

電磁波計測基盤技術

2.15 電磁波センシング技術

NICTにおける電磁波センシング技術の研究開発は、高周波電磁波センシング技術、環境計測技術、宇宙環境関連研究等が進められてきた。

高周波電磁波センシング技術の研究開発では、ライダー観測装置の開発とそれによる大気観測、また、ミリ波サブミリ波分光観測装置の開発と、国際宇宙ステーションからの観測を含む大気観測実験を進めてきた。

環境計測技術の研究開発では、環境観測を目的とした衛星 (TRMM、GPM、EarthCARE) 搭載、航空機搭載 (Pi-SAR、Pi-SAR2)、地上設置のレーダ (ウインドプロファイラ、COBRA、海洋レーダ、フェーズドアレイレーダ等) の開発、さらにパッシブレーダの開発に取り組んだ。

宇宙環境関連の研究では、研究の大きな柱として、定常観測及び観測技術開発、シミュレーションコード開発が挙げられる一方、第3期中期計画ではインフォマティクス技術の宇宙天気への応用が進められた。

2.15.1 高周波電磁波センシング技術の研究開発

(1) 光アクティブセンシング技術の研究開発

a) 地上からの観測

レーザー光を使ったアクティブセンシングであるライダー (レーザーレーダとも言う) 技術の研究開発では、アジア地域やアラスカの研究機関と協力して観測装置の開発と開発したライダー装置による大気観測を行った。アラスカ大学フェアバンクス校と協力し、ポーカーフラット実験場のライダー棟に多波長ライダー、レイリー



図2.15.1 アラスカのポーカーフラット実験場のライダー棟

ライダー、レイリードップラーライダーを設置した (図2.15.1)。

レイリーライダーは極域中層大気の温度分布を平成9年以来測定してきており、大気重力波や極域中間圏にできる夜光雲の観測などに使われている。平成15年に設置した多波長ライダーではエアロゾルや雲だけでなく、窒素や水蒸気分子からのラマン散乱も計測した。レイリードップラーライダーは中層大気の風観測のため開発され、平成17年にアラスカに設置された。

中国、インド、インドネシア等のアジア諸国にライダー観測技術の移転を行った。中国では平成6年から寧夏回族自治区の沙坡頭にライダーを設置し、砂漠上空の砂塵分布を測定 (図2.15.2) した。平成12年から16年の間は科学技術振興調整費「風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する研究」に参加し、風送ダストの長距離輸送過程の解明に寄与した。インドやインドネシアでは、赤道域の成層圏エアロゾルや成層圏から中間圏の気温分布を観測するシステムを開発・設置し、その運用を通じ技術移転を行った。

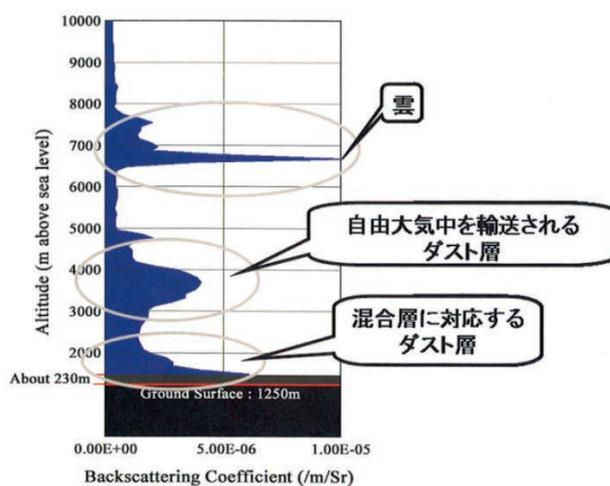


図2.15.2 沙坡頭で観測された浮遊ダスト

b) コヒーレントライダーの開発

目に安全な2μm レーザを送信光源とし、ヘテロダイン検出を行うコヒーレントライダーによる風計測及びCO₂検出技術の開発を行った。

天気予報の高精度化や気象現象の解明のために風の分

布を知ることは非常に重要である。風を計測するためのコヒーレントドップラーライダーでは送信レーザー光が大気中のエアロゾルに反射される時に生じるドップラー効果による周波数偏移を測定する。

NICTでは、小型ドップラーライダーによる地上実験・航空機実験(図2.15.3)による風観測方法と解析法の研究を行った。平成16年6月の航空機実験では航空機速度を補償し風分布を導出することができた。また、NICT本部や稚内電波観測施設、沖縄亜熱帯計測技術センターでの風計測実験、庄内平野に吹く清川ダシ観測、仙台空港での実験等を通じ、コヒーレントドップラーライダーによる風分布計測の有効性を示した。



図2.15.3 小型ドップラーライダーを搭載した航空機

将来の衛星搭載を目指して $2\mu\text{m}$ で発振する高出力伝導冷却型レーザーの開発を行った。平成20年7月には開発したレーザーを使いスキャナー付コンテナに入れた風分布と CO_2 分布が計測できる CO_2 差分吸収・ドップラーライダーを開発(図2.15.4)し、風計測実験を行った(図2.15.5)。 CO_2 は温室効果ガスの中で最も影響の大きなガスであ



図2.15.4 NICT屋上に置いた CO_2 差分吸収・ドップラーライダー

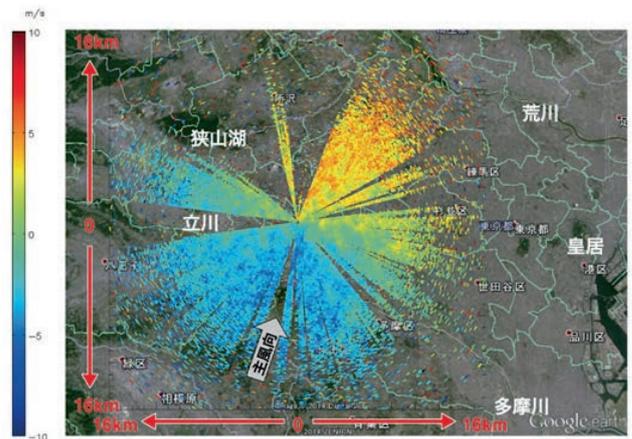


図2.15.5 CO_2 差分吸収・ドップラーライダーで観測した風分布

り、その正確な計測は地球温暖化対策のために必須である。NICTで開発した $2\mu\text{m}$ レーザーの波長はちょうど CO_2 分子の吸収線の波長帯にあり、吸収のある波長と無い波長の2波長で観測を行うことで、 CO_2 差分吸収ライダーとして動作させることができる。実際に CO_2 分布を5km程度先まで測ることができている。

(2) ミリ波サブミリ波センシング技術の研究開発

a) 地上・気球からの観測

ミリ波サブミリ波分光観測による大気リモートセンシングの研究を平成元年頃から開始した。国立天文台等と協力しながら、200GHz以上のミリ波やサブミリ波の超伝導受信機を開発した。大気微量物質を観測するための地上設置のミリ波ラジオメータ、高高度気球搭載のサブミリ波リムサウンダをNICT内で開発し、観測システムとして完成させた。平成10年から16年頃まで、アラスカのポーカーフラット実験場で地上設置ミリ波ラジオメータによる観測等を実施した(図2.15.6)。640GHz



図2.15.6 アラスカに設置したミリ波ラジオメータ(写真中央)と周辺の山火事(平成16年6月)

帯を使用した高高度気球搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (BSMILES) は、平成15年8月、16年9月、18年9月に、JAXA と協力して三陸沖の高度30 km 以上の上空から観測を行い、3回ともデータ取得に成功した (図2.15.7)。これら観測で成層圏のオゾンや一酸化塩素 (ClO) の分光データ等が得られ、超伝導受信機による観測の有効性を実証した。



図2.15.7 三陸で放球準備をするBSMILES (平成15年8月)

b) JEM/SMILES の開発

国際宇宙ステーション「きぼう」曝露部搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (JEM/SMILES、以下SMILES) は、JAXA と NICT の共同ミッションとして、平成9年に JAXA による曝露部初期利用ミッションのひとつに選定された。NICT では、平成10年度以降、SMILES のコンポーネント等のうち、サブミリ波局部発振器系、冷却光学系、常温光学系、サブミリ波受信機バイアス電源、中間周波変換増幅系、常温増幅系の開発を行った (図2.15.8)。その他に NICT では、冷却受信部のBBM 開発、地上データ処理施設の一部の整備を実施

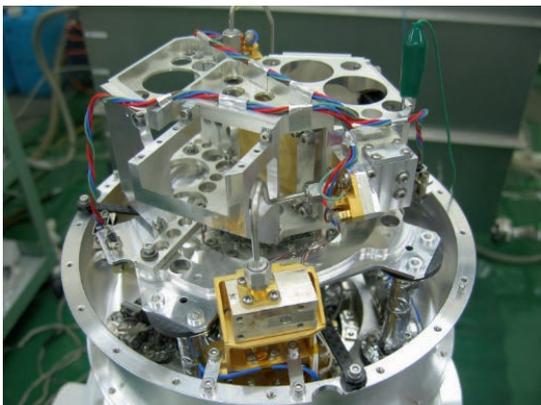


図2.15.8 SMILES の冷却光学系と冷却受信部の一部 (平成19年)

するとともに、JAXA と協力しながら SMILES の設計、開発、試験、運用、較正、検証、データ処理・解析等を実施した。

SMILES の開発は、JAXA と NICT が共同した SMILES ミッションチームを中心とした体制で進められた。SMILES ミッションチームによる開発の結果、アンテナ光学系における不要反射等による分光観測データの劣化が実用的に全く見られない、非常に高品質なデータを軌道上で得ることに成功した。計画は、国際宇宙ステーション計画の遅れにより当初予定より数年遅れたが、平成21年9月11日に、宇宙ステーション補給機 (HTV) 技術実証機に載せて、H-IIB 試験機 (1号機) により打ち上げられ、10月中旬に SMILES は観測を開始した (図2.15.9)。宇宙での超伝導受信機 (SIS receiver) 利用は、欧州の天文衛星に4か月ほど遅れたものの、地球観測に用いたのは SMILES が世界初で、従来衛星より1桁以上高い感度でのサブミリ波大気観測に成功し、一酸化臭素 (BrO) を始めとした同位体を含む11種類以上の分子等について広い高度範囲の分布をほぼ全球にわたって測定した。それらのデータは内外の研究者による大気科学研究に貢献した。



図2.15.9 打ち上げを待つ SMILES (平成21年5月)

平成22年4月21日に SMILES のサブミリ波局部発振器系に不具合が発生した。代替のサブミリ波局部発振器を国際宇宙ステーション上で取りつける方法が検討されたが、その後 SMILES の4K 冷凍機にも不具合が生じたため、SMILES 観測の復活は断念された。

c) THz リモートセンシング技術等の開発

平成23年度には、更に高い周波数のセンシング技術として、ホットエレクトロンボロメータ (HEB) ミキサ

と量子カスケードレーザ (THz-QCL) による高感度受信機の開発を開始した。平成25年10月には3 THzのQCLのフェーズロックに成功した。また、平成23年2月から外部資金等により、将来の小型サブミリ波衛星を目指したアンテナや光学系部品等の開発を進めた。平成25年7月からJAXAと協力して、CFRPによるサブミリ波反射鏡の国際宇宙ステーションきぼう曝露部を利用した宇宙環境影響評価の準備を開始した。

2.15.2 環境計測技術の研究開発

(1) 航空機搭載合成開口レーダ (Pi-SAR、Pi-SAR2) の研究開発

a) 第1期中期計画

① Pi-SAR 研究公募

平成5年度に開発を始め、平成12年には北海道有珠山及び伊豆諸島三宅島の火山観測で社会的にも合成開口レーダ (SAR) が災害監視等に有用であることを示した航空機搭載 SAR (Pi-SAR) は、1.5mの分解能と偏波を用いたカラー画像化を含む判読性の向上機能、地面の高さも同時に計測できるインターフェロメトリの機能を有する世界的にトップクラスの航空機 SAR システムである。

このPi-SARのより広い応用分野の開拓と実証を目指して、研究公募をJAXAと共同で実施した。これは、大学、国立研究機関、民間等からの研究提案に対してPi-SARによる観測機会を提供し成果を取りまとめるもので、32課題について観測を実施した。観測は平成16年2月から平成17年2月までの4シーズンに分けて実施し、この成果は、学術論文として各分野の学協会の報告のほかにワークショップ報告書としてまとめた。また、平成18年にPi-SARの成果集「地球の目撃者」として一般向けの冊子にもまとめた。

② 平成16年新潟県中越地震観測

平成16年10月23日に新潟県長岡市を震源として発生した新潟県中越地震は、大規模かつ多数の土砂崩壊による広範囲の災害を発生させた。NICTでは、翌日(24日)にPi-SARによる緊急観測の実施を決定し、地震発生から3日後の10月26日と10日後の11月3日に、震源を中心とする半径10kmの地域を中心いくつかの方向からの観測を実施した。両日もとも雨であり、上空からの空撮による状況観測は困難であったが、Pi-SARにより画像

を得ることができた。

図2.15.10は、10月26日の観測によって得られた被災地の画像の一例を示す。長岡市内のがけ崩れ場所を含む2km×1.4kmの領域である。図の白い丸が大規模な土砂崩落部分で、地震発生から4日後に人命救助が行われた場所である。



図2.15.10 Pi-SARで観測した大規模な土砂崩壊。○が崩壊した部分。

このように、Pi-SARは悪天下でも、ある程度の地震被害の把握に役立つことは示したが、この地震で多数発生した小規模の土砂崩壊や道路、河川の被害の判読には1.5mという画像の分解能では不十分と判断された。

観測の初動が人命救助の限界に当たる72時間以内には間に合わなかったこと、さらに交通機関・通信手段の障害のほか、処理に時間がかかったこともあり、データ提供までに相当の時間を要したことが課題となった。また、データさえ現地に早期に届いていれば、先に述べた画像の分解能が不十分でも現地の生活者には異変が見いだせるということも分かり、データをいかに迅速に現地に届けるかが、災害時での実用化のカギとなることが明らかになった。

b) 第2期中期計画以降

① Pi-SAR2の開発

災害時に役に立つ航空機搭載 SAR を目指して、第2世代の航空機搭載 SAR となる Pi-SAR2の開発を行った。新潟県中越地震での Pi-SAR 観測における反省から、Pi-SAR2開発のコンセプトは、Pi-SAR に比べて高分解能を実現することと観測データを現地に迅速に届けることの2点に絞った。ここから Pi-SAR2の目標は1m以下の分解能で Pi-SAR の機能性能を発展的に引き継ぐこととした。平成20年に初飛行を行った Pi-SAR2は当

初の目標を大きく超える30 cm 分解能を達成し、さらに、平成22年には機上で高速に処理する装置を開発した。

機上処理装置は2 km 四方のフル分解能画像(ただしモノクロ)を約15分で処理できる。一般にSARのデータ量は大きいので、生のデータを飛行機から地上に伝送できる通信手段が無いが、機上処理装置で画像化することにより衛星通信を用いた伝送が可能となり、平成22年度末には、ETS-VIIIを用いて画像データを地上へ伝送するデータ伝送実験を実施した。

② 新燃岳火山噴火及び東日本大震災

平成23年3月11日14時46分頃に発生した東日本大震災では、震災翌日の朝7時にはPi-SAR2観測を開始した。図2.15.11はこの時観測した仙台空港の周辺の画像である。画面の大半を黒く覆っているのは津波で冠水した領域を示している。観測データの一部は機上で画像化して、着陸後に地上回線を用いて災害発生後24時間以内に関係機関に伝送し、またNICTのWebサイトから公開した。地上到着後のデータ処理はNICT内で順次処理を行い、1週間程度かけてカラー画像としたデータを公開した。また、この地震に先立って発生していた九州の霧島・新燃岳の火山噴火災害についても、逐次観測を行い、火口内の変動をその日のうちに火山噴火予知連絡会等に送付して、土石流や泥流等による災害の予測に役立てた。

データ伝送の高速化についてはグラフィックプロセッサを用いた高速化装置を開発し、平成25年8月の桜島観測において3偏波カラー画像を観測後約10分で機上から



図2.15.11 東日本大震災の翌日の仙台空港周辺(5km × 5km)航空機搭載SAR(Pi-SAR2)により観測したもの。図の中央部に空港滑走路、右側は太平洋。

商用衛星を介して配信することに成功した。

(2) 大気のリモートセンシング技術開発

NICT発足後の3期にわたる中期計画における電波による大気のリモートセンシング技術研究開発は、以下に示すセンサ開発プロジェクトに集約される。衛星プロジェクトである熱帯降雨観測衛星(TRMM)とその後継ミッションである全球降水観測(GPM)ミッションにおける降雨(降水)レーダの開発及び雲プロファイリングレーダ開発を行っているEarthCAREプロジェクトが挙げられる。地上レーダでは、日本初のCバンドのマルチパラメータバイスタティックレーダであるCOBRAや近年開発されたフェーズドアレイレーダ、小金井及び沖縄で開発を行ったウインドプロファイラ、遠距離海洋レーダ、そして第3期中期計画からスタートしたパッシブレーダ開発がある。それぞれの機器開発プロジェクトごとに研究成果を振り返る。

TRMMに関しては、NICTは計画の段階からこのミッションに参加し、その主要センサである降雨レーダ(PR)の基礎研究を実施した。平成9年に打ち上げられたTRMMは軌道維持用の燃料が尽きたことにより平成27年4月に運用を終了したが、それまでの17年間、世界で唯一の、衛星からのレーダによる精度のよい降雨観測データを提供してきており、現業予報、気象・気候学研究等に役立てられている。NICTでは、継続して降水プロファイリングアルゴリズムの、維持・改訂を実施したほか、地上検証・アルゴリズム検証等の研究を実施してきた。

TRMMの技術はその後継であるGPMへ受け継がれ、新規開発であるKa帯(35.5 GHz)のレーダについては、電気エンジニアリングモデルまで開発を行い、TRMMと同様にアルゴリズム開発においても指導的な役割を果たした。Ka帯レーダの開発は第1期中期計画に開始し、第3期中の平成26年2月28日にGPM主衛星搭載の二周波降水レーダ(図2.15.12、JAXAとの共同開発)として打ち上げられた。

もう1つの衛星ミッションであるEarthCAREのW帯の雲レーダ開発の背景には、平成9年に開発した航空機搭載雲レーダ(SPIDER)の開発がある。SPIDERは航空機観測のみならず、地上や船舶での長期にわたる観測でその有用性と技術を実証した。そのような背景のもと、JAXAと共同で欧州宇宙機関(ESA)のEarth

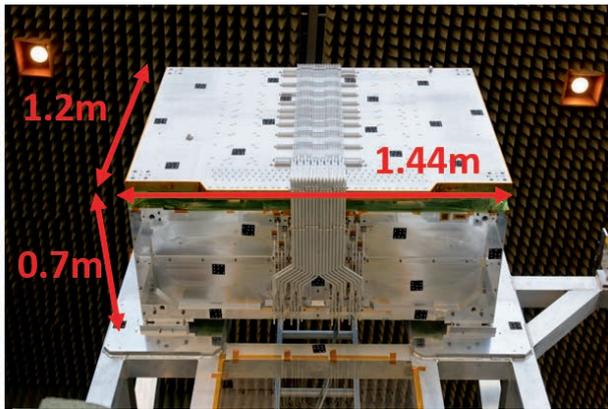


図2.15.12 GPM二周波降水レーダのKa帯降水レーダの電気エンジニアリングモデル

Explorerに提案し、第1期中期計画期間中の平成16年にEarthCAREが採択された。第2期中期計画期間では、平成20年の開発プロジェクト発足までの間、フィジビリティ研究としてアンテナ、送受信器、給電部等の基礎研究を実施した。衛星機器開発では、送受信器及び準光学給電部(送受切替部)のエンジニアリングモデル(図2.15.13)の開発まで実施した。EarthCARE搭載の雲レーダは平成27年度完成予定であり、ESAへの引き渡し後平成29年度に打ち上げ予定である。

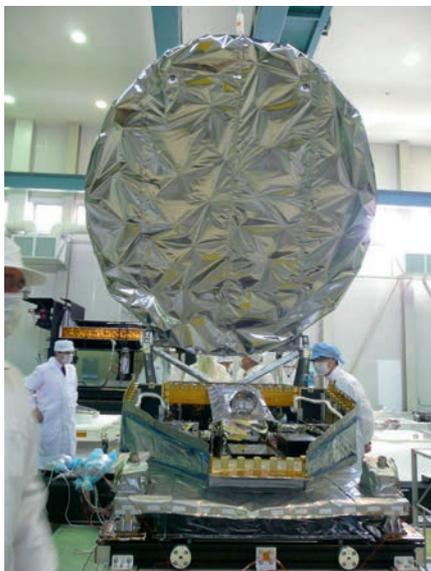


図2.15.13 EarthCARE衛星搭載雲プロファイリングレーダ(CPR)のエンジニアリングモデル
大きな主反射鏡の下にNICTが開発した準光学給電部と送受信器が配置されている。

地上レーダに目を向けると、まず、沖縄に整備したCOBRAについては、第1期中期計画期間中の平成14年に開発を完了した。COBRAは自由度の高い偏波パラメータ設定と受信専用機を複数設置することにより、

レーダ波の側方散乱波を受信できるバイスタティック観測機能をもつ世界にもあまり類を見ないレーダである。COBRAは沖縄県名護市に設置され、台風の観測や前述のTRMM/PRによる降雨観測データの検証等にも利用されている。またCOBRAはGPMによる観測データの検証や後述のフェーズドアレイ気象レーダの評価等への利用が期待されている。

フェーズドアレイ気象レーダは平成20年度からのNICT委託研究として国立大学法人大阪大学と株式会社東芝によって開発され、平成24年に完成した。このレーダの開発の基にあるのはTRMM/PRでのフェーズドアレイシステムであり、これをベースに高速で3次元データを取得できる地上設置の気象レーダが開発された。フェーズドアレイ気象レーダのターゲットはゲリラ豪雨に代表される突発的な気象現象の予測である。フェーズドアレイ気象レーダの初期観測においても積乱雲内の上空で大量の雨が生成され、それが落ちてくるところを間断なくとらえることができている(図2.15.14)、従来型のレーダでは不可能であったゲリラ豪雨の早期探知などに役立つものと期待されている。

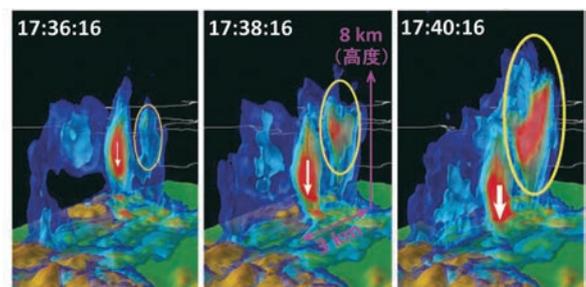


図2.15.14 フェーズドアレイ気象レーダにより観測された積乱雲の3次元構造の時間変化
上空で形成された降水コア(赤い部分)の落下や上空で新たな降水コアの形成プロセスが明瞭にとらえられている。

大気風速(3成分)の鉛直プロファイルを測定するウインドプロファイラについては、沖縄県大宜味村に設置されている400 MHz及び1.3 GHzのレーダは平成11年から開発を開始し、平成13年に完成している。特に400 MHzのウインドプロファイラは高高度(約16 km)までの風観測が可能であり、そのデータはリアルタイムで気象庁に送られている。第2期中期計画では、ウインドプロファイラにRASSを導入して、電波と音波を用いて上空の大気温度を計測する研究も実施した。また、NICT本部においてもウインドプロファイラの高度化の研究を第2期中

期計画から実施し、多重化システムによる高感度化及びイメージング化の研究を実施し、気象庁 WINDAS の更新にかかる基盤技術開発を行った(図2.15.15)。



図2.15.15 多重化システムによるウインドプロファイル (LQ13)

石垣島、与那国島の遠距離海洋レーダの整備は平成11年に開始し平成13年から稼働している。石垣島、与那国島の2島を選定したのは、東シナ海における黒潮を直接観測するためであり、黒潮潮流場の変動とエルニーニョ／ラニーニャ現象等との関連性を調べることも念頭に置いて10年程度を目途に観測を継続した。遠距離海洋レーダを2基用いることにより、2次元観測(デュアルドップラー観測)が可能となり、東シナ海における表層流速場を推定することに成功した(図2.15.16)。第2期中期計画以降では、バイスタティック観測技術開発を行い、送信を1局、受信を2局にして海流場の推定の可能性の研究を実施した。さらに第3期中期計画においては、バイスタティックの観測に加えて、受信アンテナの分散

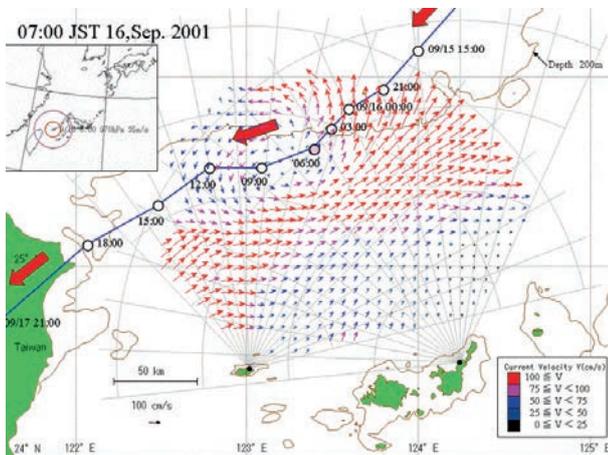


図2.15.16 石垣・与那国の海洋レーダによる平成13年台風16号通過時の表層流速場

化の研究・開発を実施し、用地が限られた場所における海洋レーダ設置を目指している。

電波の有効利用の観点から、自らの送信源を持たずに他の送信源からの電波を利用するパッシブレーダに関する研究を第3期中期計画からスタートした。パッシブレーダは送信源からの直達波の受信や降水粒子などからの側方散乱波などをターゲットとしているが、最初に取り上げたのは地上デジタル放送波の伝播遅延測定による水蒸気量の推定である。これまでに地上デジタル放送波の連続受信とその遅延プロファイルを生成することに成功し、基線上に2局の受信器を配置することにより水蒸気量推定のめどが立っている。

2.15.3 宇宙環境研究

(1) 概要及び沿革

NICTにおける宇宙環境研究の動向は、それまで宇宙天気予報業務を主に行う平磯支所と、その予報精度の向上を目的とした研究を行う本部(小金井市)にある複数の研究室が有機的・効率的に結合していった歴史と言える。特に、平磯太陽観測センターが平成21年4月に組織として終焉し、無人施設となったのは研究組織の統合としての大きな流れであり、また南極観測の発足時から続けてきた越冬観測を、機器の自動化により夏隊に移行したのは効率化の象徴である。また、CRL時代の平成5年から開始されたアラスカプロジェクトのうち、高高度観測のサブテーマがその後合流し、電離圏における機器開発が強化された。

さらに、各領域でのモデルやシミュレーションコードの開発により、世界に伍するレベルの技術が育ってきていること、また近年のハードウェアの発達により可視化等インフォマティクスの要素が付加され、アウトリーチ的な活動とともに NICT 内外の共同研究にも大きく寄与してきている。

(2) 組織の変遷

平成13年4月の独立行政法人化の際には、宇宙環境関連のグループとして、本部に4つの研究グループ(宇宙天気システムグループ、シミュレーターグループ、電離圏・超高層グループ、北極域国際共同研究グループ)、平磯太陽観測センターに1つの研究室(太陽・太陽風研究

室)があったが、平成18年の第2期中期計画に宇宙環境計測グループとして1つに統合された。その後平成23年4月に宇宙環境インフォマティクス研究室と改称し今に至る。

また、NICTが昭和32年(1957年)の第1回南極観測以来継続してきた南極昭和基地における電離層観測は、システムの多重化、省電力化等観測装置の遠隔運用のための整備を行ったことから、越冬隊から夏隊への移行の検討を行い、平成21年に完了した(図2.15.17)。

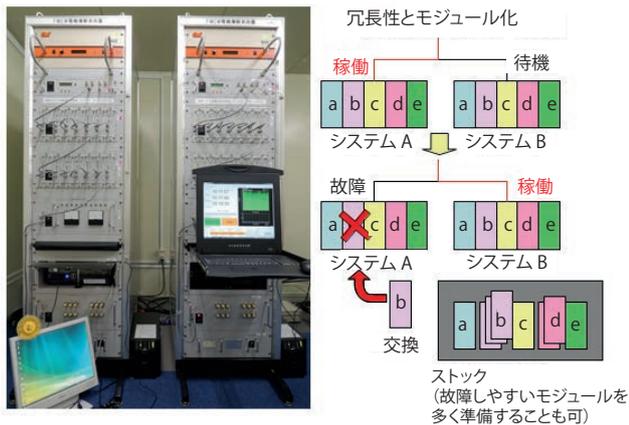


図2.15.17 省電力化・省力化を実現したFMCW型電離層観測装置1、2号機(左)、南極FM-CWの概念図(右)システムのモジュール化により専門知識のない者でも短時間で修理可能となっている。

(3) 観測技術の動向

平磯太陽観測施設の太陽電波観測システム(HIRAS)は、宇宙天気現象の源である太陽活動、特に太陽表面爆発現象を迅速に検出することを目的として運用してきたが、建設以来30年が経過し装置が老朽化し、また周辺の電波環境も悪化し十分な観測が困難となってきたことから、平成26年に山川電波観測施設に新規装置を新設し、テスト運用を開始した(図2.15.18)。

また、太陽から地球に向かってきた太陽風の詳細な情報



図2.15.18 平成26年3月に山川電波観測施設に完成した太陽電波観測システム

を地球到達前に知るために、太陽と地球の重力の釣り合う点(ラグランジュ点)に浮かぶ探査機“ACE”からのデータを受信するシステムの運用を平成9年より国際協力のもと本部にて行ってきた。このアンテナについても平成24年より改修を進め、平成26年3月に完成し、運用を開始した。

国際地球観測年(IGY、昭和32年)以来50年以上の歴史を持つNICTの電離圏定常観測では、稚内・国分寺・山川・沖縄の4か所で15分毎の定常観測を継続している。平成20年に、周辺が市街地化された稚内電波観測施設を郊外の豊富町サロベツに移転し、観測を継続した。また、観測装置として平成13年に10C型を導入し観測してきたが、平成26年に後継機としてVIPIR2を選定し、導入を進めているところである(図2.15.19、図2.15.20)。



図2.15.19 VIPIR2の受信システム(小金井局)

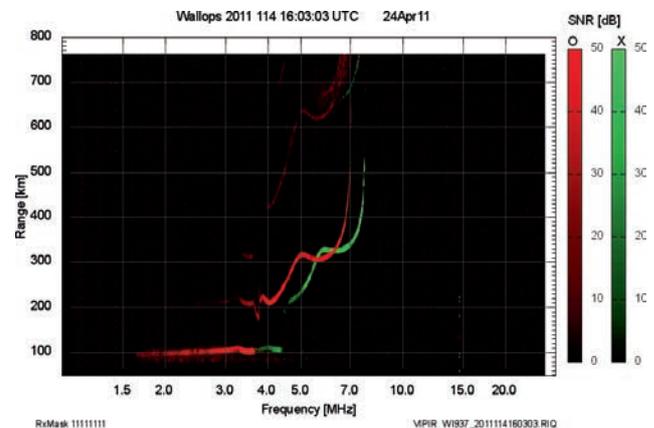


図2.15.20 VIPIR2で得られるイオノグラム Xモード(赤)とOモード(緑)の信号が別々に識別されているのが特徴

また、東南アジア電離圏ネットワーク (SEALION) は平成16年4月にインドネシア・コトタバン、9月にベトナム・バクリウに設置し、第1期の整備を終えた。その後もベトナム・フーツイ、中国・ハイナン、フィリピン・セブ、タイ・プーケットへの整備を進め、赤道域に特有の電離圏現象、特にプラズマバブルの観測を行い、その成因や伝播、GPSをはじめとする機器への影響を研究するプロジェクトを推進した。SEALION は京都大学が整備した EAR レーダーを始め、名古屋大学の全天イメージャ等の観測とも共同し、一大観測プラットフォームとして機能し現在に至る (図2.15.21)。

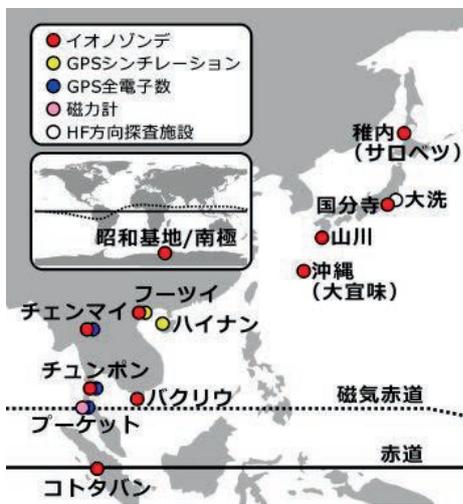


図2.15.21 国内定常観測及び SEALION 観測網

また、NICT は平成5年より、米国アラスカ大学等と共同で電磁波を利用した地球大気計測機器を開発し、アラスカ等において米国側と共同で地球環境問題において重要な北極大気変動を明らかにするプロジェクトを推進してきた。本プロジェクトは平成17年まで継続され、イメージングリオメータやミリ波ラジオメータ等9種類の観測装置の開発・観測及びその解析による数々の研究成果を始め、データ転送・蓄積・公開システム“SALMON”による大規模データアーカイブなどの開発を行った。

さらに、宇宙天気の実況を把握するために重要な極域の磁場データの取得として、ロシア・米国・日本による国際プロジェクト RapidMAG に参画した。これは、ロシアの6地点の地磁気データをリアルタイム伝送し、オーロラ活動の指標となる AE 指数をリアルタイムに導出することを目的としたものである。NICT は、極域の地磁気活動やオーロラ嵐に伴う静止軌道へのプラズマ粒子注

入の監視等を目的として、各観測所から AE 指数を算出する京都大学地磁気世界資料センターへの静止衛星経由のデータ伝送を担当した (平成23年度以降は、ロシアが自らデータ伝送のための回線を確保)。

(4) モデル・シミュレーション技術の動向

NICT では宇宙天気予報の数値予報化への道筋として、太陽風・磁気圏・電離圏結合系のシミュレーションコードの開発を続けてきた。特に、平成16年にはリアルタイムシミュレーションを完成させ、宇宙天気予報に資する定常運用を開始したが、平成23年に一旦リアルタイムシミュレーションを休止し、空間分解能をより精緻にするとともにコードのロバスト性の向上を図った。特に「極端現象」に対応し、巨大太陽フレア発生時の社会への影響推定等にも耐え得るコードの開発を続けている (図2.15.22)。

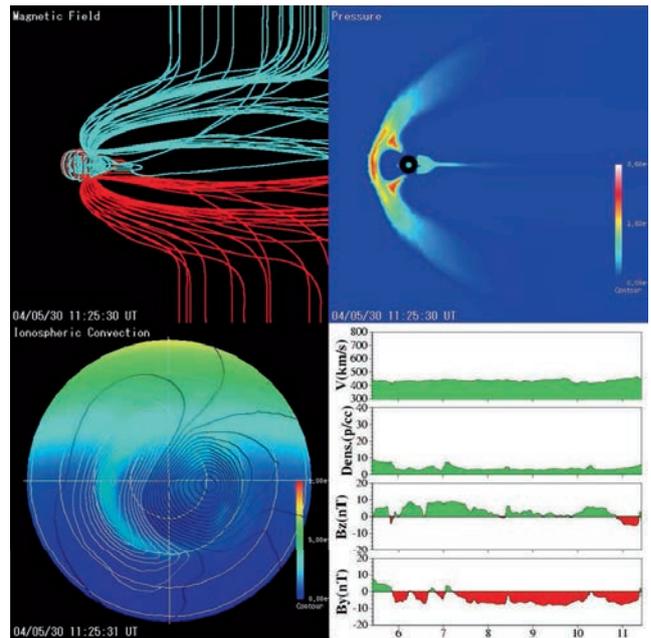


図2.15.22 リアルタイムの磁気圏及び電離圏シミュレーション結果の例

また、静止軌道の衛星障害の一因である放射線帯電子フラックス変動を、太陽風速度や密度、磁場など複数のパラメータから予測するモデルを開発し、ACE 衛星からのリアルタイムデータを用いて実際に予測し、Web で情報を公開するシステムの運用を開始している。現在、予測領域を GPS 衛星軌道まで拡大するための研究開発や、地磁気や HF レーダー観測データを用いて磁気圏内

部の擾乱による変動の効果を考慮したモデルの研究開発を推進している(図2.15.23)。



図2.15.23 放射線帯モデルの結果を表示する外部公開用Webページ

地上から高度500kmを超える電離圏に至る空間変動を1つのモデルの中で再現するプロジェクトを平成19年に開始した。GAIAと呼ばれるこのモデルは、現在では地上付近の気象の客観解析データを入力し、対流圏から電離圏までの繋がりをシミュレーションで示すことが可能となり、成層圏突然昇温などのイベントが現実に近い形で再現されることが示されている(図2.15.24)。

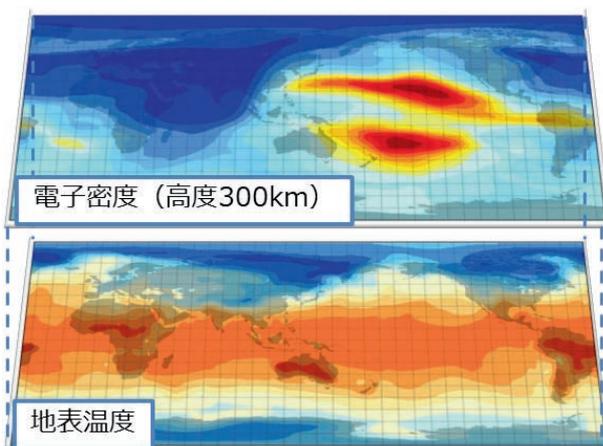


図2.15.24 GAIA の概念図
地表温度パラメータと高度300kmの電子密度を1つのシミュレーションコードで再現可能

(5) インフォマティクス技術の動向

NICTで継続してきた国内電離圏定常観測について、前世紀中の観測データはフィルムに記録されていたが、近年その劣化が問題となってきていた。これに対し、データのデジタル化を順次進め国内観測データについてはほ

ぼ完了するとともに、海外との交換データについてはフィルムロール1本を1つの画像として保存する新たな手法を用い、データ欠損の恐れがなくかつ安価なデジタル化を実現させた。

また、観測データを専門家以外にも分かりやすく提供しその成果を社会に還元することを主な目的として、サイエンスデータ可視化プロジェクトを平成21年より開始し、自動CG化アプリケーションの開発やタイルディスプレイを用いたコンテンツ開発を進めた。

平成22年頃から検討されたOneSpaceNet構想(後にScienceCloudと改称)は、観測データ、シミュレーションコード、解析環境等を1つのクラウド上に展開し、NICT内外からシームレスにアクセス可能にしたものであり、これまで個々の研究者が行ってきた研究活動をチーム化する原動力となっている。

(6) 宇宙天気情報の利用拡大・国際動向

宇宙天気情報のユーザーニーズを知るために、NICTでは平成15年より太陽地球環境情報サービスユーザーズフォーラム(後に宇宙天気ユーザーズフォーラムと改称)を開催し、現在までに9回開催している。近年の宇宙天気の動向やデータの使い方の講演を行うほか、関連する外部研究者や代表的ユーザーによる講演会を中心として行ってきた。

また、これまで欧米に比べ研究協力体制が乏しかったアジア・オセアニア域において、電離圏・ジオスペース観測及びデータ交換の基盤を構築することを目的として、平成24年にアジア・オセアニア宇宙天気アライアンス(AOSWA)を立ち上げた。第1回AOSWAワークショップは平成24年2月にタイ・チェンマイで開催され、8か国14組織が参加した。第2回は平成25年11月に中国・昆明で開催され、11か国29組織から99名が参加した。

2.16 時空標準技術

2.16.1 概要と沿革

時空標準技術においては、時間(周波数)と空間の基準を確立するための研究及び技術開発を行ってきた。具体的には、周波数の源となる周波数標準器の研究開発、その実用展開に不可欠な周波数・時刻の高精度比較・伝送技術の研究開発及び位置基準の構築に必要なVLBI技術の研究開発並びに生活や産業の基盤を支える周波数国家標準及び日本標準時の発生と供給に関する業務を行っている。

周波数標準及び日本標準時に関する技術開発の歴史は、元を辿れば昭和初期にまで遡る。通信省電気試験所での周波数標準器の開発や千葉県の送信所からの標準電波の発射など、国家標準の基盤を支える研究は脈々と引き継がれており、現在の最先端技術の開発につながっている。

またVLBIに関しては、巨大パラボラアンテナを有する鹿島宇宙技術センターは日本におけるVLBI技術開発のパイオニアであり、現在でもIVS技術開発センターとして国際コミュニティに貢献している。

組織としては、第1期中期計画(平成13～17年度)開始時に、電磁波計測部門の所属となり、従来の2研究室1課体制から5グループ制(原子周波数標準グループ、時間周波数計測グループ、日本標準時グループ、精密測位技術グループ、宇宙電波応用グループ)に再編された。平成15年には時間周波数計測グループは完了・解散し、代わって準天頂衛星グループが新設された。加えてタイムスタンププラットフォームグループも新設された。

第2期中期計画(平成18～22年度)においては、所属が新世代ネットワーク研究センターに変更となり、小グループ制が廃止され、「光・時空標準グループ」の名称で大きな1つの研究室として統合される形となった。従来のグループはそれぞれプロジェクトとして研究活動を継続した。

第3期中期計画(平成23年度～)においては、所属が電磁波計測研究所になり「時空標準研究室」の名称となった。研究室を活動内容毎にグループ分けした結果、平成26年度現在、次世代時刻周波数標準グループ(原子時計に関する技術開発)、次世代時空計測グループ(主に衛

星仲介及び光ファイバを用いた比較・伝送技術の開発)、日本標準時グループ、次世代時空計測グループ(鹿島)(VLBI技術の開発)として活動している。準天頂衛星のプロジェクトは総務省委託研究の完了に伴い平成23年度に解散した。

2.16.2 第1期中期計画：電磁波計測部門

(1) 周波数標準設定、標準電波発射、標準時通報

日本標準時の定常業務においては、周波数国家標準及び日本標準時を安定に発生・維持・供給した。平成14年にシステム全般に渡り大幅更新した新日本標準時システム(図2.16.1)の開発に着手し、新2号館(平成16年完成)にて平成17年度末に定常運用を開始した。国際的に検討が始まったうら秒廃止の議論に関しては、国内での課題を平成14年より検討した。時刻比較の定常業務においては、平成13年にはがね山標準電波送信所を開局し、GPS/GLONASS衛星による時刻比較、及び静止衛星を利用した衛星双方向時刻比較の双方で定常観測を実施した。平成16年には長波送信所2局に双方向用新モデムを配備した。



図2.16.1 新日本標準時システム

時刻・周波数供給においては、長波標準電波(図2.16.2)、テレホンJJY、TVサブキャリア等によるサービスを安定に運用した。平成16年にはTVサブキャリアサービスを終了するとともにテレホンJJYを新システムに更新(図2.16.3)し、またNTP専用線サービスを開始した。標準電波においては、電波干渉に関する寄与文書2件をITU-Rに平成17年に提出した。



はがね山標準電波送信所

おおたかどや山標準電波送信所

図2.16.2 標準電波送信所



↑ 公開NTP用サーバー

← テレホンJJYシステム

図2.16.3 日本標準時の供給システム

周波数校正においては、平成14年に校正システム(ISO/IEC17025適合)が国家計量標準機関としての認定(ASNITE-NMI認定証)を受けた。また平成15年に計量法に基づく「特定標準器を用いた指定校正機関」として周波数校正サービス(jcss校正)を開始した。平成17年にGPS衛星を用いた遠隔校正業務を開始し、また周波数標準の国際承認(CMC)を取得した。

(2) 時空標準に関する研究開発

a) 標準時に関する技術開発

電子時刻認証に関しては、平成13年に民間との共同研究も含め研究を開始した。平成17年にはタイムスタンプ統合化プラットフォームを構築し、タイムビジネスにおける国家時刻標準機関として標準時の提供を開始した。また平成15年より関西先端研究センター(神戸)にシス

テムを設置し、実験を行った。

ネットワーク時刻同期技術に関しては、高精度・高速タイムスタンプを開発し、小金井-大手町間などでの実証試験を経て、平成17年にはインターネット時刻供給サーバ(SNTPサーバ)を公開試験運用するとともに、クライアント側での品質向上技術を開発した。またデータセンター・間利用に適した光ファイバ高精度時刻配信システムを開発した。これらの技術は以降、公開NTPサービスに活用された。

b) マイクロ波標準

光励起型Cs一次周波数標準器(CRL-O1)の運用では、年数回のペースでBIPMへの報告を行った。不確かさは、特に統計的な部分が運用のたびに多少変動したが、平成13年には確度 6×10^{-15} を達成した。運用実績から、不確かさ 8×10^{-15} として評価論文を取り纏め、平成16年にMetrologia誌に掲載された。平成17年にはレーザーやCsオープン交換等の改良と再調整を行ったが、不確かさ 6.8×10^{-15} という自己評価の範囲内でBIPM調整値とよく周波数が一致することを確認した。

Cs原子泉型一次周波数標準器の開発では、平成14年にラムゼー共鳴信号の取得に成功し、平成15年に安定化と高S/N化により 10^{-15} 台を達成した。平成16年に新2号館にて現NICT-CsF1の実験を始め、ほぼ目標通りの安定度 6×10^{-13} @1秒、 4×10^{-15} @20,000秒を達成した。平成17年には 2×10^{-15} 程度の不確かさ見通しを得ることができた。

衛星搭載を目指した小型水素メーザーの開発では、平成13年に検討を開始し、準天頂衛星プロジェクト開始後はその課題の1つとして開発を進めた。

c) 光標準

光周波数標準の開発では、平成14年に Ca^+ イオントラップ標準器を目指してトラップ装置と精密光周波数計測用光源(クロックレーザー)の開発に着手した。計測システム(光コム)、クロックレーザーなどを整備し、平成16年末に $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの捕捉と冷却信号取得に成功した。平成17年には、クロックレーザーの線幅として当時世界トップレベルの数Hzを実現するとともに $^{40}\text{Ca}^+$ シングルイオンのクロック遷移周波数でMHzオーダーの測定結果を得て、標準器としての基本動作を達成した。

d) 比較・伝送

静止衛星を仲介とする衛星双方向周波数時刻比較技

術の開発においては、時刻比較用モデムを独自開発し、アジア太平洋地域での実運用を平成14年に開始した(図2.16.4)。平成15年に米国との試験観測を開始するとともに、平成17年には日独間の時刻比較精度0.4 ns(相対値)を実証した。また、校正用小型可搬局を整備し、国内予備実験で時刻較正精度2 nsを確認した。



図2.16.4 衛星双方向周波数比較用アンテナ群

GPS 搬送波位相比較法(GPSCP)においては、BIPM キャンペーン実験(平成14~15年)に参加し受信機校正を行うとともに、時刻比較ソフトの開発によりサブナノ秒の見込み精度を確認し、平成17年には日米間実験で平均時間1時間で 3×10^{-14} の周波数比較精度を実証した。

ETS-VIII 衛星による高精度時刻比較実験では、衛星搭載機器の開発及び打上げに向けた準備を進めた。

総務省受託研究「準天頂衛星システムの研究開発」(平成15~23年)においては、平成15年に衛星搭載時刻管理系の概念設計を開始し、平成17年にEM製造に着手した。地上系は平成16年に設計を開始した。要素技術としては通信端末に関する基礎研究として、リングフィルタを利用した周波数可変VCOやアンテナを開発し特許化した。

パルサータイミング計測に関しては、3年半にわたる観測データをまとめて平成14年に論文化するとともに、日露間の共同観測データ解析の結果、宇宙空間伝搬媒質における経年変化を検出してロシアと共著論文化した。

e) VLBI・SLR

首都圏広域地殻変動観測プロジェクトの最終年度(平成13年)として成果を取りまとめた。具体的には、平成12年6月下旬に発生した三宅島の噴火活動とこれに起因する海底地殻へのマグマ貫入によって引き起こされた首都圏での広域地殻変動を検出、その収束に至るまでの経緯をリアルタイムVLBI技術を活用して観測し、結果を

気象庁、地震予知連絡会等に提供した。また、宇宙測地観測機器によるコロケーション観測で重要な基準点を結ぶ測量を実施した。国際基準座標系への貢献が評価され、国際地球回転事業(IERS)から感謝状を受けた。

広帯域VLBI、準実時間VLBI技術開発においては、データ交換インターフェースVSIの仕様制定への貢献が評価され、平成13年に国際VLBI事業が総務大臣賞を受賞した。平成14年に開発した16チャンネルIP-VLBIシステム(K5/VSSP)やギガビット関連処理システム(GICO-2)等を統合したK5/VSI観測システム及びデータ処理ソフトウェアが平成17年に完成し、世界最速となる2 Gsps・4 Gbps サンプルングでのVLBI観測及び1 Gbps 高速サンプルングでのリアルタイム関連処理システムの実証実験に成功した。同年9月に国際測地VLBI実験に参加し、時間分解能1時間でのUT1及び極運動の決定精度5.2 μ sec、0.12ミリ秒角を実証した。

VLBI技術を活用した宇宙飛翔体の準リアルタイム位置測定に関しては、IP-VLBIシステムを用いて探査衛星「GEOTAIL」や「のぞみ」のVLBI試験観測を実施し、狭帯域テレメトリー信号でも群遅延観測が可能なることを実証した。また、小型探査機「ホイヘンス」に関してはESAの要請を受けデータ収集に成功し、国際貢献を果たした。小惑星探査機「はやぶさ」の地球スイングバイや小惑星イトカワへの着陸等においても、VLBI観測による位置計測に成功した。

f) アジア地域への貢献

アジア太平洋時間周波数標準中核研究機関計画では、平成13年から隔年で複数の研究者を地域から招聘し、トレーニングプログラムを実施するとともに、平成12年にアジア太平洋で初の時間周波数に特化した国際ワークショップを開催したことを受け、平成14年・平成16年にも継続して国際ワークショップを開催した。また、アジア太平洋地域の計量組織であるアジア太平洋計量計画(APMP)に参加し、傘下の時間周波数技術委員会(TCTF)で委員長を務めるなど国際貢献を果たした。

2.16.3 第2期中期計画：新世代ネットワーク研究センター

(1) 日本標準時の高度化の研究開発及び供給

日本標準時の定常業務においては、前期に開発した新

日本標準時発生システム (NJST システム) により周波数国家標準及び日本標準時を安定に生成した。原子時計データの国際原子時への年間平均寄与率9~11%を実現して期間を通じ世界第2位の貢献度を維持した。

時刻比較の定常業務においては、衛星双方向や GPS 衛星による国際定常時刻比較網を運用し、韓国、中国、シンガポール、台湾の標準機関に対する技術支援を行った。平成19年には日独定常時刻比較に衛星双方向方式を採用し、UTC に対する日本標準時の差の計測の不確かさを0.7 ns から0.5 ns に改善した。さらに平成21年には GPS PPP 法への取組などにより、この計測の不確かさを更に0.5 ns から0.3 ns に改善した。

長波標準電波は2局体制でほぼ100%の運用率を達成したが、東日本大震災における福島第一原子力発電所事故の影響により「おたかどや山標準電波送信所」の停波を余儀なくされ、復旧は平成23年度に持ち越した。テレホン JJY、専用線 NTP サービスでもほぼ100%の安定供給を実現した。NTP に関しては、従来より処理能力を2桁高めた NTP サーバを独自開発し、平成18年に一般ユーザー向けサービス (公開 NTP) を開始した。その後、独自の時刻伝送装置を開発し、平成21年に大手町設置サーバによる公開 NTP サービスを開始した。平成23年1月以降、信頼性向上などのため、大手町の運用を停止し、NICT 本部に一本化してサービスを継続している。また、地下や建物内で電波時計を利用するための電波時計リピータを平成18年より開発し、平成20年にはタイ国内展示会で公開した。

電子時刻認証においては、タイムビジネス (時刻認証事業者) に日本標準時を安定に提供した。平成18年には、クライアント側で時刻認証を行う方式のシステムを開発した。本方式の標準化に関して、技術基準等の報告書を平成20年に国内認定機関へ提出した。また日本のタイムビジネス向け時刻配信方式は、平成22年4月に ITU-R TF.1876 として正式に承認された。この ITU 勧告を基に JIS 標準化案の策定と経済産業省への登録を平成21年に行い、JIS 取得の作業を進めた。

持ち込み校正においては、平成18年に新校正システムを完成させ、このシステムによる指定校正機関及び ASNITE の再申請、審査を経て新システムでの計量法に基づく特定標準器による校正 (jcss) サービスを開始した。平成22年には従来の固定周波数 (1、5、10 MHz) に

加え、1 Hz ~ 100 MHz の任意周波数にも校正範囲を広げた。遠隔周波数校正においては、GPS を用いたシステムが jcss 国内認可 (平成18年) と ASNITE-NMI 国際認可 (平成21年) を受け、受信装置は技術移転により平成22年に製品化された。平成20年には標準電波を用いた遠隔校正の研究に着手した。

(2) 次世代時刻周波数標準技術の研究開発

a) マイクロ波標準

平成18年に平均時間1秒での安定度が水素メーザーより2桁高い超高安定冷却サファイア発振器 (CSO) を導入した。これを Cs 一次周波数標準器や光計測の信号源として用いることにより、超高精度周波数計測が可能となった。

NICT-O1 (図2.16.5左) は平成18年の確度評価を最後に運用を終了した。原子泉型 Cs 一次周波数標準器 NICT-CsF1 (図2.16.5右) については平成19年に不確かさ 2×10^{-15} で国際承認を獲得した。以後 BIPM に各年数回の確度報告を実施した。CSO をマイクロ波信号源として用いることで短期安定度が従来より約3倍向上し、平成22年には不確かさ 1.4×10^{-15} を達成した。さらに新方式を取り入れた NICT-CsF2 の開発に着手した。



↑ 光励起型 (NICT-O1)

原子泉型 (NICT-CsF1) →

図2.16.5 セシウム一次周波数標準器

b) 光標準

平成18年より広帯域光コム (図2.16.6左) を開発し、10,000 秒で 10^{-16} 以上の周波数安定度を実証した。さらに CSO の導入により短時間計測精度が向上し、平成20年には超高安定クロックレーザー (図2.16.6右) の1秒の安定度を世界トップレベルの 10^{-15} 台に向上させた。光周波数の校正用に波長 $1.5 \mu\text{m}$ の通信波長帯においてフェムト秒ファイバ光コム及び超狭線幅レーザーを開発した。また、光周波数標準器のクロックレーザーの要となる光共振器においては、国内企業との技術連携により

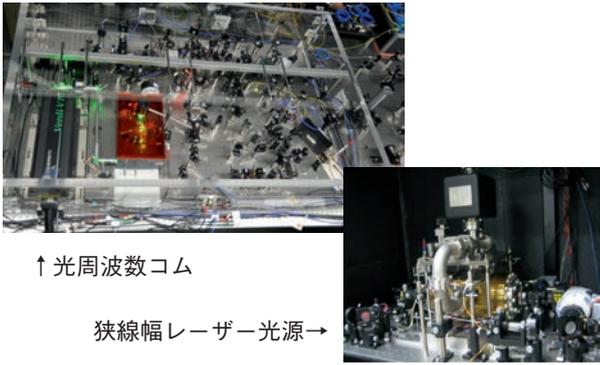


図2.16.6 超高精度光計測の要となる装置

国産化への道を拓き、開発された共振器は第3期中期計画のSr光格子時計において実利用された。

Ca⁺イオントラップ光標準(図2.16.7左)に関しては、平成20年に時計遷移周波数の絶対値を決定し世界に先駆けて論文化した。この結果は平成21年6月に国際度量衡委員会の周波数・波長標準作業部会で承認され、Caイオンの時計遷移が長さ標準を定めるための推奨放射リストに新たに登録される成果となった。平成22年には磁場の影響を抑えることで不確かさを 10^{-14} 台から 10^{-15} 台へ向上させた。

Sr光格子時計(図2.16.7右)に関しては、平成18年に開発に着手し、平成21年に遷移周波数の絶対値を不確かさ 7×10^{-15} で評価した。平成22年度末には国立大学法人東京大学のSr光格子時計との間でファイバ伝送による周波数比較実験を行い、以後の詳細な検討により2つの独立した光周波数標準器が 10^{-16} 台で一致するという顕著な成果を生んだ(2.16.4 (2) b) 参照)。平成22年には、Ca⁺イオントラップ光標準及びSr光格子時計の光領域での直接比較により、2,000秒で 3×10^{-16} の周波数安定度を確認した。

左) Ca⁺単一イオントラップ装置

右) 光格子時計内で捕捉されたSr原子

図2.16.7 光周波数標準器

(3) 時空計測技術の研究開発

衛星双方向比較方式については、国内外での送受信局較正実験を実施し、局内遅延時間を1 ns程度で決定した。また、新技術である複信号方式を用いた双方向比較の研究を平成18年に本格的に開始し、台湾との長期連続試験において、短期(数千秒以下の平均)で約30 ps、それ以上の長期で約200 nsという従来技術の数倍良い比較精度を実証した。同方式は準天頂衛星による地上局間時刻比較でも採用され、静止衛星を利用した場合と同等な結果が得られた。

GPS時刻比較方式については、搬送波位相方式により韓国、台湾及びNICT間で精密時刻比較実験を実施し、平成20年には1日平均で 10^{-15} 台の精度を達成した。

ETS-VIII衛星による時刻比較実験については、平成18年の打上げ後に高精度時刻比較ミッションの正常動作を確認した。平成21年には地上の2点間で搬送波位相方式による比較実験を行い、従来方式より1桁程度の高精度化を実証した。平成22年には、1,000秒平均で 7×10^{-15} の周波数安定度を確認した。

総務省からの受託研究の準天頂衛星「みちびき」における時刻管理系の研究開発においては、平成21年に衛星搭載機器の開発を完了し、搭載系・地上系の総合システム検証を実施した。サロベツ、父島、カウアイ(米)にモニター・時刻管理部を整備した。平成22年9月の打上げ後、定常運用に移行して技術実証実験を開始し、衛星-地上間の時刻比較、軌道上での搭載原子時計の精密モニタ、L帯3波信号のタイミング計測の各実験で、目標の1 ns以下の精度を達成した。

1.5 μ m光通信帯における 10^{-14} 台の計測精度を目指して、平成18年に光源などの整備を開始した。1.5 μ m帯信号を用いたマイクロ波伝送では、平成20年に東京都内114 kmの光通信網において1日平均での精度 10^{-18} 台で周波数伝送を達成した。平成21年にはJGN2plusの小金井-大手町-白山間通信網を利用して総距離204 kmの伝送に成功した。

(4) 時空統合標準技術の研究開発

a) VLBI

リアルタイム地球姿勢決定の研究では、国際基線によるUT1推定に要する処理時間を5分以内に短縮(従来は3時間)した。この技術は平成20年に国土地理院のUT1

定常観測業務に導入され、2～3日かかっていた処理時間を1日以内に短縮した。平成22年には国土地理院、スウェーデン、ドイツを結ぶ基線において、UT1-UTCを2マイクロ秒、極運動を40マイクロ秒角の精度で推定できることを確認した。

数値気象予報データを用いて電波伝搬遅延誤差を大幅に軽減するモデル解析手法を開発し、また、世界測地系と整合する位置情報を算出するための解析プログラムを開発した。

平成18年には世界最小口径2.4 m アンテナと国土地理院つくば32 m アンテナ間での測地 VLBI 観測に成功した。平成19年には小型分割可搬型1.6 m アンテナを開発して、この超小型システムにより平成22年に鹿島-つくば間で測地実験を実施し、基線長推定結果の再現性による計測精度評価において、GPS の高精度単独測位による基線長推定結果の短期再現性2.7 mm を上回る2.4 mm の精度を確認した。

VLBI 技術を用いた周波数比較の予備的な評価に着手し、鹿島-小金井基線においては、平均化時間10万秒で 10^{-15} の安定度を達成した。また、VLBI と同時観測したETS-VIII、GPS、衛星双方向複製疑似雑音信号方式による周波数比較結果と比較して精度評価を行った。

b) 電波資源拡大

電波利用状況を把握し周波数資源を効率的に配分することを目的に、総務省受託研究「広域電波強度分布測定技術の研究開発」を平成19年から開始した（～平成23年）。さらに平成20年には「統計的手法による放射電力測定技術の研究開発課題」の受託研究も開始した（～平成23年）。

2.16.4 第3期中期計画：電磁波計測研究所

(1) 時空標準の高度利用技術の研究開発

a) 標準時業務

日本標準時の定常業務においては、NJST システムにより周波数国家標準及び日本標準時を高精度かつ安定に生成した。新技術として、平成23年に標準時分散構築システムの開発を開始した。未来 ICT 研究所の建物内にシステム整備を進めた。また、光標準とのリンクに必要な計測技術として、平成23年に高周波計測システムの開発に着手した。

周波数供給においては、長波標準電波、テレホン JJY、NTP サービスを安定に実施した。テレホン JJY では月14万アクセスを越え、公開 NTP サービスでは日に2.6億アクセスを突破した（平成26年7月現在）。標準電波においては、平成23年に福島第一原子力発電所事故の影響で、おおたかどや山標準電波送信所の要員退避・運用停止を余儀なくされたが、一時立入により4月より運用を再開し（図2.16.8）、9月には送信装置の遠隔操作化と NICT 本部での24時間監視体制を確立し、以後の運用を続けている。標準電波送信所の老朽化対策として、平成24年にははがね山、平成25年にはおおたかどや山の各標準電波送信所の設備更新に着手した。



図2.16.8 東日本大震災後のおおたかどや山標準電波送信所での復旧作業

電子時刻認証においては、平成23年5月に時刻配信・監査方法が日本工業規格 JIS X 5094 として標準化され、さらに平成26年には国際標準化機構 ISO/IEC 18014 part4の最終国際規格案となった。

周波数校正業務に関しては、標準電波を用いた遠隔校正装置において受信周波数の遠隔切替機能の追加などシステム改良を進めるとともに、沖縄・金沢・サロベツにてデータ取得を継続した。受信状況の変化に対応するべくシステムを改良し、受信同期精度を向上した。

b) THz 標準

平成23年に未開拓な THz 領域における周波数標準の確立のための研究に着手した。平成25年までにサブ THz キャリア光源及び THz コムを用いた計測システムを開発し、0.3 THz で 10^{-17} 台の周波数計測精度を達成し、この結果は Nature Photonics 誌のリサーチハイライトとして紹介された。さらに、世界初の THz 周波数分周

器を開発した。また、分子イオン THz 周波数標準に関する理論論文が Journal of Physics B 誌の平成24年ハイライト論文として選出された。

c) 国際活動

アジア太平洋計量計画／技術委員会 (APMP/TCTF) における国際活動においては、標準校正の国際相互承認に関するプロセスを標準化ドキュメントにまとめ、TCTF 技術委員会で平成24年に採択された。うるう秒対応議論が平成27年世界無線通信会議 (WRC-15) の議題になったことに伴い、アジア・オセアニア地域無線通信連合 WRC 準備委員会 (APG-15) に平成24年から参加した。

(2) 次世代光・時空標準技術の研究開発

a) マイクロ波標準

平成23年より原子泉型 Cs 一次周波数標準器 NICT-CsF1 のオーバーホールと各部改善を実施した。また光トラップ方式を組み込んだ2号機 (NICT-CsF2) の開発では、 10^{-15} 台の確度を確認するとともに高確度化に向けた新計測手法の開発を進めている。

b) 光標準

前期に開発した Ca^+ イオントラップ光標準器の周波数確度を 3×10^{-15} に向上させた。さらに、 Ca^+ 単イオン光時計と Sr 光格子時計を光領域で直接比較することで Ca^+/Sr の周波数比を高い信頼性で確定した。この結果は、平成24年に秒の定義等を議論する国際諮問委員会 CCTF で承認され、 Ca^+ 、Sr 双方ともに CCTF の推奨周波数値の更新に貢献した。平成23年に In^+ イオントラップ標準器の開発を新たに開始した。平成25年までに Ca^+/In^+ 共同冷却サブシステムや時計レーザーサブシステム等、時計遷移周波数精密計測システムを構成する主なサブシステムの稼働を開始し、これらを統合運用して時計遷移観測実験に着手した。

Sr 光格子時計においては、平成22年度末の国立大学法人東京大学との周波数比較実験の結果から2局間の標高差 (56 m) による相対論的周波数シフトをリアルタイムに検出した。このシフト補正後の周波数が不確かさ 7×10^{-16} で国立大学法人東京大学と一致したことで、光格子時計の16桁の普遍性を証明した。また、絶対周波数を 3×10^{-15} の確度で決定した。さらに、 Ca^+ イオントラップ用の超高安定クロックレーザーと光コム

でリンクすることで高安定化したクロックレーザーにより Sr 光格子時計の時計動作を実現した。この結果は平成23年に Nature Photonics 誌の技術ハイライトとして紹介された。その後細部の最適化を進め、ドイツの Sr 光格子時計との周波数比較実験で顕著な成果を上げ (次項参照)、絶対周波数確度についても 1.7×10^{-15} に改善した。また新技術開発としては、極低温環境を備えた Sr 光格子時計2号機の開発を平成23年に、単結晶材による光共振器を利用した超高安定光源の開発を平成25年に、それぞれ開始した。

(3) 次世代光・時空計測技術の研究開発

衛星双方向比較技術においては、複疑似雑音比較方式 (DPN 方式) において、平成23年に非静止衛星による準実時間連続計測を小金井-沖縄及び小金井-鹿島間で実施し、短期 (数秒)・長期 (数日) で100 ps を切る精度を達成した。さらに送信波間の干渉軽減を図り、平成24年の小金井-沖縄間実験において、短期安定度においても GPS 搬送波方式の2.5倍の精度が得られることを実証した。また、新技術開発として、平成23年に搬送波位相方式の研究にも着手した。平成24年に10,000秒で 4×10^{-16} のシステム周波数計測精度を確認し、平成25年には世界でも最長基線 (約9,000 km) となる NICT-PTB (ドイツ) 間にて国内短基線と変わらない測定精度 (0.2 ps@1 s) を実証した。これは搬送波位相を用いない従来方式の精度を2桁以上上回る結果である。また、同基線において衛星双方向比較により、両機関にある Sr 光格子時計同士の間での直接比較を実施し、不確かさ 1.6×10^{-15} で両時計の周波数が一致することを確認した。これは世界初の大陸間の光格子時計直接比較実験であった。

対外活動としては、ニュートリノ速度検証に関して高エネルギー加速器研究機構と共同研究契約を結び、平成25年には J-PARC と岐阜県神岡町との間で精密時刻比較実験を行った。また、ESA が推進する国際宇宙ステーション利用のミッション ACES に関して、日本代表機関として地上局の運用管理を行うことが決定となり、平成25年度に受入れ準備に着手した。

総務省からの受託研究である「準天頂衛星における時刻管理系の研究開発」は平成23年が受託最終年度となり、小金井-沖縄間の比較実験において当初の目標であった1 ns 以下の周波数比較精度を達成した。

光ファイバ伝送技術では、キャリア伝送システムによる周波数比較の実証を行うとともに、マイクロ波伝送システムの市販化に向けた装置を試作した。

(4) 時空統合標準技術の研究開発

VLBIの精度向上を目指した広帯域受信系の開発を開始し、平成25年までに、2-15 GHzにおける電波干渉などを考慮した観測周波数4バンドの最適配列を確定した。この帯域に適合する大型カセグレンアンテナ対応広帯域フィード(6.5-15 GHz)を独自設計で開発し、鹿島34 mアンテナへ搭載した(図2.16.9上)。合わせて超小型アンテナ(図2.16.10)の広帯域化を行うとともに、実証実験のため鹿島・小金井・つくば(独立行政法人産業技術総合研究所と協力)の3局へのシステム配備を整えた。データ取得系においては、新規開発した高速A/D変換器の性能評価を行うとともに、RFダイレクトサンプラ(図2.16.9下)のスケジュール観測に対応したデータ記録ソフトの整備も行った。さらに、鹿島-小金井間の高速回線を整備し、分散処理システムの基盤整備を進めた。



図2.16.10 VLBI用34mアンテナ(左)と超小型アンテナ(右)

統合解析ソフトウェアに関しては、平成25年までにVLBI+GNSSデータ、及び地上測量データを統合解析する機能実装を実現した。このソフトウェアを使ってVLBIとGPSの統合解析を実施し、統合解析の有効性を確認した。さらに、実データを用いてVLBI及びGNSS周波数比較の解析を試行した。この統合解析ソフトウェアの応用として、平成23年にはGPSを用いたリモートセンシング観測を実施し、NICT本部の60 m鉄塔上で連続観測により、降雨による反射率の変化を検出した。



図2.16.9 34mアンテナ用広帯域フィード(上)とダイレクトサンプラ(下)

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

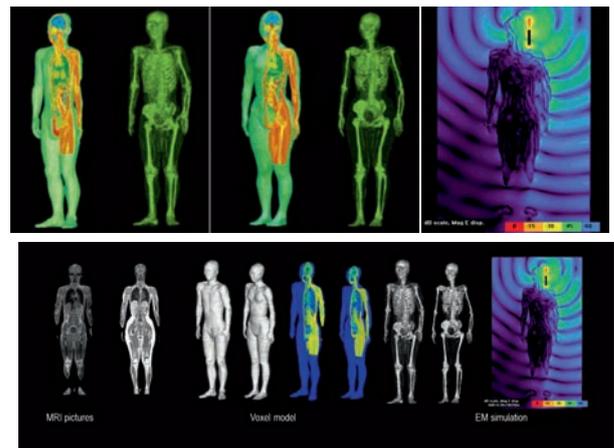


図2.17.3 日本人成人男女の数値人体モデルの開発

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。

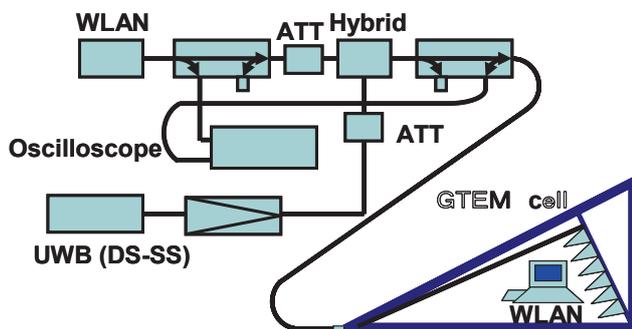


図2.17.8 GTEMセルを用いたUWB干渉評価系

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

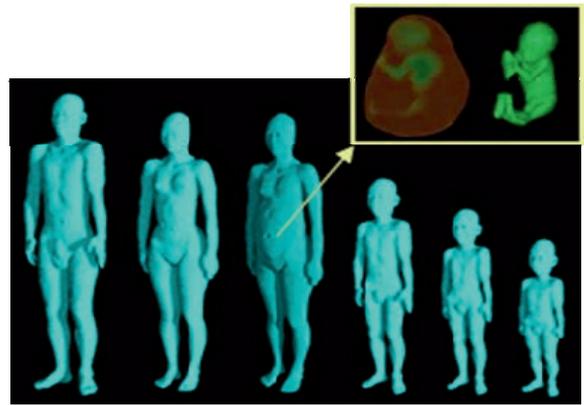


図2.17.9 妊娠女性や小児を含む、高分解能数値人体モデルの開発

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。

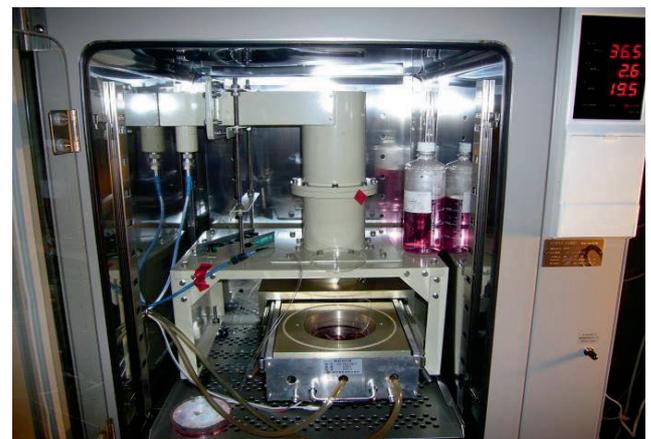


図2.17.10 温度制御機能付細胞ばく露装置

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)。

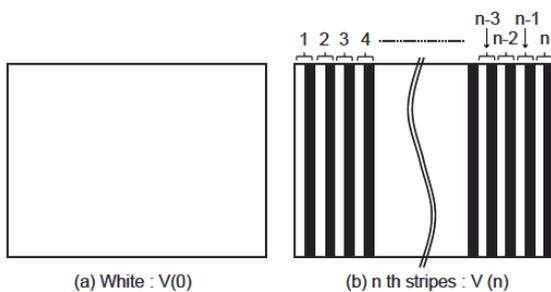


図2.17.11 PC画面からの電磁的情報漏えい評価用のテストパターン

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。

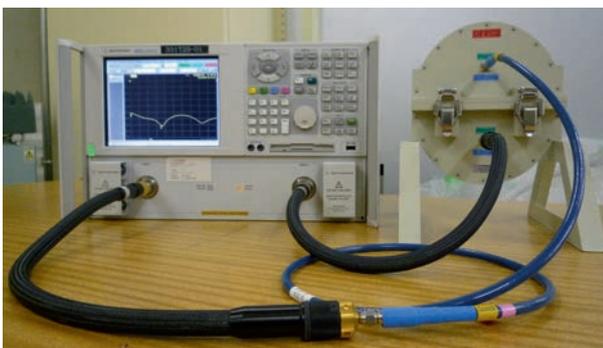


図2.17.12 2焦点扁平空洞型シールド効果測定装置

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)。

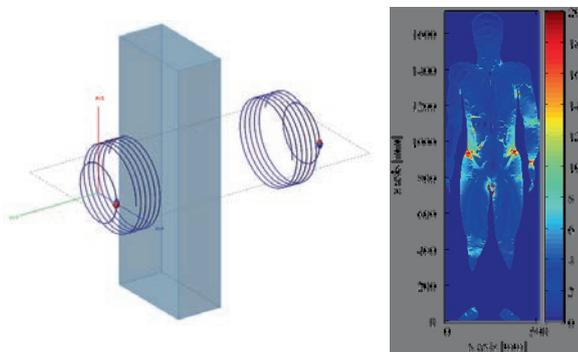


図2.17.18 共鳴方式 WPT システムのコイル間(左図灰色部)における人体内の誘導電界分布の計算(右)

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。

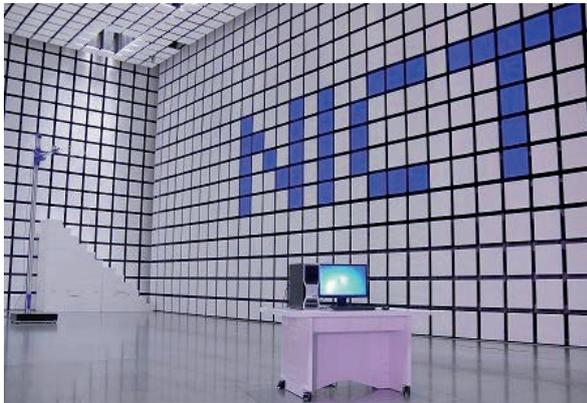


図2.17.20 5面/6面共用大型電波暗室

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。

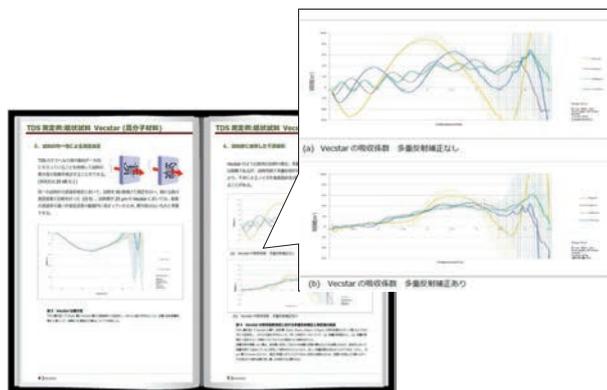


図2.17.23 テラヘルツ帯分光測定装置のユーザーガイド

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。