Technology Reports

研究開発用電測車　フィールド移動実験　特殊車両

モバイルコミュニケーションの進化を支えた研究開発用「電測車」の変遷 ―1G～5Gのフィールド移動実験に使われたユニークな車両たち―

R&D戦略部　奥村（おくむら）　幸彦（ゆきひこ）

多様な環境下を移動しながら安定したコミュニケーションを図ることが可能な移動通信システムの実現にあたり，その研究開発段階におけるフィールド（屋外）移動実験は欠かすことのできない重要なプロセスである．1Gから5Gに至る各世代のフィールド移動実験では，それぞれユニークかつ創意工夫された仕様の研究開発用「電測車」（特殊車両）が投入され，果てしない距離の走行実験によりモバイルコミュニケーションの進化を支えてきた．

本稿では，これら各世代の研究開発用「電測車」の特徴を解説し，主な車両とそのフィールド移動実験模様，個別装備などを写真とともに紹介する．

1. まえがき

「電測車」とは，「電波測定車」または「電界強度測定車」の略であり，一般には移動通信システムをはじめとするさまざまな無線システムにおいて使用される電波の受信状態を広範なエリアで測定することを目的とした車両を指す．一方，本稿で紹介する移動通信システムの研究開発用「電測車」は，電波測定に加えて，電波を用いた無線通信実験（または無線伝送実験）や商用装置の通信接続試験などをフィールド（屋外）で移動しながら行う特殊車両であり，放送局が使用する中継車や，移動通信事業者が使用する移動基地局車などとも基本的に共通する仕様・機能を有している．

通常，研究段階のフィールド移動実験で使用される移動端末（または移動局）は試作装置であり，そのサイズや消費電力が大きいことに加えて極めてデリケートな装置であるため，それらを車両搭載するにあたっては，慎重かつさまざまな工夫が必要となる．ドコモの研究開発部門（電電公社／NTT時代の移動通信研究開発部門を含む）では，これらの点も考慮した研究開発用「電測車」として，世代ごとに必要な条件を満たすため特殊車両を順次投入してきた．多様な環境における実験走行の経験も活かし

©2021 NTT DOCOMO, INC.
本誌掲載記事の無断転載を禁じます．
本誌に掲載されている社名，製品およびソフトウエア，サービスなどの名称は，各社の商標または登録商標．

て，世代を追うごとに車両仕様も進化させ，フィールド移動実験のノウハウを蓄積してきた．

本稿では，研究開発用「電測車」の特徴を解説した上で，移動通信システムの各世代で活躍してきた研究開発用「電測車」の主な車両とそのフィールド移動実験模様，個別装備などを写真とともに紹介する．

2. 研究開発用「電測車」の特徴

ドコモR&Dセンタ駐車場に勢揃いした研究開発用「電測車」（2007年10月撮影）を**写真1**に示す．移動通信システムの研究開発では，世代を追うごとに無線アクセス方式の高周波数化，高機能化が進んできたことを背景として，実験用の移動局装置・測定装置類はより大型化してきた．この傾向に伴い電測車の車両サイズも順次大型化し，3～4トンクラスの車両（小型トラックまたは小型バス）から8トンクラスの車両（中型トラック）がベース車両として採用されるとともに，大型の実験装置の搭載を行いやすくするための支持レール・可動架台機構，専用ドアなどを電測車に設置する工夫がなされてきた．さらに，実験装置の消費電力も大電力化する方向となり，安定かつ十分な電力を供給可能とする大容量（最大20kVA[*1]クラス）の発動発電機[*2]（以下，発発）が電測車に搭載されるとともに，騒音対策，振動対策のための特殊加工が施された．また，電測車の走行中における実験装置の振動対策としては，車両自体にエアサスペンションを採用しつつ，装置架台の防振加工も施された．

また，車両によっては，新しい無線アクセス技術の検証実験，移動電波伝搬特性[*3]の測定実験において，実験メニューに応じた複数の形式のアンテナ本体を搭載することのできる脱着式専用架台や，低損失でのアンテナケーブル取回しを可能とするルーフ通線機構などが採用された．さらに，アンテナ地上高やアンテナ設置位置に依存する通信性能，伝搬特性を測定・評価するための伸縮ポール，折畳みアーム，ターンテー

写真1　ドコモR&Dセンタ駐車場に勢揃いした電測車

＊1　VA：ボルトアンペア．交流電源を各種機器などに供給する際，負荷が利用する有効電力と利用しない無効電力の両方を考慮した皮相電力を表す単位で，発電機や変圧器の能力を示す場合に用いる．

＊2　**発動発電機**：主に商用電源の供給ができない環境で電力供給することを目的とした，エンジン（発動機）を動力源として動作する発電機または発電装置であり，燃料としてガソリン・軽油・カセットボンベなどが用いられる．一般に発発と略して呼ばれている．電測車への発発搭載にあたってはフィールド移動実験での使用を考慮したさまざまな工夫が施されている（5章参照）．

＊3　**移動電波伝搬特性**：移動通信システムにおいて，電波が送信点（基地局または移動端末）から受信点（移動端末または基地局）へ伝搬する際の特性で，伝搬損失，電力遅延プロファイル，角度プロファイルなどがある．陸上移動における電波伝搬では，電波が建物や樹木，地形の起伏など，障害物や反射物の影響を絶えず受けて伝搬するため，移動によって受信レベルは常に変動し，瞬時に大きく落ち込むことがある．

ブルなどを用いた可動式アンテナ架台が搭載された．

一方，高速鉄道で移動中の携帯電話／スマートフォン利用時の通信性能の向上，通信品質の安定化に向けた模擬実験のために，最大時速300kmでの高速走行中の無線通信実験が可能な車両や，実際の基地局アンテナの設置条件を再現した電波伝搬実験が可能な高伸長アンテナポールを搭載した車両といった特殊実験用の電測車も導入された．

なお，電測車の一部は，道路運送車両法における特種用途自動車，すなわち主たる使用目的が特種である自動車として登録されており，車両ナンバープレートの車種を表す数字（分類番号）が8で始まるいわゆる「8ナンバー車」となっている．

3. 各世代の研究開発用「電測車」

以下では，各世代の移動通信システムの研究開発に活躍した電測車のうち主な車両を解説する．

3.1　1G

セルラ方式[*4]を採用する第1世代移動通信システム（1G）の実現にあたり，無線周波数帯として新たに800MHz帯が候補となり，その移動電波伝搬特性の解明とモデル化がシステムの検討に先立ち必要であった．電電公社の電気通信研究所（東京都武蔵野市）では，1962年に，移動無線回線設計の基本となる基地局と移動端末間の電波伝搬特性を，実際に自動車で走行しながら行う電波伝搬測定実験により解明し，これを基に受信電界強度とサービスエリアの推定法を一般化することを目標とした検討が開始された．VHF（Very High Frequency）帯[*5]・UHF（Ultra High Frequency）帯[*6]における実際の移動電波伝搬データを取得するため，関東一円で大規模な走行実験が1962年から1965年にかけて実施された［1］．実験場所については，市街地や郊外地を含む関東一円を対象に移動電波伝搬実験を行うこととした．5カ所に設置された送信設備の1つは，都心に位置し，高さのとれる「東京タワー（東京都港区）」に設置され，これを起点として伝搬距離1～100kmの範囲で実験が行われた．同実験に使用された電測車を**写真2**に示す．三菱・ジュピターをベースとした車両（中型電測車※）に，送信設備から発射された電波を走行しながら受信測定するための受信アンテナと，受信電界強度測定器と電源供給のための発

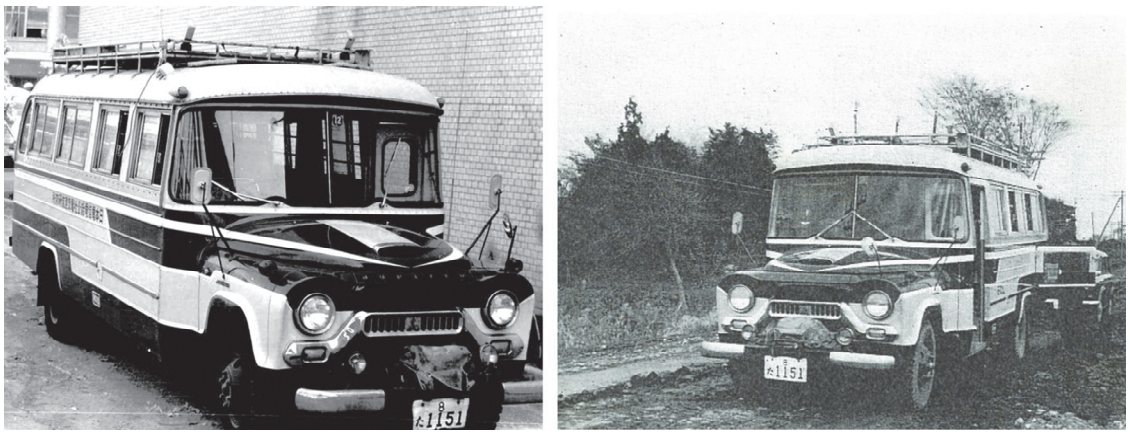


写真2　大規模電波伝搬実験における電測車と実験模様

＊4　**セルラ方式**：移動通信システムにおいて，サービスエリアを多数のセルと呼ばれる小さなエリアに分割した上で，それぞれのセルに基地局を設置し，ユーザ（移動端末）は近隣の基地局と接続して通信を行うシステム．通信中にユーザ（移動端末）が異なるセルにまたがって移動する際は，接続する基地局を自動的に切り替えるハンドオーバ制御により通信を継続する．セルの形状は正六角形とすることで，最も周波数利用効率を高くできる．

＊5　**VHF帯**：30～300MHzの無線周波数帯のことで，波長は1～10mであり，メートル波，超短波とも呼ばれる．

＊6　**UHF帯**：300MHz～3GHzの無線周波数帯のことで，波長は10cm～1mであり，デシメートル波，極超短波とも呼ばれる．

発が搭載された．当時の測定器は真空管式で，1日連続動作させると10dB程度測定値が変化するため，測定器を30分ごとにレベル校正を行いながら使用した．関東一円で2度にわたって実施した実験の走行距離は延べ約2,500kmにもおよんだ．

その後，大規模移動電波伝搬実験の結果も踏まえて，1972年に800MHz帯陸上自動車電話システム（大都市方式）［2］の商用システム開発が電電公社の横須賀電気通信研究所（神奈川県横須賀市）で開始された．セルラ方式を基本とし，周波数繰返し方式*7および多元接続方式*8にFDMA（Frequency Division Multiple Access）*9を採用した周波数有効利用技術，ならびに無線回線制御技術，移動体交換技術など，同システムの基盤となる技術の確立に向けた開発が進められ，1973年から1976年にはフィールド移動環境におけるシステム試験が実施された．

同試験に使用された電測車を**写真3**に示す．トヨタ・マッシーダイナ（レントゲンを搭載可能な検診車型式／4トン車）をベースとした7人が乗れるマイクロバス形式の車両（中型電測車，写真3(a)）や，トヨタ・クラウン バンをベースに後部機器スペースを拡張したワゴン形式の車両（小型電測車，写真3(b)）を用いて各種試験が行われた．マイクロバス形式の車両には，通信実験機器，各種測定機器に加えて実験データの分析・グラフ化に用いる電子計算機（写真3(a)・右下の車内写真中，左側に設置されている装置）が搭載され，これら全体に6kVAの発発から電源を供給した．一方，ワゴン形式の電測車は，一般の乗用車において移動端末を搭載する場合と同じアンテナ高を再現するとともに，自動車電話利用時の雑音（高周波帯域に加えて音声帯域での雑音）の影響も評価するために導入され，後に，加入者規模が少ない地方都市向けの中小都市方式のシステム試験でも使用された．

開発が完了した大都市方式は，1979年12月に，自動車電話サービス（音声電話サービス）として東京23区内で商用サービスが開始され，1983年3月には，広島，岐阜，仙台において中小都市方式のサービスが開始された．その後，持運び可能なショルダーホンとハンドヘルド型携帯電話が，それぞれ1985，1987年に商用導入された．さらに加入者の増加に対応すべく従来の5倍の加入者容量を実現する大容量方式［3］が実用化され，1988年に商用サービスが開始された．また，1991年には150ccの容積を実現した超小型携帯電話「ムーバ」［4］も商用導入された．

3.2　2G

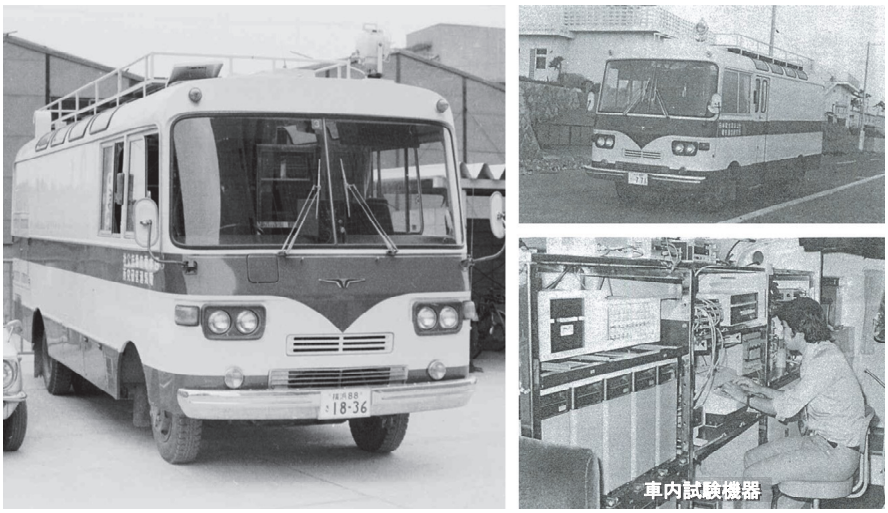
1Gの導入前後より，次世代システムの初期検討が開始され，1987年には，システムのさらなる容量増大と音声品質の向上，およびファクシミリやデータ通信などの音声電話サービス以外の新サービス実現に向けて，多元接続方式にTDMA（Time Division Multiple Access）*10を採用するデジタル移動通信システム［5］（PDC：Personal Digital Cellular system*11）すなわち第2世代移動通信システム（2G）の研究開発が本格化し，1G同様，各種フィールド移動実験が実施された．

写真4(a)は，1989年に東京都新宿区周辺で実施されたデジタル伝送方式の1つであるQDPSK（Quaternary Differential Phase-Shift Keying）方式*12と選択型受信ダイバーシチ*13の組合せで高品質伝送する実験の様子を撮影したものである．その際の電測車には，米ゼネラルモーターズ（GM）・シェビーバン（シボレーブランド）をベースとして，発発とルーフ上に複数アンテナ素子間の間隔を可変する機構を備えたアンテナ設置用プラットフォームを架装した車両（小型電測車）が使用された．ベース車両にアメリカ車が使われたのは，通信実験用試作装置とその動作

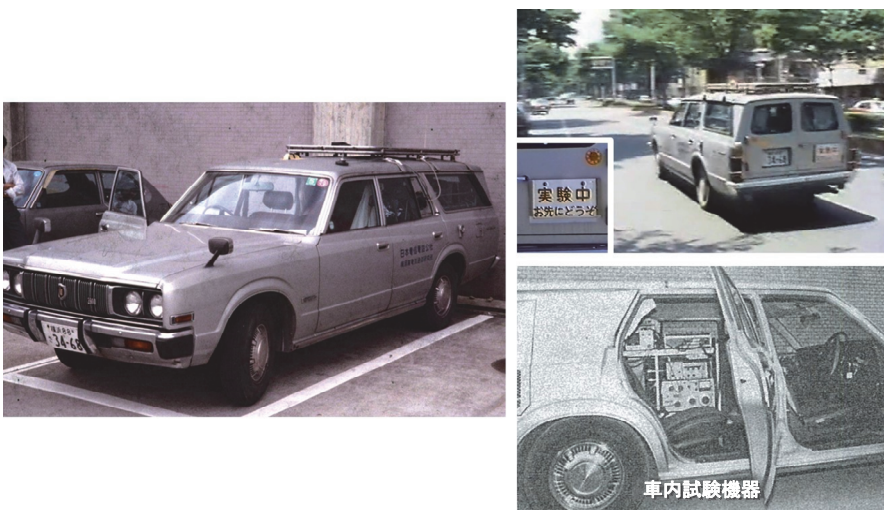
※電測車分類：本稿において，車両サイズや搭載する装置類の規模などを勘案し，電測車を3段階（小型，中型，大型）に分けて表記．

＊7　**周波数繰返し方式**：セルラ方式において限られた無線周波数資源を有効活用するため，ある基地局（セル）で用いた周波数と同じ周波数を，セル間の干渉の影響がない一定の距離を隔てて繰り返し再利用する方式．システムに割り当てられた周波数帯全体をN個の周波数帯に分割し，これらを1つのグループとして各周波数帯のセルが隣接することのないよう面的に繰り返し配置する（代表例として，N=7とする7周波数繰返しがある）．

＊8　**多元接続方式**：移動通信システムにおいて，ある基地局が複数のユーザ（移動端末）を収容し，それらの端末が同時に基地局との間で無線通信を行う際，互いに干渉することなく各端末が正しく情報を送受信できるようにする方式．無線リソースを時間，周波数他のさまざまなドメインで分割し，各ユーザに割当てする方法が存在し，複数ドメインを組み合わせる方法など，限られた無線周波数資源を使ってより多くの端末が収容できるよう，各世代のシステムにおいて工夫がなされてきている．



(a)マイクロバス形式の電測車と試験模様



(b)ワゴン形式の電測車と試験模様

写真3　1G（大都市方式／中小都市方式）の研究開発で使用された電測車

に必要な電源容量を確保できる発発を搭載し，かつ，都心部の道路事情に合わせてスムーズに走行することができる適当な日本車が当時無かったためである．

2Gの研究開発が終盤に差し掛かると，1990～1992年にかけて神奈川県横浜市の横浜駅周辺およびみなとみらい地区において，フィールド試験が繰り返し実施された．同試験では，主な電測車として，写真4(b)に示す日産・アトラス（4トン・トラック）をベースとして箱形の測定室と実験・測定機器ラック，発発などを架装した車両（中型電測車）が使用された．実験・測定機器ラック（写真4(b)・右）は，電子機器用標準ラック×3架の一体型で，収容機器

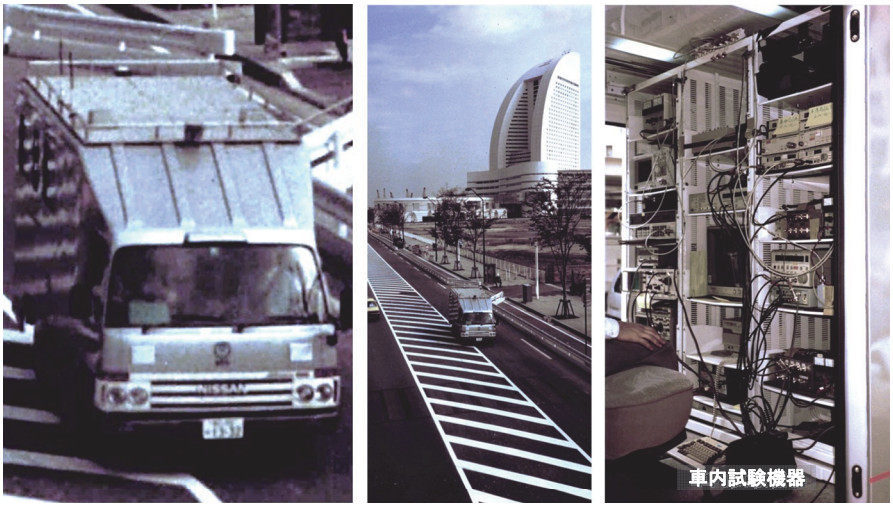
＊9　FDMA：システムに割り当てられた広い無線周波数帯域を複数の狭い帯域の無線チャネルに分割し，それぞれを異なるユーザの通信チャネルとして独立に使用可能とした周波数ドメインの多元接続方式．

＊10　TDMA：所定の周波数帯域を有する1つの無線チャネルを複数の一定時間区間（タイムスロット）に分割し，それぞれを異なるユーザの通信チャネルとして独立に使用可能とした時間ドメインの多元接続方式．

＊11　PDC：日本国内で普及した第2世代移動通信システムの1つで，ドコモなどが採用した．

＊12　QDPSK方式：送信デジタルデータを無線信号の位相ドメインで変調する位相シフトキーイング（位相変調）方式において，1シンボルあたり4つの位相状態を使用し，かつ，データをシンボル間の位相差に反映する，4相差動位相シフトキーイング方式の略称．フェージング現象により，振幅とともに位相が大きく変動する移動電波伝搬路を経由する通信においては，絶対位相を用いる方式に比較して通信品質を向上可能である．

(a)小型電測車とQDPSKデジタル伝送実験模様



(b)中型電測車とシステム試験模様

写真4　2G（デジタル移動通信方式）の研究開発で使用された電測車

の種類や実験・測定項目に応じて一体型ラック全体を，床に埋め込まれたレール上を前後に動かして固定できる機構を備えていた．

2G（PDC方式）は1993年3月に商用サービスが開始された．その後，1997年3月に3倍のデジタルデータ通信速度を実現したPDCパケット方式（最大28.8kbps）の商用サービス［6］が開始され，1999年2月には同方式を使用してWebアクセスやメール利用を可能とした「iモード」サービス［7］が開始された．

3.3　3G

2G開発完了とほぼ同じ時期に第3世代移動通信シ

＊13 ダイバーシチ：マルチパス環境下における，端末の移動中に生じるフェージング現象（受信電波のレベルが大きく落ち込む現象）を抑制するため，送受信する信号に冗長性をもたせることで得られた異なる変動成分を合成または選択利用することにより，受信電波レベルが落ち込む確率を低減し，無線伝送品質を向上させる技術．冗長性をもたせるドメインに応じて，空間ダイバーシチ，周波数ダイバーシチ，時間ダイバーシチなどがある．

ステム（3G）の研究が本格的に開始された．3Gの多元接続方式には，複数候補を比較・検討した結果，CDMA（Code Division Multiple Access）[*14]をベースとし，新しく割り当てられることとなった2GHz帯を用いて広帯域無線伝送することを特徴とする広帯域コヒーレントDS-CDMA（Direct Sequence-CDMA）[8]（後にW-CDMA（Wideband-CDMA）[*15]と呼称）が採用された．この方式は，無線伝送帯域幅を最大5～10MHzに広帯域化することで市街地などの電波伝搬で生じるマルチパス[*16]の分離・合成をしやすくし，高速・高品質のデータ伝送を実現している．実環境における広帯域化の効果の確認や384kbps～2Mbpsの最大通信速度による映像伝送，新たに採用された高速パワーコントロール，ソフトハンドオーバ[*17]他の技術の検証を行うフィールド移動実験が1994年より千葉県船橋市において順次行われた．

写真5(a)は広帯域コヒーレントDS-CDMAの当初のフィールド移動実験に使用された電測車で，前述の2Gのシステム試験で使用されていた車両（日産・アトラス）に，新たにドコモ・ロゴを設置し，使用した．その後，最大2Mbpsの伝送実験で使用される，大型化された実験装置を搭載することや長時間におよぶ走行実験も考慮して，写真5(b)に示す新しいタイプの電測車が導入された．この車両（中型電測車）は，いすゞ・エルフ（3.5トン・トラック）をベースとして，安全性（強度），断熱性，デザイン性などを考慮して成形された後部ボディに測定室，低騒音の発発，空調装置を架装するとともに，走行時の振動を軽減するエアサスペンションを装備した．さらに当該車両では，大型実験装置の積み下し専用の開閉ドアを追加設置し，専用の昇降機を用いて同装置の車両サイドからのスライドインを可能とするレール付き装置固定基台や，車両外に設置した各種実験用アンテナと実験装置を直結するための機構など（後述）を新たに導入した．この新しいタイプの電測車は，その後，世代をまたがって継続使用または追加導入され，現在，7代目の車両がフィールド移動実験で活躍中である．

3G（W-CDMA方式）は2001年10月に商用サービス［9］が開始された（サービス開始時の最大通信速度は384kbps）．その後，2006年8月にHSDPA（High-Speed Downlink Packet Access）[*18]方式［10］（サービス開始時の下り最大通信速度は3.6Mbps．順次高速化し，2011年6月には14Mbpsの提供を開始），2009年6月にHSUPA（High-Speed Uplink Packet Access）[*19]方式（上り最大通信速度5.7Mbps）の商用サービスがそれぞれ開始された．

3.4　4G

3Gが商用化された翌年の2002年には，第4世代移動通信システム（4G）に向けた無線アクセス実験装置の試作が開始された［11］．下り100Mbpsの高速パケット通信を実現すべく，無線周波数帯域幅を100MHzに拡大し，広帯域化により増大するマルチパスの相互干渉や周波数選択性フェージング[*20]の影響を排除するため，下りリンクにおいて多数の狭帯域信号に分割してマルチキャリア伝送[*21]する直交周波数分割多元接続（OFDMA：Orthogonal Frequency Division Multiple Access）ベースの方式を新たに採用した．これらの検証用に開発した試作装置を用いて，2003年5月よりフィールド移動環境における100Mbps伝送実験を行った．横須賀市で実施された，同実験に使用された中型電測車（いすゞ・エルフ）を**写真6**(a)に示す．前述の車両サイドから実験装置をスライドインさせる機構を活用して，複数種類の移動局実験装置を載せ換えた実験が行われている．

2005年5月には，OFDMAベースの無線アクセス

＊14 CDMA：同一の周波数帯域・タイムスロットの無線チャネル上に，ユーザごとに異なる直交符号系列を用いて拡散した通信チャネルを多重化することで，複数ユーザの同時通信を可能とする符号ドメインの多元接続方式．

＊15 W-CDMA：3GPPにおいて国際標準仕様化された第3世代移動通信システムの呼称．

＊16 マルチパス：送信点から放射された電波が，建物や地形などの障害物によって反射・回折し，複数の経路（パス）を伝わって受信点に到達する現象．

＊17 ソフトハンドオーバ：通信中のユーザ（移動端末）が異なるセルにまたがって移動する際，接続する基地局を自動的に切り替えるハンドオーバ制御において，セル境界の周辺エリアでは複数の基地局と同時接続し，各基地局からの信号を合成受信することで，通信の瞬断がないセル間移行を実現する方法．これに対して，セル境界での同時接続を行わず，セル切替えのみを行う方法をハードハンドオーバと呼ぶ．

＊18 HSDPA：W-CDMA方式に基づく下りリンクの高速パケット伝送方式．3GPP標準仕様上の下り最大伝送速度は約14Mbpsである．移動端末の電波受信状況に応じて，変調方式と符号化率が最適となるよう制御する．

(a)中型電測車と広帯域コヒーレントDS-CDMA実験模様

(b)新規導入された中型電測車と384kbps～2Mbps伝送実験模様

写真5　3G（W-CDMA方式）の研究開発で使用された電測車

＊19 HSUPA：W-CDMA方式に基づく上りリンクの高速パケット伝送方式．3GPP標準仕様上の上り最大伝送速度は5.7Mbpsである．基地局における電波受信状況に応じて，符号化率，拡散率，送信電力が最適となるよう制御する．

＊20 周波数選択性フェージング：マルチパスが生じる電波伝搬路において，受信信号の周波数軸上のレベルが一様ではなくなる状態を指す．

＊21 マルチキャリア伝送：送信デジタルデータを複数の搬送波（キャリア）を用いて並列伝送する方法．マルチキャリア伝送を用いる代表的な方式に直交周波数分割多重（OFDM：Orthogonal Frequency Division Multiplexing）があり，LTE以降の移動通信システムをはじめとして，無線LAN，デジタルテレビなど，最近の無線システムで多く採用されている．

方式に，4×4 MIMO（Multiple-Input-Multiple-Output）多重技術[*22]，16QAM（Quadrature Amplitude Modulation）高次変調技術[*23]などを組み合わせる方式を適用した実験装置を用いて，100MHz帯域幅において下り最大1Gbpsのリアルタイムパケット信号伝送実験［12］に成功した．さらに，同年12月には，無線アクセス方式を6×6 MIMO多重，64QAMに拡張し，下り最大2.5Gbpsのパケット信号伝送実験に成功し，2006年12月には，12×12 MIMO多重を適用した下り最大5Gbpsの伝送実験［13］にも成功している．

これら一連のGbpsクラスの伝送実験では，実験装置のさらなる大型化に対応すべく，写真6(b)に示す，いすゞ・フォワード（8トン・トラック）をベースとし，測定室内に実験装置を前後2列に設置できる車両（大型電測車）を新たに導入して，フィールド移動実験に使用した．この車両は，通信実験用としては，これまでで最大規模である．さらに，高速かつ高度な信号処理を行う無線アクセス実験装置，および高速伝送を活かした多数動画の並列伝送をデモンストレーションする各種装置の電源を安定して供給するため，20kVAクラスの大容量発発を搭載するとともに，無停電電源装置も装備した．

一方ドコモは，2004年11月，世界に向けてSuper 3Gの概念［14］を提唱したが，これは，3G技術の長期的な競争力を維持しながら，その先の4Gへの円滑な移行を可能とすることを想定した概念である．2006年からSuper 3Gの実験検証に向けた実験システム開発を行い，屋内での基本実験を経て2008年2月からは横須賀市，山梨県甲府市周辺でフィールド移動実験を行い，写真6(c)の中型電測車（いすゞ・エルフ）を使用して下り最大約250Mbpsの伝送が可能であることを確認した．同実験システムでは，音声・画像伝送・ゲームなど各種アプリケーションを用いてSuper 3Gの商用化に向けた実用性・有効性も検証した．

Super 3Gは，2009年3月に3GPP（3rd Generation Partnership Project）仕様のLTE（Long Term Evolution）として標準規格化されるとともに，2010年12月に国内において商用サービス［15］が開始された（サービス開始時の下り最大通信速度は75Mbps．順次高速化し，2013年10月には倍の150Mbpsの提供を開始）．さらに，2015年3月には，LTEの発展形であり，キャリアアグリゲーション[*24]，高度化C-RAN（Centralized Radio Access Network）[*25]などの高速・大容量化技術が新たに適用されたLTE-Advancedを使用する商用サービス「PREMIUM 4G」［16］の提供が開始された（サービス開始時の下り最大通信速度は225Mbps．順次高速化し，2020年3月には1.7Gbpsの提供を開始）．

3.5　5G

第5世代移動通信システム（5G）は，高速・大容量通信，低遅延通信，多数端末同時接続などの特長を有するシステムの実現を目標に，LTEが商用化された2010年ごろから研究開発を開始した．2012年12月には，11GHz帯において周波数帯域を400MHz（LTE-Advancedの4倍）に拡大し，8×16 MIMO多重技術を適用した実験装置を用いて最大約10Gbpsのパケット信号伝送の基礎実験に成功した［17］．

沖縄県石垣市で実施した本実験装置によるフィールド移動実験では，**写真7**に示すように移動局（送信装置とアンテナ）を，トヨタ・エスティマ（ハイブリッドカー）をベースとした車両（小型電測車）に搭載し，これまで移動通信システムでは電波伝搬の特性上，利用が難しいとされていた6GHz以上の高い周波数を用いて広帯域無線伝送を行うことにより，5Gの目標とする10Gbps超えの超高速通信が可

＊22 MIMO多重技術：複数のアンテナから異なる情報信号を同時に同じ周波数を用いて送信し，無線伝搬路において空間的に多重して信号伝送する技術．

＊23 QAM高次変調技術：デジタルデータを無線送信信号に高効率変換する技術の1つ．変換された後の信号を，位相と振幅が異なる16通りの組合せで表現する16QAM変調では，1回の送信で4ビットの情報を送信することができる．

＊24 キャリアアグリゲーション：複数の周波数帯を束ねることで高速通信を可能とするLTE-Advancedの主要無線アクセス技術の1つ．

＊25 C-RAN：基地局制御部を集中設置するネットワークアーキテクチャ．

(a)中型電測車と100Mbps伝送実験模様

(b)新規導入された大型電測車と1Gbps伝送実験模様

(c)中型電測車とSuper 3Gのシステム実験模様

写真6　4Gに向けた研究開発で使用された電測車

写真7　小型電測車と10Gbps伝送基礎実験模様

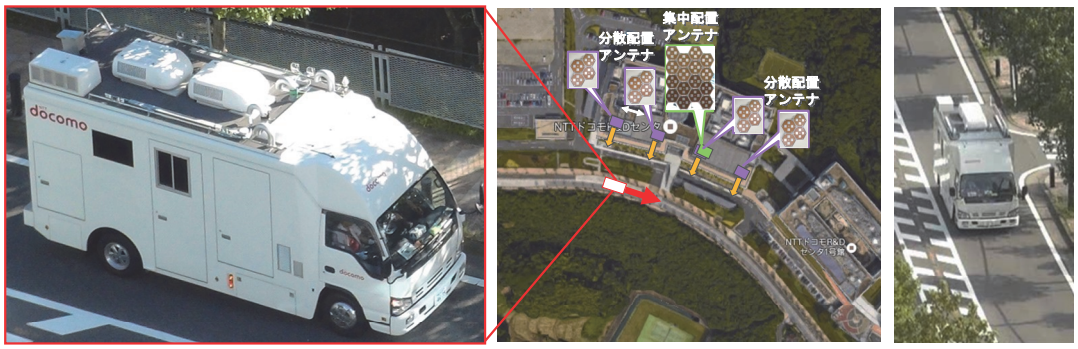
能であることを実証した．なお，本実験の機器電源はハイブリッドカーが装備しているバッテリーから出力される1.5kVAの電源を活用しつつ，追加のバッテリーを搭載して不足する電力を賄う構成となっており，住宅街を通過する試験コースにおいて発発搭載による騒音などを避けることを可能としている．

その後，2014年ごろから開始した5Gの本格的な研究開発段階では，5Gの周波数候補として，現行の4Gが使用する周波数の少し上である3.7GHz/4.5GHzなどの低SHF（Super High Frequency）帯[*26]から15GHz/28GHzなどの高SHF帯，さらにその上の39GHz/70GHzなどのEHF（Extremely High Frequency）帯[*27]といった幅広い周波数帯を仮定し，各周波数帯での無線アクセス技術に関する実験を世界の主要ベンダと協力して，並行実施してきた［18］．

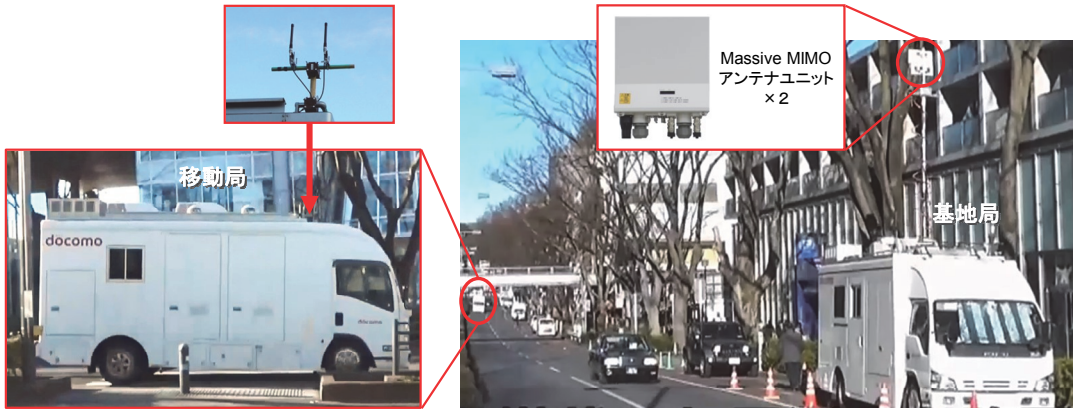
低SHF帯での実験では，4.5GHzを使用する分散アンテナシステム[*28]のフィールド伝送実験や，同じく4.5GHzのMassive MIMOシステム[*29]におけるデジタルビームフォーミング[*30]のビーム追従[*31]に関するフィールド移動実験などを行った．2017～2018年に横須賀市および東京都内で実施した実験では，**写真8**(a)，(b)に示す中型電測車（いすゞ・エルフ）に移動局装置を搭載して走行するとともに，フィールドビーム追従実験で用いるMassive MIMO基地局は，許可を得て路肩に停車した中型電測車（いすゞ・エルフ）を使用して，車内に基地局装置本体を，伸縮ポール上に同Massive MIMOアンテナユニット[*32]（64素子×2）を設置して実験を行った．

一方，高SHF帯での実験では，28GHzを使用した高速移動5Gビームフォーミング通信実験，車載用5Gガラスアンテナ通信実験などを行った．2016年にレーシングコース（静岡県）において実施した高速移動実験では，**写真9**(a)に示す小型電測車（トヨタ・エスティマ）の車内にアナログビームフォーミング[*33]を装備した28GHz帯移動局装置本体を，車両ルーフ上に固定した透明ドーム（風防構造）内に同アンテナユニットを搭載して，特急列車乗車時を想定した最大時速150kmの高速走行時のビーム追従実験を行った．さらに，2020年にミリ波関連研究開発プロジェクト[*34]の一環として試験走路（茨城県）において実施した実験では，写真9(b)に示す小型電測車（トヨタ・アルファード）に，より高精度なビーム追従を可能とするデジタルビームフォーミングと基地局間連携機能を装備した28GHz帯通信実験システムの移動局を搭載し，高速道路の自動車走行時においても複数基地局間をまたいで安定かつ高品質な通信が可能となる新システムの実験を行った．また，2019年に市街地（東京都墨田区）で実施した

＊26 SHF帯：3～30GHzの無線周波数帯のことで，波長は1～10cmであり，センチメートル波とも呼ばれる．
＊27 EHF帯：30～300GHzの無線周波数帯のことで，波長は1～10mmであり，ミリメートル波（またはミリ波）とも呼ばれる．
＊28 分散アンテナシステム：地理的に分散配置された複数のアンテナユニットを，中央処理（または集中処理）装置に光ファイバ経由で接続し，同装置において一元的に信号処理を行うことで通信能力，通信容量を増大できるようにしたシステム．
＊29 Massive MIMOシステム：超多数のアンテナ素子で構成される大規模MIMOを用いたシステムのこと．高い周波数帯ではアンテナ素子サイズを小さくすることができるため，従来世代よりも高い周波数帯（SHF帯～EHF帯）を用いる5Gにおいて導入が進められている．分散アンテナシステムに対し，集中アンテナシステムに相当する．
＊30 デジタルビームフォーミング：超多素子で構成されるアンテナを用いて電波の放射エリアを特定方向へ集中させる機能（ビームフォーミング）を，デジタル信号処理によって実現する方式．



(a)中型電測車と4.5GHz帯分散アンテナシステム実験模様



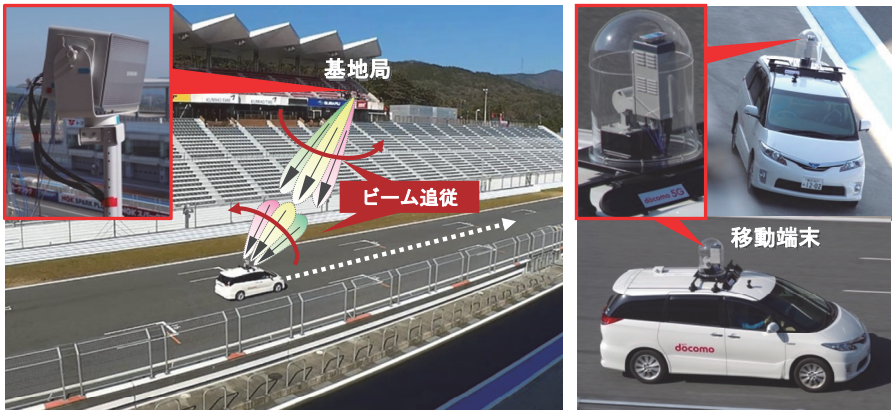
(b)複数中型電測車と4.5GHz帯デジタルビームフォーミング伝送実験模様

写真8　5Gの研究開発で使用された電測車(1)

28GHz帯車載用5Gガラスアンテナ通信実験では，写真9(c)に示す小型電測車（トヨタ・ハイエース）の車内に28GHz帯移動局装置本体を，4カ所の車両ウインドウガラスに同車載用5Gガラスアンテナ（ガラス一体型5Gアンテナ*35とオンガラスアンテナの2種類）をそれぞれ設置して時速約30kmのフィールド移動実験を行い，下り最大3.8Gbps（400MHz帯域幅時）／同7.5Gbps（800MHz帯域幅時）の高速無線データ伝送に成功した［19］．同実験では，移動局に加えて，許可を得て路肩に停車した中型電測車（いすゞ・エルフ）を使用して，車内に基地局装置本体を，伸縮ポール上に同Massive MIMOアンテナユニット（128素子×2偏波*36）を設置して実験を行った（写真9(c)）．

2017年からは，多様な利活用分野で5Gを応用する新しいモバイルソリューションの実現可能性検証のため，実験用5G移動端末とともに高精細映像機器などのアプリケーション用機器を電測車に搭載して，総務省の「5G総合実証試験*37」に取り組んだ．例えば，2018年にはスマートワークプレイス分野で5Gを活用して大容量コンテンツデータを共有しながら映像編集業務を行う「動くサテライトオフィス」（小型電測車使用）に関する試験［21］を，2020年には地域医療分野で５Ｇを活用して複数診断映像を

＊31　ビーム追従：ビームフォーミングされた電波の放射方向を，移動する端末の方向となるよう追従制御する機能．
＊32　アンテナユニット：基地局を構成する装置の1つで，送受信するデジタル信号を無線信号との間で変換し，無線信号の増幅やアンテナ素子からの電波の送受信などを行う機能を一体化した装置．
＊33　アナログビームフォーミング：超多素子で構成されるアンテナを用いて電波の放射エリアを特定方向へ集中させる機能（ビームフォーミング）を，アナログ信号処理回路によって実現する方式．
＊34　ミリ波関連研究開発プロジェクト：2018～2020年度にドコモが総務省から委託を受けて実施した「電波資源拡大のための研究開発（JPJ00024）」．
＊35　ガラス一体型5Gアンテナ：小型，薄型，かつ透明なガラスアンテナで，車両ウインドウガラスに設置しても視野をさえぎらず，車両デザインを損ねないという特長がある．
＊36　偏波：電波が空間を伝搬するときの電界の振動方向．基地局のアンテナから電波を送受信する場合，地面に対して垂直な面で振動する垂直偏波と水平な面で振動する水平偏波の両者を用いる構成が多い．



(a)小型電測車と28GHz帯アナログビームフォーミング高速移動実験模様

(b)小型電測車と28GHz帯デジタルビームフォーミング高速移動実験模様

(c)小型・中型電測車と28GHz帯車載用5Gガラスアンテナ通信実験模様

写真9　5Gの研究開発で使用された電測車(2)

＊37 **5G総合実証試験**：5Gの実現による新たな市場や新しいサービス・アプリケーションの創出を目的に，移動通信事業者にとともにさまざまな利活用分野の関係者が参加する実証試験で，2017～2019年度に総務省が主導して実施した．同試験の推進支援を行ってきた第5世代モバイル推進フォーラム（5GMF：The Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum）より試験結果のレポート（英文）が発行・公開されている［20］.

共有しながら遠隔診療支援を行う「移動診療車」（大型電測車使用）に関する試験［22］を，それぞれ徳島県神山町と和歌山県において実施した（**写真10**）．

2019年からは，5Gの商用化に向けた移動端末および基地局装置開発を加速し，屋内試験を経て市街地から郊外に至る多様な通信環境下でのフィールド移動試験を繰り返し行うとともに，2019年9月からは5Gプレサービス［23］の提供を行った後，2020年3月に5G商用サービス［24］（3.7/4.5GHz帯を使用して下り最大3.4Gbpsの高速通信を提供）を開始した．その後，5G対応移動端末の機種数増加とともに，2020年9月には，新たに28GHz帯を使用した下り最大4.1Gbpsのサービス提供を開始するに至った．

なお，2020年4月以降の新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の拡大に伴い，5G移動端末新機種の開発過程における電測車を用いたフィールド移動環境での通信接続試験においては，従来電測車の中で複数の測定者が実施していた試験データの収集と解析を遠隔地から行えるようにして，感染拡大リスクを抑える形で試験を継続している（**写真11**）．

4. 特殊実験用電測車

以下では，特殊な実験や測定に必要な機能を備えた電測車として，超高速移動通信実験用，電波伝搬実験用の各車両について解説する．

4.1　超高速移動通信実験用車両

ドコモは，時速200kmを超える高速鉄道乗車中などの超高速移動環境における5Gサービスの提供を想

写真10　小型／大型電測車による5G総合実証試験模様

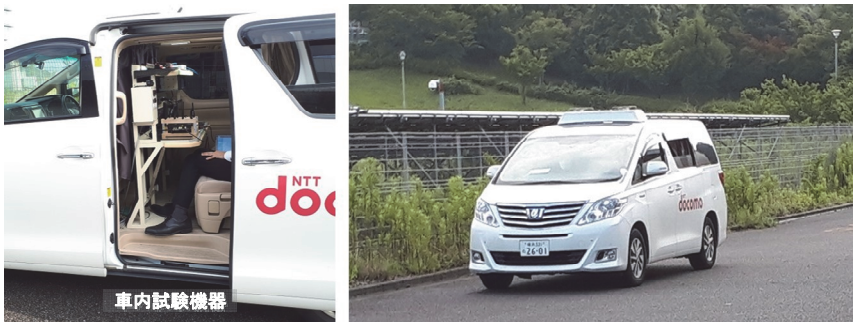
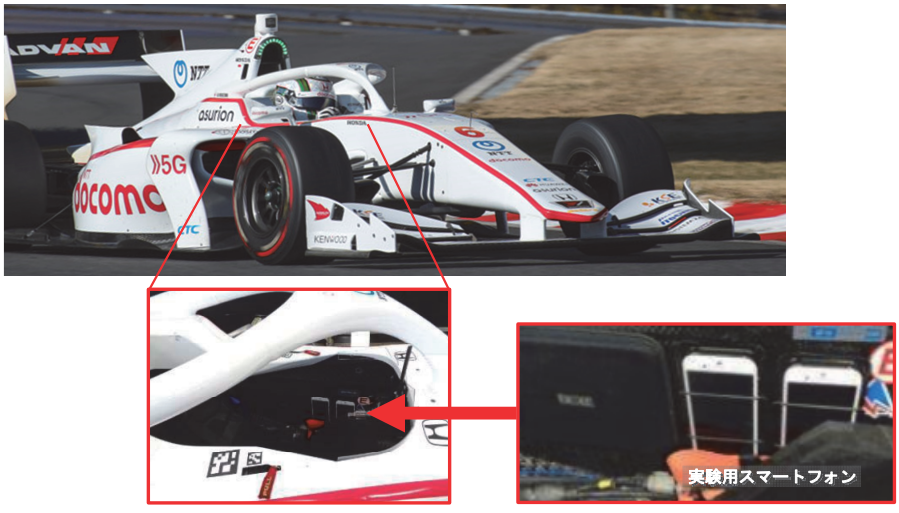


写真11　小型電測車による5G商用移動端末の遠隔試験模様

定した自動車走行による模擬実験を，2018年4月に茨城県にある日本自動車研究所の高速周回路において実施した［25］．同実験では，28GHz帯を使用し，高速走行可能な小型電測車に搭載した実験用移動端末装置とコース脇に設置した2つの実験用基地局との間で5G通信を行った（**写真12**(a)）．同小型電測車は，合計200kg近い重量の実験機材を搭載しながら時速300km超えの走行が可能となるよう，日産・GTR（V6ツインターボエンジン搭載）をベースに特別チューニングを行った車両で，車内に実験機器を安全かつ確実に固定できる専用架を装備するとともに，機器電源としてトランクに専用バッテリーを搭

(a)高速走行可能な小型電測車および大型電測車を用いた5G通信実験模様



(b)フォーミュラカーを用いた通信実験模様

写真12　超高速移動通信実験用電測車

載している．また，2つの基地局間での通信中ハンドオーバを制御する疑似5Gコアネットワーク＊38装置を設置するために大型電測車（いすゞ・フォワード）を使用した．

実験の結果，最高時速305kmで移動する移動局と基地局との間の5G通信に成功するとともに，時速293km移動中の下り1.1Gbpsの超高速5G無線データ伝送や，時速290km移動中の5G移動局と5G基地局との間の無線通信回線を維持したまま接続先基地局を切り替える，通信中ハンドオーバにも成功した．さらに，時速200kmで移動する5G移動局からの4Kハイフレームレート映像＊39による車窓カメラ映像の5G無線ライブ中継にも成功した．

また，ドコモでは，高速鉄道乗車中など超高速移動環境におけるモバイル通信サービスの品質向上に向けた取組みを各世代のシステムにおいて実施してきている．その超高速移動環境を模擬するため，4輪カーレースの「スーパーフォーミュラ＊40」に参戦するフォーミュラカーを活用し，搭載した小型移動端末（携帯電話・スマートフォン）と周辺基地局との間で，ハンドオーバ試験を含む各種通信実験を継続している（写真12(b)）．フォーミュラカーを活用する通信実験では，レース場にもよるが，直線コース部分で時速300km程度まで加速した後，カーブに突入する際，一気に時速50km程度まで減速するというように，走行速度，すなわち端末の移動速度が短時間で大きく変化する状況を得ることができる．その上，レース場は，同じコースを幾度も周回することで効率よく試験データを収集でき，また，通信性能向上に向けてパラメータ調整などを実施した場合の実験データの比較評価にも適している．

4.2　電波伝搬実験用電測車

市街地から郊外までの多様な通信環境を想定した電波伝搬のフィールド測定実験を行うことに特化した電測車を**写真13**に示す．この特殊電測車（いすゞ・エルフ）には，実験用アンテナを任意の地上高で設置するための最伸長が14mおよび24mの2本の伸縮ポールが搭載されている．これは，中型電測車の一部で搭載されているアンテナ設置用伸縮ポールに比較して2～3倍の最伸長となっており，基地局のアンテナ高に対する条件を幅広いレンジで仮定した電波伝搬実験を可能としている．なお，同車両で移動する際，最伸長24mのポールは，縮めた状態のポールを水平にしてルーフ上に固定する（写真13・左）．また，伸縮ポールを最伸長近くまで伸ばす場合や，アンテナユニットの容積・重量によっては，実験現場でポールを補助ステーで支えた上で実験を行う．

5. 研究開発用「電測車」の個別装備

5.1　実験機器用電源

電測車の主要な装備として，車内で使用する各種実験機器・測定機器の電源供給に必要な発発がある．歴代の電測車（主に中型・大型電測車）では，実験に用いる機器の消費電力に応じて数kVAから20kVAを超えるものまで幅広い電源容量の発発が搭載されてきているが，いずれも車両走行時の振動対策，発発動作時の防音および熱対策，発動機排気ガスの軽減対策が施され，市街地・住宅街などでの走行試験も想定した配慮がなされている（**写真14**(a)）．なお，最初に紹介した1Gの電測車（写真2）では，当時，搭載する測定機器の電源（約1kVA）として使用可能な発発が国産では見つからず，米軍の払い下げ品を2台入手し，使用した．ただし，発発のスターターロープ＊41による始動の不調と出力電圧の変動に手を焼き，発発2台のうち1台を測定車に載せて実験に使用している間，もう1台を修理・点検に出し

＊38 コアネットワーク：交換機，加入者情報管理装置などで構成されるネットワーク．移動端末は無線アクセスネットワークを経由してコアネットワークとの通信を行う．

＊39 4Kハイフレームレート映像：4K標準フレームレート映像の倍にあたる120フレーム／秒の高フレームレート・高精細映像．実験では，リアルタイム4Kハイフレームレート HEVCコーデック［26］を用いて，超高速移動環境のように動きの速いシーンでも滑らかで高臨場のカメラ映像伝送を実現した．

＊40 スーパーフォーミュラ：タイヤとコックピットがボディで覆われていない構造のフォーミュラカーを用いる国内最高峰の4輪カーレースで，正式名称は全日本スーパーフォーミュラ選手権（旧全日本選手権フォーミュラ・ニッポン）．ドコモでは，同レースに参戦するDOCOMO TEAM DANDELION RACING［27］のフォーミュラカーを活用する通信実験を1999年より実施している．

写真13　高伸長ポール搭載の電波伝搬実験用電測車

ておき，使用中の発発が不安定になると，すぐに電気通信研究所に戻って修理・点検済みの発発に載せ替えることで，実験継続した状況であった．現在の発発は，車両エンジン同様セルモーター＊42で起動し，自動電圧調整機能を有しており，長時間の実験にも耐えうるものとなっている．

また，3G以降の発発を搭載する中型または大型電測車においては，写真14(b)に示すとおり，測定室内に発発の始動操作を含む電源系の集中操作が可能なパネルを備えるとともに，発発と連携する車載バッテリーシステムの導入によりバッテリー上がりへの対処も可能としている．さらに搭載機器に応じて，大容量UPS（無停電電源装置）や安定化電源も装備している．一方，小型電測車では，車両自体が機器への電源供給も可能な大容量バッテリーを搭載するハイブリッドカー＊43を積極的に導入し，発発を非搭載とすることで，温室効果ガスである二酸化炭素CO_2の排出量削減に取り組んでいる．今後は，さらなる排出量削減が可能な電気自動車やプラグインハイブリッドカー（PHV：Plug-in Hybrid Vehicle）の使用も望まれる．

5.2　実験機器搭載機構

3G以降の研究開発における世代が進むにつれ実験装置が飛躍的に高機能化し，装置サイズが大型化されることとなったが，これらの大型装置を搭載してフィールド移動実験を行うことを前提に新規導入された中型・大型電測車では，実験装置の積み下し専用の開閉ドアを測定室に追加し，専用の昇降機を用いて同装置の車両サイドからのスライドインを可能とする，レール付き装置固定基台を新たに採用した（**写真15**）．従来の電測車における実験装置類の搭載方法は，測定室内に電子機器用標準ラック（19インチラック＊44）あるいは汎用棚をあらかじめ備え付けておいて，そこに実験装置や測定機器を設置した上で，必要な結線を行って実験系を組み上げていくスタイルであったが，新車両では，大型ラック（19インチラックよりも幅広のラックや19インチラック×2～3架を連結したラック）に多数のカード型回路ユニットやモジュールが組み込まれて一体的

＊41　スターターロープ：発発などのエンジンをマニュアルで始動するためのリコイルスターター（マニュアルスターター）において使用されるロープ（引き紐）で，同ロープを操作者が強く引くことによりエンジンのクランクシャフトを回転させて始動する．現在の発発用エンジンでは，セルモーター（＊42参照）を用いて始動する方式が一般的である．

＊42　セルモーター：エンジンの始動時に回転力を与えるための専用のモーターでセルスターターとも呼ばれる．モーターを動かすための電力はバッテリーより供給するが，同バッテリーが上がるとエンジンが始動できなくなる．

＊43　ハイブリッドカー：エンジンとモーターの2つの動力源をもつ車両で，走行状況に応じてエンジンとモーターの使用を最適制御することで燃費を向上させる．モーター駆動用の専用バッテリーを搭載しており，車種によっては同バッテリーを車両内の汎用電源（電源容量1.5kVA程度）として利用可能である．また，同バッテリーを大容量化し，外部電源から充電可能とした車種はプラグインハイブリッドカーと呼ばれ，モーターのみで走行可能な距離を大幅に長くすることができる．

(a)低騒音発動発電機

(b)電源系集中操作パネル（上段）／車載バッテリー（下段左）・UPS＆安定化電源（下段右）

写真14　実験機器用電源

に構成された実験装置を分解することなくそのまま搭載可能とする新スタイルとしたことが大きな変化であった（その後の中型・大型電測車では，この新スタイルを踏襲してきている）．さらに，慎重な取扱いを要する試作実験装置の振動対策として，実験装置固定基台と車両側の可動式プラットフォームの間に振動吸収用ゴムを挿入するとともに，車両自体にエアサスペンションを採用することで，走行実験中に生じる広範な周波数成分を有する振動の影響を軽減できるように工夫している．

5.3　実験用アンテナ搭載機構

電波を用いる無線通信システムの実験において，アンテナは特徴的かつ重要な構成要素の1つであり，研究開発用電測車には，各種実験用アンテナを搭載・使用するための特殊機構が装備されている．

旧式の小型電測車および現行の中型・大型電測車では，通常，車両の屋根上に設けられたデッキ（ルーフデッキ）にマグネット基台，クランプなどの専用取付け具を用いて実験用アンテナを固定設置しているが，金属製車両ボディ（ルーフ部分を含む）

＊44　19インチラック：各種電子機器を収容するためのラック（架）で，収容機器の幅を19インチ（482.6mm）に標準化したもの（米国EIA規格など）．なお，国内のJIS規格では480.0mmの機器幅が採用されているが，機器の取付け穴間隔はEIA規格と共通（465.0mm）である．

写真15　レール付き装置固定基台

による電磁界的な影響を軽減するため，一部車両では，**写真16**(a)・左側に示す折畳み式突出しパイプ基台や固定式突出しレール基台を用いてアンテナを設置することで，車両ボディとの必要な離隔距離を確保する工夫を行っている．

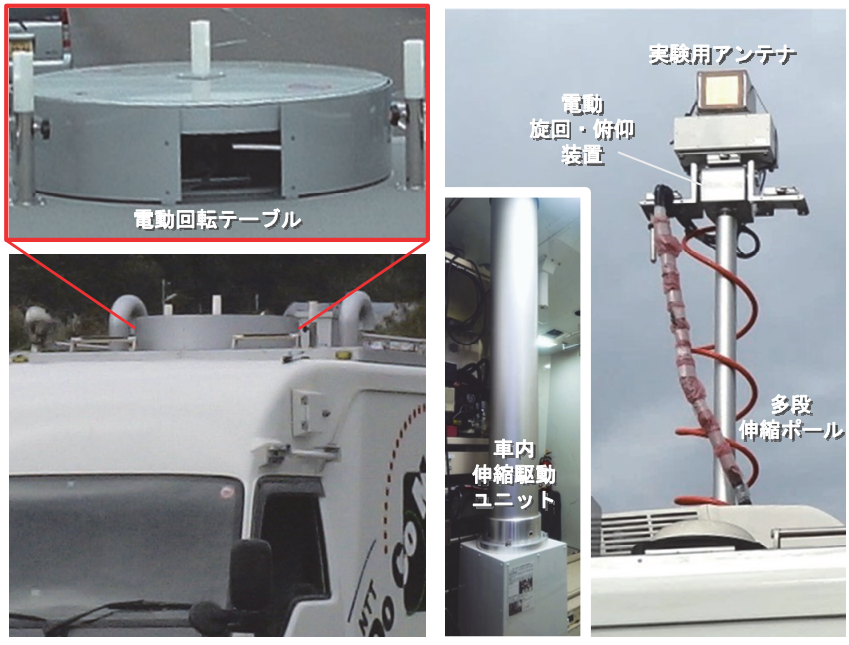
また，3G以降の研究開発において新規導入された中型・大型電測車では，システムの高周波数化に伴い新たに2GHz以上の周波数を用いた実験が行われるようになり，電測車外の実験用アンテナと電測車内の実験装置の間を接続する高周波同軸ケーブルの中継コネクタを不要とし，短いケーブル長で直結することができるよう，写真16(a)・右上に示すアンテナ接続ケーブル通線用のルーフ貫通管（逆U字管）を装備して，ケーブル区間の低損失化を図っている．なお，逆U字形状としているのは，車両ルーフの貫通部分の管路径を大きくしつつ，雨水などの侵入を防止するためである．

一方，小型電測車では，写真16(a)・右下に示す汎用アンテナ基台を一部の特殊車両および旧式車両を除いて標準搭載している．この基台は，各フィールド移動実験において，実験ごとに異なる周波数のアンテナを付け替えたり，同一実験において複数種類のアンテナを比較評価することなどが容易に行えるよう，プラグ&ソケット型アタッチメントを採用している．

新しい原理や方式による無線アクセス技術の検証の種類・内容によっては，アンテナの設置条件を細かく調整して実験することがあり，一部電測車では，それらに対応する各種アンテナ可動機構を装備している．写真16(b)左側の写真は，中型電測車のルーフ上に装備された低速度電動回転テーブルで，アンテナ素子を平面上で円を描く形で移動させたり，固定設置されたアンテナとの組合せでアンテナ間隔を変化させることが可能である．さらに，写真16(b)・右側の写真は，アンテナ素子またはアンテナユニットの位置を上下に移動調整したり，アンテナからの電波放射方向（方位角および仰角）を調整することのできる，電動旋回・俯仰装置（角度可変機構）付き多段伸縮ポールである．

なお，写真9～10に示した5Gの研究開発における高周波帯を用いたフィールド走行実験では，アンテナ単体ではなく，高周波回路部分と一体化したアン

(a)各種アンテナ搭載機構



(b)各種アンテナ可動機構

写真16　実験用アンテナ搭載機構

テナユニットが電測車外に設置されるようになってきており，同ユニットを設置するための機構（風防機構を含む）を新たに工夫し，装備している．

6. あとがき

本稿では，1Gから5Gに至る移動通信システムの研究開発を支えてきた「電測車」を写真とともに紹介した．現在ドコモでは，5Gの当初システムの技術を発展させた5G evolutionと，さらにその先の第6世代移動通信システム（6G）に向けた研究開発を推進している．今後も，これらの研究開発を支える「電測車」として，既存の車両をさらに進化させた車両も導入しながら，大小さまざまな車両がフィールドを走り続けていくことで，ユーザの期待と信頼に応えられる移動通信ネットワークを実現していきたい．なお，4G以降は，世代ごとに向上するシステムの能力を活かした新たなユーザ・アプリケーション／サービスを効果的にアピールし，かつ実証することが積極的に行われてきており，最近では，それらに特化した新しいカテゴリの車両も導入されているため，別の機会に紹介したい．

最後に，本稿の作成にあたり，黎明期の移動通信システム研究開発で使用された車両を含め，電測車の貴重な写真を提供いただいた電電公社・NTT・ドコモのOB諸氏に感謝いたします．また，研究開発用電測車の製造・整備を長年にわたり支えていただいた松電通信株式会社特装車両事業部（横浜市金沢区・旧株式会社アスカ電子）の関係各位に本誌面を借りて深く感謝申し上げます．

文　献

[1] 奥村 善久，大森 英二：“陸上移動無線の電界強度とその変動特性，”電子通信学会雑誌，Vol.50，No.11，pp.2108-2115，Nov. 1967.
[2] 伊藤 貞男：“我が国の移動通信小特集　自動車電話方式，”電子通信学会誌，Vol.63，No.2，pp.122-127，Feb. 1980.
[3] 倉本 実，渡辺 邦夫，江口 真人，結城 主央巳，小川 圭祐：“大容量自動車電話方式，”電子情報通信学会誌，Vol.71，No.10，pp.1011-1022，Oct. 1988.
[4] 卜部，ほか：“移動機・携帯機の研究開発　ムーバの開発に至る経緯と今後の展開，”本誌，Vol.2，No.3，pp.6-12，Oct. 1994.
[5] 佐々木，ほか：“特集：デジタル移動通信システム，”本誌，Vol.1，No.1，pp.16-49，Jul. 1993.
[6] 大貫，ほか：“移動パケット通信システム特集，”本誌，Vol.5，No.2，pp.6-37，Jul. 1997.
[7] 榎，ほか：“iモードサービス特集，”本誌，Vol.7，No.2，pp.6-32，Jul. 1999.
[8] 安達，ほか：“広帯域コヒーレントDS-CDMA無線アクセス特集，”本誌，Vol.4，No.3，pp.6-24，Oct. 1996.
[9] 永田，ほか：“IMT-2000サービス特集(1)　―モバイル新世紀の先駆け「FOMA」誕生―，”Vol.9，No.2，pp.6-26，Jul. 2001.
[10] 後藤，ほか：“HSDPA特集，”本誌，Vol.14，No.3，pp.6-24，Oct. 2006.
[11] 正村，ほか：“第4世代無線アクセス技術特集　―次世代移動通信システムの実現に向けて―，”本誌，Vol.11，No.2，pp.6-52，Jul. 2003.
[12] 樋口，ほか：“ブロードバンドパケット無線アクセス1Gbit/sパケット信号伝送実験特集，”本誌，Vol.13，No.2，pp.6-24，Jul. 2005.
[13] 田岡，ほか：“ブロードバンド無線アクセスにおけるMIMO多重法を用いた5Gbit/s超高速パケット信号伝送屋外実験，”本誌，Vol.15，No.2，pp.25-30，Jul. 2007.
[14] 尾上，ほか：“定額制時代の大容量・高効率通信を支える技術特集，”本誌，Vol.16，No.2，pp.6-40，Jul. 2008.
[15] 北川，ほか：“LTEサービス「Xi」（クロッシィ）特集―スマートイノベーションへの挑戦―，”本誌，Vol.19，No.1，pp.6-48，Apr. 2011.
[16] 安部田，ほか：“PREMIUM 4G特集　―LTE-Advancedの導入―，”本誌，Vol.23，No.2，pp.6-29，Jul. 2015.
[17] 須山，ほか：“超高速移動通信の実現に向けた10Gbps屋外無線伝送実験，”本誌，Vol.21，No.4，pp.22-27，Jan. 2014.

［18］岸山，ほか：“2020年のサービス実現に向けた5G技術特集，”本誌，Vol.23，No.4，pp.6-68，Jan. 2016.
［19］猪又，ほか：“車両デザインを損なわず，安定した5G通信を実現する車載用アンテナ技術　―車載用5Gガラスアンテナ―，”本誌，Vol.27，No.3，pp.51-56，Oct. 2019.
［20］第5世代モバイル推進フォーラム（5GMF）：“White Paper & Report：5Gシステム総合実証試験報告書．”https://5gmf.jp/whitepaper/
［21］奥村 幸彦，須山 聡：“［5Gの幕開けに向けた研究開発と実証］5G時代のサービス協創とシステムトライアル，”情報処理，Vol.61，No.3，pp.243-249，Mar. 2020.
［22］奥村 幸彦，増野 淳，南田 智昭，須山 聡，岡田 隆：“［5Gが切り開く新たな通信社会とそれを支える要素技術］5Gを活用する遠隔診療システムの実証試験，”電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン（2020冬号・No.55），Vol.14，No.3，pp.186-199，Dec. 2020.
［23］遠藤，ほか：“5Gプレサービス概要，”本誌，Vol.27，No.3，pp.6-10，Oct. 2019.
［24］古城，ほか：“5G商用サービス概要，”本誌，Vol.28，No.1，pp.6-10，Apr. 2020.
［25］奥村 幸彦：“時速300kmの超高速移動環境で5G無線通信実験に成功，”電子情報通信学会誌，Vol.101，No.9，pp.936-937，Sep. 2018.
［26］NTTニュースリリース：“ハイフレームレートによる滑らかでシャープな映像のライブ伝送を実現，”Apr. 2018. https://www.ntt.co.jp/news2018/1804/180405a.html
［27］DOCOMO TEAM DANDELION RACING：“ドコモチーム ダンディライアン オフィシャルホームページ．”https://www.dandelion-racing.com/team/