬特性を曲線区間において測定すると共に、レイトレース法によるシミュレーション結果と比較した。実測及びレイトレースシミュレーションの結果、ミリ波通信においては曲線区間においても、無線機アンテナのメインローブ範囲外においても線路に沿って電波が到達することが分かった。メインローブ範囲外にまで電波が到達しうるのは、主にレールによる反射によるものであることであると分かった。レールは曲線区間を連続的にカーブしていること、レールの材質が鉄であり反射が大きく表れることから、レールによる反射の影響は大きいことが把握できた。これにより、鉄道においては線路に沿って電波が伝搬することにより見通し外においても通信できる可能性を示した。

3.6 参考文献

- [3.1] 佐々木伸, 山村博, 川村武彦, ”ミリ波による対列車通信,” 鉄道総研報告 Vol.3 No.5, May 1989
- [3.2] 山村博, 林秀一, 鈴木尚子, 佐々木達也, ”大容量ミリ波無線システム,” 鉄道総研報告, Vol.9, no.11, Nov. 1995.

- [3.3] 柴垣信彦, 佐藤洋介, 石川恭介, 加島謙一, "W 帯を利用した次世代列車無線システムの検討と国際標準化動向—RoF とミリ波を用いた新しい電波システム—," 信学技報, RCS2017-10, Apr. 2017.
- [3.4] H. Meinel, A. Plattner, and G. Reinhold, "A 40 GHz Railway Communication System," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. SAC-1, No.4, pp.615-622, Sept. 1983.
- [3.5] 塚本薫, 加藤泰典, 梅田周作, 河原伸幸, 永山博幸, 川崎邦弘, 中村一城, 辻宏之, 岡崎彰浩, 石津文雄, "40GHz 帯を用いた移動体無線通信システムのフィールド試験," 信学技報, RCS2013-149, pp.43-48, Oct. 2013.
- [3.6] 服部鉄範, 栗田明, 殖栗英介, 工藤司, 塚本薫, 岡崎彰浩, "鉄道における対列車ミリ波通信の伝搬試験," 信学技報, RCS2014-210, pp.79-84, Nov. 2014.
- [3.7] 中村一城, 岩澤永照, 岩城詞也, 竹内恵一, 川崎邦弘, 柴垣信彦, 梁取勝也, 佐藤洋介, 藤井誠人, 加島謙一, 菅野敦史, 山本直克, 川西哲也, "100GHz 帯ミリ波による対列車通信システムのフィールド試験," 信学技報, RCS2019-10, p45, Apr. 2020.
- [3.8] K. Abe, T. Hattori and H. Koizumi, "Millimeter-Wave Radio Communication System between Trains and Ground Facilities", IEEE Proc. 12th International Conference on Information Networking (ICOIN-12), pp.363-368, Jan. 1998.
- [3.9] H. Song, X. Fang, and Y. Fang, "Millimeter-Wave Network Architectures for Future High-Speed Railway Communications: Challenges and Solutions," IEEE Wireless Communications, pp.114-122, Dec. 2016.
- [3.10] D. He, B. Ai, K. Guan, Z. Zhong, B. Hui, J. Kim, H. Chung, and I. Kim, "Channel Measurement, Simulation, and Analysis for High-Speed Railway Communications in 5G Millimeter-Wave Band," IEEE Trans. On Intelligent Transportation Systems, Vol.19, No. 10, pp.3144-3158, Oct. 2018.

- [3.11] 松村善洋, 丹下智之, 西山武志, 笹木栄志, 岩本功貴, 中村一城, 荒川智樹, 井倉裕之, 眞田幸俊, "ミリ波の新幹線環境での活用を想定した 45GHz 帯伝搬特性の曲線区間での測定・解析及び適切な地上局配置間隔," 信学論(B), Vol.J105-B, no.3, Mar. 2022.
- [3.12] 生岩量久, 安昌俊, OFDM 技術とその適用, コロナ社, 東京, 2010.
- [3.13] 伊村真, "無線通信システム技術の変遷と今後の展望," 三菱電機技報, Vol.88, No.9, pp.66-69, Sept. 2014.
- [3.14] S. Alamouti, "Space block coding: A simple transmitter diversity technique for wireless communications," IEEE J. Select. Areas. Commun. , vol.16, no.5, pp.1451-1458, Oct. 1998.
- [3.15] 大槻知明, "7-2 時空間符号," 電子情報通信学会知識ベース 知識の森, 4 群 モバイル・通信, 1 編 無線通信基礎 7 章 MIMO 伝送, 電子情報通信学会, 2010.
- [3.16] ITU-R, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," P.838-3, Mar. 2005.
- [3.17] 今井哲郎, 電波伝搬解析のためのレイトレーシング法ー基礎から応用までー, コロナ社, 東京, 2016.
- [3.18] 今井哲郎, 角 誠, 多賀登喜雄, "レイトレーシング法を用いた市街地マクロセル伝搬推定システム," NTT DoCoMo テクニカルジャーナル, Vol.12, no.1, pp.41-49, Apr. 2004.

第4章 新幹線環境におけるミリ波 列車無線システムの提案と，地 上局配置間隔の決定

第3章において，無線回線の大容量化を目的として，45 GHz 帯ミリ波を新幹線に適用する検討としての伝搬特性評価とシミュレーションを実施した．具体的には，曲線区間において 45 GHz 帯の伝搬特性を測定するとともに，レイトレース法を用いたシミュレーションにより伝搬特性を評価し，アンテナのメインローブの外であっても一定の距離まではミリ波の電波が届くことを明らかにした．東海道新幹線は曲線区間が多いことから，この結果を用いて，東海道新幹線で使用可能なミリ波列車無線システムの実用化方式を提案する．さらに，想定される無線装置構成において，曲線区間における 45GHz 帯ミリ波方式の適切な地上局配置間隔を示す．

4.1 はじめに

高速に移動する鉄道における地上車上間通信インフラを高速化することは重要な課題である．周波数帯域を比較的確保しやすいミリ波を新幹線システムに適用することが考えられるが，ミリ波は直進性が高く，降雨減衰が大きいことが課題である．第3章にて測定とシミュレーションにより，曲線区間においてメインローブ外でも電波が届くことを明らかにした．しかし，新幹線は高速で走行するため無線機間隔を 400 m としても 5 秒に 1 回程度のハンドオーバが想定される．今まで報告されている 40 GHz 帯の通信実験[4.1-4.4]ではハンドオーバについての報告は無く，90 GHz 帯の試験[4.5]においては列車の位置による無線機の切り替えとしてのみ報告されている．本章では，短い無線機間隔においても全線にわたり無線が途切れ無い高速ハンドオーバを可能とするミリ波通信方式を提案する[4.6]．ミリ波は豪雨による減衰が大きいため，豪雨に対す

る利得向上策を含めた回線設計の補正を行い，新幹線に適用可能な提案方式の適切な地上局配置間隔について検討する．

4.2 新幹線で適用可能な無線装置構成の提案と豪雨対策の検討

4.2.1 新幹線に適用可能なミリ波無線装置の構成

3.3.1 項に記載の通り東海道新幹線は，最小曲線半径を $R = 2500 \text{ m}$ としたため，他の新幹線に比べミリ波の電波到達エリアが短くなる．これにより無線機間隔が短くなるため無線機を切替えるハンドオーバー回数が増加する．東海道新幹線は最高 285km/h で走行しており，無線機間隔を 400 m とするとハンドオーバーは 5 秒 に 1 度 となる．ここでセルの概念を導入し，セル内では同一の周波数を使用し周波数を切替えないセル内ハンドオーバーと，セルを渡る際に周波数を切替えるセル間ハンドオーバーの双方を使用することとした．セル内ハンドオーバーの場合は前スロットの同期信号の強度を参照することで使用するアンテナを切替える．

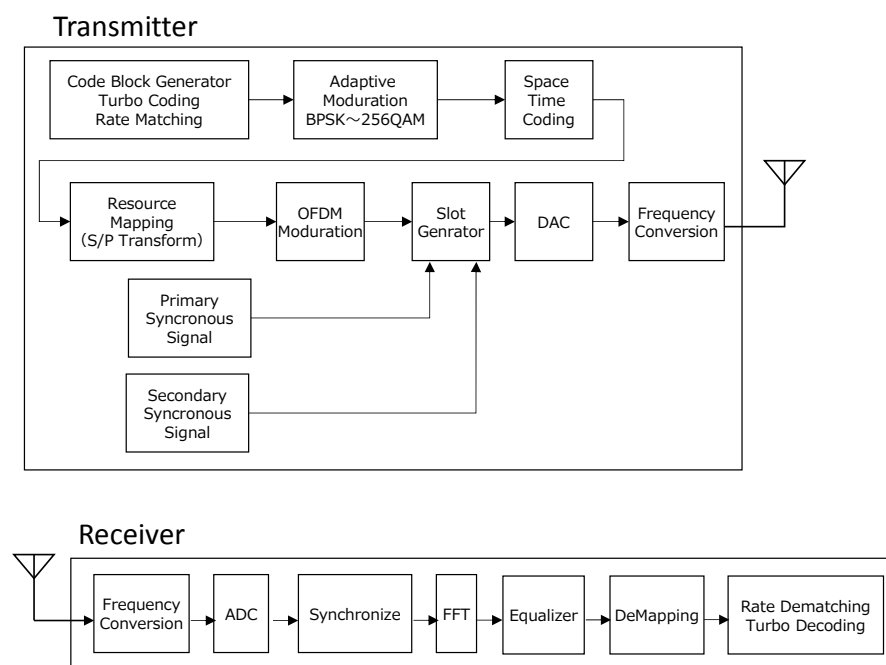


図 4.1 送信機・受信機の構成

一方セル間ハンドオーバでは、セルの境界のアンテナエリアに入ったらセル境界アンテナとの距離を同期信号により測定し、境界アンテナとの距離が一定の距離に到達したら周波数を切替える。新幹線への適用を想定している無線装置（以下提案方式という）の構成を図 4.1 に示す。

提案方式におけるセル配置とキャリア配置を図 4.2 に示す。3.4.7 項を踏まえ、セル内に同一周波数の地上局を複数配置し、信号強度の比較により、受信電力が最大になる 2 つの地上局と車上局が通信する。車上局も 1 先頭車に 2 台の無線機を設置しており、Alamouti[4.7]の符号化を用いた STBC による 2×2 送受信ダイバーシティの適用を想定した方式とすることで高速ハンドオーバが可能な方式としている。

提案方式の無線機仕様を表 4.1 に示す。制御信号や重要度の高い通信には常に BPSK 変調を用いて信頼性の向上を図っているが、その他の情報に対しては BPSK~256QAM の適応変調を適用し大容量通信を可能としている。送信出力は、3.3.3 項で使用した無線機の諸元に対し、電波伝搬測定結果や前述の変調方式を実現するための受信レベル、地上局の無線機間隔等を考慮し、60 mW とした。

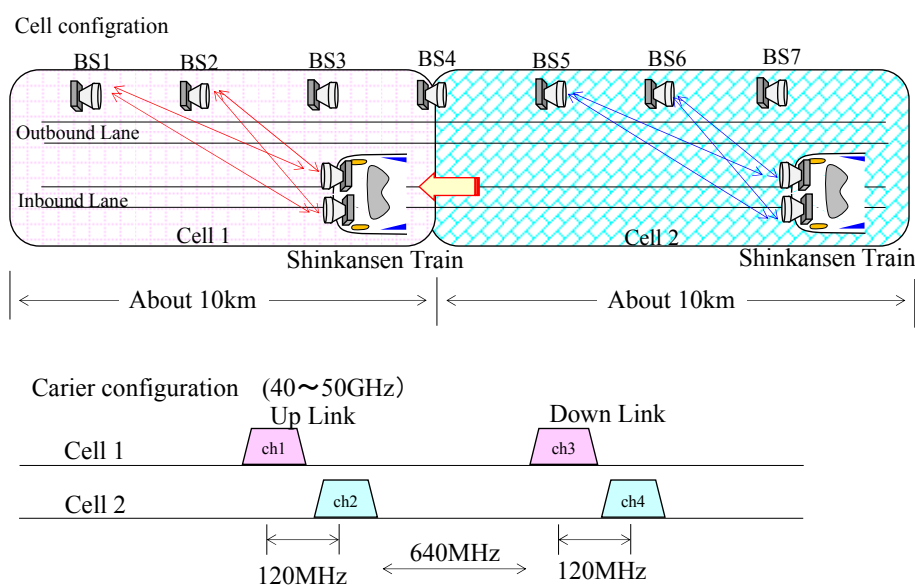


図 4.2 セルの構成とキャリア配置

表 4.1 無線機の仕様

送信電力	17.8 dBm (60mW)
多元接続方式	TDMA-FDD
1次変調方式	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
2次変調方式	OFDM
アンテナ	33dBi (レンズアンテナ)
最大通信速度	約500Mbps

4.2.2 提案方式のフレーム構成とスロット構成

提案方式のフレーム構成を図 4.3 に示す. 1 フレームに N スロットを収容することにより 1 セルに最大 $N-1$ 列車 (N は自然数) まで在線可能とし, 各列車に対してはスロットを均等に割り当てる. 図 4.3 に示す通り, アップリンク (Up Link : UL) とダウンリンク (Down Link : DL) は同期しており, アップリンクはダウンリンクのちょうど 1 msec 後 (1 スロット後) に割り当てられている. 同一セル内に最大 $N-1$ 列車となっているのは, UL の 1 スロット分はランダムアクセスチャネル (Random Access Channel : RACH) 用に確保されているためである.

Frame Configuration (the number of trains in the same cell is $N-1$)

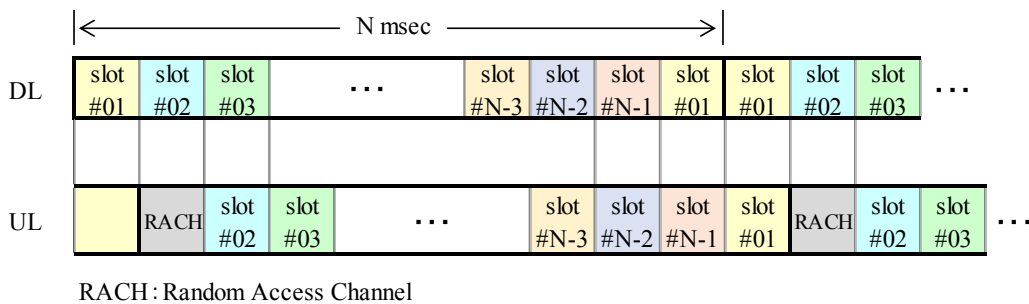
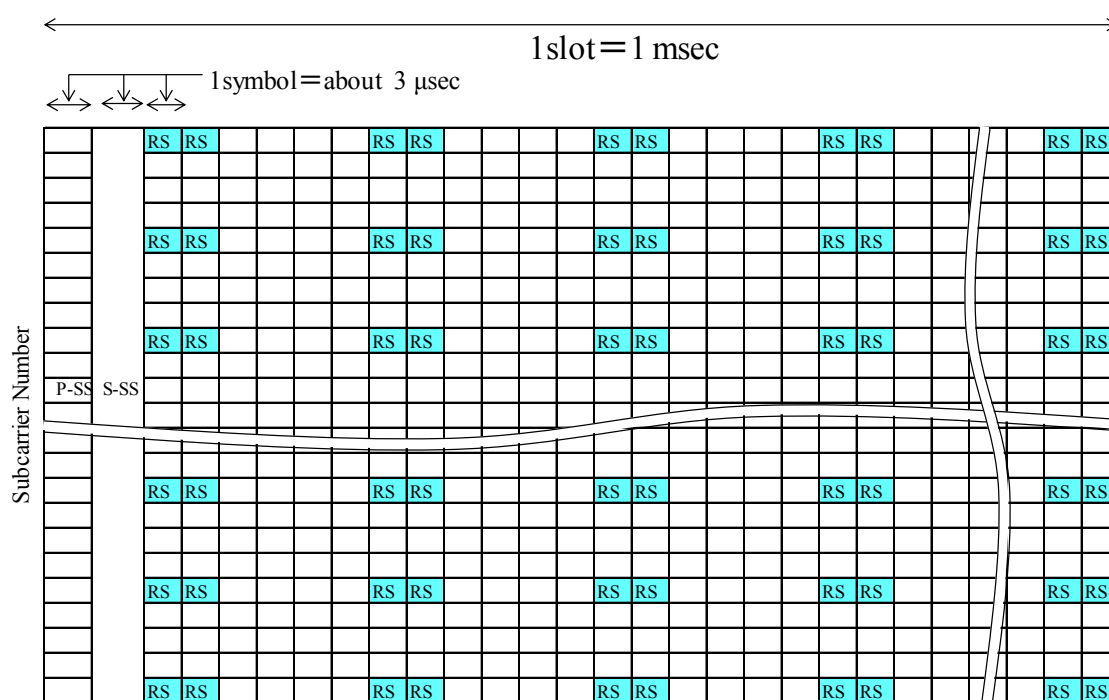


図 4.3 無線システムにおけるフレーム構成

提案方式のスロット構成を図 4.4 に示す. 1 スロット = 1 msec を基本単位として通信を行う. OFDM 変調を前提に数百キャリア, 数百シンボルを 1 スロットに含む. ここで P-SS は一次同期信号であり, Zadoff-Chu 系列を用いる. 一次同期信号は受信機

において自己相関をとることにより、スロットの先頭位置を検出するために用いられる。S-SS は二次同期信号であり、本帯域内においてスペクトル拡散された信号が用いられる。二次同期信号は主に自動周波数制御（Automatic Frequency Control : AFC）のために用いられると共に、セル内の地上局（BS）の特定とスロット番号（1～N-1）の特定に用いられる。さらにスロット内には既知の参照信号（Reference Signal : RS）が配置され、チャネル等化に用いられる。同期信号や OFDM における 1 シンボル長は約 3 μ sec であり、2 シンボル毎に STBC 化することで、送信ダイバーシティ機能を持つ。



P-SS: Primary Synchronous Symbol (Zad-off-Chu sequence)、
 S-SS: Secondary Synchronous Symbol (Spreaded Spectrum Signal)、RS: Reference Symbol
 Carrier Number=about 300、Symbol Length = about 3 μ sec、GI= about 0.1 μ sec

図 4.4 無線システムにおけるスロット構成

4.2.3 高利得モードの動作

ミリ波は降雨減衰が大きいいため、豪雨等の状況においても最低限の通信を確保するための対策が必要となる。提案方式に対して、降雨減衰が大きい際に、スロット構成を切り替えることにより、受信利得を増加させる高利得モードを提案し実用化可能と考えて

いる．高利得モードのイメージを図 4.5 に表す．但し図 4.5 はあくまでもイメージであり，本来の受信信号はフィルタを通過しておりこの波形と同一形状ではない．

高利得モードでは，OFDM 受信処理を行った信号を 16 回合成することで，信号成分は電圧次元において 16 倍となるが，雑音成分は電力次元で 16 倍になるため，理論上 12 dB の利得を得ることができる．提案方式は精密な位相同期が必要であり，高速走行中はドップラーシフトの影響を分離できないが，30 km/h 以下の低速走行時においては，図 4.4 に示した 2 次同期信号と参照シンボル (RS: Reference Symbol) により位相回転を補償することで利得の向上効果を得ることが出来る．実験的に実施した高利得モードのコンスタレーションを図 4.6 に示す．ここでは，信号の合成を行わないとき ($\times 1$ mode)，4 回合成したとき ($\times 4$ mode)，16 回合成したとき ($\times 16$ mode) のコンスタレーションの例を示している．

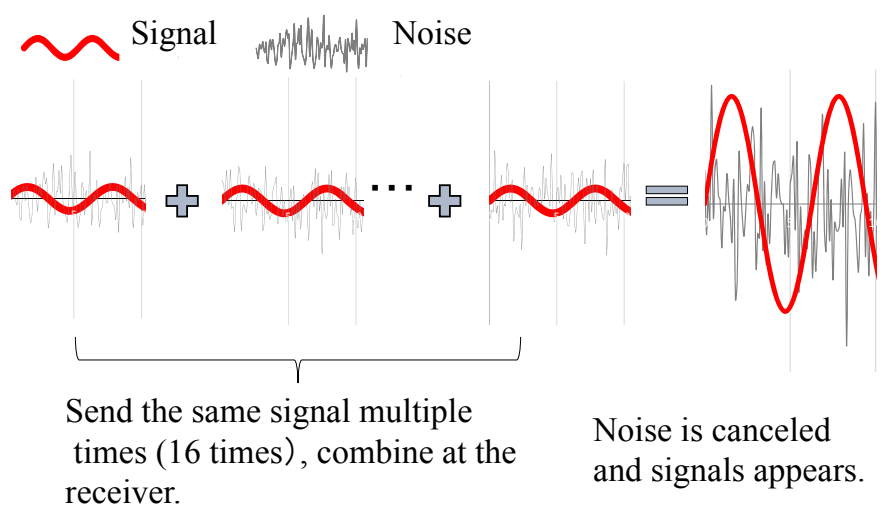


図 4.5 高利得モードの概念

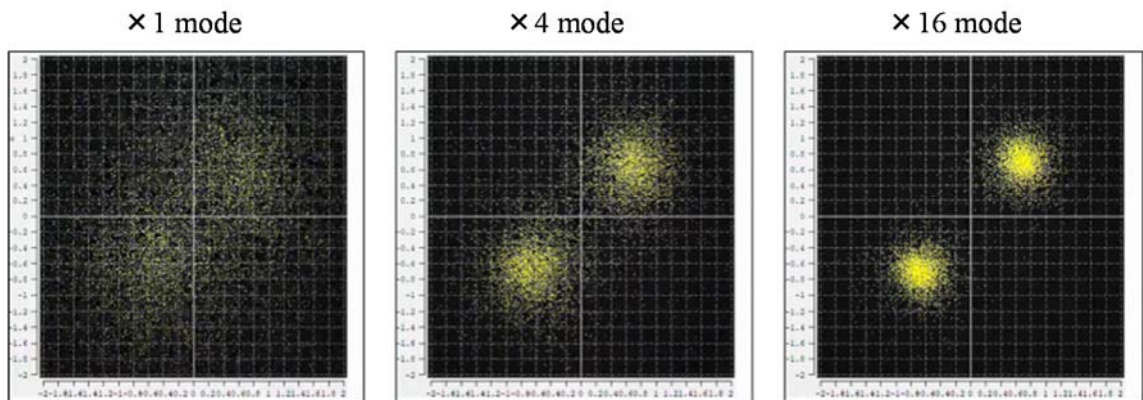


図 4.6 高利得モードのコンスタレーション例

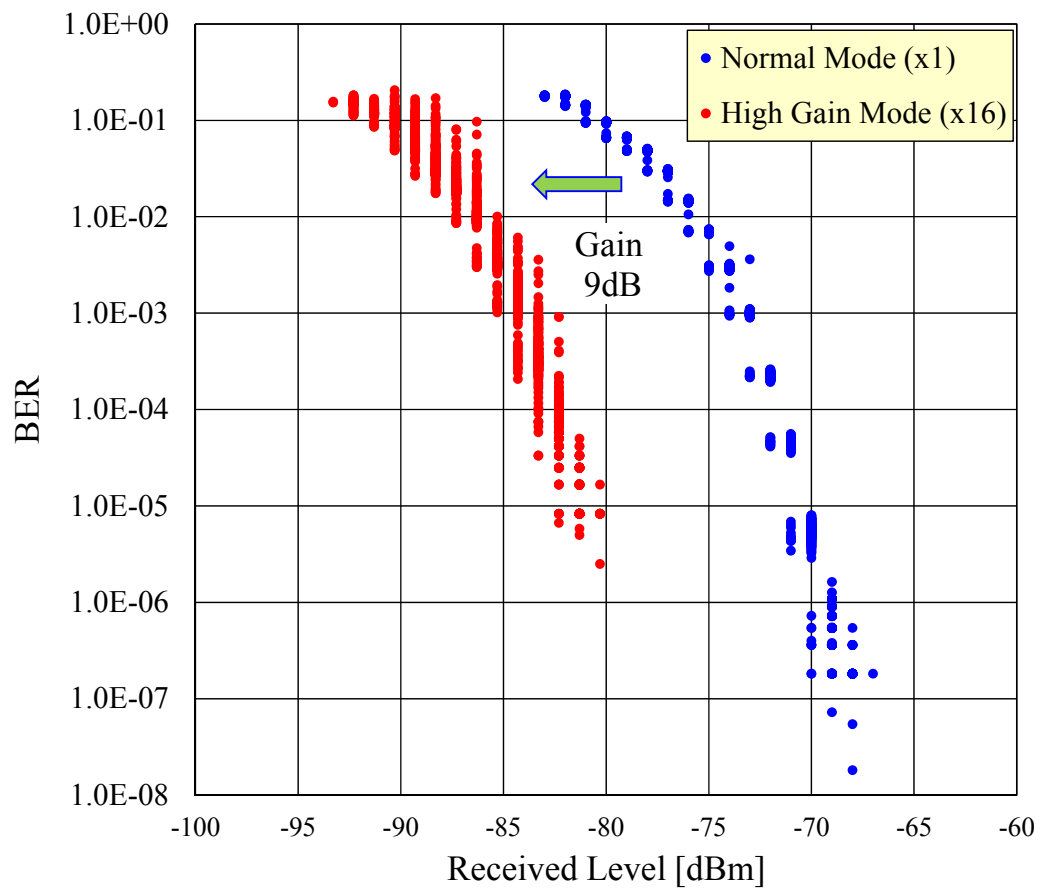


図 4.7 高利得モードによる効果 (FEC 無し)

静環境における高利得モードの効果を図 4.7 に示す. 本図においては所望 BER である

BER= 3×10^{-2} において約 9 dB の利得改善効果が得られていることから、最低受信レベルを 9 dB 低下でき、誤り訂正符号（Forward Error Correction : FEC）の採用を想定すると最低受信レベルを -90 dBm 程度に改善することができる。なお、信号を 16 回合成した×16mode の場合の通信速度は約 1.1 Mbps となる。

4.3 適切な地上局配置間隔の検討

4.3.1 回線設計

提案方式の直線区間における基本的な回線設計を図 4.8 に示す。回線設計に適用するパラメータは表 4.2 に示す[4.8,4.9]。表 4.2 におけるその他損失のうち、車体透過損失に、車上局を覆うレドームの損失分が考慮されている。最低受信レベルは、温度 300K を想定し受信帯域幅 120 MHz, 受信機 NF=10 dB, 変調方式 BPSK で BER= 3×10^{-2} を想定し、所要 C/N=2 dB とすると、 $-174 + 10 \log (120 \times 10^6) + 10 + 2 = -81.2$ dBm となる。図 4.8 における条件は、地上局車上局間距離 700 m, 降雨量想定は 1 時間に換算して 180 mm/h としている。180 mm/h は従来の LCX を用いた列車無線システムの要求条件である。運転士と総合指令所との通信は通常時だけでなく降雨による運転中止時などの豪雨時においても確保される必要がある。そのため豪雨にも対応可能な回線設計が求められる。なお沿線の雨量計の過去 12 年間の記録を確認すると 4 回、180 mm/h 相当（10 分雨量 30 mm）の降雨事象が発生しており、180 mm/h の想定は適切と考える。ミリ波は降雨減衰が大きいいためこの回線設計の場合、地上局車上局間距離は最大で 700 m 程度になる。

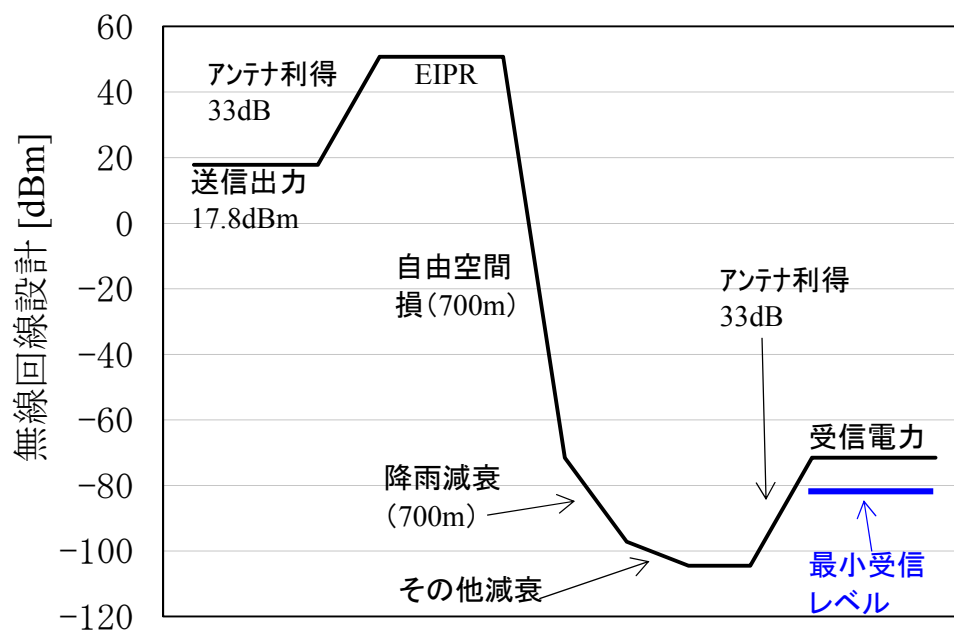


図 4.8 基本的な回線設計（地上局車上局間 700 m）

表 4.2 回線設計に使用するパラメータ

降雨減衰 (45.0GHz)	36.50 dB/km
その他減衰	-7.32 dB (700mに対応)
【その他減衰の内訳】 水蒸気損失、乾燥大気減衰、水膜減衰、車体透過損失を考慮	

4.3.2 高利得モードの効果を含めた回線設計

ここで、高利得モードの効果を含めた提案方式の回線設計を図 4.9 に示す。4.3.1 項においての回線設計では、地上局車上局間 700 m が限界であったが、地上局車上局間の距離を 900 m とすることができれば、必要な地上局数が削減できる。

地上局車上局間距離を 900 m に増加することで、降雨減衰とその他減衰が増加する。特に降雨減衰は 200 m で約 7.3 dB 増加し影響が大きい。ここで、高利得モードによる効果を踏まえることで、最低受信レベルが 9～11 dB 程度増加するため、180 mm/h の豪雨時においても地上局車上局間距離を 900 m として回線設計しても通信可能とすることができる。

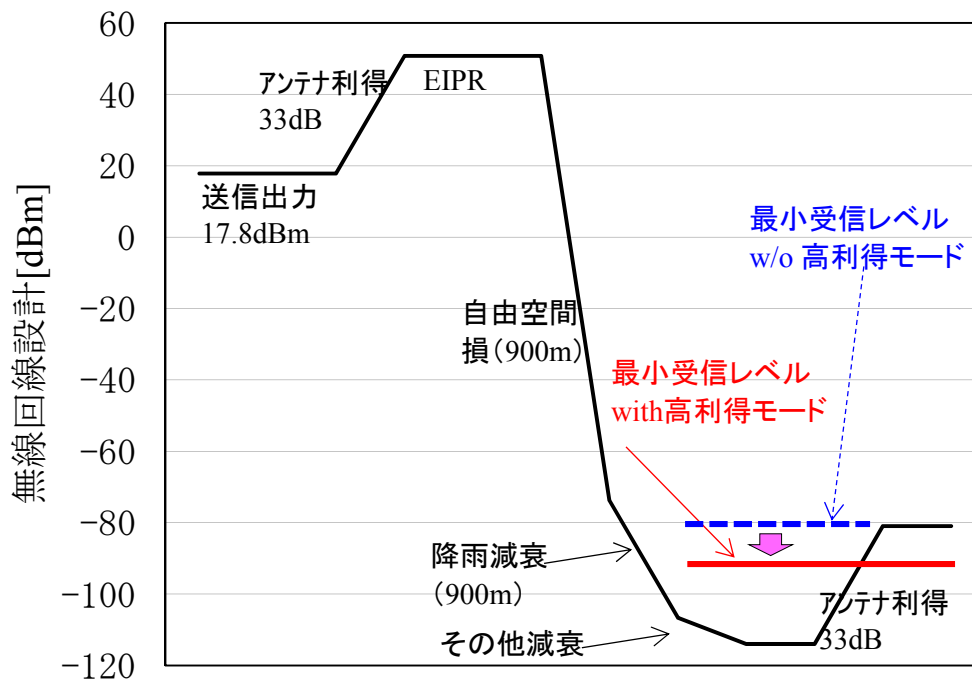


図 4.9 高利得モードの回線設計（地上局車上局間 900 m）

提案方式の地上局は線路沿線に設置する。車上局のアンテナは線路と平行を向いているため、すぐ真横にある地上局とは通信できない（図 4.10）。地上局からみると、列車の位置がある程度離れていないと通信できない、すなわち通信不能区間が存在する。今回、地上局の配置を検討するうえで、通信不能区間を約 100 m に設定している。この場合、高利得モードを適用しない場合の直線区間における地上局配置間隔は、基本的な回線設計における地上局車上局間距離の 700 m から通信不能区間の 100 m を減算した 600 m であるところ、高利得モードを適用すると、地上局車上局間距離が 900 m に延長され、地上局配置間隔は、通信不能区間の 100 m を同様に減算した 800 m となる。このため直線区間における地上局配置数は、地上局配置間隔が元々 600 m であったところ、高利得モードを適用することで 800 m となり、地上局数は 3/4 に削減できる。

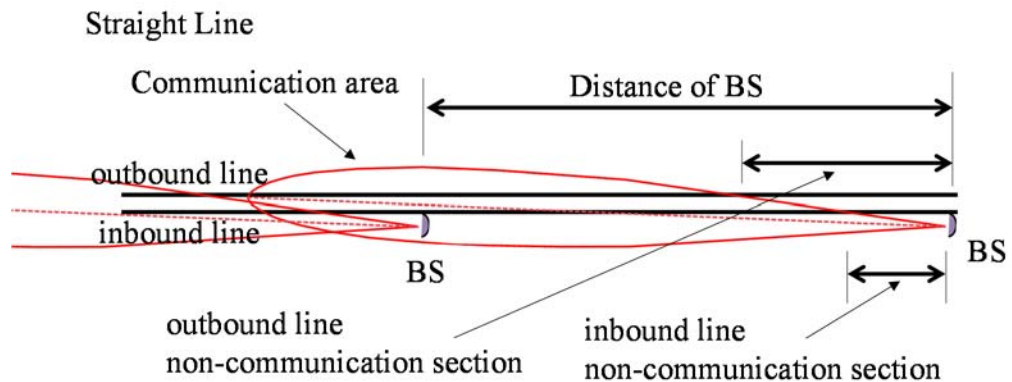


図 4.10 通信不能区間（近端距離）

4.3.3 曲線半径に応じた適切な地上局配置間隔

第3章において実測とシミュレーション結果から曲線区間における電波伝搬特性に関する考察を行った。これらの結果を元に曲線における無線通信距離及び地上局設置間隔を検討する。図 4.11 に $R = 2500 \text{ m}$ の曲線区間（防音壁無し）の通信距離に関する考察結果をもとに、回線設計パラメータを適用して求めた受信信号レベルを示す。高利得モードを想定した最低受信レベルを -90 dBm とした場合、直接波による単純な計算結果においては地上局車上局間 500 m 程度で最低受信レベルに達するのに対し、レイトレース法による受信信号レベルでは最低受信レベルに達するまで 550 m 程度まで長くなることが確認できる。

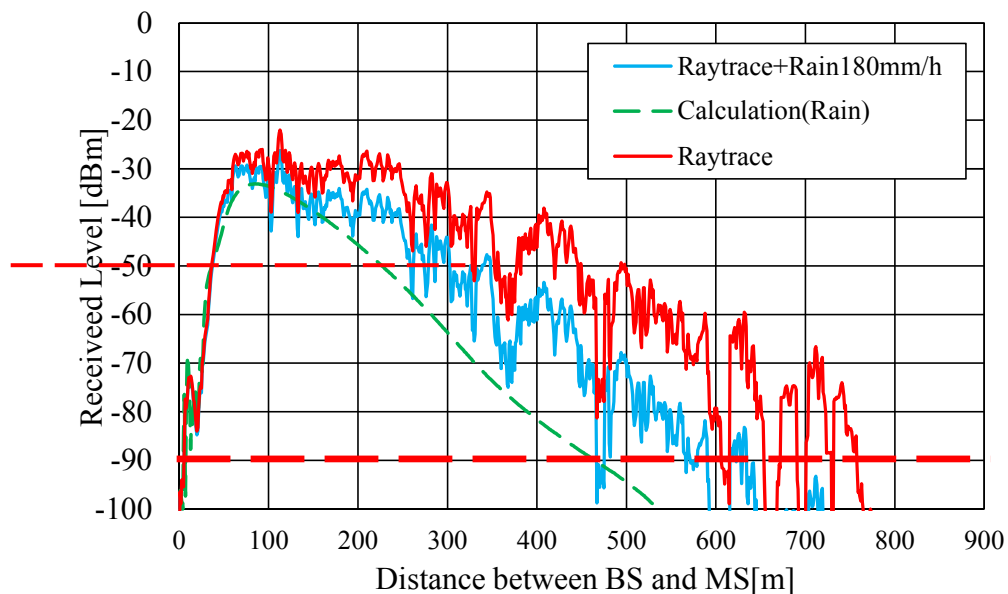


図 4.11 提案方式における回線設計を適用した受信信号レベル
(曲線区間 $R=2500$ m, 防音壁無し)

更に図 4.12 に $R=395$ m の曲線区間（防音壁無し）の考察結果をもとに、回線設計パラメータを適用して求めた受信信号レベルを示す．図 4.12 においても、直接波による単純な計算結果においては地上局車上局間 140m 程度で最低受信レベルに達するのに対し、レイトレース法による受信信号レベルでは最低受信レベルに達するまで 200 m 程度まで長くなることが確認できる．図 4.11 と図 4.12 の結果を比べると、図 4.12 は地上局車上局間の距離が短い分降雨減衰の影響が少なくなっているが、図 4.11 も図 4.12 もレイトレース法によるシミュレーション結果により、単純な直接波のみの計算結果に比べて、地上局車上局間距離が長くなることを示している．

これらの計算結果をもとに曲線半径と受信可能距離の関係を考察する．最大の地上局車上局間距離より、余裕を見て近端距離 100 m を減ずることにより適切な配置間隔が算出できる．その結果、 $R=400$ m の曲線の場合の地上局配置間隔は約 100 m、 $R=2500$ m の場合の地上局配置間隔は約 450 m となる．

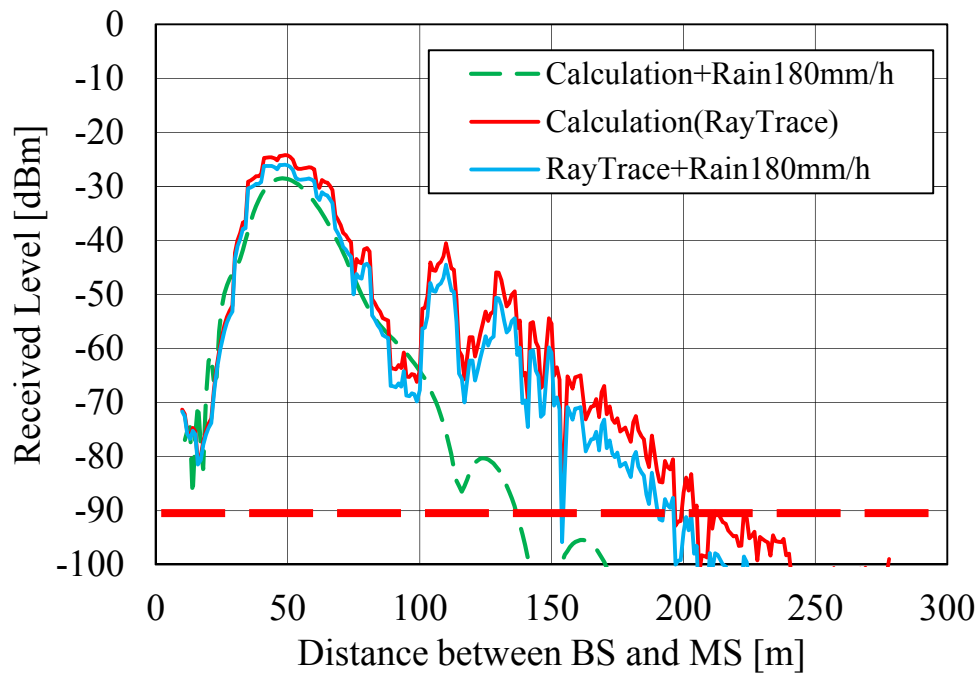


図 4.12 提案方式における回線設計を適用した受信信号レベル
(曲線区間 $R=395$ m, 防音壁無し)

4.4 結論

本章では、東海道新幹線において適用可能な無線装置構成と、高速走行時における円滑なハンドオーバを実現するためのセル構成、周波数配置を提案した。セル内では同一の周波数を使用し周波数を切替えないセル内ハンドオーバと、セルを渡る際に周波数を切替えるセル間ハンドオーバの双方を使用することで、全線にわたり継続して通信を続けることが可能な方式を提案した。

鉄道における無線システムは、安全運行を支える設備となるため異常時こそその可用性が求められる。そのため、今までに経験した最大降水量である 180 mm/h の豪雨まで対応可能とする必要がある。そこで、ミリ波の弱点である降雨減衰の影響を低減する高利得モードの適用を前提とした回線設計例を示し、地上局間隔を広げられることを確認した。

また、ミリ波シミュレーション結果を反映した曲線区間における 45 GHz 帯方式における適切な地上局間隔の定め方を示した。その結果、 $R=2500$ m の曲線区間における地上局配置間隔は約 450 m となった。

4.5 参考文献

- [4.1] 佐々木伸, 山村博, 川村武彦, "ミリ波による対列車通信," 鉄道総研報告 Vol.3, No.5, pp.17-25, May 1989.
- [4.2] 山村博, 林秀一, 鈴木尚子, 佐々木達也, "大容量ミリ波無線システム," 鉄道総研報告 Vol.9, No.11, pp.37-42, Nov. 1995.
- [4.3] 塚本薫, 加藤泰典, 梅田周作, 河原伸幸, 永山博幸, 川崎邦弘, 中村一城, 辻宏之, 岡崎彰浩, 石津文雄, "40GHz 帯を用いた移動体無線通信システムのフィールド試験," 信学技報, RCS2013-149, Oct. 2013.
- [4.4] 服部鉄範, 栗田明, 殖栗英介, 工藤司, 塚本薫, 岡崎彰浩, "鉄道における対列車ミリ波通信の伝搬試験," 信学技報, RCS2014-210, Nov. 2014.
- [4.5] 公益財団法人鉄道総合技術研究所, 株式会社日立国際電気, 国立研究開発法人情報通信研究機構プレスリリース, "世界初、90 GHz 帯を用いて時速 240 km で走行する列車と地上間で毎秒 1.5 ギガビットのデータ伝送に成功," Jan. 2019.
- [4.6] 松村善洋, 丹下智之, 西山武志, 笹木栄志, 岩本功貴, 中村一城, 荒川智樹, 井倉裕之, 眞田幸俊, "ミリ波の新幹線環境での活用を想定した 45 GHz 帯伝搬特性の曲線区間での測定・解析及び適切な地上局配置間隔," 信学論(B), Vol.J105-B, no.3, Mar. 2022.
- [4.7] S. Alamouti, "Space block coding: A simple transmitter diversity technique for wireless communications," IEEE J. Select. Areas. Commun., vol.16, no.5, pp.1451-1458, Oct. 1998.
- [4.8] ITU-R, P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods."
- [4.9] ITU-R, P.676-12, "Attenuation by atmospheric gases and related effects."

第5章 N700S 確認試験車による 走行試験での性能確認

第2章において新幹線の静電アンテナの小形化の提案を行い、その有効性を計算と測定により実証した。また第3章において45 GHz帯のミリ波電波の伝搬特性を測定とシミュレーションにて明らかにするとともに、第4章にて東海道新幹線で使用可能なミリ波列車無線システムの実用化方式を提案し、提案した無線装置構成において、曲線区間における45 GHz帯ミリ波方式の適切な地上局配置間隔を検討した。

東海道新幹線では、東海道・山陽新幹線の更なるブラッシュアップを目指し、技術開発を推進する試験専用車としてN700S確認試験車を走行させている。本章においては、実際の新幹線車両であるN700S確認試験車による走行試験で、第2章で提案した静電アンテナと、第4章で提案したミリ波列車無線システムが実用化可能であることを確認したので、その結果について述べる。

5.1 はじめに

これまで東海道新幹線では、新幹線車両の騒音を低減するため、様々な対策を行ってきた。騒音の一層の低減を図るため、東海道新幹線の先頭車両屋根上に設置されている静電アンテナについて、第2章では、形状の改良により、屋根上に突起していることによって発生している騒音を減らすことができないか検討を行った。アンテナ高さを低下させるとともにアンテナ形状を滑らかにすることで低騒音化を図れ、架線電圧検知性能と無線性能を満足することが明らかになった。

また、東海道新幹線では、指令と列車内の通信にLCX方式の列車無線を使用し、安全・安定輸送の確保、お客様への情報提供、異常時対応などに活用している。安全安定

輸送の確保やメンテナンスの省力化、セキュリティ強化をさらに推進するため、より高速で大容量の通信が可能となる、ミリ波方式列車無線システムを第 4 章にて提案した。

本章では、次世代高速鉄道のための無線通信システムとして、第 2 章にて提案した静電アンテナと第 4 章にて提案したミリ波方式列車無線システムを新幹線車両（N700S 確認試験車）に搭載し走行試験を実施し[5.1-5.4]，その結果を示す。静電アンテナに関しては、その形状において実際に架線電圧検知性能と構内無線それぞれの性能が従来の性能と同等であることと、騒音低減効果を得られることを確認する。また、ミリ波方式列車無線システムに関してある一定区間の走行試験の結果を示し、高速ハンドオーバを実現することによりミリ波通信を新幹線環境でも適用可能であることを示す。

5.2 低騒音化した静電アンテナの走行試験結果

5.2.1 提案静電アンテナの走行試験概要

新幹線 N700S 確認試験車に、提案静電アンテナ（以下提案アンテナ）と従来型静電アンテナ（以下従来アンテナ）を設置し、走行試験による性能評価を行う。試験区間は東海道新幹線区間とする。走行試験では、架線の検知電圧 V_d 、構内無線の受信信号強度（Received Signal Strength Indicator：RSSI），騒音特性を測定する。試験時の天候は晴天であった。

5.2.2 架線電圧検知性能

図 5.1 に、東海道新幹線の上下線全区間の中で架線の検知電圧 V_d が最低となった区間の走行試験結果を示す。図 5.1 において、検知電圧 V_d は、架線加圧有無を判定可能な基準値 V_n で規格化している。架線は、約 1000 m～1500 m 程度の有限長のため、両端の引張箇所付近の 2 本の架線が重複する部分が周期的に存在する（図 5.2 の青と赤の双方が重なる区間）。そのため、図 5.1 の◎で示した部分では、検知電圧が高くなっている。また、1～2 秒間隔でも周期的に検知電圧が高くなるが、これは図 5.3 に示す電化柱に付属する架線を支える金属棒（架線と同電位）によるものである。これら金属物や金属線が本アンテナに近づくことで、架線と本アンテナの間の静電容量が大きくなり、検知電圧が高くなると考えられる。

検知電圧の全線を通しての最低値を V_{dmin} とすると、 V_{dmin}/V_n は、提案アンテナで 6.70、従来アンテナで 8.00 であり、東海道全区間において使用に問題がないことを確認できた。検知電圧が最低となった区間は、切取区間（山を切り取って線路を通した区間）であり、最低値のポイントは線路上空に陸橋がある箇所であった。切取区間の壁面や陸橋は、車体や線路と同じ電位で GND となるため、架線と GND の間に浮遊容量が発生することで架線－アンテナ間の静電容量が低下すると考えられる。

検知電圧 V_d/V_n の東海道全区間での平均値は、提案アンテナで 13.8、従来アンテナで 16.3 であり、提案アンテナは従来アンテナの 0.85 倍であった。これは、2.3.3 項での計算結果の 0.78 倍とおおむね対応しており、設計の妥当性を確認することができた。

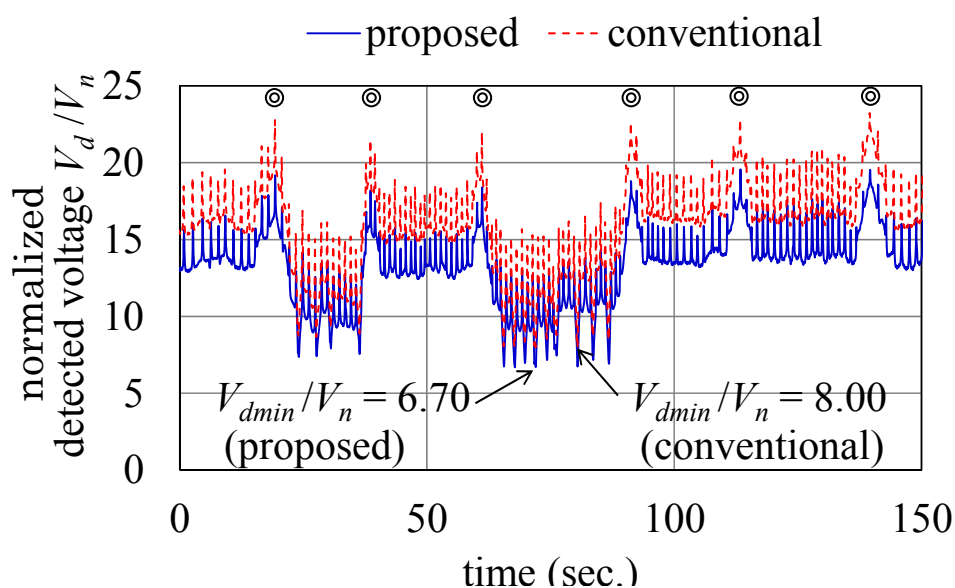


図 5.1 架線電圧検知の走行試験結果

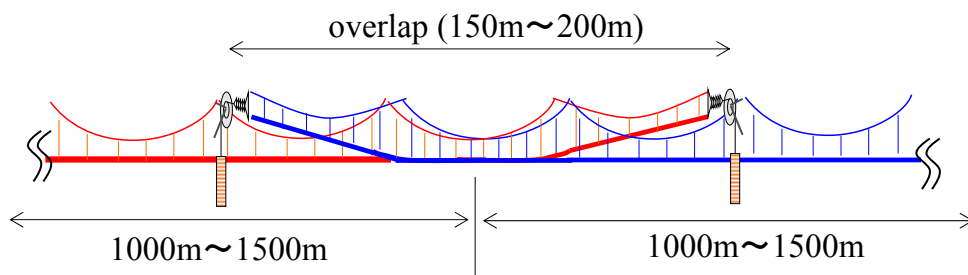


図 5.2 架線の重複区間

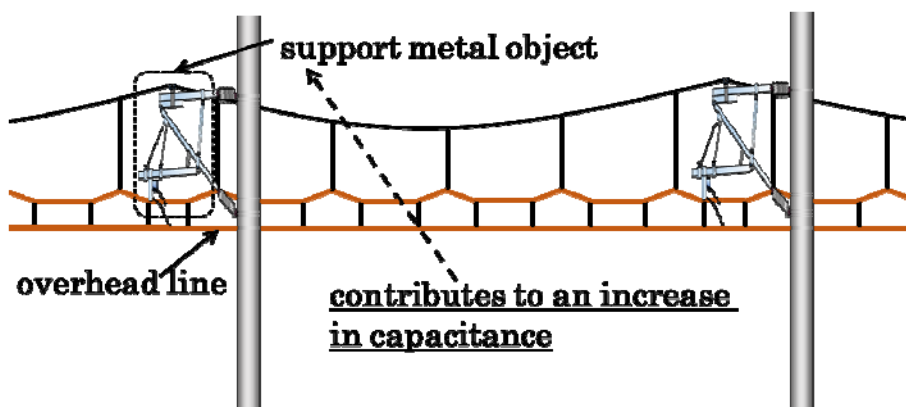


図 5.3 新幹線における標準的な架線構成

5.2.3 無線性能

無線性能の測定は、構内無線により、小田原駅、熱海駅、新富士駅、掛川駅、三河安城駅付近において実施する。送信は駅周辺に設置されている八木宇田アンテナにより行い、試験車両に設置した提案アンテナと従来アンテナで受信する。使用周波数は f_1 である。試験方法は、10 秒送信、5 秒間欠を繰り返した。

まず、サービスエリアが広い代表的な駅として掛川駅における構内無線受信レベルの測定結果を図 5.4 に示す。構内無線のサービスエリアは、駅構内に入る外側の信号機のさらに 150 m 外側までのエリアと定められている。掛川駅の場合、駅を中心とした 4.625 km がサービスエリアとなる。サービスエリア内において提案アンテナの受信レベルが従来アンテナに比べ高い傾向にあることが分かる。

また、各駅のサービスエリア境界においての受信レベルの比較を図 5.5 に示す。提案アンテナの受信レベルは、従来アンテナに比べて 0~2.6 dB 高いことが分かる。これ

は、提案アンテナの利得が従来アンテナより高いためと考えられる．2.3.4 項で示したように、水平面内平均化利得は、 f_1 において提案アンテナが従来アンテナより 3.1 dB 高い．両アンテナの利得の差分が、走行試験結果に傾向として現れていることが確認できる．

これらの試験結果により、無線通信用として、提案アンテナが従来アンテナに比べ優れた利得を有していることを実証できた．

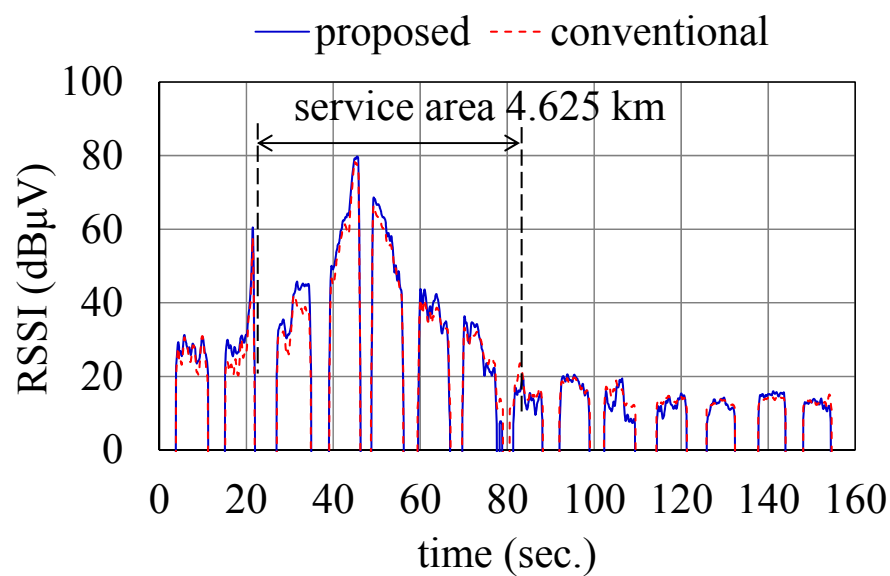


図 5.4 掛川駅における構内無線受信レベルの比較

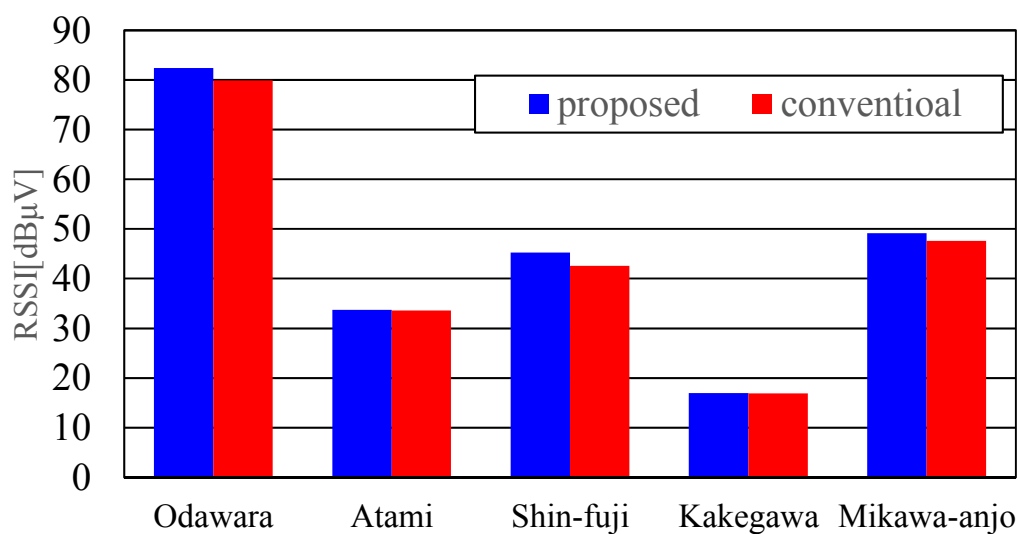


図 5.5 各試験駅サービスエリア境界での受信レベル

5.2.4 騒音特性

最後に、走行試験における騒音特性の測定結果を示す。アンテナ部分の騒音をマイクロホンアレイによるビームフォーミング法により測定した。図 5.6 に示すように、提案アンテナの騒音は、従来アンテナに比べて 6.0 dB 低減し、提案アンテナの低騒音化の効果を確認することができた。

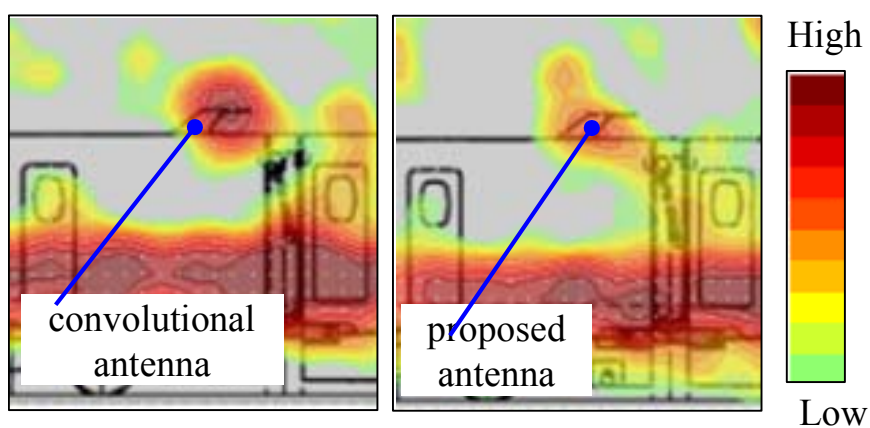


図 5.6 アンテナの音圧レベル比較

5.3 提案したミリ波列車無線システムの走行試験結果

5.3.1 ミリ波列車無線システムの走行試験概要

新幹線 N700S 確認試験車の両先頭車と、約 4 km 程度の地上試験区間にミリ波無線装置を設置し、走行試験による性能評価を行う。試験区間は、岐阜羽島駅と米原駅間の約 4 km の区間とした。走行試験では、セル内ハンドオーバーとセル間ハンドオーバーの試験を実施した。試験時の天候は晴天であった。

5.3.2 セル内ハンドオーバー試験

提案方式を前提とし、表 5.1（表 4.1 と同一）に仕様を示した無線機を用いて走行試験を実施した。本試験は、直線区間と $R=3000\text{m}$ の曲線が続く約 4 km の区間にて実施し、地上局を 4 局設置した。そこに 1 編成の車上局を速度 283 km/h で走行し、地上局と車上局の間の通信を継続して確認した。最初にセル内ハンドオーバー試験における地上局の配置を図 5.7 に示す。またセル内ハンドオーバー試験における受信信号電力の変化を図 5.8 に示す。図 5.8 は、列車が 0 km から図における右方向に移動している際の受信レベルの変化である。ここで、0 km～0.5 km 付近までは地上局 1 箇所だけ受信できているが、0.5 km を超えたところから、その場所で受信できる地上局のうち受信レベルが高い方から最大 2 箇所の地上局からの電波を選択して受信し続けていることを示している。本区間では同じ周波数の地上局を A～D まで、4 局設置しているがそのうち受信レベルの高い 2 つの地上局を選択し続けることで、地上局 A,B の組合せから、B,C の組合せ、C,D の組合せ、と移行して、ハンドオーバーを実現している。

表 5.1 無線機の仕様

送信電力	17.8 dBm (60mW)
多元接続方式	TDMA-FDD
1次変調方式	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
2次変調方式	OFDM
アンテナ	33dBi (レンズアンテナ)
最大通信速度	約500Mbps

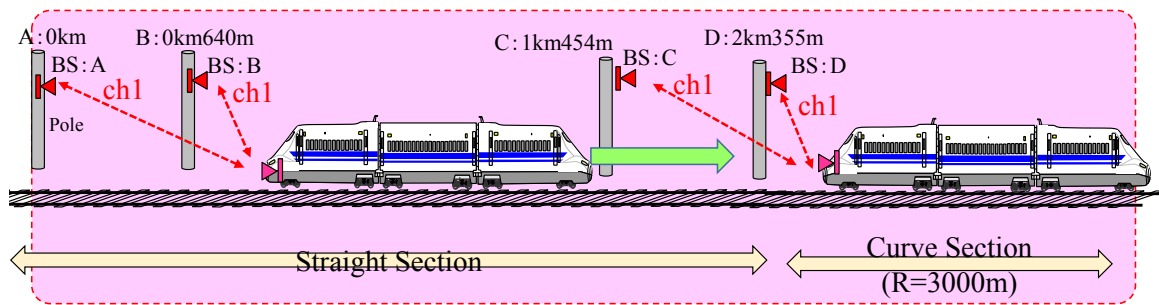


図 5.7 走行試験時の地上局の配置（セル内ハンドオーバ）

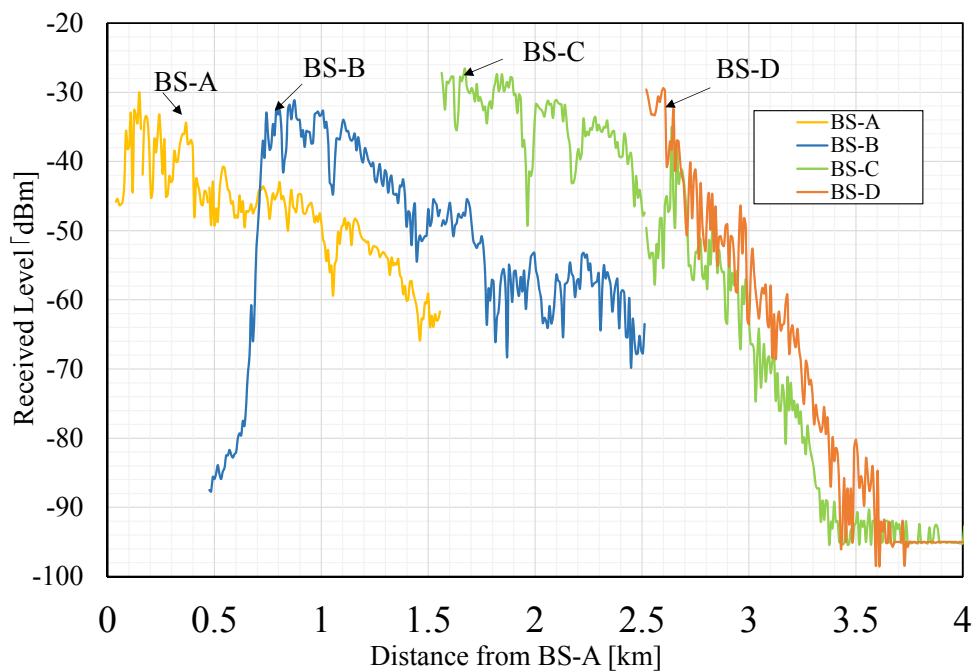


図 5.8 走行試験時の受信信号電力（セル内ハンドオーバ）

5.3.3 セル間ハンドオーバ試験

図 5.9 にセル間ハンドオーバ試験の構成を、図 5.10 にセル間ハンドオーバ試験における受信信号電力の変化を示す。BS : A, BS : B の 2 局で薄赤色のセル、BS : C, BS : D の 2 局で水色のセルを構成している。薄赤色と水色のセルでは周波数（チャンネル）が異なり、ここでは赤色のセルを ch1, 水色のセルを ch2 としている。試験列車は水色のセルから薄赤色のセルに移動する。

図 5.10 において、横軸は地上局 A からの距離、縦軸は地上局 A～D から車上局に到達した電波の受信電力（dBm）を示している。セルの境界で、BS-A,B と BS-C,D の受信電力が切り替わっているが、これは、セル境界でセル間ハンドオーバが行われ、周波数

が切り替わることで通信先の地上局が C と D から、A と B に切り替わっていることを示している。

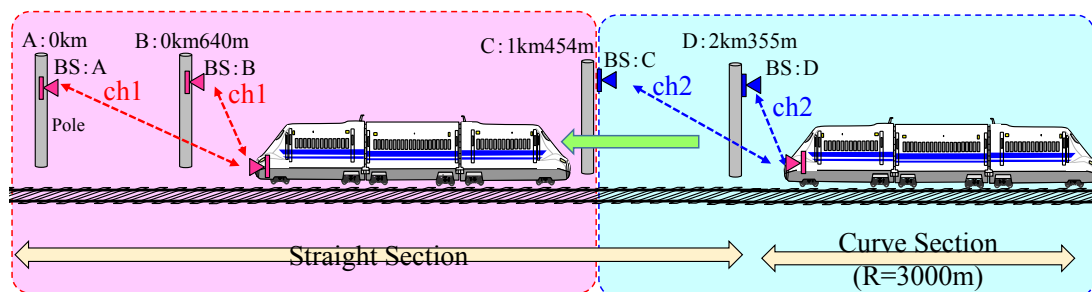


図 5.9 走行試験時の地上局の配置（セル間ハンドオーバ）

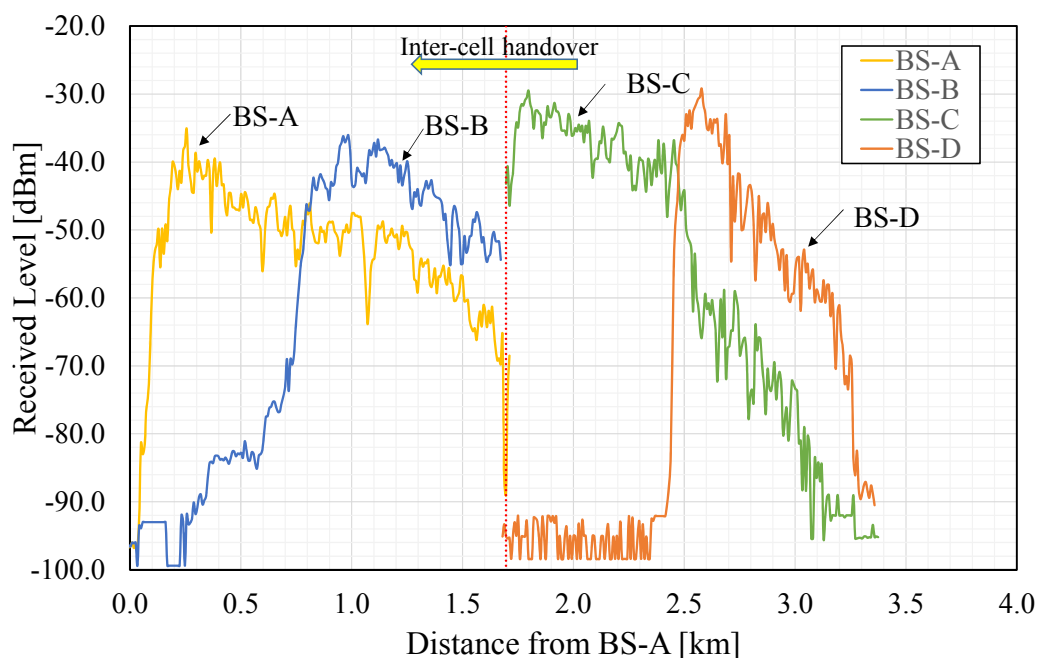


図 5.10 走行試験時の受信信号電力（セル間ハンドオーバ）

なお走行試験における最大伝送速度について記す。図 5.7 の無線機配置で BS-A 及び BS-B のみ使用した走行試験においては、約 30 秒間継続して、Up Link 505 Mbps, Down Link 508 Mbps の通信を確認した。この走行試験により、本ミリ波無線装置が、新幹線のような高速鉄道において、大容量無線通信インフラの無線装置として利用できる可能性を示すことができた。

5.4 結論

本章では、最初に提案静電アンテナの実使用状況での走行試験結果を示した。走行試験において提案アンテナの架線検知電圧の従来アンテナに対する比率は、平均するとおむね計算の通りであり、設計の妥当性を確認できた。架線検知電圧の全線を通しての最低値は、架線加圧有無を判定可能な基準値の 6.7 倍であり、東海道全区間において使用に問題がないことを実証した。また、提案アンテナの無線通信の受信レベルは、従来アンテナより 0~2.6 dB 高く、両アンテナの利得の差分が走行試験結果に現れていることを確認できた。更に、騒音特性も測定し、低騒音化の効果を確認した。

次に、提案方式のミリ波無線機の走行試験結果を示した。セル内ハンドオーバー、セル間ハンドオーバーを円滑に実施でき、LCX 方式に比べ地上車上間通信を改善できるミリ波通信を新幹線環境に適用可能で、大容量無線通信インフラの無線装置として利用できる可能性を示すことができた。

第 2 章で提案した静電アンテナは東海道新幹線 N700S 系新幹線量産車 1 編成目から採用され順調に運用されている[5.5]。また、第 4 章で提案したミリ波無線装置も次期新幹線列車無線システムとして採用されることが決定した。ミリ波無線装置車上局を新幹線の両先頭車に設置し、地上局を車上装置と対向に設置することで、最大 1 Gbps の通信が可能な車上地上間のミリ波方式列車無線システムが実現される予定である[5.6]。

5.5 参考文献

- [5.1] 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, 西本研悟, 坪浩行, 眞田幸俊, ”新幹線向け架線電圧検知／無線通信共用アンテナの降雨降雪対策と性能評価,” 信学技報, A・P2019-114, RCS2019-206, pp.19-24, Nov. 2019.
- [5.2] Y. Matsumura, E. Sasaki, T. Nishiyama, K. Nishimoto, H. Akutsu, and Y. Sanada, “Performance Evaluation of Miniaturized Antenna of the Shinkansen Used for Overhead Line Voltage Detection and Wireless

Communication”, Proceeding of the 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, (WPMC2020), Online, Oct. 2020.

- [5.3] 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, 西本研悟, 坪浩行, 眞田幸俊, ”新幹線架線電圧検知・無線通信共用アンテナの小形化と試験結果,” 信学論(B), Vol.J104-B, no.1, pp.42-53, Jan. 2021.
- [5.4] 松村善洋, 丹下智之, 西山武志, 笹木栄志, 岩本功貴, 中村一城, 荒川智樹, 井倉裕之, 眞田幸俊, ”ミリ波の新幹線環境での活用を想定した 45 GHz 帯伝搬特性の曲線区間での測定・解析及び適切な地上局配置間隔,” 信学論(B), Vol.J105-B, no.3, Mar. 2022.
- [5.5] 笹木栄志, 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, 西本研悟, 牧村英俊, 坪 浩行, “東海道新幹線新型静電アンテナの開発,” 日本鉄道サイバネティクス協議会, 2020 年度鉄道サイバネシンポジウム Nov. 2020.
- [5.6] JR 東海 ニュースリリース, "東海道新幹線におけるミリ波方式列車無線の整備について, " Sept. 2021.

第6章 本論文の結論

本論文では、新幹線をはじめとする次世代高速鉄道に向けて、無線通信速度の改善のためのミリ波の適用に向けた検討と、次世代高速鉄道に利用するアンテナ形状の改善の検討を実施した。まず第2章では、折り返しモノポール構造の採用と並列共振回路の付加により、検知棒を短縮し小形化した新幹線用静電アンテナを提案し、その電気的特性を明らかにした。続いて第3章においては、高速鉄道へのミリ波の適用を想定し、曲線区間において45 GHz帯の伝搬特性を測定するとともに、レイトレース法を用いたシミュレーションにより伝搬特性を評価し、アンテナのメインローブの外であっても一定の距離まではミリ波の電波が届くことを明らかにした。第4章においては、東海道新幹線で使用可能なミリ波列車無線システムの実用化方式を提案した。また、想定される無線装置構成において曲線区間における45 GHz帯ミリ波方式の適切な地上局配置間隔を示した。第5章では、実際の新幹線車両であるN700S確認試験車による走行試験を実施し、第2章で提案した静電アンテナと、第4章で提案したミリ波列車無線システムが実用化可能であることを確認した。

6.1 新幹線静電アンテナの低騒音化（第2章）

第2章では、新幹線先頭車屋根上に搭載された静電アンテナの形状の改良により、屋根上に突起していることによって発生している騒音を、低減することを検討している。ここでは、従来の静電アンテナの内部構造に対して、折り返しモノポール構造の採用と並列共振回路の付加により、検知棒を短縮し小形化した新幹線用静電アンテナを提案した。検知棒を短縮すると架線電圧検知性能が劣化するが、騒音を低減するアンテナレドーム形状内でアンテナ基板面積を可能な限り大きくすることで架線電圧検知性能の劣化を実用上問題無い範囲に収めている。

提案した静電アンテナの電気的特性を計算と測定により示し、積雪・降雨の架線電圧検知性能への影響を実験と計算により確認した。これにより、騒音が低く設定された提案アンテナの形状でも、従来アンテナとほぼ同等の電気的特性を発揮することを示した。

6.2 新幹線環境での活用を想定したミリ波の 45 GHz 帯伝搬特性の測定と解析（第 3 章）

第 3 章では、無線回線の大容量化を目指して、45 GHz 帯ミリ波を新幹線に適用する検討を行っている。ミリ波は直進性が高いため、高速鉄道においてはその直進性を活かした通信エリアを構成することができる。しかし東海道新幹線は他の新幹線に比べ曲線半径が短いため、直進性の高いミリ波の電波到達エリアが短くなる。但し実際の鉄道沿線環境においては、防音壁や電化柱など電波を反射する物体が多数存在する。

ここで上記の反射物影響を含む、鉄道の曲線環境における伝搬測定結果の一例を示した。そして伝搬測定結果とシミュレーション結果の比較を行い、鉄道の曲線区間の電波伝搬について明らかになった特徴として、曲線区間においてもメインローブ範囲外にまで電波が到達しうること、更にその原因は主にレールによる反射であることを示した。

6.3 新幹線環境におけるミリ波列車無線システムの提案と、地上局配置間隔の決定（第 4 章）

第 4 章では、東海道新幹線で使用可能なミリ波無線機の実用化方式を提案している。新幹線は高速で走行するため無線機間隔を 400 m としても 5 秒に 1 回程度のハンドオーバーが想定される。短い無線機間隔においても全線にわたり無線が途切れ無い、高速ハンドオーバーを可能とするミリ波通信方式を提案した。提案方式にはセルの概念を導入し、セル内では同一の周波数を使用し周波数を切替えないセル内ハンドオーバーと、セルを渡る際に周波数を切替えるセル間ハンドオーバーの双方を使用することで、全線にわたり継続して通信を続けることが可能な方式とした。

鉄道における無線システムは、安全運行を支える設備となるため異常時こそ可用性が求められる。すなわち今までに経験した最大降水量である 180 mm/h の豪雨まで対応

可能とする必要がある。そこで、ミリ波の弱点である降雨減衰の影響を低減する高利得モードの適用を前提とした回線設計例を示し、地上局間隔を広げられることを確認した。さらに想定される無線装置構成において、曲線区間における 45 GHz 帯ミリ波方式の適切な地上局配置間隔を示した。

これにより、提案ミリ波無線機を高速鉄道に適用することが可能であることと、その際における地上局配置間隔が明らかになった。

6.4 N700S 確認試験車による走行試験での性能確認 (第 5 章)

第 5 章では、第 2 章で提案した低騒音型の静電アンテナと、第 4 章で提案したミリ波無線機を、東海道新幹線の N700S 確認試験車に搭載し、走行試験によりその性能を確認している。

提案静電アンテナの走行試験の結果としては、提案静電アンテナの架線検知電圧の従来アンテナに対する比率は、おおむね計算の通りであり、設計の妥当性を確認できた。また、提案静電アンテナの無線通信の受信レベルは、従来アンテナより 0~2.6 dB 高く、両アンテナの利得の差分が走行試験結果に現れていることを確認できた。更に、騒音特性も測定し、提案静電アンテナによる低騒音化の効果を確認した。

提案したミリ波無線機の走行試験の結果は、セル内ハンドオーバ、セル間ハンドオーバを円滑に実施できることを確認した。この結果、LCX 方式に比べ地上車上間通信を改善できるミリ波通信を新幹線環境に適用可能で、大容量無線通信インフラの無線装置として利用できる可能性を示すことができた。

6.5 全体のまとめ

本論文では、次世代の高速鉄道にふさわしい無線システムとして、低騒音化が可能となる静電アンテナの提案と、通信速度の飛躍的な向上が可能となるミリ波無線機の提案を行った。

提案した静電アンテナは、従来の静電アンテナに比べ、走行騒音が 数 dB 低減されて

いるにもかかわらず、従来の静電アンテナとほぼ同等の性能を示すことを確認した。提案した静電アンテナは、東海道新幹線 N700S 系新幹線量産車 1 編成目から採用され順調に運用されている。

また、今回提案したミリ波無線装置は、今後の安全安定輸送の確保やメンテナンスの省力化、セキュリティ強化のため、次期新幹線列車無線システムとして採用されることが決定した。ミリ波無線装置車上局を新幹線の両先頭車に、ミリ波無線装置地上局を車上装置と対向に設置することで、最大 1 Gbps の通信が可能な車上地上間の無線通信方式が実現される予定である。

付録 A 著作一覧

A.1 査読付き論文

- [1] 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, 西本研悟, 坪浩行, 眞田幸俊, ”新幹線架線電圧検知・無線通信共用アンテナの小形化と試験結果,” 信学論(B), Vol.J104-B, no.1, pp.42-53, Jan. 2021.
- [2] 松村善洋, 丹下智之, 西山武志, 笹木栄志, 岩本功貴, 中村一城, 荒川智樹, 井倉裕之, 眞田幸俊, ”ミリ波の新幹線環境での活用を想定した 45GHz 帯伝搬特性の曲線区間での測定・解析及び適切な地上局配置間隔,” 信学論(B), Vol.J105-B, no.3, Mar. 2022. [採録通知受領済み]
- [3] N. Nonaka, K. Muraoka, T. Okumura, S. Suyama, Y. Okumura, T. Asai, and Y. Matsumura, ”28 GHz-Band Experimental Trial Using the Shinkansen in Ultra High-Mobility Environment for 5G Evolution”, IEICE Trans. Commun., Vol.E104-B, no.9, pp.1000-1008. Sep. 2021.

A.2 国際学会

- [1] Y. Matsumura, E. Sasaki, T. Nishiyama, K. Nishimoto, H. Akutsu, and Y. Sanada, ”Performance Evaluation of Miniaturized Antenna of the Shinkansen Used for Overhead Line Voltage Detection and Wireless Communication”, Proceeding of the 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, (WPMC2020), Online, Oct. 2020.
- [2] K. Nishimoto, H. Akutsu, Y. Nishioka, N. Yoneda, Y. Matsumura, E. Sasaki, and T. Nishiyama, ”Miniaturized Shinkansen Antenna for Overhead Line Voltage Detection and Wireless Communication”, Proceeding of 2020

International Symposium on Antennas and Propagation, (ISAP2020), Online, no.4B2, Jan. 2021.

- [3] N. Nonaka, K. Muraoka, T. Okuyama, S. Suyama, Y. Okumura, T. Asai, and Y. Matsumura, “28 GHz-Band Experimental Trial at 283 km/h Using the Shinkansen for 5G Evolution”, Proceeding of 91st IEEE Vehicular Technology Conference, (2020 VTC-Spring), pp.1-5, Online, May 2020
- [4] T. Tange, Y. Matsumura, T. Nishiyama, E. Sasaki, T. Arakawa and H. Igura, “Development of Millimeter Wave Radio Equipment Which Can Realizes High-Capacity Wireless Communication for The Shinkansen”, Proceeding of the 13th World Congress on Railway Research, (WCRR2022, Birmingham, England), June 2022, [Accepted]

A.3 国内研究会

- [1] 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, 西本研悟, 坪浩行, ”新幹線向け架線電圧検知／無線通信共用アンテナの試験結果,” 信学ソ大, no.B-1-50, Sept. 2019.
- [2] 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, 西本研悟, 坪浩行, 眞田幸俊, ”新幹線向け架線電圧検知／無線通信共用アンテナの降雨降雪対策と性能評価,” 信学技報, A・P2019-114, RCS2019-206, pp.19-24, Nov. 2019.
- [3] 松村善洋, 丹下智之, 西山武志, 井倉裕之, 荒川智樹, 岩本功貴, 中村一城, 眞田幸俊, “鉄道における曲線区間の 45GHz 帯電波伝搬特性測定結果とシミュレーション評価の比較,” 信学技報, RCS2020-129, pp.104-109, Nov.2020
- [4] 松村善洋, 丹下智之, 笹木栄志, 岩本功貴, 中村一城, 眞田幸俊, “鉄道沿線におけるミリ波帯の伝搬特性測定について”, 信学技報, RCS2021-14, pp.66-71. April 2021.

- [5] 笹木栄志, 西山武志, 松村善洋, 西本研悟, 坪浩行, “東海道新幹線用新型静電アンテナの開発,” 電気学会産業応用部門大会, no.5-79, pp.435-438. Aug. 2019.
- [6] 西本研悟, 坪 浩行, 西岡泰弘, 米田尚史, 松村善洋, 笹木栄志, 西山 武志, ”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検討,” 信学ソ大, no.B-1-51, Sept. 2019.
- [7] 西本研悟, 坪 浩行, 西岡泰弘, 米田尚史, 松村善洋, 笹木栄志, 西山 武志, ”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,” 信学技報, A・P2019-115, RCS 2019-207, pp.25-30, Nov. 2019.
- [8] 野中信秀, 村岡一志, 奥山達樹, 須山 聡, 奥村幸彦, 浅井孝浩, 松村善洋, ”新幹線を用いた高速移動環境における 28GHz 帯 5G 伝送実験,” 信学技報, RCS2019-264, pp.145-150. Dec. 2019
- [9] 猪又 稔, 今井哲朗, 村岡一志, 野中信秀, 須山 聡, 北尾光司郎, 奥村幸彦, 浅井孝浩, 松村善洋, ”新幹線における 2GHz から 28GHz 帯の車両侵入損失特性,” 信学技報, A・P2019-168, pp.99-103. Jan.2020.
- [10] 野中信秀, 村岡一志, 奥山達樹, 須山 聡, 奥村幸彦, 浅井孝浩, 松村善洋, ”新幹線を用いた高速移動環境における 28 GHz 帯 5G 下りリンク伝送実験,” 信学総大, no.B-5-104, Mar.2020.
- [11] 牧村英俊, 西本研悟, 坪浩行, 西岡泰弘, 稲沢良夫, 松村善洋, 西山武志, ”新幹線向け架線電圧検知／無線通信共用アンテナの低背化に関する検討,” 信学ソ大, no.B-1-76, Sept. 2020.
- [12] 牧村英俊, 西本研悟, 坪浩行, 西岡泰弘, 稲沢良夫, 松村善洋, 西山武志, ”低背化した新幹線向け架線電圧検知／無線通信共用アンテナの放射特性評価結果,” 信学総大, no.B-1-41, March 2021.

A.4 その他

- [1] 笹木栄志, 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, 西本研悟, 牧村英俊, 坪 浩行, “東海道新幹線新型静電アンテナの開発,” 日本鉄道サイバネティクス協議会, 2020 年度鉄道サイバネシンポジウム, Nov.2020.

A.5 表彰

- [1] 笹木栄志, 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, 西本研悟, 牧村英俊, 坪 浩行, “東海道新幹線新型静電アンテナの開発,” 日本鉄道サイバネティクス協議会, 2020 年度鉄道サイバネシンポジウム, 論文賞受賞, Nov.2020.
- [2] 丹下智之, 松村善洋, 西山武志, 笹木栄志, “大容量伝送可能なミリ波無線の新幹線利用,” 東海旅客鉄道株式会社 技術開発表彰, 最優秀技術開発賞受賞, June 2021.