

### 2.17 電磁環境技術

#### 2.17.1 概要及び沿革

NICTにおける電磁環境技術の研究開発は、2つの分野が源流となっている。1つは昭和27年の電波研究所発足当時から行われてきた、電波法等の法令に準拠した無線機器等の試験、校正業務と、関連した研究開発である。独立行政法人としての通信総合研究所発足時には電磁波計測部門の測定技術グループがこの業務を所掌していた。型式検定は、国際条約に定められた航行や救難用など重要な無線機器が、所定の機能・性能を持つことを試験し判定する。また、無線機器用の測定機器の校正は、無線設備から発射される電波の特性(電力、周波数、帯域幅など)が所定の技術基準に正しく合致していることを担保するために、測定に用いる機器の指示値の標準値からの偏差を計測する業務である。

もう1つの源流は、電波研究所時代の昭和40年代に開始され昭和58年発足の電磁環境研究室として組織化された、無線通信に関連した電磁的適合性(EMC)の研究開発である。独立行政法人発足時には、無線通信研究部門に電磁環境グループが組織され、無線機器への電磁雑音の影響機構や電磁雑音の計測法、無線機器からの電波による機器誤動作防止のための試験法や生体影響の評価法の研究等を行い、無線通信に関する電磁的適合性の確保に必要な各種国際・国内の技術基準に貢献してきた。

これら2つは、第1期中期計画期間中の平成16年に無線通信部門に集約され、EMC推進室、EMC計測グループ、通信EMCグループ、生体EMCグループからなるEMC研究センターに再組織された。

EMC計測グループは旧測定技術グループで行っていた試験及び校正業務と関連する研究開発を、通信システムEMCグループでは無線システムへの電磁干渉の評価法や無線システム保護のための電磁妨害波の測定法を、生体EMCグループでは人体に対する電波利用の安全性を確保するための、電波の人体へのばく露評価技術や電波防護指針に関連した研究開発を、それぞれ実施した。さらに拠点研究推進部門仙台EMCリサーチセンターと連携してEMCユニットとして活動を行った。

第2期中期計画期間ではEMC関連研究の所属部門は

無線通信部門から電磁波計測研究センターに変更となった。また、大グループ制への移行によりEMC推進室と3研究グループはEMCグループに統合され、第1期中期計画期間から継続してきた活動はそれぞれ新EMCグループのEMC計測プロジェクト(無線機器等の試験・校正を含む研究開発を担当)、通信システムEMCプロジェクト(妨害波測定技術の研究開発)、生体EMCプロジェクト(電磁界ばく露評価技術の研究開発)に引き継がれ、また漏えい電磁波検出・EMC対策技術に関する研究開発プロジェクトが新たに加わった。

第3期中期計画期間では、EMCグループが電磁環境研究室と改称され、通信システムEMC技術、生体EMC技術、試験・校正法に関するEMC計測技術、及びミリ波からテラヘルツにわたる超高周波数帯の計測基盤技術の研究開発を実施している。

#### 2.17.2 第1期中期計画期間

##### (1) 電磁環境に関する研究開発

###### a) 通信EMC技術の研究開発

マイクロプロセッサ内蔵電化製品や、高効率のスイッチング電源を持つ製品の増加に伴い、商工業地域や公共地域のみならず、住宅地域において、人工的な周囲電磁雑音が増大しており、電磁環境の悪化が懸念されている。電磁雑音のレベルを上記の各地域において面的に測定し、電磁環境を評価することが可能な、車載型の電磁環境モニタリング装置を開発した(図2.17.1)。

この装置はVHF/UHF帯を対象として30MHzから3.5GHzを受信可能な3軸等方性アンテナと受信系をハ



図2.17.1 3軸等方性アンテナを搭載した電磁環境モニタリング車

イブリッド車両に搭載したもので、走行測定が可能である。本装置を用いて都市部等での電磁環境測定を行った他、東京タワー近傍における放送波の電磁界強度分布等を明らかにした。

また、電磁干渉を防止するための研究開発と技術基準への寄与としては、電子レンジ等の機器からの電磁妨害波の振幅確率分布 (APD) と被干渉デジタル通信信号のビット誤り率の相関についての基礎検討を進め (図2.17.2)、APD 測定法が新しい妨害波測定法として国際無線障害特別委員会 (CISPR) の基本規格に採択された (規格発行は平成18年6月)。また、超広帯域 (UWB) 無線システムを含む無線干渉問題解決のための超広帯域信号波形の計測法を確立し、ITU-R 国際標準に提案し、勧告化された (平成17年10月)。



図2.17.2 電子レンジ雑音に対する APD 測定

#### b) 生体 EMC 技術の研究開発

携帯電話に代表される様々な無線利用の拡大に対して適切な人体防護を実現するには、高精度な電波ばく露量の評価を行うことが重要である。そのため、日本人の平均体形を有する成人男女の磁気共鳴 (MRI) 画像から全身数値モデル (女性モデルは世界初) を作成し、数値計算による電磁波の詳細なばく露評価を可能とした (図2.17.3:平成16年11月)。なお、この成果を報じた *Physics in Medicine and Biology* 誌の論文 (平成16年出版) は、平成17年9月に同誌の年間優秀論文賞 (The Roberts Prize) に選ばれた。

また、人体モデルの根拠となるマイクロ波・ミリ波帯における生体組織の電気定数を測定するシステムの開発を進めた。

第3世代携帯電話の導入に伴う使用周波数や通信方式の変更を考慮し、携帯電話の電波による人体頭部内比吸

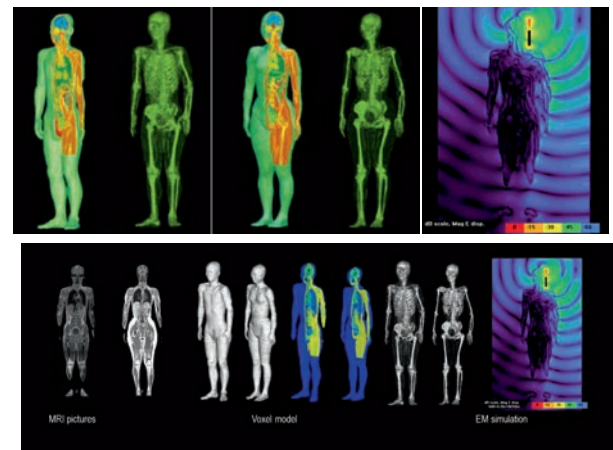


図2.17.3 日本人成人男女の数値人体モデルの開発

収率 (SAR) の測定システムに関して測定の不確かさやファントムの特性、プローブ較正法などの検討を行い、国内技術基準や国際標準化への寄与を行った。

一方、電磁波による生体への影響のメカニズムを解明するための共同研究を医学・生物学系の大学・研究機関とを行い、ラット頭部の局所ばく露装置や細胞実験用ばく露装置、家兎眼に対するばく露評価装置などの開発・評価を行った (図2.17.4)。

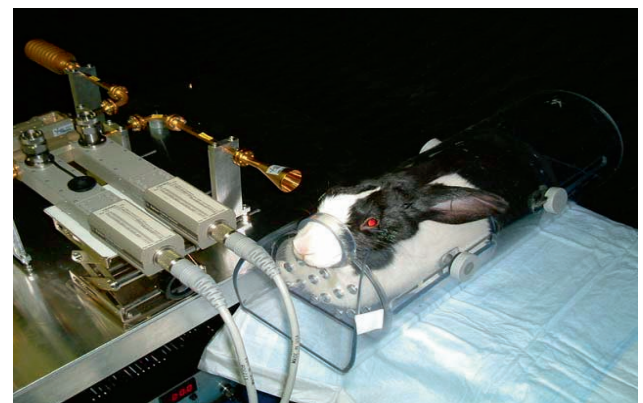


図2.17.4 動物実験用ばく露装置

また、携帯電話と脳腫瘍との関連を調べるための、世界13か国が参加した国際的な疫学調査に関連するばく露評価 (頭部内 SAR 分布の機種依存性、携帯電話から放射される電波の強度の統計調査や利用環境等の関連) を実施した。

## (2) 無線設備の機器の試験・較正及び EMC 計測技術の研究開発

### a) 試験・較正技術の研究開発

無線用測定機器の較正技術に関する研究開発としては、標準ループアンテナの改良による較正精度の向上、ダイポールアンテナ及び VHF/UHF 帯広帯域アンテナの自由空間アンテナ係数較正法の検討、ホーンアンテナの較正における不要反射等による不確かさ解析などを実施した他、SAR 測定用プローブの較正系の整備、無線利用周波数の拡大に対応するため 110 GHz までの高周波電力較正系の整備を行った(図2.17.5)。

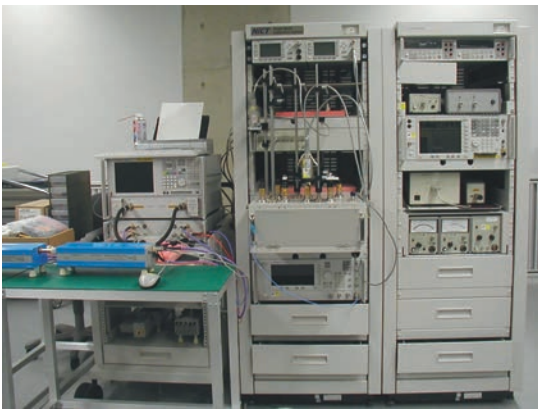


図2.17.5 周波数上限を拡張した電力較正系

一方、無線機の試験法に関する研究開発としては、各種規格に対応した試験を実施するための試験装置の整備を進めた。特に船舶レーダーについては、ITU-R の不要輻射推奨測定方法に基づく試験を可能とするため、可変帯域阻止フィルタの開発と広帯域にわたる高速測定装置の開発を行うとともに、レーダーアンテナに対し遠方界となる測定レンジ(数百 m)を確保できる測定サイト候補を、周囲電磁環境等の評価を行った上で選定した。また、ITU-R における関連技術基準審議への寄与を行った。

### b) EMC 計測技術の研究開発

平成16年度からは電磁環境グループと測定技術グループが一体化して EMC 計測グループが発足したことにより、国際電気標準会議(IEC)や CISPR 等の国際標準化会議における検討動向も考慮して、放射妨害波測定用サイトの評価法の検討や、反射箱を用いた妨害波測定法やアンテナ校正法、無線局の放射電力測定法についての検討を実施した(図2.17.6)。反射箱を用いた放射電力測定に関する論文(平成17年出版)は、平成18年9月に電

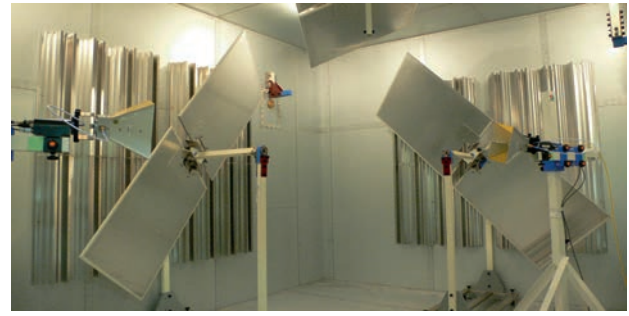


図2.17.6 反射箱を用いたアンテナ測定法の検討

子情報通信学会の通信ソサイエティ論文賞を受賞した。

さらに電磁波セキュリティに関する研究開発を開始し、情報端末ディスプレイからの漏えい電磁波による情報再現に関するセキュリティ基準レベルの定量的な評価法を提案し、ITU-T SG5に寄与を行った他、電磁シールド材料の性能評価法の検討を行った。

## 2.17.3 第2期中期計画期間

### (1) 妨害波測定技術の研究開発

情報機器と通信機器の一体化・集積化に伴う機器内電磁干渉(イントラ EMI)の検討として、ノート PC からの雑音による無線 LAN や USB 型地上デジタル放送(ワンセグ)受信器への影響評価を行った。

第1期中期計画期間に引き続き、電磁妨害波の APD 測定法の検討を進め、平成18年11月にフィルタバンク方式による5周波同時計測可能な APD 測定装置を、さらに平成20年7月にはマルチキャリア方式通信信号への雑音の影響評価に効果的な FFT 型多周波 APD 測定装置(1 kHz 分解能で5000周波数以上)の、試作・動作実証にそれぞれ成功した(図2.17.7:いずれも世界初)。多

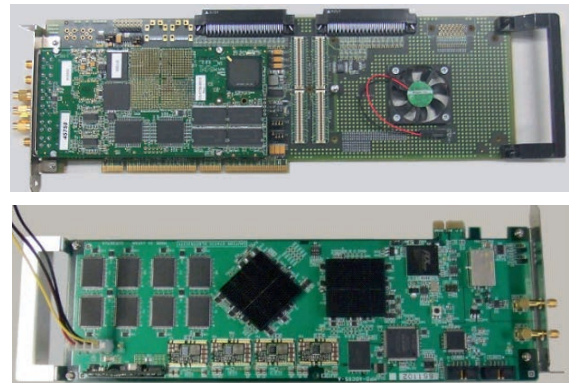


図2.17.7 フィルタバンク型(上)及びFFT型(下)の多周波リアルタイム APD 測定用 FPGA 基板

周波 APD 測定に関する論文(平成20年出版)は、平成21年9月に電子情報通信学会の通信ソサイエティ論文賞を受賞した。

また、CISPR 国際標準化会議において、産業科学医療用(ISM)装置からの変動性妨害波に対する製品規格として、APD 測定法の導入を提案し採択された(平成20年10月)。以降、同プロジェクトにおいて国際巡回測定や測定手順・許容値の検討を主導した。

新たな通信システムの導入に伴う干渉問題解決のための研究開発として、GHz 帯で使用可能な TEM 導波デバイスである GTEM セルを用いた新しい広帯域干渉評価技術を開発し、UWB 通信機器を用いて有効性を実証した(図2.17.8)。この成果を報じた論文(平成22年出版)は、平成23年8月に IEEE EMC 論文誌の年間最優秀論文賞(The Richard B. Schulz Best Transaction Paper Award)に選ばれた。さらに、GTEM セルを用いた電界プローブ校正法の検討を行い、IEC 国際規格化を達成した。

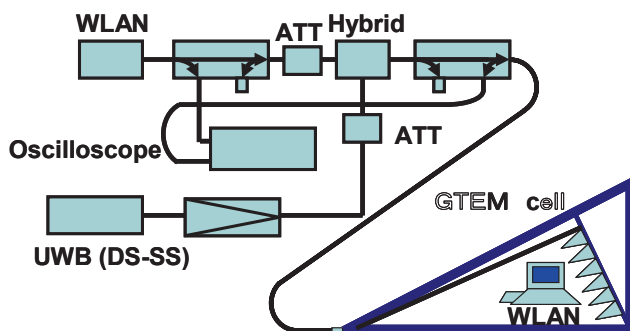


図2.17.8 GTEMセルを用いたUWB干渉評価系

また、PLC(電力線通信)システムからの漏えい電磁波の建物遮蔽効果について検討し、国内技術基準策定に貢献した。

## (2) 電磁界ばく露評価技術の研究開発

数値人体モデルを用いた高精度ばく露評価技術に関する研究を更に発展させ、世界で初めての高分解能な妊娠女性・胎児のばく露評価モデルの開発(図2.17.9:平成18年8月)、小児モデルの開発(平成20年12月)、無線端末使用時の姿勢を模擬できる任意姿勢モデルへの改良(平成20年12月、平成21年12月)を行い、詳細なばく露評価を行った。なお、成人男女の数値人体モデルにつ

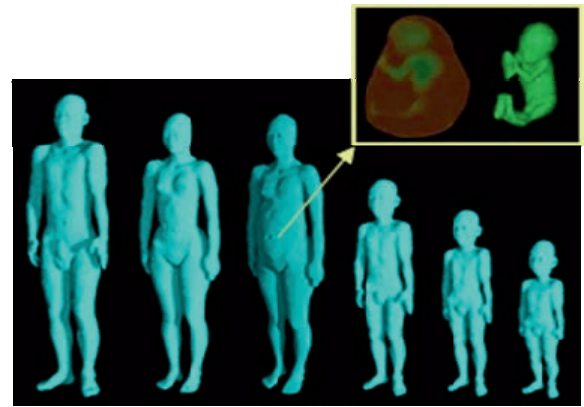


図2.17.9 妊娠女性や小児を含む、高分解能数値人体モデルの開発

いては平成18年3月より、妊娠女性モデルについては平成20年7月に、外部公開(営利・非営利)を開始した。

携帯電話のSAR測定法の高速化や、新世代携帯電話方式の携帯電話端末や基地局に対する電波防護指針適合性評価手法について研究を進め、得られた成果をITU-T/SG5およびIEC/TC106国際標準化会議等に現在に至るまで毎年継続して寄書している。

一方、電磁波による生体影響メカニズムを解明するための検討として、細胞レベルにおける電磁波の影響を評価するための、培養細胞に高強度の電磁界をばく露する装置(図2.17.10)を開発し(平成19年3月)、温度計測システムを用いて培養容器内の高精度なばく露評価を可能とした。

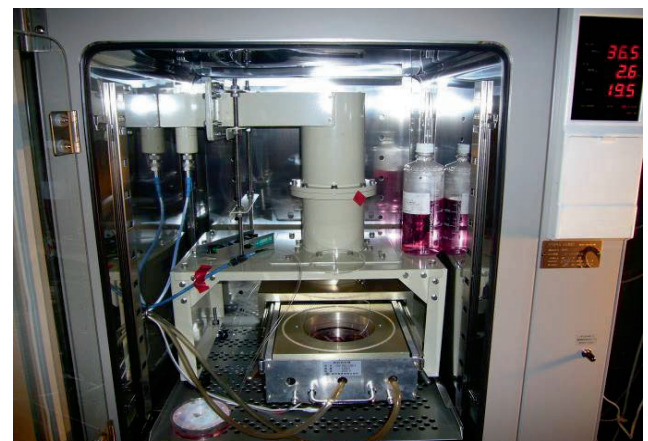


図2.17.10 温度制御機能付細胞ばく露装置

また、前中期計画から引き続き、携帯電話端末使用と脳腫瘍に関する国際疫学調査のために、電波発射強度測定機能を有する特殊携帯電話端末を使用して、実使用に

おけるばく露評価データを取得する方法を開発し、上記疫学研究の推進に大きく貢献した。なお、疫学研究におけるばく露評価に関する論文(平成20年出版)は、平成21年9月に電子情報通信学会通信ソサイエティ論文賞を受賞した。

### (3) 漏えい電磁波検出・対策技術の研究開発

PCディスプレイからの漏えい電磁波に情報が含まれているかを広帯域に評価可能な表示画面のテストパターン(図2.17.11)を開発した。これを含む漏えい電磁波に関する情報セキュリティ評価方法をITU-T/SG5へ規格提案し、採択された(平成23年1月に勧告発行)。

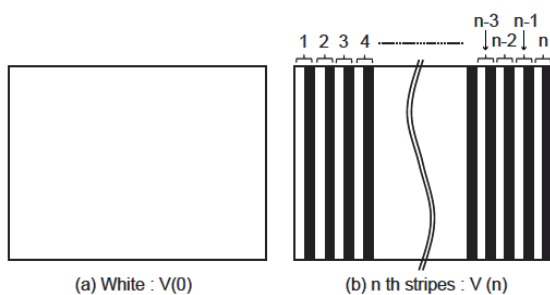


図2.17.11 PC画面からの電磁的情報漏えい評価用のテストパターン

また、電磁波に対するシールド性能を高感度に評価できる2焦点扁平空洞型シールド効果測定系を開発し(図2.17.12)、シールド効果測定装置を用いて面抵抗値を推定する手法を開発した。さらに、誘電体と金属の複合体(プリント基板に相当)の等価面抵抗値の測定についても検討を行った。本シールド効果測定装置の成果技術移転を推進し、複数県の工業試験センターで利用されるようになった。

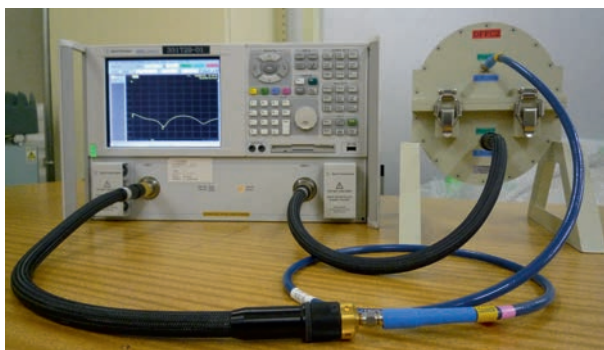


図2.17.12 2焦点扁平空洞型シールド効果測定装置

EMC対策技術に関する検討としては、EMCフィルタ特性評価法の不確かさについて評価し、その結果を踏まえて国際規格(CISPR17 Ed.2.0)の投票用委員会原案(CDV)を作成した。このCDVは可決され、続いて国際規格最終原案(FDIS)が発行され、平成23年6月に規格となった。また、テラヘルツ波を用いた材料評価や産業応用のための基盤研究として、テラヘルツ波分光器を評価するためのラウンドロビンを独立行政法人産業技術総合研究所及び独立行政法人理化学研究所と開始した。

### (4) 無線機器等の試験・較正技術の研究開発

第1期中期計画期間において整備した高周波電力計の較正系の性能を評価し、平成18年10月には周波数75 GHz、平成19年7月には110 GHzまでの業務を開始した(図2.17.13)。



図2.17.13 110GHzまでの電力較正業務を開始

アンテナの較正法においては対数周期ダイポールアンテナ(LPDA)やホーンアンテナ等の広帯域アンテナについて、位相中心を考慮してアンテナ間距離を規定することにより、不確かさの低減に有効であることを定量的に示した。また、ループアンテナの較正法について独立行政法人産業技術総合研究所との共同研究を開始し、比較実験を行った。放射妨害波試験場の評価法に関して、CISPR国際標準化会議で提案されていた参照サイト法による国際比較実験に参加し、NICTのオープンサイト、及び平成22年度末に完成した大型電波暗室が標準サイトとしての基準性能を満たしていることを確認する一方、参照サイト法の技術課題を検討し標準化に寄与した。

無線機器の試験法に関する研究開発としては、マグネ

トロン発振評価装置の開発やスプリアス対策デバイス開発への寄与を行うとともに、レーダースプリアスの高速計測装置の開発を行い、従来(例えば7.5~26 GHzの測定で約22時間)に対して最大60倍の高速化を達成した(図2.17.14)。



図2.17.14 レーダースプリアス高速計測装置

また、船舶用レーダーに対して新たに要求された項目である、海上物標(一定の散乱断面積を持つ標的)の探知能力試験を行うため、総務省との協力により試験サイトの選定・整備を進め、平成22年2月に新潟県上越市有間川に試験用設備が総務省により整備された(図2.17.15)。



図2.17.15 上越市に整備された船舶レーダー試験設備

## 2.17.4 第3期中期計画期間

### (1) 通信システムEMC技術の研究開発

急速な普及が進む省エネルギー機器による電磁干渉問題を研究課題として検討を行った。代表的な省エネ家電であるLED照明に内蔵されるスイッチング電源からの

広帯域電磁雑音を取り上げ、雑音発生機構及び雑音モデルを検討した。雑音が地上デジタル放送へ与える干渉の度合いを、雑音のAPDを用いて定量的に予測可能であることを示した。さらに複数のLED照明から発生し重畳する雑音に対して、光・電磁雑音強度変動の相関を用いて雑音源を特定する方法を開発し、有効性を明らかにした(平成26年に誌上発表)。

また、省エネ家電やパワーエレクトロニクス機器からの雑音の広帯域化に対応するため、従来の汎用測定器では不可能であった1 GHzまでの伝導妨害波測定を可能とする、TEMセルを用いた伝導妨害電圧測定装置(図2.17.16)及びコモンモード電圧測定装置を平成26年に開発した。

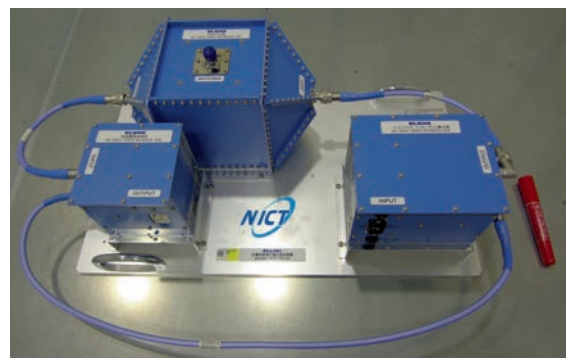


図2.17.16 TEMセルを用いた広帯域伝導妨害電圧測定装置

省エネ家電等の増加に伴って生ずる複数干渉要因を、独立成分分析等の統計的手法によって識別分離する方法について検討を行い、実験系の構築及びアルゴリズム・解析パラメータの最適化を進めた。また、地上デジタル放送波の高精度電波伝搬特性測定法の検討を進め、チャンネル毎の推定伝達関数を帯域連結する手法の改良を行って、フィールド実験により有効性を実証した。この成果は平成26年6月に映像情報メディア学会丹羽高柳論文賞を受賞した。さらに伝搬路上の気候変動の検出及び予測を目指した水蒸気量推定の応用(図2.17.17)について、センシングシステム研究室と共同で検討を開始し、平成26年には到来波の遅延量をリアルタイムに推定することに成功した。

国際標準化活動においては、IEC/TC77会議での妨害波測定法の不確かさ及び電磁環境の分類に関する基本規格の作成に大きく貢献した。さらに、電磁界プローブの校正に関する研究成果がIEEE Std.1309:2013(2013年度



図2.17.17 地上デジタル放送波による水蒸気量の推定

版)規格に反映された。また CISPR 国際標準化会議においては、第2期中期計画期間から継続して APD 測定の製品規格への導入プロジェクトを主導し、平成27年5月に国際規格最終原案 (FDIS) が可決され、国際規格になることが決定した。

## (2) 生体 EMC 技術の研究開発

電波利用の多様化と周波数拡大に対応し、長波からミリ波までの高精度な電波ばく露評価シミュレーションを可能とするために、各周波数帯における数値人体モデルの高解像度化を行うとともに GPU プロセッサを用いた廉価な大規模数値計算システムを開発した(平成24年)。また無線電力伝送 (WPT) システムにおける人体ばく露量特性の評価(図2.17.18)、誘導電流測定及び温度測定による比吸収率測定手法の検討、実際の人体と同様の誘導電流分布を実現する人体等価アンテナの開発等を実施した。妊娠女性に対するばく露評価モデルの構築を目指した日仏国際共同研究プロジェクトを主導し、各妊娠周期(8~32週)を網羅した妊娠女性モデルを31体開発した(平成25年)。

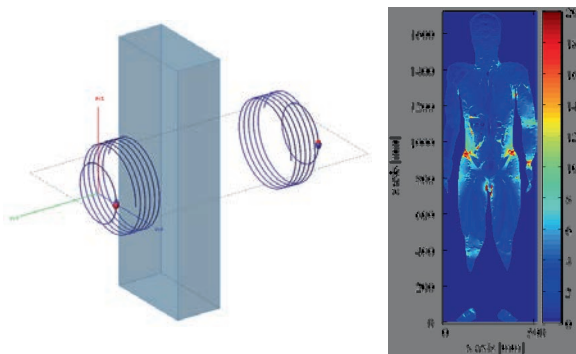


図2.17.18 共鳴方式 WPT システムのコイル間(左図灰色部)における人体内の誘導電界分布の計算(右)

各周波数領域における生体組織の電気定数測定系の開発と改良を行い、特に低周波数帯(~100 Hz)での

測定誤差の検討、及び10~100 GHz帯における測定時間を大幅に短縮(10分の1)可能な測定系を開発した(図2.17.19)。その結果、100種類以上の組織に対する世界最大規模の生体組織電気定数データベースを平成25年度に構築した。引き続き、当該データベースの拡張・改良を進めており、平成27年度を目途に公開を予定している。



図2.17.19 同軸プローブを用いた電気定数測定系

電磁波ばく露に関する生物学・医学的研究においては、外部研究機関・大学等との共同研究により、複数周波数の無線信号の同時ばく露を可能とする生物実験用反射箱型ばく露装置の開発を行うと共に、若年者の携帯電話使用と健康影響に関する国際疫学調査のために電波ばく露量計測専用端末を用いた若年者の電波ばく露量調査を行っている。さらに、テラヘルツ波帯非熱作用影響評価等の医学・生物研究において、ばく露評価やばく露装置開発に貢献した。

比吸収率測定法に関しては、新しく国際標準化された、側頭部以外の人体に近接して使用する携帯無線端末を対象とした SAR 測定の測定系の整備と不確かさ評価を行った。さらに、LTE/MIMO 等の最新無線システムに対する電波防護指針への適合性評価手法についての検討を行い、当該手法が IEC 国際規格改訂案に採用された。また比吸収率較正業務に関する国際相互比較試験や不確かさ評価を実施すると共に、ホワイトスペース利用を反映して較正周波数を700 MHz帯にも拡張するなど、国内電波利用状況の変化に即した業務への対応を行った。

## (3) 試験・較正技術の研究開発

平成23年2月に完成した VHF/UHF 大型電波暗室

(図2.17.20)をはじめとする新棟設備への移設作業を完了し、較正業務を開始した。

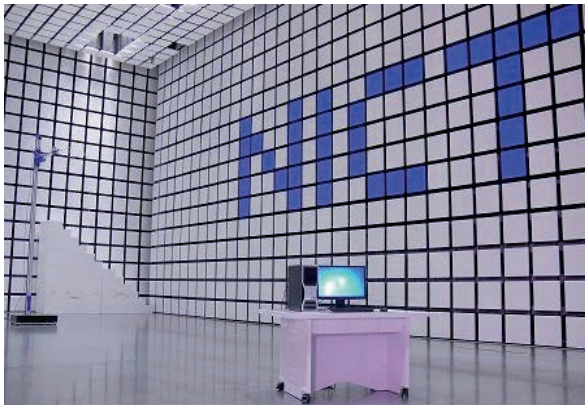


図2.17.20 5面/6面共用大型電波暗室

また、最近の無線利用の周波数拡大に対応するために高周波減衰量の較正範囲、高周波電力計の較正周波数及び電力の範囲の拡張を行った。特に高周波電力計については、Dバンド(110~170 GHz)の電力国家標準に基づいて市販の電力計を較正できるシステム(図2.17.21)と較正手順を確立し、平成26年3月に世界に先駆けて較正業務を開始した。



図2.17.21 Dバンド(110~170 GHz)の電力較正系

近年のスイッチング電源搭載省エネ家電やパワーエレクトロニクス機器の増加に伴って重要性が増している、周波数30 MHz以下の放射妨害波測定に必要なループアンテナについて、従来の較正法の問題点を定量的に明らかにするとともに、SI基本単位へのトレーサビリティを有する新しい高確度な較正方法を開発した。また妨害波測定場の評価方法に関して、国内32基の大型電波暗

室並びに屋外測定場による測定結果を比較評価し、評価方法の妥当性を検討した。上記は、いずれも CISPR 国際標準化会議に寄与を行った(平成24年10月以降、継続して寄与)。

一方、無線機器の試験技術に関する研究開発としては、物標探知能力試験において新潟県上越市の試験場の改良・整備や海上の被測定ブイの反射特性の改良、船上からの海上物標の探知能力試験法の検討を行うとともに、平成25年にレーダー試験設備に関して外国機関への訪問調査を実施して試験設備等の整備に反映した。

また新型のGPS搭載非常用位置指示無線標識装置(EPIRB)を試験するための施設整備を平成24年に行った。さらに、実用化が見込まれる固体素子を用いたチャープ方式等のレーダーに対応する試験法を開発するために、スプリアス測定系のソフトウェアを改良し有効性を確認した他、チャープレーダーから従来型のパルスレーダーへの干渉による影響を信号発生器と実機を組み合わせたシミュレーションにより明らかにした(平成25年)。

#### (4) 超高周波計測技術の研究開発

超高周波帯における無線利用の増加に対応するため、電力較正の周波数上限(110 GHz)の拡張を目指して、110~170 GHzの電力標準(熱量測定による国家計量標準)を独立行政法人産業技術総合研究所と共同開発した。一方、NICT独自の電力較正方法(3ミキサ法により変換損失を確定した周波数変換器を用いる方法：図2.17.22)についての研究開発も進め、300 GHzまでの高周波化を平成25年度に達成した。

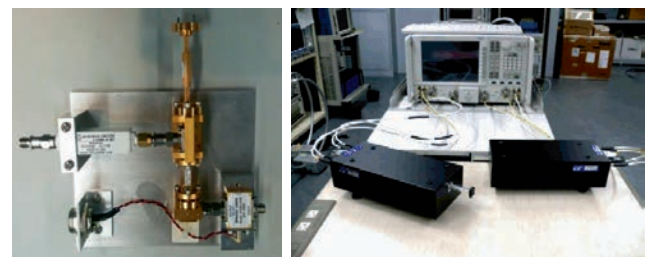


図2.17.22 周波数変換系を用いたミリ波帯電力較正

さらに、300 GHzまでの精密電力測定のための機材を整備し、220~325 GHz用の標準ゲインホーンの利得較正法の検討を平成25~26年度にわたり行った他、超高周波帯を用いる無線端末やアンテナ等の材料定数の測



定を可能とするため、300 GHz まで対応可能な誘電率測定系を開発した。また、テラヘルツ波帯の電力測定に向けて海外標準機関 (PTB: ドイツ国立物理工学研究所) の動向調査や当該機関との情報交換を行った。

テラヘルツ波帯を用いた分光技術の汎用化を推進するには、非専門家向けのユーザーガイドが不可欠である。そこで NICT が選定した標準試料及びプロトコルを用いて国内3機関 (NICT、独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人理化学研究所) により各種分光装置の比較試験を行うとともにガイドを作成し、平成27年3月に公開を開始した (図2.17.23)。また、独立行政法人理化学研究所と共同で開発した世界最大の分光スペクトルデータベースを改良し、国内外の研究機関からデータベース構築に参加できる環境を平成26年に整備した。

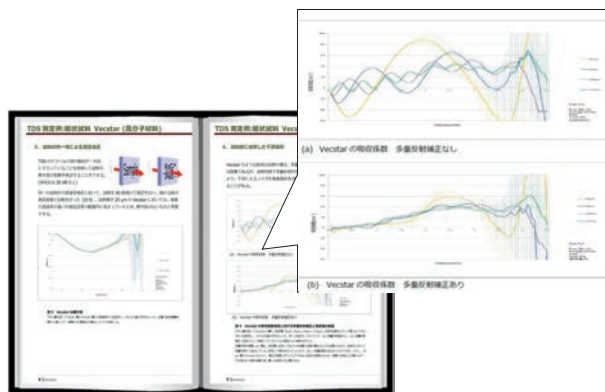


図2.17.23 テラヘルツ帯分光測定装置のユーザーガイド

さらに平成23年から現在に至るまで、テラヘルツ波を用いた測定技術の産業応用例として、NICT内外の機関と協力し、無機有機コンポジットの物性解明手法や、コラーゲン繊維等の生体物質の変性の測定・解析する手法、汎用の非破壊検査手法としての可能性を検討している。