

第 2 章

研究活動

ネットワーク基盤技術

2 研究活動 ネットワーク基盤技術

2.1 光ネットワーク技術

世界のインターネット情報流通総量(トラフィック総量)は経済状況の良否によらず増大しており、日本国内の場合、平成25年11月時点で、平均2.6 Tbps、直近の1年間は年率35.6%で伸び続けている(図2.1.1)。光ファイバ通信は商用導入されて30年ほど経つが、この間にトラフィック需要は1万倍以上に増大している。更に伸び続けるモンスターのようなトラフィックに対してどう対処するのか、またネットワークの仕組みは今のままで果たしてよいのか、は大きな課題である。

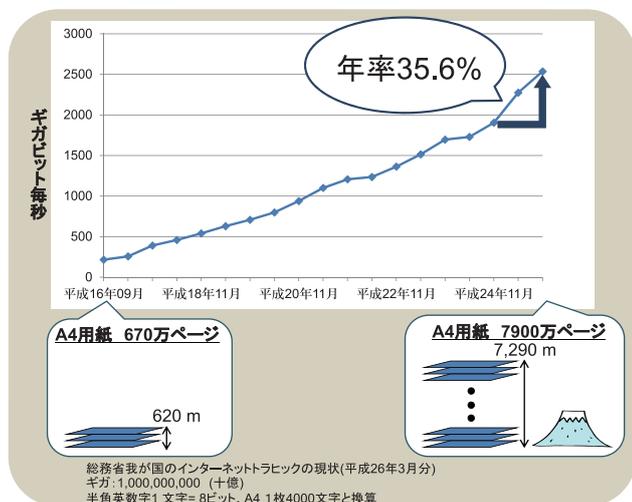


図2.1.1 日本のトラフィック推移

本稿では社会経済を持続的に支える超高速・大容量で効率的なネットワークインフラの研究開発に取り組んできた道程を ICT ハードウェア技術、光交換・光伝送システム技術、さらにネットワークアーキテクチャ技術の観点から振り返り概観する(図2.1.2)。

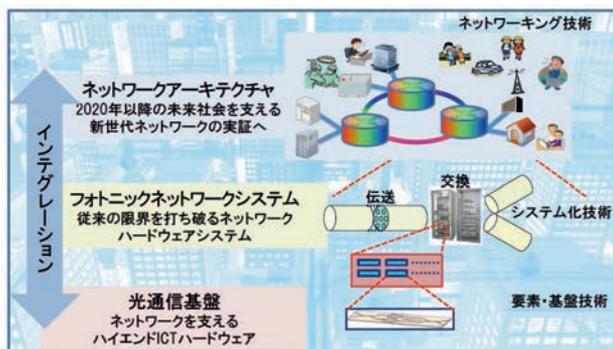


図2.1.2 光ネットワークを支える技術

2.1.1 ICT ハードウェア技術

(1) 光変復調技術

光ファイバを使えば、遠くまで光にのせた情報を伝えることができる。人間同士が会話する時に音の高さ、強さ、長さを変化させて情報を伝えるように、光通信では、光の振幅(強度)と、周波数(色)、位相(タイミング)のいずれかを変化させて情報を送っている。このように情報伝送のために光を変化させることを光変調と呼ぶ。最も簡単な光変調は、光の「ある」、「ない」の2通りでデジタル信号を送るオンオフキーイング(OOK)である。より多くの情報を送るために、様々な変調方式が研究されている。

NICTでは、光パケットシステムへの適用を目指し、平成15年度に光周波数のみを変化させて情報伝送を行う周波数シフトキーイング(FSK)変調器を開発した。10 GbpsFSK信号の95 km伝送に成功し、平成16年度には周波数効率を2倍以上に改良し、技術移転の結果、製品化に成功した(図2.1.3)。さらに、平成17年度にはFSK方式で変調された光信号を、位相を切り替えることで情報を伝送する位相シフトキーイング(PSK)方式で変調された光信号への直接変換に成功した。また、光通信システム、計測システムでの利用が期待できる技術として、光の強度の比率(消光比)が100万を超える世界最高の光強度制御性能をもつ高速光変調器を実現した。

平成18年度には、FSK変調器の技術を更に高度化し、1度に2ビットの情報を送る差動4相位相変調方式(DQPSK)で100 Gbpsを超える信号を発生し2,000 km伝送に成功、当時の世界記録25.6 Tbps、周波数利用効率3.2 bps/Hzも達成した。さらに平成19年度には、1度に4ビットの情報を送る16直交振幅変調(QAM)を可能とする集積光変調器(図2.1.4)を実現し、世界最高速度50 Gbps(12.5 Gbaud)を達成した。平成24年度には、光・電気ハイブリッド信号合成による60 Gbpsの64 QAM生成にも成功した。従来から様々な変調方式が利用されている無線分野と異なり、光の周波数は携帯電話の周波数と比べ10万倍高く、複雑な変調方式は困難であったが、この課題は克服されつつある。



図2.1.3 FSK 変調器

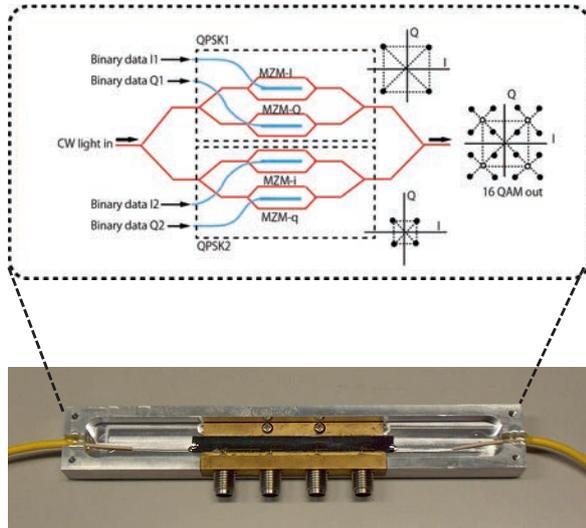


図2.1.4 16QAM 変調器

消光比1,000万以上に改良した変調器のすぐれた技術を利用し、平成22年度には、大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台と共同で信号の乱れが30万年に1秒以下の世界最高性能の基準信号発生装置を開発、100 GHz を超える高速信号の長距離伝送を実現した。この基準信号発生装置は、日米欧の国際協力で建設されたALMA 電波望遠鏡の基準信号源として利用されている。ALMA 電波望遠鏡は、最大18.5 km 離れた66台のアンテナを連動させ天体観測する。それぞれのアンテナの信号のタイミングを正確に合わせるために基準信号が必要となる。基準光信号は光の強度を所定の周波数のミリ波信号で変化させたもので、光ファイバにより効率よく各アンテナまで送られる。各アンテナで基準光信号からミリ波信号を取り出し、天体からの微弱信号の受信に利用す



図2.1.5 光検出器の特性測定器

る。その他、直径7mのアンテナの形状を4.4 μm の精度で測定するアンテナ形状計測などにも利用されている。この基準信号発生技術に関しては、光信号を電気信号に変換する光検出器の特性測定(図2.1.5)や、新たに利用が広がりつつあるミリ波帯を利用するための電波測定などへの応用技術として開発を進めている。

(2) 量子ドットによる広帯域光源

光通信では、低コストかつ製造エネルギーが少ない小型で高性能な光通信用レーザを量産する技術が必要である。NiCTでは、ナノテクノロジーのひとつである量子ドット作製技術を用いて光通信用レーザの製造技術について研究を行っている。また、光ファイバは伝送ロスの最も低いCバンドを中心とした帯域が利用されており、大容量化と光周波数利用の効率化のための様々な技術革新が進められているが、根本的に、このCバンドではおよそ5 THz程度の帯域しか確保できず、将来の更なる光情報通信利用の拡大に伴う光周波数帯域の枯渇が懸念されている。そこで、NiCTでは、Thousandバンド(Tバンド)と名付けた波長1.0 μm 帯と、十分活用されていないOバンドの新たな光周波数帯域の利活用に注目し、T、Oバンドに潜在する75 THzを超える非常に広い光周波数資源を新たに開拓することで、将来の光ネットワークのチャンネル数の大幅な増大に寄与できると考えている(図2.1.6)。

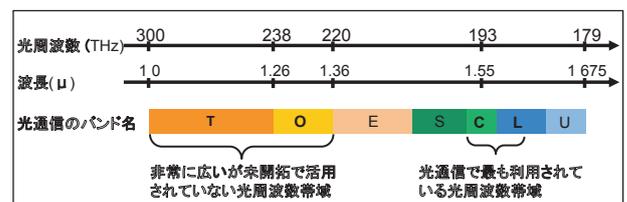


図2.1.6 光通信で割り振られたバンド名と光周波数(波長)

広帯域化にとって、最も有効な革新技術は「ナノテクノロジー」で、NiCTはその中の量子ドット技術について最先端の研究を行っている。III-V族化合物半導体結晶の自己組織的手法を巧みに利用することで、図2.1.7(a)に断面構造を示すような高さ数ナノメートルの島状構造が量子ドットとして形成される。この量子ドットは、その内部に電子や正孔を3次元的に強く閉じ込められることから高効率発光が期待され、さらに原子レベルでのサ

イズ制御により発光波長域の広帯域化が可能な新材料となる。NICT では、この高品質化新技術として「サブナノ層間分離技術 (図2.1.7 (b))」を提案している。

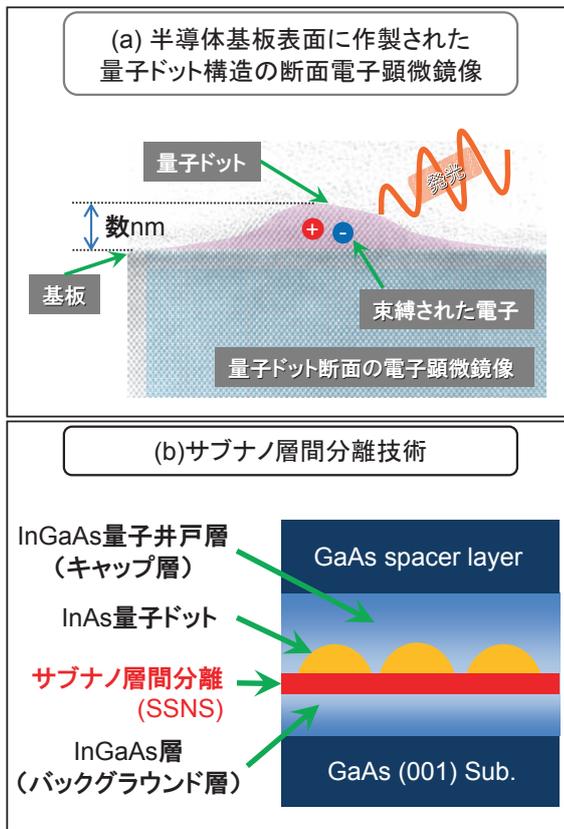


図2.1.7 高密度・高品質半導体量子ドット技術

アンチモン系半導体量子ドットによる1.3 μm 帯で動作するレーザダイオードを平成15年度に作製し、その室温発振に世界で初めて成功し、高性能な光通信用半導体レーザを安価に作成できる可能性を示した。翌年にはその成果を半導体表面から垂直に光を発する面発光レーザに適用した。

平成21年度には、1本の光ファイバでT、C及びLバンドを含む広帯域光信号が伝送できるように最適化された光源を開発し、低損失広帯域微細構造光ファイバを用いた超広帯域伝送システムの伝送実験に成功した。平成22年には、NICT 独自のサブナノ層間分離技術により世界最高300層の半導体量子ドットの積層 (図2.1.8) に成功、この技術を用い半導体量子ドットレーザを試作し、1.55 μm 帯でのレーザ発振に成功した。本技術により温度調整不要な光通信量子ドットレーザが実現され、ネットワークの低消費電力化に貢献できる。さらに、平成23年度には、1.0~1.3 μm 帯で動作し、現在の光通信

波長帯の約10倍の光周波数資源 (約70 THz) を利用できる量子ドット光源の開発に成功した。また、超広帯域光伝搬特性のフォトニック結晶ファイバを組み合わせた高速データ伝送サブシステムを構築し、エラーフリー光伝送にも成功した。

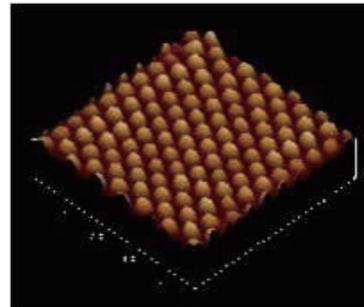


図2.1.8 世界最高密度量子ドット (300層の最上層)

(3) 光ファイバ無線技術

スマートフォンの爆発的普及で、いつでもインターネットに繋がることができるようになったが、トンネルや地下街、山間部、高層ビル上層階など、電波が「入りづらい」場所 (電波不感地帯) も未だに多くある。電波不感地帯へ電波を送り届ける際、電気・光変換器で電波の情報を光信号に変換し、極めて減衰の小さい光ファイバを用いてその光信号を送り、送り届けた先の光・電気変換器で元の電波に戻す「光ファイバ無線技術」が開発されてきた。

大容量のデータをやりとりする高速データ通信には光ファイバ通信が適しているが、持ち運びなどを考えると無線通信が便利である。しかし、無線通信は利用可能な帯域が限られ、伝送速度の飛躍的な高速化は望めず、新たな周波数帯域での高速無線伝送技術が必要とされている。そこで NICT では、高速伝送に適しているものの、発生させることが難しいミリ波帯の電波にデータをのせる研究も行っている。

光ファイバ無線技術による、光でミリ波信号を作り出す技術と多値変調技術16 QAM を組み合わせることで、電氣的な技術では難しいミリ波で高速無線信号の生成に成功 (図2.1.9) し、平成23年度にはミリ波帯の電波で当時の世界記録40 Gbps の無線伝送に成功した。平成25年度には更に高速化し80 Gbps 無線伝送に成功し、記録を更新した。

光ファイバ無線技術は一部既に実用化されているが、更なる普及のために、国際電気通信連合 (ITU-T) や国際

電気標準会議 (IEC)、IEEE において標準化が進んでおり、NICT でも光ファイバ無線システムの適用や信号品質の評価手法について提案を行っている。また、光ファイバ無線技術を発展させ、地震などで光ファイバが切断された時に、切断部分を高速な無線機に接続することで光ファイバの代替として使うなど、光通信のバックアップとして使う研究 (図2.1.10) も行っている。

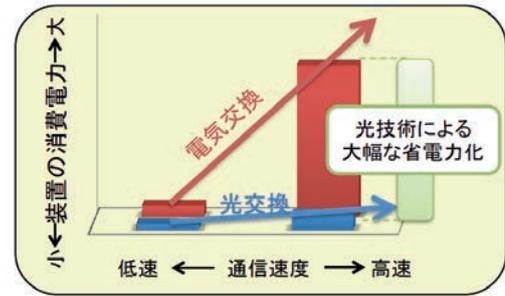


図2.1.11 光技術で省電力化

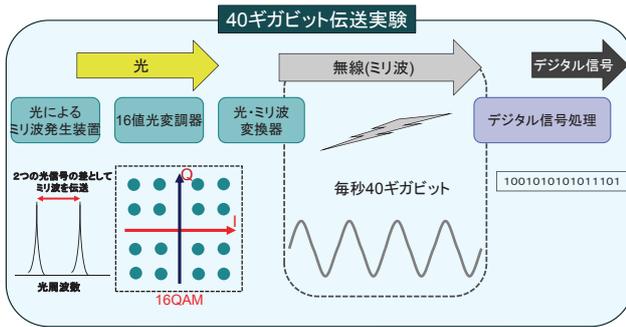


図2.1.9 高速無線信号生成

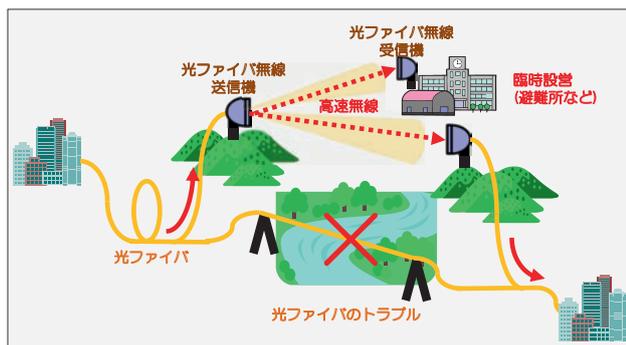


図2.1.10 光ファイバと親和性の高い臨時設営高速無線

2.1.2 光交換・光伝送システム技術

(1) 光パケットスイッチ

近年、通信トラヒックは増大し続け、それに伴い通信機器の消費電力も増加の一途をたどっており、ネットワークの大容量化と低消費電力化が重要な課題となっている。しかし、現在のネットワークの中継装置であるルータでは、光ファイバで伝送された光信号を一旦電気信号に変換し、転送処理を行い、再度光信号に変換して光ファイバで伝送されている。そのため、処理量の増大に伴って大規模化する中継装置の消費電力の増大が懸念されている。NICT では、大容量・省電力な光信号のまま交換処理を行う光パケットスイッチの研究開発を進めている (図2.1.11)。

平成14年度に光バッファを備え、パケットの宛先を光処理で求める世界初の光パケットスイッチプロトタイプの開発に成功した。主要諸元は光パケットスイッチ規模2入力2出力、回線速度10 Gbps、バッファ数2などであった。さらに、世界最高の1ポートあたり40 Gbpsの入出力速度の光パケット転送実験に成功し、平成15年3月の光通信に関する世界最大の国際会議 OFC2003にて動態展示を行った。平成16年度には、100ピコ秒以下の高速応答可能な光パケット受信器と、40 Gbpsの速度でパケットネットワークの特性を評価できるパケットビット誤り率測定器を開発し、ECOC2004にて光パケット送受信と特性評価の動態展示を行った。ECOCは、OFCと双璧をなす光通信分野で最も重要な国際会議の1つである。

平成17年度には、光のまま160 Gbpsの速度で高速転送を実現した (図2.1.12)。このプロトタイプは、光処理によりパケットの宛先を1.24ナノ秒 (毎秒8億パケッ

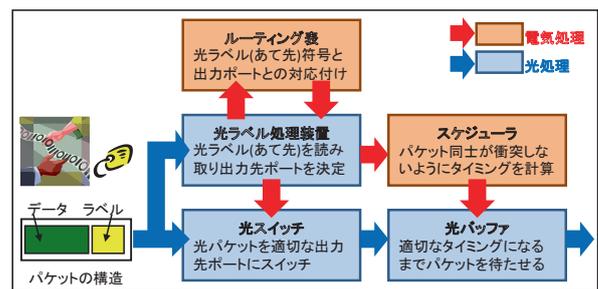


図2.1.12 進化し続ける光パケットスイッチプロトタイプ

ト処理相当)で検索する機能を持ち、異なるポートから同時に入力される 160 Gbps の光パケットの衝突回避を可能にする光バッファを備えている。平成 18 年度には、電気の 10 Gbps イーサネットフレームと 80 Gbps 信号の光パケットの相互変換に成功し、光パケット交換ネットワークを高速インターネットと直接接続できるようにした。併せて、光パケットスイッチを介し 100 km 伝送実験を行い、パケット損失率 10^{-6} 以下を達成し、実データである 3D ハイビジョンビデオストリームの伝送実験にも成功した。さらに光パケットスイッチプロトタイプを年々改良し、平成 22 年度には、世界最高速度 2.56 Tbps の高速転送に成功した。毎秒 1 ビットあたりのスイッチングに要する消費電力は電気処理のルータに比べ大幅に少ない数百ピコ W/bps である。

(2) 光パケット・光パス統合ネットワーク

現在のインターネットで使用されているパケット交換方式は、通信回線を多数のユーザが共有するため、ベストエフォートで回線利用効率を高めている。一方で従来型の電話網などで利用されているパス(回線)交換方式は、ユーザが通信回線を占有するため、通信サービスの品質を確保できる。NICT は、これら両方式を採用し、多様な通信サービスの提供を可能とする「光パケット・光パス統合ネットワーク」の研究開発を行っている。光パケット・光パス統合ネットワークは、光パケット交換用と光回線交換用それぞれに別の波長帯域を割当て、波長多重技術により両方式を共存させている。これらの交換方式に割り当てる波長帯域の幅をトラヒックの状況やユーザの要求に応じて変えることで、波長資源を効率的に利用する(図 2.1.13)。



図 2.1.13 波長資源の柔軟な境界線制御

平成 22 年度には、NICT の光パケット交換と光回線交換方式を統一的に制御する部分を実装し、世界で初めて本格的な光パケット・光パス統合ネットワークを構成するノードプロトタイプを開発した。翌平成 23 年には、

安定性と操作性に優れた「光パケット・光パス統合ノード装置」の開発に成功した(図 2.1.14)。本装置は、デバイスの安定化と集積化により、従来比半分以下の筐体サイズを実現した。必須な要素技術として偏波無依存の光スイッチ、利得変動抑圧光増幅器を開発して実装することにより、従来のプロトタイプでは安定動作しなかった、偏波や強度が変動するような実際の環境においても、信号の 0、1 を正しく判別し、常時パケット誤り率 10^{-4} 以下という ITU-T 勧告の厳しい基準を十分に満たした通信品質の維持を実現した。また、本装置の光パス部には、ITU-T で規定される通信規格 OTN の光送受信トランスポンダがあるが、この規格は、NICT を含む日本の産学官が連携し、標準化に寄与した成果(平成 18 年度、ITU-T G.Sup43)である。



図 2.1.14 光パケット・光パス統合ノード装置

平成 23 年度に幕張メッセで開催された Interop Tokyo 2011 にて、本装置 2 台を光ファイバ 50 km で環状に接続したリングネットワークを構築し、遠隔地から NICT のテストベッドネットワーク JGN-X のイーサネット回線を経由して送られてきた 4 K (4,096 × 2,160 画素) やハイビジョン (1,920 × 1,080 画素) などの高精細映像転送、双方向 TV 会議システム、高速データ転送などの動態展示にも成功した。平成 25 年度には、インターネットに繋がる NICT の実験ネットワークに本装置を組込んで、研究室の職員が Web によるデータアクセスや電子メールの送受信で利用し、実用性を確認している。

光パケット交換システムはインターネットの経路制御とは別に、固有の ID を光パケットに付与し、その ID を決め、ID の経路表を作成しているため、ネットワーク管理が複雑になる問題があった。そこで、NICT は委託研究先と共同で、平成 24 年度に 125 Gbps の高速回線上で絶

え間なく伝送されるパケットをすべて検索できる速さを備え、かつ、ルータで用いられる既存のLSI (TCAM) 技術と比べて1/20の消費電力となる高速・省電力検索LSIを開発した。平成25年度には、そのLSIを用いた宛先検索結果をもとに光スイッチを制御する電子回路を開発し、インターネットのIPアドレスをもとに宛先検索する仕組みを実装した光パケットヘッダ処理装置(図2.1.15)を試作し、光パケット交換実験に成功した。

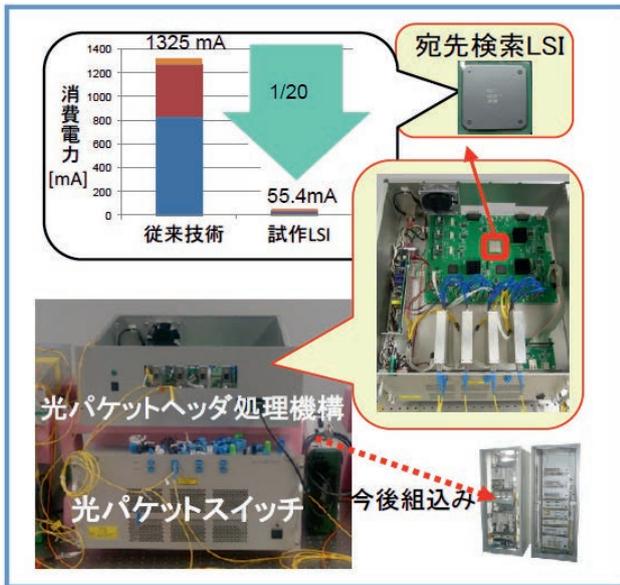


図2.1.15 光パケットヘッダ処理装置

(3) 光伝送技術

光通信の黎明期には、時分割多重方式(OTDM)によって、通信速度の向上の可能性が検討された。その後、複数の波長の光信号を1本の光ファイバで同時に送受信する波長分割多重方式(WDM)の出現と、複数の波長チャンネルを同時に増幅する光増幅器の実用化によって、1本の光ファイバあたりの伝送容量は一気に増大した(図2.1.16)。

その増大にもかかわらず、瞬く間に光ファイバの既知の利用可能帯域は使い尽くされ、新たな波長資源の探索や周波数利用効率の向上が研究開発上の喫緊の課題と思われた。ところが、波長チャンネルの増設や周波数利用効率の向上のために光信号のパワーを増加させると、波形歪み(非線形光学効果)やファイバ焼損(ファイバフェーズ現象)を引き起こしてしまうことが明らかになった。光ファイバ1本当たりの伝送容量の大幅な拡大を期待することができず、物理的な限界に突き当たった。

この新たな律速要因に従い、2008年にNICT主導で

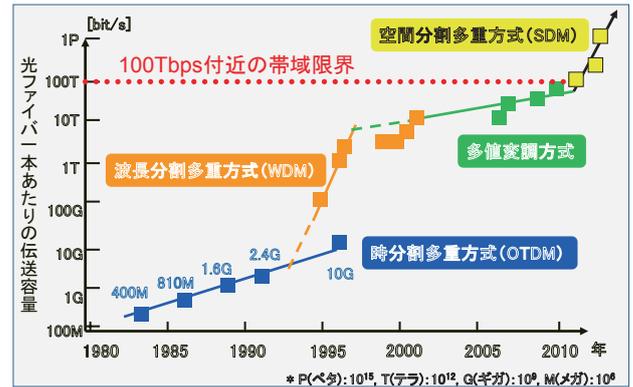


図2.1.16 光ファイバの伝送容量の推移

産学官連携のEXAT研究会(光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究会)が発足し、既存の技術の範囲内で光ファイバネットワークを増設して対応するか、あるいは光通信システムをインフラから抜本的に見直すかの議論が始まった。現在使われている標準型光ファイバ(SSMF)は実用化から30年が経過し、実用システムとしては不動の位置を占めている。EXAT研究会ではそこに敢えて挑戦し、新たな多重化の軸として空間の利用、即ち空間分割多重方式(SDM)について本格的に取り組むことが重要であるとの結論が得られた。NICTでは、初歩的な試作や概念設計のみで半ば忘れられていた1本の光ファイバに複数の通路(コア)をもつマルチコアファイバに注目し、研究を進めた。

平成22年度には、光ファイバ1本に7つの通路(コア)をもつ「7コアファイバ」と、「既存の光ファイバと7コアファイバを接続する7コア同時空間結合装置」を開発し、109 Tbps、16.8 kmの伝送実験に成功した。1本の光ファイバの物理的限界と予測されていた100 Tbpsをマルチコア化で突破した世界記録で、マルチコアファイバの有効性を明確に示した。翌平成23年度には、「19コアファイバ(図2.1.17)」と「7から19のコア可変の空間結合装置」を開発し、世界記録を更新し305 Tbpsの伝送実験に成功した。数十 μm 間隔の19本ものコアで伝送品質を保ち、それぞれのコアが独立に既存の光ファイバと結合することは、これまでに実現できないと考えられていたので、論文を発表したOFC2012で大きなインパクトを与えた。

さらに、平成25年度には、世界で初めて19コア一括光増幅器の開発に成功し、増幅後の信号光が反射して再び増幅器に入射することを防ぐ一括アイソレータも実現した。これまでマルチコアファイバの長距離伝送に必要

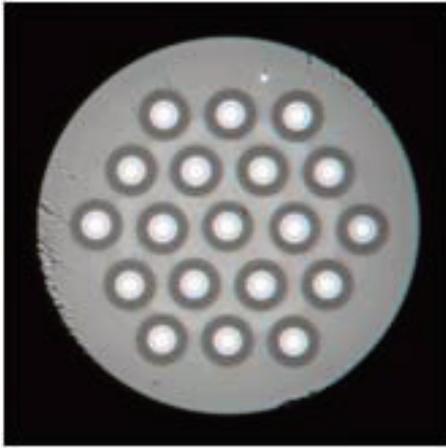


図2.1.17 19コア光ファイバ断面

な光増幅器は、コア数分だけ必要とする方式が研究されていたが、1台で済む19コア一括増幅器による1,000 km超の光伝送実験に世界で初めて成功した。

2.1.3 ネットワークアーキテクチャ技術

NICTでは、光ネットワークとそれにアクセスする端末を繋ぐネットワークとの融合を図り、通信データの集中による過負荷や機器故障等によるネットワークの通信障害等に備え、複数の通信経路を設けるマルチホームネットワーク構成と管理の簡素化自動化、異種通信のサポートにより、信頼性を向上するネットワークアーキテクチャ技術の研究開発を進めている。

(1) ID・ロケータ分離機構

現在のインターネットでは、IPアドレスを端末などの識別子(ID)とネットワーク内での端末の位置情報(ロケータ)として利用している。1つのIPアドレスをIDとロケータの両方に使用することは、異種プロトコル間通信、移動通信、マルチホーム接続、セキュリティ、経路制御の拡張などで不都合が生じる。例えば、端末がネットワークを移動した場合、端末のIDとロケータを兼ねるIPアドレスが変更され、移動前のIPアドレスを識別子としていた進行中の通信が切れてしまう。NICTでは、平成18年度にこれらの問題を解決するために、IDとロケータを分離するアーキテクチャHIMALISの研究を開始した(図2.1.18)。

HIMALISは、端末の識別子としてID、位置情報はロケータを使用する。端末とホスト(サーバ)間ではIDを利用し

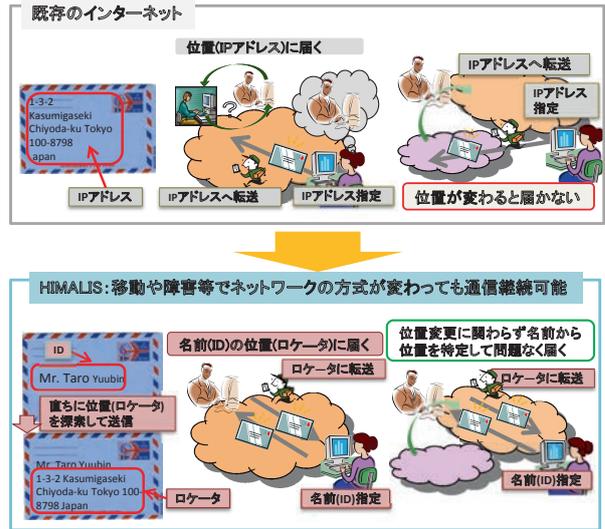


図2.1.18 ID・ロケータ分離機構イメージ

た通信を、中継のネットワーク機器においては、ロケータを使用して通信を行うことで、異種プロトコル間通信や途切れない移動通信などを実現する。IDとロケータのマッピングを行うために、DNR、HNR、HGWを配備する。HGWは、IDとロケータのマッピング以外にプロトコル変換やネットワーク移動、端末認証にも利用される。図2.1.19にHIMALISアーキテクチャの主要な構成を示す。

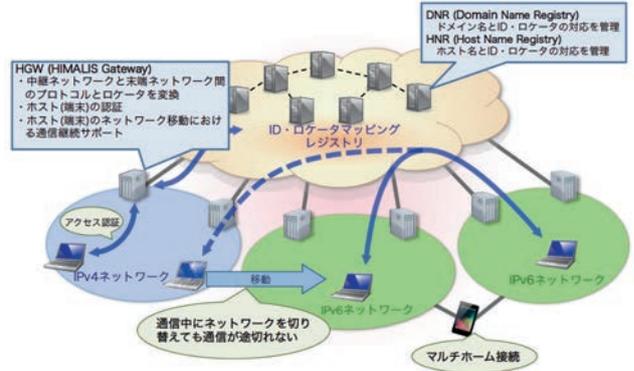


図2.1.19 HIMALISアーキテクチャ構成要素

平成19年度に基本機能評価システムの構築に着手し、その後研究開発を進め、平成24年度までにNICTのテストベッドJGN-X上でネットワークアクセス機能、端末間通信、マルチホーム接続時に複数の経路から適切な経路を選択できる機能等を実装した。平成25年度には、安全で切れにくい移動型無線ネットワークを構築し、IPv4のWiFiアクセスポイントから別のIPv4やIPv6のWiFiアクセスポイントへ端末が移動する際に、パケッ

ト損失がゼロで通信できることを確認した。

並行してITU-TのSG-13において標準化活動を実施した。NGNに関する勧告では、平成20年度に要求条件と基本概念のY.2015、平成23年度に機能定義のY.2022、IPv6の機能定義Y.2057の勧告化に貢献した。新世代ネットワークに関する勧告では、基本概念のY.3031とIDとロケータのマッピング機能であるY.3032の勧告化を達成した(表2.1.1)。

表2.1.1 ID・ロケータ分離機構に関する標準化

勧告番号	対象	勧告年月	概要
Y.2015	NGN	平成21年 2月	要求条件と基本概念
Y.2022	NGN	平成23年 8月	機能定義
Y.2057	NGN	平成23年11月	IPv6の機能定義
Y.3031	NWGN	平成24年 5月	基本概念
Y.3032	NWGN	平成26年 1月	IDとロケータマッピング機能

* NGN:次世代ネットワーク、NWGN:新世代ネットワーク

(2) 階層的・自動的にロケータを割り当てる機構

現在のインターネットにおいて、企業などの組織がネットワーク障害や災害などに備えて迂回経路を用意するには、それぞれ固有のアドレスの集合(アドレス空間)を確保し、複数のインターネットサービスプロバイダ(ISP)と接続し、経路情報を外部のISPへ通知する必要がある。そのように通知された経路情報は現在50万にも及び、経路情報の発見に時間がかかり、迅速に迂回経路へ切り替えることができなくなっている(図2.1.20)。この問題を解決するために、以前から階層的にアドレスを割り当てる手法の研究が行われているが、運用管理などの問題で実現されていない。

そこで、NICTでは平成21年度から、これまでアド

レスと呼ばれていたインターネットにおける位置情報を、ロケータとして再定義し、ネットワークの接続状況に合わせた階層的なロケータを自動で割り当てる機構HANAの研究を開始した。

HANAでは、ISPなどの上流のネットワークからロケータの上位部分を切り出し、ロケータの下位部分は企業などの組織内で独自に階層構造を割り当てる。HANAを利用すると、パソコンなどの端末だけでなく、ネットワーク管理者が手動で設定しているルータやサーバにも階層構造のロケータを自動で割り当てるので、ネットワーク運用管理の手間を省くことが可能である。

組織が接続するISPから切り出した階層的なロケータを使用すると、組織内の固有の経路情報が外部に通知されなくなり、インターネットの経路情報が削減される。さらに、組織が複数のISPと接続すると、指定する宛先ロケータによって異なる経路が利用できる。障害時には、利用する宛先ロケータを切り替えるだけで、迅速に迂回経路へ切り替えることができる(図2.1.21)。

平成24年度には、JGN-X上でHANAを使って広域ネットワークの自動構築に成功した。自動構築された広域ネットワークは、実験用の模擬データセンタ、IPv4、IPv6ユーザ端末が利用できるネットワークから構成され、階層的なロケータをHANAで自動的に割り当てた。その後、NICTの大規模インターネットシミュレータStarBED³を利用し、インターネット規模における自動割り当ての検証も行った。

さらに平成25年度には、企業内のネットワークやデータセンタなどで利用されているIPのデータ転送処理を高速で行うハードウェア(レイヤ3スイッチ)にHANAを実装した(図2.1.22)。このレイヤ3スイッチを利用す

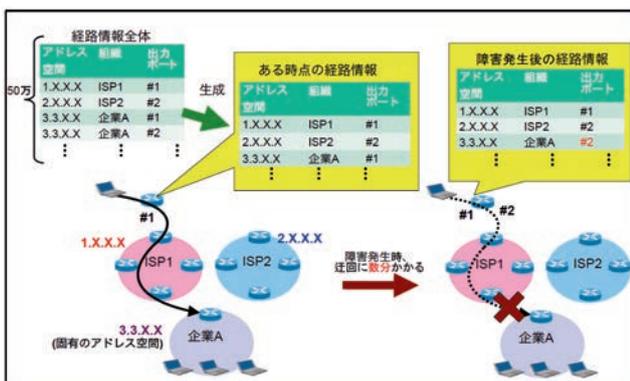


図2.1.20 インターネット経路切替

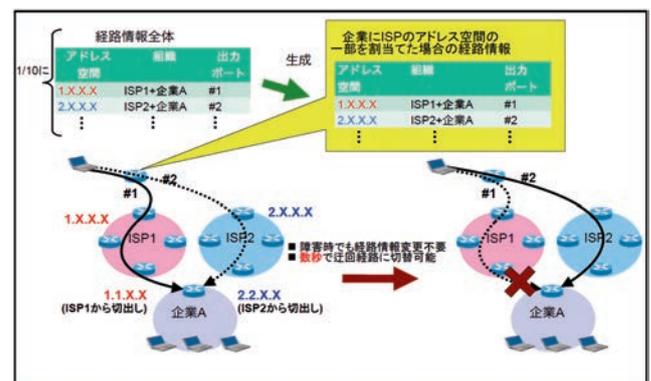


図2.1.21 複数ロケータ割り当て時の経路切替

ると、ネットワークのコアとなる1台のレイヤ3スイッチにロケータを設定するだけで、それ以外のすべてのレイヤ3スイッチやパソコンなどに自動でロケータが付与される。



図2.1.22 HANA レイヤ3スイッチ

2.2 ワイヤレスネットワーク技術

2.2.1 第1期中期計画 ワイヤレスアクセス

高速移動時のセルラー環境でも 100 Mbps を超える情報伝送レートでの通信が可能な大容量・広帯域・広域移動通信システム、さらにこの新システムと既存システムの間を複数の端末を持たずにシームレスに接続するソフトウェア無線通信システムを実現するための無線通信技術、デジタル信号処理技術、ネットワーク構成技術に関して研究開発を行った。これら研究開発した通信システムを利用してマクロセル、マイクロセル間及び異種並びに同種システム間の通信をシームレスに切り替えて伝送できる新世代移動通信システムを構築し、テストベッドで実証した。

(1) マルチメディア無線通信技術の研究開発

ネットワーク層 (OSI 参照モデル第3層) 以下で異種無線通信システム間の高速ハンドオーバを可能とする Beyond3G アーキテクチャの1つであるモバイルイーサネット上で、IEEE802.11 システムと第3世代携帯電話システム (W-CDMA) との間のハンドオーバ、さらに IEEE802.11 システムと IEEE802.16 システムのハンドオーバを実現した。アプリケーションは、通常の Web アクセスのみならず、実用リアルタイムアプリケーションを対象とし、上記異システム間をリアルタイムにハンドオーバするモバイル端末上で、VoIPv6 電話・IPv6 ビデオストリーミング・IC カードから携帯端末へ権限委譲する方式のモバイル電子商取引を動作させた。これらのハンドオーバについては屋内・屋外における実証実験システムを構築し、実環境に準じた機能・性能評価を行った。また、無線セキュリティとして、無線の特長であるマルチキャストを利用した暗号化キー配布方式、位置情報を用いて無線の種類に依存しない同キー生成方式を提案するとともに、その実証試験システムを構築した。また、実証試験以外に提案システムのスケーラビリティを評価するため大規模計算機シミュレーションを用いた評価も行った。モバイルイーサネット/モバイル IP ネットワークを対象とした大規模ネットワークシミュレータ MIRAI-SF を構築し、この無線プラグインと

して IEEE802.11 a/b/g/e、802.16、802.21 (ドラフト仕様) を実装した。また、最大モバイル端末数3万を可能とするシミュレーション環境を構築し、大規模な無線ネットワークを想定した高速ハンドオーバー方式や無線セキュリティの評価を行った。これらの開発技術は平成17年に総合デモンストレーションとして一般公開された。

(2) 新世代移動通信システム (第4世代移動通信システム) の研究開発

平成16年度に新世代移動通信システムとして直交周波数分割多重 (OFDM) と時分割多元接続 (TDMA) を利用した DPC-OF/TDMA 方式を提案し、平成17年度にはその実証試験のため、マイクロ波帯で 100 MHz 帯域幅を用いた物理層装置及び IP 接続が容易でユーザーが自由に好きなチャンネルにアクセスできるプロトコルを備えた MAC 層装置から成る総合移動通信プロトタイプを開発した。そして時速 100 km 下においても伝送レート 70 Mbps 以上の伝送速度が実現できるブロードバンドパケット伝送システムを実現した (図2.2.1)。

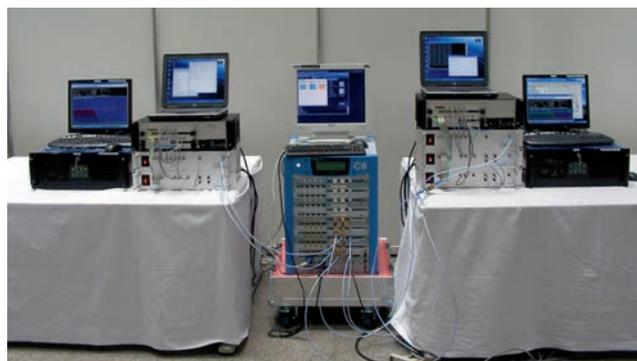


図2.2.1 ブロードバンドパケット伝送システム

また、異なる商用の無線通信システムを1台の機器でソフトウェアの変更のみで実現できるソフトウェア無線通信機を世界で初めて開発した。特に平成16年度には無線 LAN (IEEE802.11 a/b)、第3世代携帯電話システム (W-CDMA)、地上波デジタル TV (13セグ) の利用が1台の無線機でソフトウェアの変更だけで実現でき、各通信システムをシームレスに切替え可能なソフトウェア無線機を開発し、この無線機による屋外シームレス

伝送実験 (W-CDMA、IEEE802.11 b) に成功した。また、W-CDMA、802.11 無線 LAN (2 GHz、5 GHz) に対応可能な高周波モジュールを開発し、これらを処理可能なデジタル信号処理プラットフォームの研究開発を行った (図2.2.2)。



図2.2.2 高周波モジュール

(3) 成層圏無線中継システムの研究開発

a) プロジェクトの背景

1990年代後半、携帯電話は第2世代が普及し、無線は「いつでもどこでも誰とでも」通話できるようになるための技術として発展する中、多数必要となる基地局設置コストを減らし、かつ広域にわたる高速無線アクセスを可能とするため、地上と衛星軌道の間に位置する未開拓空間とも呼ばれる成層圏 (高度約20km) に大型飛行船を活用した IT 基地を設置する構想が生まれた。成層圏は気流が安定し、静止軌道に比べると格段に伝搬距離と伝搬遅延が短いためアンテナや送信出力は小さくて済み、また地上からみて、高さ20kmの電波塔を建てた場合と同等であるため、少ない送信電力かつ1つの成層圏基地局で直径100km以上の範囲を一度にカバーすることも可能とされた。

平成9年のITU世界無線通信会議 (WRC、ジュネーブ) において、「High Altitude Platform Station (HAPS)」という無線局が無線通信規則 (RR) 上で定義され、そのための専用周波数帯として48/47 GHz帯が分配されるに至った。

その後、日本では総務省と文部科学省が主導し、NICTの第1期中期計画の開始から3年ほど遡った平成10年より、当時の航空宇宙技術研究所 (NAL)、海洋科学技術センター (JAMSTEC)、通信・放送機構 (TAO)、及び通信総合研究所 (CRL) の連携により、成層圏飛行船技術 (日本では「成層圏プラットフォーム (SPF)」と

名付けられた) とその通信・放送分野への応用技術、及び環境計測技術の研究開発プロジェクトがスタートした (図2.2.3)。またそれらの進捗を確認するための成層圏プラットフォームワークショップ (SPSW) を毎年東京で開催するようになり、SPSWには情報収集のために多くの国々の大学、研究機関から多数の研究者が集まるようになった。SPSWは平成17年までに計5回開催された。このプロジェクトは、飛行船構造、材料、モーター、太陽電池、燃料電池、制御、無線とそのアクセス制御、周波数共用と開拓、信号処理、環境センサ等の要素技術、及び第3世代携帯電話や当時検討が進められていた地上放送のデジタル化の他、防災、環境保全、さらには防衛に至るまで、非常に多岐の分野にわたる広い裾野と波及効果をもつ巨大プロジェクトとして内外から大きな期待を集めた。

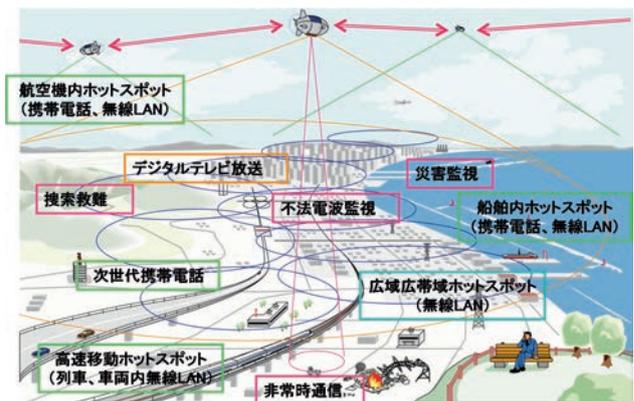


図2.2.3 成層圏プラットフォームによる通信・放送分野への応用例

b) CRLでの研究開発

CRLとTAOが連携し、SPFに搭載する通信・放送ミッションの研究開発を担当した。CRLでは、ITUにおいて日本が提唱してその国際的な分配を目指していたKa帯 (31/28 GHz帯) を使い、地上に同時に複数のセルを生成する機能をもつ、マルチビームと適応可変ビームの同時形成が可能なデジタルビーム形成 (DBF) アンテナの開発を行った。アンテナ素子数は100素子以上が理想であったが、まずはその評価用ということで4×4の16素子で試作し、そのための独自のビーム形成アルゴリズムを考案・開発した。その他、WRCですでに分配が決まっていた48/47 GHz帯を使い、DBFよりは同時形成ビーム数は少ないが、コストが安くかつ高い利得が得られる機械駆動制御型のマルチビームホーン (MBH) アン

テナを試作開発した。TAOでは、「横須賀成層圏プラットフォームリサーチセンター」が横須賀リサーチパーク(YRP)に設置され、携帯電話の基地局機能をSPFに担わせるための2GHz帯セクタアンテナや、SPFをデジタル放送タワーとして使うためのUHF帯送信装置等が開発された。

平成14年には、試作開発された通信・放送ペイロードをSPFの代用となる各種航空機に搭載しての疑似環境での実証実験がTAOにより開始された。DBFアンテナとMBHアンテナによる高速アクセス通信実験は双発ヘリコプタ(Vertol)、デジタル放送実験は小型ジェット(Gulfstream)を利用してYRP上空及び北海道大樹町にて行った。またCRLでは、米国航空宇宙局(NASA)開発の高高度ソーラープレーン無人機(Pathfinder Plus)に無線中継機を搭載しての実験をハワイにて行い、世界で初めて高度20kmの航空プラットフォームによる地上での第3世代携帯電話の直接接続によるTV電話とデジタルハイビジョン放送の受信に成功した(図2.2.4)。その成果についてCRLとNASAの両方でプレスリリースを行い、両国で数多く報道された。



図2.2.4 NASAの高高度滞空型ソーラープレーンによる携帯電話中継とデジタル放送の実証

平成16年になると、飛行船の制御試験用に独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発した定点滞空試験機(全長68m、滞空高度4km)による実験が大樹町で開始され、同年に新たに発足したNICTはデジタル放送、光通信、及び将来の電波監視への応用を目指した電波到来方向推定の3ミッションを同試験機に搭載して実験に参加した。飛行船制御は成功し、合わせてNICTの

ミッションもすべて成功した。特に光通信では高度4kmの飛行船と地上局が相互にレーザーを捕捉し追尾することに成功した(図2.2.5)。

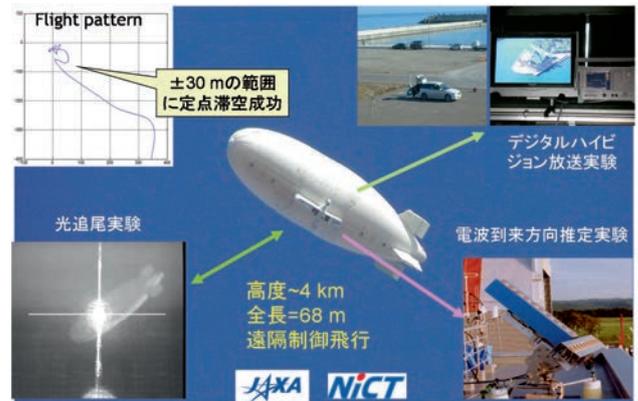


図2.2.5 JAXA開発の定点滞空試験機による通信・放送ミッションの実証

c) ITUでの周波数分配獲得活動

CRLはTAOと連携し、総務省主導の元で、HAPS用の追加周波数帯としてKa帯(31/28GHz)獲得に向けて平成9年よりITU-R及びWRCにおいて活発な寄与活動・ロビー活動を行ってきた。その結果、HAPSのKa帯における無線システムの基本特性のほか、従来の固定業務や静止衛星、電波天文、地球探査業務等への干渉評価に関する合計6本の日本提案勧告を成立させた。また、平成12年のWRC-2000(イスタンブール会合)では、これらの勧告をベースとした周波数分配獲得活動を行い、無線通信規則(RR)上でのKa帯のHAPSによる使用に関する規定とこの分配に賛同するタイ、インドネシア、ベトナム等を含むアジアの12か国の国名を列挙した脚注の追加に成功した。この新しい規定と脚注の追加により、適用可能な国は限定されているものの、実質的にKa帯がHAPS用として国際的に確保されることとなった。またその後も寄与を続け、平成15年のWRC-2003(ジュネーブ会合)では、日本提案に賛同する国をさらにロシア等を含め7か国増やし、かつ南北アメリカ地域までも含めることで合意された。

d) その後の動向

プロジェクト自体は、上記のようにCRLとTAOが担当した通信・放送ミッションについては基盤技術の開発とその成層圏を含む上空での代替機による実証評価、更には高速アクセス用の周波数分配の獲得に成功したが、肝心の飛行船技術、特に電源技術に課題が残り、低高

度(4km)での短時間の定点飛行制御には成功したものの、成層圏高度での定点飛行制御までは至らず、平成17年度にプロジェクトとしてはいったん終了することとなった。欧米でも結局、ロッキードマーチン等の大手企業が成層圏飛行船の開発に挑んだが、いずれも成功しなかった。その後、携帯電話や地上デジタル放送は地上の基地局や送信局の増設で普及した。しかし、当時のコンセプト自体はそれから10年近く経過した今でも生きており、これらの技術は、航空機内インターネットのための旅客航空機搭載用のミリ波アンテナや大規模災害時の通信確保のための小型無人飛行機による無線中継技術などに受け継がれている。

2.2.2 第2期中期計画 ユビキタスマバイル

高効率・高信頼な途切れない無線ネットワークの実現及び広域・超高速無線通信技術に資する研究開発を実施した。具体的には、(1)周波数利用効率の更なる向上を目指し、無線機周囲の電波利用状況に応じて無線通信方式の最適化機能を具備した高信頼可変無線通信技術、(2)利用可能な通信ネットワークを移動端末が認知して、通信を途切れさせることなくネットワーク接続を適応的に行うネットワーク連携技術、(3)地上・海上等、利用シーンを問わず広域な無線アクセスを可能とする広域無線通信技術、(4)近距離においてGbpsオーダーの伝送速度を提供する超高速無線ネットワーク技術、(5)医療や健康管理支援システム用通信技術、生体内外無線伝送技術及び医療現場における安全な無線利用技術に関する研究開発を実施した。

(1) 高信頼可変無線通信技術(コグニティブ無線通信技術)

無線機周囲の電波状況(周波数利用状況、電磁干渉状況、通信回線品質など)を認識(通信環境認識)し、認識結果に基づき最適な無線通信システムを選択(システム選択)して、システム選択結果に基づき無線機をソフトウェア的に再構築(システム再構築)するコグニティブ無線通信技術に関する研究開発を行った。具体的には、コグニティブ無線機開発に必要な無線通信デバイスの開発と、無線機を再構築する際に必要となるハードウェア/ソフトウェアプラットフォームの設計・開

発を実施した。デバイス開発では、UHF帯から6GHz帯までをカバーする各種デバイス(アンテナ、フィルタ、アンプ、送受信ミキサ等)を開発した。ハードウェアプラットフォーム開発では、ソフトウェアのみでシステムが高速に変更可能なFPGAを用いた汎用信号処理ハードウェアを平成19年に開発した。ソフトウェアプラットフォーム開発では、通信環境認識を行うスペクトラムセンシング部、スペクトラムセンシング部とシステム選択部及びシステム選択後の無線機再構築部とのインタフェースの開発を行い、主たる研究開発成果をIEEE 1900.4及び1900.6において平成21年度に国際標準化し、IEEE 1900.4に準拠するコグニティブ無線機を世界で初めて開発した。また、開発したコグニティブ無線機は、平成22年度にシンガポール情報開発庁(IDA)が募集した「ホワイトスペース特区を利用したホワイトスペース通信実験」に採択され、実証試験に利用された。

(2) ネットワーク連携技術(コグニティブ無線ネットワーク技術)

ユーザーセントリックな無線ネットワークサービスの提供を目指して、利用可能な無線ネットワークの回線品質の認識結果に基づく最適ネットワーク構成の構築・運用規範に関する研究開発を行った。具体的には、ネットワークアーキテクチャ、基地局構成及び基地局・ネットワーク側との協調アルゴリズム設計を実施して、平成20年度には、これらの設計結果を実装したヘテロジニアス型コグニティブ無線基地局を開発した。平成21年度には、周囲の無線ネットワーク及び電波利用状況を認知した上で、既存ネットワークに繋ぐ回線を確立する可搬型基地局(コグニティブ無線ルータ)を開発した。平成22年度には、神奈川県藤沢市に500台のコグニティブ無線ルータを設置して、一般ユーザーによるインターネット接続及び各種アプリケーションによる大規模社会実証実験を行った(図2.2.6)。また、電波が使用されていない周波数帯(ホワイトスペース)を自動的に探索して無線ネットワークを構築する、ホワイトスペース対応コグニティブ無線ネットワークの構築を世界で初めて成功した。これらの成果は電波の利用状況をすべてネットワーク側に具備されたサーバ(クラウド)に格納し、状況に基づき利用者に最適な無線通信システムを提供するシステムに反映され、このシステムアーキテクチャをコ

グニティブワイヤレスクラウドと名付け、国際的に提案を行った。これがワイヤレスにおいて“クラウド”という言葉を使用した世界で初めての例となった。主たる研究開発成果は、IEEE 802.11 af、IEEE 802.19.1、IEEE 1900.4 a において国際標準化された。なお、開発したコグニティブ無線ルータは、平成23年には、東日本大震災の後、被災地域の支援要請を受け岩手県遠野市に設置され、通信手段を失った災害対策本部の連絡手段、病院において医師が医療データベースにアクセスする手段、また、被災地で活動されているボランティアの通信手段などの形で利用された（この貢献により NICT は遠野市より感謝状を授与された）。



図2.2.6 左：ヘテロジニアス型コグニティブ無線基地局
右：コグニティブワイヤレスクラウド用サーバ

(3) 広域無線通信技術

a) 海上高度交通システム (海上 ITS)

船舶の安全・快適運行を目的とした、船舶間及び陸船舶間をメッシュ状無線ネットワークで接続する船舶間通信システムを実現するための要素技術の研究・開発を行った。具体的には、平成18年度に海上マルチホップメッシュネットワークシミュレータを開発し、平成19年度以降、IEEE802.16 e 標準仕様の無線通信システムを基本として、媒体アクセス制御 (MAC) 層技術、インターネットプロトコル (IP) 等のデータ伝送における経路選択及び経路構築技術の研究開発を行い、シンガポールにおいて屋外実証実験を実施した。要素技術は IEEE 802.16 n へ寄与文書として提出して、国際標準化活動への寄与を果たした。

b) 安全運転支援車車間通信システム (車車間 ITS)

UHF 帯 (700 MHz 帯) を用いた交差点における衝突等を防止することを目的とした安全運転支援のための車車間通信システムに関する研究開発を実施した。具体的には、UHF 帯電波伝搬特性の測定及びそのモデル化を行い、この電波伝搬モデルに基づく周波数共用技術及び衝突防止用通信プロトコルの設計・開発を行った。開発し

た各要素技術を ITS Forum006 に準拠した物理層とともに無線機に実装して、平成22年度に、屋外実験に世界で初めて成功した。

c) 特定小電力無線システムの高度利用技術

ガス・電気・水道等を中心とした遠隔検針及び監視・制御等の実現を目的としたスマートユーティリティネットワーク (SUN) 構築技術の研究開発を実施した。具体的には、UHF 帯 (400 MHz および 900 MHz) における電波伝搬特性の測定結果から通信エリアの見積もりを行い、広域をカバーして、低消費電力で運用可能なマルチホップ無線通信システムの MAC 層及び物理層の技術仕様を設計した。主たる研究成果は、IEEE 802.15.4 g、IEEE 802.15.4 e において国際標準化に提案され採択された。また、これらの標準化に準拠した無線機器の開発及びガスメータ等への導入についても、平成23年に世界に先がけて成功した。

d) 公共・公益分野におけるブロードバンド無線通信システム (公共ブロードバンド)

警察・消防等の公共・公益分野における動画伝送等のマルチメディアコンテンツの無線伝送を目的とした、VHF (200 MHz) 帯ブロードバンド無線通信システムに関する研究開発を実施した。具体的には、VHF 帯の電波伝搬測定を実施し、通信範囲の設計を実施、5 MHz の占有帯域幅を有する直交周波数分割多元接続 (OFDMA) を採用する無線アクセス装置を設計・開発した (図2.2.7)。平成22年度には、商用可能な可搬型基地局の開発を行い、社団法人電波産業会 (ARIB) 公共ブロードバンドシステム移動通信システム開発部会へ技術仕様を提案し、ARIB STD T-103 として標準化された。



図2.2.7 公共ブロードバンドシステム

(4) 超高速無線ネットワーク技術

大容量 AV 機器間通信及び超高速ファイルダウンロード等のアプリケーションに利用できるミリ波帯無線パーソナルエリアネットワーク (WPAN) の実現を目的として、60 GHz 帯を利用した 1 Gbps 以上の伝送速度をもつ近距離無線システムに関する研究開発を実施した。具体的には、ミリ波帯 WPAN システムの要素技術 (物理層、MAC 層、指向性アンテナ制御プロトコル) を開発して、平成 19 年度に、IEEE 802.15.3c に国際標準化された。国際標準化に際しては、国内外主要企業を中心とした 19 機関 2 大学から成るミリ波実用化コンソーシアムを設立して、NICT は標準化作業を先導した。平成 22 年度には、IEEE 802.15.3c 仕様に準拠して、1.5 Gbps 以上の伝送速度を達成するプロトタイプ開発に世界で初めて成功した。また、60 GHz 帯高周波 CMOS トランシーバ部の開発にも世界で初めて成功した。ミリ波帯無線 LAN の標準化作業を行う IEEE 802.11 ad にも研究開発成果を寄与文書として入力して、MAC 層標準仕様が国際標準化された。

(5) 生体内外無線通信技術の研究開発

a) 研究開発の概要

医療現場をワイヤレス技術で支援する“ICT ユビキタス医療”の実現を目指して、医療や健康管理を支援するシステムに必要な通信技術の研究開発や、新たな医療検査、治療に資する生体内外無線伝送技術、医療現場における安全な無線利用のための技術の研究開発を行った。具体的には、生体の動的電波伝搬モデル化や生体内外電波伝搬の実測、通信方式の改良や伝送特性評価等を実施した。

平成 19 年 1 月には産学官連携による共同研究組織「医療 ICT コンソーシアム」(NICT、民間企業 15 社及び 3 大学) を結成して、各分野からの意見を反映した IEEE802.15.6 (W-BAN: 無線ボディエリアネットワーク) 国際標準化を推進し、アプリケーション及び要素技術の両面から実用化を見据えた研究開発を指向した。W-BAN 要素技術とシステム開発を着実に進めた結果、平成 21 年 5 月には「低消費電力セキュア BAN 搭載ユビキタス型心電計の開発に初めて成功 ~安心の見守りボディ・エリア・ネットワーク (BAN) の実現~」、平成 22 年 5 月には、「UWB ハイバンドを用いた BAN システムの開発に初めて成功 ~国内 UWB 制度に準拠・TELEC 認証済~」の報道発

表を行って研究開発の成果を広く社会に発信した。

b) 研究成果について

① 生体の動的電波伝搬モデル化

ウェアラブル端末を用いた W-BAN の準静的なモデルに対して、より現実的な動的チャンネルモデルを提案してデータを系統化した。具体的には、人体の基本動作を歩行、立ち座り、寝転び等のタイプ別に 7 分類し、シミュレーションソフトウェアにより再現性のあるデータを作成した (図 2.2.8)。

医療機器に対する電波妨害への耐性 (RF イミュニティ) を確認するため、高品質伝送を可能とする超高帯域 (UWB) 信号に対して、シリンジポンプ、無線テレメトリー機器、ベッドサイドモニタ等といった一般的な医療機器との電磁両立性 (EMC) を評価した (図 2.2.9)。

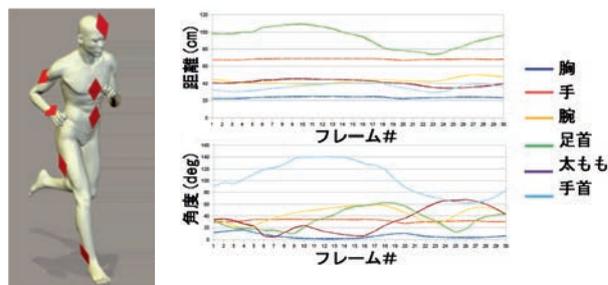


図 2.2.8 ウェアラブル端末を用いた W-BAN による走行動作の例とアンテナ距離 (上) 及び角度 (下) の結果。縦軸は腰にあると仮定した W-BAN コーディネータと各部位にある W-BAN センサ間の距離、コーディネータと各センサの相対位置を示す角度を示す。

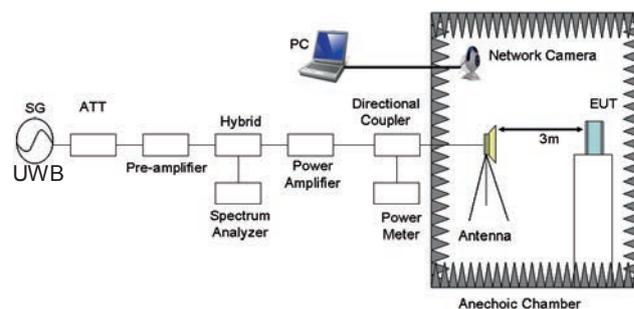


図 2.2.9 EMC 評価系の構成

② 生体内外電波伝搬の研究

平成 20 年度に NICT 数値人体モデルを使用した時間領域差分法 (FDTD) による解析に着手した。平成 21 年度には、液体ファントムを用いた伝搬損失測定実験によるインプラント W-BAN 用電波伝搬モデルを構築した。伝搬モデルは IEEE802.15.6 に提案し、方式評価用伝搬モデルとして採用された (図 2.2.10 (a))。さらに構築し



図2.2.10 (a) NICT 数値人体モデルを利用した FDTD 解析によるインプラント W-BAN 用電波伝搬モデルの構築
 (b) インプラント W-BAN の生体利用実験—CT 測定の様子
 (c) インプラント W-BAN の生体利用実験—胃部カプセル型信号発生器の3次元 CT 画像
 (d) 信号減衰測定に使用したカプセル型信号発生器の試作品

た電波伝搬モデルを利用して、GFSK 変調によるインプラント W-BAN 用物理／メディアアクセス制御層(PHY/MAC 層) 技術を IEEE802.15.6 に提案した。また、平成 21 年度から 2 年間は、公立大学法人横浜市立大学医学部の協力を得て、インプラント W-BAN の生体内外間の電波伝搬測定を実施した(図 2.2.10 (b)、(c))。また、カプセル型小型信号発生器(図 2.2.10 (d)) を体内に一時留置した際の体外受信信号レベルを測定し、FDTD 解析結果との整合性を確認した。

③ W-BAN 通信方式の改良と伝送特性評価

生体に関わるセンサ情報伝送の優先度に応じた制御を可能にするビーコンモード、省電力化可能なノンビーコンモードが混在した MAC 層技術の検討、セキュア通信技術の開発、チャープ UWB 及びインパルス UWB のハードウェア搭載を仮定した通信品質等の検討並びに医療用周波数帯域の割当のある 400 MHz 帯の使用を前提とした狭帯域 GFSK 通信方式の差動復調特性等を検証した。また、超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS) を用いた衛星国際通信実験(タイ-YRP-鹿島間)において、W-BAN データ伝送実験を初めて成功させた。実験では、W-BAN システムからのデータを、通信衛星を経由して伝送した場合の伝送遅延時間変動下での W-BAN 動作への影響を評価した。

c) その他の研究活動

医療 ICT のための標準化・法制化を推進するため、IEEE802.15.6 標準化に NICT 独自提案等により積極的に寄与した。なお、NICT が副議長、セクレタリ等の重職を務めることで IEEE802.15.6 活動をリードした。

学術的価値を高めるため、平成 18 年度に電子情報通信学会内に医療情報通信技術研究専門委員会を設置して定期的に研究会を開催した。平成 19 年以降は、毎年「国

際医療 ICT シンポジウム (ISMICT)」を企画して国内外(フィンランド、カナダ、台湾等)で開催した。

2.2.3 第3期中期計画 スマートワイヤレス

飛躍的に増加する端末を収容し、クラウド系のネットワークと協調しながら、平時・災害時における様々な利用シーンに合わせて無線リソースの制御を行い、無線ネットワークを柔軟に構成可能とするスケーラブルワイヤレスネットワーク技術の研究開発を行った。また、ブロードバンドから低速まで柔軟なワイヤレス伝送を実現するため、利用状況や利用条件等に応じて適切に無線パラメータを変更させ、再構築可能な無線機間ネットワークを実現するスマートブロードバンドワイヤレスネットワーク技術の研究開発を行った。

(1) スケーラブルネットワーク技術の開発

半径数百 m の範囲内に存在するガスメータや、電気メータおよび放射線量計等の各種環境モニターからの情報収集、制御が可能な省電力 Wi-SUN システムの技術仕様について、IEEE802.15.4 g/4 e 委員会での標準化を完全に終了させた。当該委員会では、副議長及びテクニカルサブエディタとして標準化を推進した。また、この仕様を推進する Wi-SUN アライアンスを国内外の民間企業 9 社とともに創設し、国際標準化をベースにした相互接続可能な民間規格の策定に寄与するとともに、この技術仕様に基づく小型無線モジュール(2 cm × 4 cm 程度)及び同モジュールを組み込んだ無線機を開発した(図 2.2.11)。また、既に特定の利用目的のために割り当てられている周波数において、「空間的」、「時間的」に利用可能なホワイトスペースと呼ばれる周波数帯を利用

するホワイトスペース Wi-SUN の研究開発を行い、その技術仕様の標準化を行う IEEE802.15.4 m 委員会を立ち上げ、副議長、セクレタリ、及びテクニカルエディタとして技術仕様を標準化させた。さらに、標準化を行った IEEE802.15.4 g をベースにして、MAC 層を簡略化させるための研究開発を行い、その仕様を ANSI/TIA PN-4957.200 として標準化させた。当該標準化では副議長として会合を主導した。加えて、前述の無線機研究開発成果を活用し、規格認証団体 Wi-SUN アライアンスの発起人メンバとして、多様なアプリケーションに対する各認証仕様 Wi-SUN プロファイルの策定に主導的に寄与した。成果の一つとして、家庭内エネルギー管理システムにおける標準通信アプリケーション ECHONET Lite を実現するための Wi-SUN プロファイルを策定し、平成25年から東京電力をはじめとする国内主要電力会社に採用されたことが挙げられる (図2.2.12)。



図2.2.11 左：Wi-SUN 無線モジュール、右：無線モジュールに電池ボックス、インタフェース部をつけた無線機

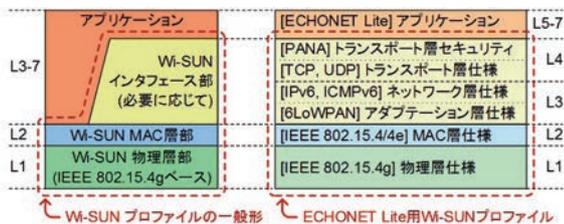


図2.2.12 上：ECHONET Lite 用 Wi-SUN プロファイルのプロトコルスタック、下：ECHONET Lite 用 Wi-SUN プロファイルの動作実証

また、これらの各種環境モニターから Wi-SUN で局所的に集められた情報を数十 km の範囲で広域に収集するために通信距離 40 km 程度までサポートをする UHF 帯 (TV 帯ホワイトスペース) を用いた IEEE802.22 規格準拠のスマート WRAN システムの開発に世界で初めて成功した。このシステムを用いて、平成26年に、岩手県遠野市で伝送実験が行われ、12 km の長距離伝送が可能であることが実証された。また、この標準規格に中継機能等の面的拡張機能を追加する研究開発を行い、IEEE802.22 b 委員会を立ち上げ、議長として研究開発した仕様の標準化を行っている。更には、IEEE802.22 システムをホワイトスペースで利用するために、一次利用者と二次利用者間の干渉計算、監視を行うホワイトスペースデータベース (WSDB) の開発に成功した (図2.2.13)。



図2.2.13 WSDB の動作画面

(2) ブロードバンドワイヤレスネットワーク技術の研究開発

ホワイトスペースで動作可能なスマート WLAN の仕様を設計し、物理層、MAC 層方式、無線 LAN システム間の共存方式をホワイトスペース WLAN の標準規格である IEEE802.11 af に提案し、最終標準ドラフト方式として採択された。この標準化において NICT は、副議長及びセクレタリとして標準化を主導した。また、平成24年には、このドラフト標準に基づく無線機の開発に世界で初めて成功した。さらに、ホワイトスペースを利用するシステム間共存方式を IEEE802.19.1 に提案し、最終標準ドラフト仕様として採択された。そして、これらの標準に準拠した無線機の開発に世界で初めて成功した。以上の成果に基づき、英国電波規制当局 (Ofcom) が実施した TV White Spaces Pilot プロジェクトに参画し、ロン

ドン市街地において、ホワイトスペース帯 LTE システムを用いた 40 Mbps 以上の移動体高速ブロードバンド通信と、IEEE 802.11 af システムを用いた 3.7 km の固定地点間通信に成功した(図2.2.14)。ホワイトスペースを用いた市街地における移動体高速通信及び固定地点間通信は、本実証が世界で初めての事例となった。また、本実証において利用可能周波数の管理を目的として開発したデータベースは、Ofcom の審査を経て認定を受けた。本成果は、英国をはじめとする世界各国のホワイトスペースの制度化に多大な貢献をもたらすことが予想される。

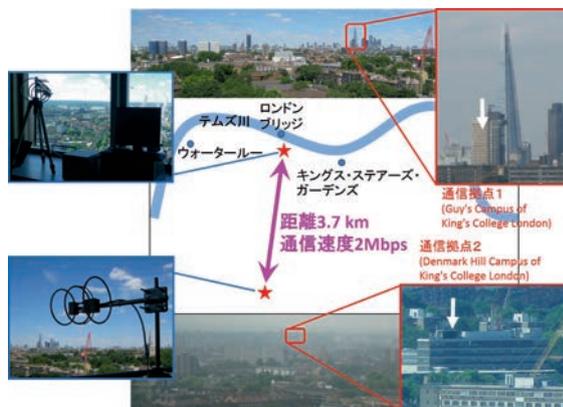


図2.2.14 英国 Ofcom パイロットにおけるホワイトスペース通信実証 (IEEE 802.11af)

スマート WPAN として、ミリ波における見通し外通信時の電波伝搬モデルを確立し、最大 1.7 Gbps まで対応した IEEE802.11 ad/15.3 c 準拠の通信システム、及び見通し外においても通信パスを探索可能なビームステアリングアンテナの開発を行い、同システム上で動作する低密度パリティ検査 (LDPC) 符号化復号化装置 (1 Gbps 以上で動作) を開発した他、これらを融合させた見通し外ミリ波伝送方式の基礎試験を行った(図2.2.15)。



図2.2.15 左：ビームステアリングアンテナのデモンストレーション、右：LDPC 符号化、復号化装置のデモンストレーション

(3) 自律分散ワイヤレスネットワーク技術の研究開発

災害に強く実際に社会に実装可能で経済活動の促進や人命救助に役立つ自律分散ワイヤレスネットワーク技術の実現を目指し、耐災害ワイヤレスメッシュネットワーク、大規模災害時の通信確保を目指した小型無人飛行機による無線中継システム、インフラに依存しない端末間通信システムの研究開発に取り組んでいる。また伝搬条件の悪い環境での無線利用の可能性を拡大するための UWB による屋内測位システムや有線接続なしに給電と通信を同時に実現するシート媒体通信技術の研究開発にも取り組んでいる。

耐災害ワイヤレスメッシュネットワークでは、地域型の分散ネットワークアーキテクチャである「NerveNet」と呼ばれる技術を基盤とした基地局ノード30局程で構成されるワイヤレスメッシュネットワークテストベッドを国立大学法人東北大学キャンパス内に設置し、災害時にインターネット等が使用不能になることを想定した大規模な実証実験を平成25年3月に実施した。

小型無人飛行機による無線中継では、プログラム通りに自動で2時間以上巡回飛行することが可能な無人飛行機を仮想の電波塔として活用し、災害による情報孤立地域との通信回線を発災直後に迅速に確保するシステムの開発を行い、平成25年3月から平成26年にかけて仙台、北海道大樹町、和歌山県白浜町、香川県坂出市等において多くの実証実験を成功させた(図2.2.16)。また無人飛行機のための周波数有効利用や無線の信頼性向上技術に関する総務省の委託研究(平成25～27年度)を受託し、ITU や国際民間航空機関 (ICAO) 等の国際標準化活動への寄与も行っている。

インフラに依存しない端末間通信ネットワークでは、920 MHz 帯の電波を用い、基地局を通さずに端末同士だけで、しかもリアルタイム通信ができない環境でも端末を持った人や車の移動により時間差をおいて広報やセンサなどの情報を拡散・収集するネットワークを開発した(図2.2.17)。東京都台場地域や京都府精華町けいはんな地域にテストベッド設備を実装し、バス会社や自治体と連携した評価実験を平成26年3月より実施している。このネットワークは、大量のデータや全国規模・全世界規模のやりとりには適していないが、地域に根ざした情報のやりとりに適しており、低いコストで住民や観光客の暮らしや活動を支援する地域の街づくりへの貢献が期

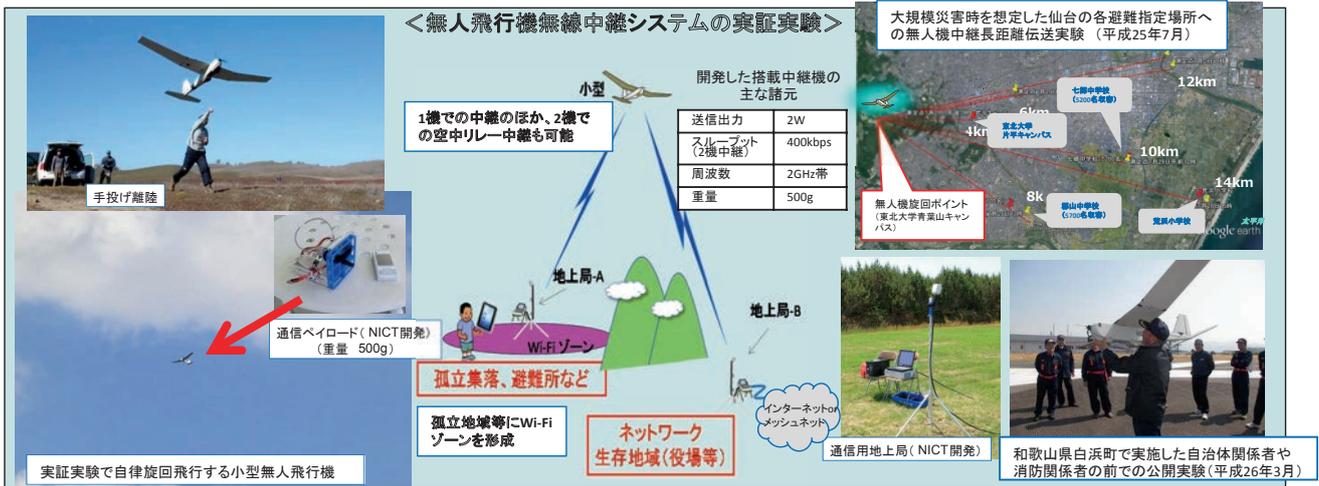


図2.2.16 小型無人飛行機による災害時無線中継システム

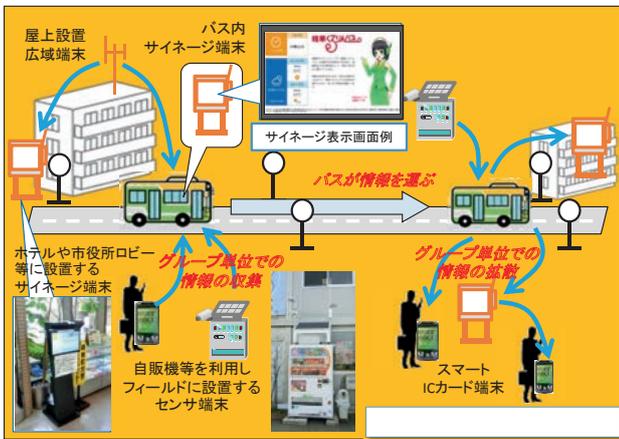


図2.2.17 インフラに依存しない端末間通信ネットワーク

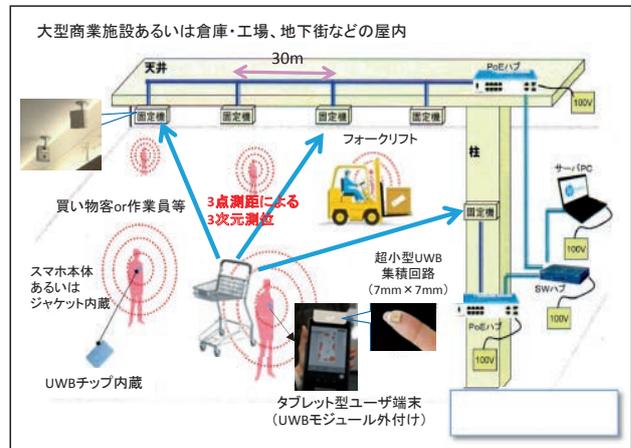


図2.2.18 UWBによる屋内測位システム

待される。IEEE802.15.8の中で平成27年度末の国際標準化に向けた審議が進められており、研究室メンバーが Vice Chair や Adhoc リーダの役職で主導し、NICT 提案方式が採用されるよう活動している。

UWB (超広帯域無線) による屋内測位システムでは、インパルス型の UWB を用い、GPS 電波の届かない屋内や地下等でも高い精度 (30cm程度) で位置を検知することのできる屋内測位システムを開発し、ショッピングモールや物流倉庫に実装して平成26年3月より評価実験を実施している (図2.2.18)。このシステムは、他の屋内測位方式と比べて最も精度が高い。研究開発と並行し、UWB の使用に関する規則改訂の審議に副主査やワーキンググループリーダーとして貢献した。

シート媒体通信技術は、厚さ数 mm のシート (2次元シート) に電磁波を閉じ込め、表面近傍のみに染み出すエバネッセント波により任意のシート上のデバイスに対して無接点で情報通信と給電を同時に行う技術であり、シートとの間で高効率に情報や電力の入出力を行うカプラや、シート上の任意の場所に、通信信号や給電電力を集中する技術などを開発してきた (図2.2.19) (詳細については 2.10.6 を参照のこと)。第3期中期計画では、特にウェアラブルでフレキシブルな布状シートにも適用できるようにするための高効率な小型カプラの開発を行い、ヘルスケアや脳波計測、小型の玩具、ワイヤレスディスプレイ等に应用するための研究開発を進めている。



図2.2.19 布状シートを用いたウェアラブル媒体による通信・給電システム

2 研究活動 ネットワーク基盤技術

2.3 宇宙通信システム技術

2.3.1 概要

第1期中期計画では、超高速衛星通信システムの研究開発と宇宙通信システム基盤技術の研究開発を進めた。この期間には、技術試験衛星 VIII 型「きく8号」(ETS-VIII) 及び、超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS) の開発を行った。また、光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS) と光地上局との間で双方向光通信実験に世界で初めて成功した。

第2期中期計画では、スペース・インフォネットワーク技術の研究開発と通信を支える宇宙基盤技術の研究開発を進めた。この期間には、WINDS の打上げ及び WINDS を用いた世界最高速の1.2 Gbps 衛星通信技術の実証を行い、東日本大震災の災害対策支援として WINDS による臨時衛星回線を提供した。衛星搭載通信機器高度化の研究においては、将来のデータ伝送系に必要な10 Gbps クラスのミリ波・光衛星通信技術の基礎技術研究を進めた。

第3期中期計画では、ブロードバンド衛星通信システム技術の研究開発と超大容量光衛星／光空間通信技術の研究開発を進めた。ブロードバンド衛星通信システム技術の研究開発としては、WINDS をテストベッドとした実証実験を実施し、数十 Mbps を実現する航空機等搭載用モバイル衛星通信地球局の開発や、海洋資源調査等

の社会貢献プロジェクトに参画し、研究開発から実用システムへの展開を図った。後者の超大容量光衛星／光空間通信技術の研究開発では、数十 Gbps を有する光通信インフラの要素技術を確立し、小型衛星搭載用の小型光トランスポンダを開発し、小型衛星による光通信実験及び量子鍵配送に関する基礎実験の宇宙実証を目指した。

2.3.2 日韓高速衛星通信実験(平成14年)

日韓郵政大臣会合で合意された「高度情報通信に関する共同実験の推進」の中の重要課題とされた日韓高速衛星通信実験として、韓国電子通信研究院(ETRI) と共同で平成14年日韓共催ワールドカップにおいて高精細パノラマ映像を日本側、3次元高精細映像伝送を韓国側が担当し、デモンストレーション実験を実施した(図2.3.1)。

- ① KOREASAT-3 で、Ka バンドのトランスポンダ(155 Mbps) を使用した。
- ② ハイビジョン映像を横に3面つなぎ合わせた高精細パノラマ映像を伝送し、日本韓国両国のスタジアムの試合を、バーチャルスタジアムとして遠隔地に再現する技術実証を確立した。



図2.3.1 高精細パノラマ映像のデモの様子(パシフィコ横浜の国際メディアセンターにて)

2.3.3 技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」(ETS-VIII)による高度移動体衛星通信実験

平成18年12月に打ち上げられた ETS-VIII は、大型展開アンテナを搭載し、携帯電話程度の大きさの端末で移動体衛星通信を実現することが主目的で、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と NICT が共同開発した。アンテナの展開には成功したが、S バンド受信機の低雑音増幅器 (LNA) の電源が入らない不具合があり、JAXA、製作メーカー及び NICT で構成する「きく8号通信系ミッション機器不具合原因究明合同チーム」を設置し、約1年をかけて不具合原因を特定した。不具合原因は、DCDC コンバータからの電流を各 LNA へ分配するダイオードの取り付け部に導電性異物が入り短絡したことによるものであった。このため受信系は、時刻比較ミッション用の小型アンテナで代用し、携帯端末側も外付けの70 cm アンテナや地上中継装置を使用し、失われた機能を補填して実験を行える体制を整えた。送信系は問題なく動作し、大型展開アンテナに関する軌道上での特性を測定した。基本性能評価及び地球局基本性能評価等を行い、航空機搭載合成開口レーダ (Pi-SAR2) による観測データを、航空機上から衛星 (ETS-VIII) 経由で、地上へと伝送する実験に成功した。これにより災害時に迅速に対応し、観測追加の指示を受けるなどインタラクティブな観測運用が期待される (図2.3.2)。衛星センサネットワーク実験では5機関 (独立行政法人国立高等専門学校機構高知工業高等専門学校、国立大学法人東京大学地震研究所、日立造船株式会社、JAXA、NICT) の共同研究により津波の早期検出を目指した海上ブイからのデータ伝送実験を実施し、将来の津波早期検出に利用可能なことを示した (図2.3.3)。

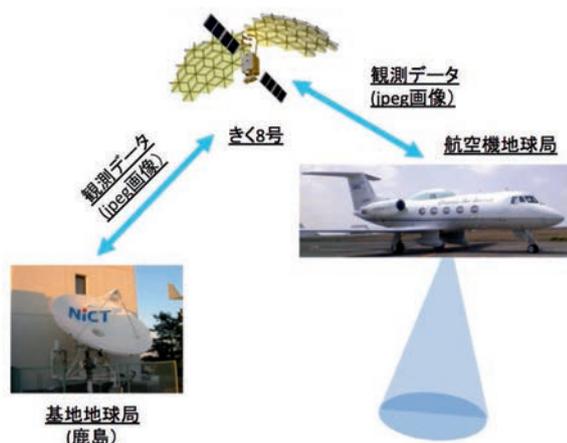


図2.3.2 ETS-VIIIによる観測データ伝送システム

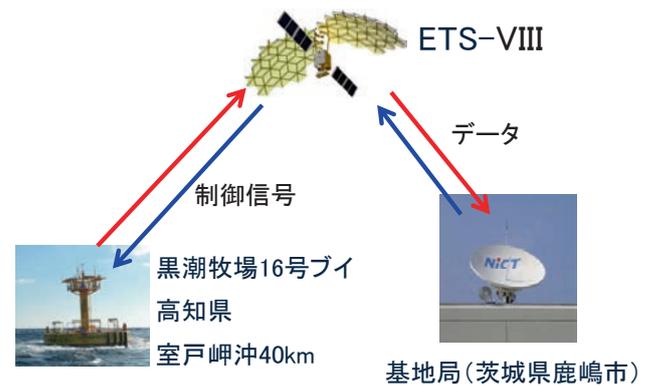


図2.3.3 ETS-VIIIを用いた海上ブイからのデータ伝送実験

2.3.4 超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS)

平成20年2月に打ち上げられた WINDS は、日本及びアジア・太平洋地域におけるデジタルデバイド解消、災害時の通信回線バックアップ、及び超高速衛星回線の提供のための基本技術実証を目的に開発された衛星である。WINDS は、JAXA と NICT が共同で開発し、NICT は衛星搭載ベースバンド交換機の開発を担当した。地上施設に関しては、1.2 Gbps/622 Mbps 高速モデムや5 m アンテナの大型地上局及び2.4 m アンテナの超高速小型地球局 (車載局) の開発を NICT が担当した。1.2 Gbps/622 Mbps TDMA 方式通信装置の改良により、622 Mbps × 2波伝送及び衛星通信では世界最高速の1.2 Gbps 多地点衛星通信を達成した。多地点 SS-TDMA 実験を実施するために、可搬型 SDR-VSAT を整備し、大型局、車載局との3地点間での622 Mbps 通信実験を実施し基本特性を取得した。WINDS を使用した実験では、NHK と共同でスーパーハイビジョン伝送実験 (札幌テレビ塔からの映像を研究開発テストベッドネットワーク (JGN) と WINDS 経由で NHK 放送技術研究所へ伝送) を実施し、伝送された映像を技研公開来場者に公開した。また、国立天文台等と共同で平成21年7月の皆既日食の映像を硫黄島から WINDS とインターネット経由で配信する実験を実施した。その他にも外科手術の立体ハイビジョン映像伝送実験や立体4K 映像伝送実験などを実施してきた。災害時の衛星通信に関しては、各地防災訓練に参加するとともに、平成22年10月に開催された APEC 情報通信大臣会合での大規模地震発生を模擬した実験などを実施している。平成23年3月

の東日本大震災に際しては、東京消防庁の支援要請に基づき、WINDS を用いて東京消防庁作戦室(大手町)と緊急消防援助隊指揮支援本部(気仙沼市)との円滑な情報共有を実現した(図2.3.4)。また、防衛省からの支援要請に基づき物資輸送拠点となった陸上自衛隊松島基地と入間基地を WINDS 回線で接続し、ネットワーク環境を提供した。東日本大震災後には WINDS を使用して世界最高性能の移動体地球局として24 Mbps での通信が可能な小型車載地球局(図2.3.5 (a))及び船舶地球局を開発した。平成25年2月には、災害時等に専門家でもなくとも運用可能なフルオート可搬型地球局(図2.3.5 (b))及びハブとなり得る大型車載地球局を開発した。これらの地球局を用いて各地で行われる防災訓練等に参加するとともに、様々な機関と意見交換を行い、また次期衛星の検討を実施した。平成25年9～10月に海洋域からのブロードバンド衛星通信の実証を目指し、海洋研究開発機構(JAMSTEC)の海洋調査船「かいよう」からの洋上衛星通信実験を実施し、世界初の陸上からの無人探査機「おとひめ」の遠隔操作実験を実施した(図2.3.6)。

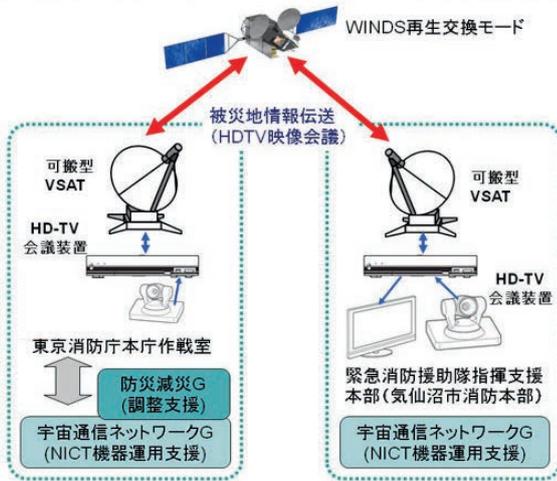


図2.3.4 WINDS を用いた災害対策活動支援システム

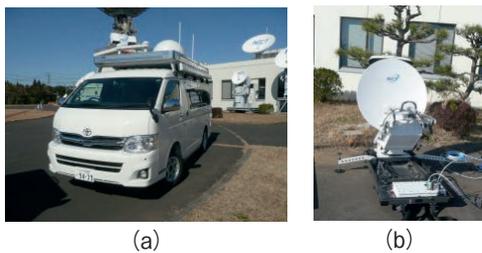


図2.3.5 移動体地球局 (a: 小型車載地球局、b: フルオート可搬型地球局)



図2.3.6 無人探査機「おとひめ」の衛星経由遠隔操作実験

2.3.5 準天頂衛星

準天頂軌道を用いる衛星の軌道保持方法に関する研究や準天頂衛星の通信分野、放送分野、測位分野、地球観測分野への利用に関する研究を実施し、有効性を示した。特に、平成10年に打上げられた通信放送技術衛星(COMETES)が静止化に失敗し、衛星仰角が変化し、仰角80度以上となることがあったため、高層ビルの密集する東京丸の内での衛星伝搬実験を実施し、準天頂衛星の特徴である高仰角によるビルのブロッキングが大幅に改善されるという有利性を証明した。NICTは、これまで衛星が地球に対して描く軌跡(図2.3.7)にちなんで「8の字衛星」という名称を使用していたが、「静止衛星」のようにわかりやすい名称の「準天頂衛星」と命名した。平成11年8月に「準天頂衛星システム検討委員会」を立ち上げ、通信システムに必要な技術、サービス、ビジネスプラン、コンソーシアムの実現の可能性、出資者を調査・検討し、平成11年11月に「準天頂衛星シンポジウム」を開催した。その後、準天頂衛星の実現に向けた働きかけが功を奏し、平成15年に通信・放送・測位の衛星プロジェクトが開始されたが、平成18年には通信・放送が撤退し、測位だけとなり、平成22年9月の準天頂衛星初号機(QZS-1、「みちびき」)の打上げ後、国の研究機関で技術実証実験、民間等で利用実証実験が行われている(CRL(現NICT)、NICTでの開発・実験は「2.16 時空標準技術」を参照)。現在、内閣府では4機の衛星体制による平成30年のサービス開始に向けて、開発・整備が進められている。

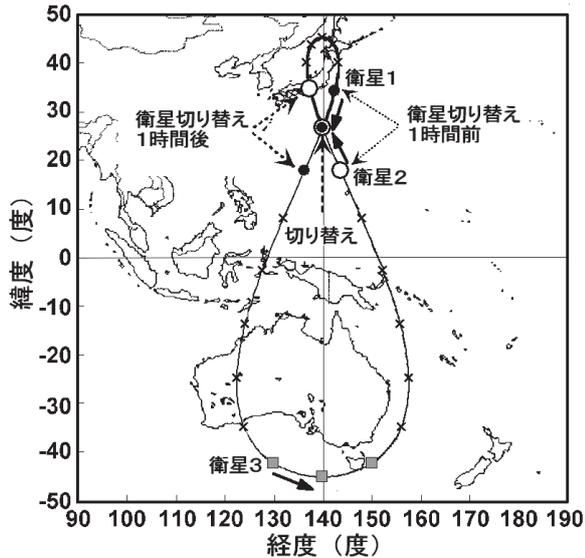


図2.3.7 準天頂衛星の軌跡

2.3.6 地上／衛星周波数共用携帯電話システム技術の研究開発

地上携帯電話に衛星携帯機能を持たせることにより、地上系の圏外でも補完的に衛星系を用いることで、全国に渡る移動通信環境を築くことを目指して、地上／衛星共用携帯電話システム (STICS) (図2.3.8) の研究開発を、電波利用料 (平成20～25年3月) により実施した。衛星移動通信システムと地上移動通信システムの一体的な制御技術により衛星系と地上系で同一周波数の共用が可能となり、かつ、地上系トラフィックなどに適応して動的な制御を行うことで、周波数を最大限に有効利用すること等も可能となる。このシステムでは移動衛星業務用に割り当てられているSバンド帯域 (最大で約30 MHz幅) を使用することを前提とした。地上携帯電話端末や基地局の送信電力の日本の広範囲に渡る実測データを平成20年から平成22年に収集し、これに基づく干渉モデルを構築し干渉評価を行った結果、地上-衛星間の干渉下での周波数共用が成立することを平成24年に確認した。また、衛星側の小規模モデルである16素子16ビームDBF／チャネライザを開発し評価を行った結果、デジタル技術を活用することで、100ビームクラスのマルチビーム形成や、大型展開アンテナの鏡面変形によるサイドローブ上昇の抑制、災害時等に特定の衛星ビームにチャンネルを集中して割り当てることが可能であることを平成23年から平成24年に確認した。地上／衛星回線を

連動制御するダイナミック制御機能を模擬するシミュレータを開発し、東日本大震災を模擬する呼を生成し、地上で収容しきれない呼を衛星に逃がし、衛星リソースをダイナミック制御することで、呼損軽減の効果を平成24年に確認した。これらの要素技術を組み合わせ、総合評価模擬装置を開発して総合評価試験を実施し、有限な衛星上のリソースを災害時に有効に活用することが可能であることを平成25年3月に示した。

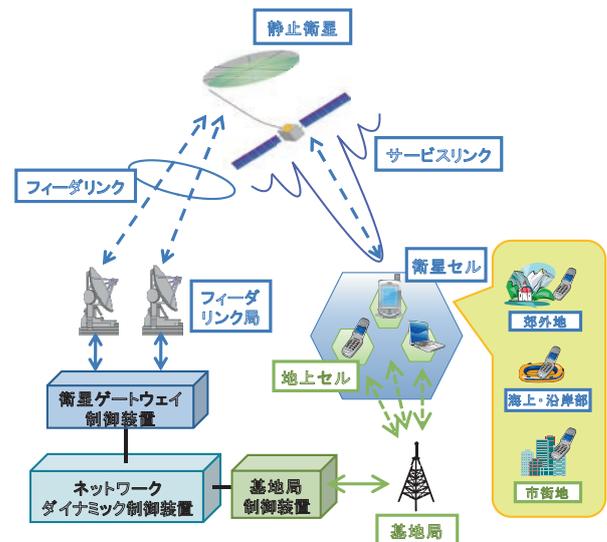


図2.3.8 地上／衛星共用携帯電話システムの概念図

2.3.7 ヘリコプター衛星通信

ヘリコプター衛星通信は、従来のヘリテレでの弱点 (ヘリコプターと中継車が必要) を、衛星通信を利用してカバーするもので、CRL (現NICT) から提案し、平成13年に電波利用料を使用して研究開発を開始した。実施において検討会を設置し、三菱電機が通信、NTTデータが映像、川崎重工業がヘリコプター、宇宙通信 (現スカパーJSAT) が衛星、テレコム先端技術研究支援センター (SCAT) が事務局を担当し、NICTが全体をとりまとめた。設計では通信アンテナにパラボラまたはフェーズドアレイのいずれを採用するかを検討し、最終的にはフェーズドアレイを採用することとした。ヘリコプターに通信システムを搭載した状態での飛行前の駐機試験では、アクティブフェーズドアレイアンテナ (536素子) を開発し、世界初のヘリコプター衛星通信を実現した。平成18年には、総務省消防庁等と協力して、伝送速度1.5 Mbpsの画像伝送実験を実施した。実験は、ヘリコ

プターから撮影した画像情報を、実用衛星 (Superbird) を経由し、消防庁所有の消防・防災通信システムへ伝送し、消防・防災通信ネットワーク (実用システム) への接続性を確認した。ヘリコプター衛星通信システムは商品名「ヘリサット」(図2.3.9)として三菱電機が商品化し、総務省消防庁所有のヘリコプターに導入されたのを始め、各自治体のヘリコプターに導入され始めている。また、ヘリコプター衛星通信システムの技術的条件が定められたことに伴う無線設備規則の整備に協力した。



図2.3.9 ヘリサットの外観

2.3.8 光衛星通信に関する研究

(1) 光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS) との通信実験

平成17年8月に打ち上げられた OICETS と、NICT 本部の宇宙光通信地上センターに設置した光地上局との間で平成18年3月に双方向光通信実験を実施し、世界で初めて成功した。アップリンク、ダウンリンクとも 10^{-4} ~ 10^{-5} の BER を大気擾乱のもとで達成した。また、世界で初めて衛星の光信号の偏光特性を取得し、宇宙量子鍵配送の基礎データを得た。光地上局の光学的衛星追尾技術を維持・更新・発展させ、OICETS との光通信実験を NICT が主導し、世界の3機関 (NASA/JPL、ESA、DLR) と国際協同実験 (図2.3.10) を実施した。実験では将来の光通信の標準化につながる条件の異なるサイトでの伝搬データを取得し、衛星と地上を結ぶ光回線上の雲による遮蔽特性を衛星画像により評価した。その結果、国内に4局以上の光地上局を配置することで、高い確率で雲の影響を回避できること (ダイバーシチの有効性) を示した。また、ドイツ TerraSAR-X 衛星との光学追尾実験を実施した。

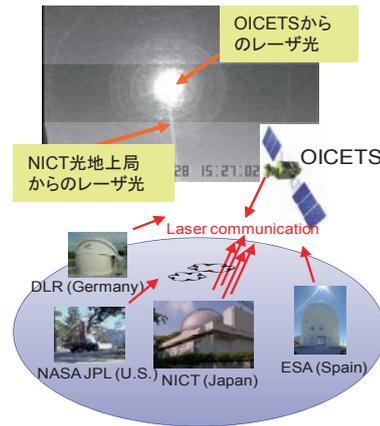


図2.3.10 OICETSによる衛星-地上光通信国際協同実験

(2) 光衛星通信に関する基礎研究

衛星搭載用光衛星通信機器要素技術の研究開発として、光ファイバ増幅器の宇宙環境適応性試験 (放射線試験、振動試験等) を実施し、宇宙用光ファイバ増幅器の衛星搭載性を確認した。デジタルコヒーレント光受信機を開発し、6 Gbps BPSK 復調を確認した。その後、複数の光変調方式に対応可能なデジタルコヒーレント受信機の地上試験モデルを開発し、3 Gbps、6 Gbps の BPSK 及び6 Gbps の QPSK 復調機能を FPGA を用いて実装し実現した。

空間量子鍵配送に関する研究開発として、平成20年10月に ESA 量子鍵配送実験国際協力の合意により、トピカルチーム会合に参加し、国際協力を推進し、ウィーン大学との共同研究を実施した。また、空間量子鍵配送装置を開発し、平成21年3月に地上実験として1 km の空間量子鍵配送実験を実施した。平成22年10月に空間量子暗号機器による1.37 km の空間量子鍵配送実験をビル間で実施し、大気ゆらぎのデータをシンチロメータにより同時に計測した (図2.3.11)。



図2.3.11 空間量子鍵配送実験 (ビル間1.37km)

地上系アプリケーションとして、光通信信号を1.5 μm シングルモードファイバーと直接接続し、空間伝送できる超小型空間光通信装置を開発し、平成20年10月に40 Gbpsの光変調信号を32チャンネル波長多重した光信号を送ることにより、地上の近距離通信で1.28 Tbpsの世界最高速を達成した。また、100 Gイーサネット光空間伝送を達成した。総合伝送速度1.28 Tbpsを達成した超小型光無線通信装置の実用化に向け、精追尾機構に関する設計技術を民間企業等に技術供与するとともに大学や研究機関との共同研究を行った。平成24年2月に数十 Gbpsの高速データ伝送を行う光通信装置を車両に搭載できるよう改造し、走行する車両と地上固定局との見通し間で行う光通信実験を実施した。平成26年3月には、ネットワーク化された光地上局を小金井・沖縄・鹿島に設置し、気象センサデータ等を活用するサイトダイバーシチを技術実証するテストベッド構築を推進した(図2.3.12)。宇宙データシステム諮問委員会(CCSDS)において、宇宙光通信の標準化に関して、今後整備される文書の一つ“Real-Time Weather and Atmospheric Characterization Data”を、NICTがEditorとなり標準化寄与文書として編纂予定である。

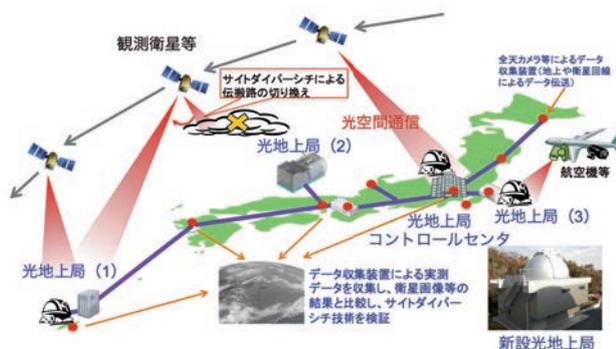
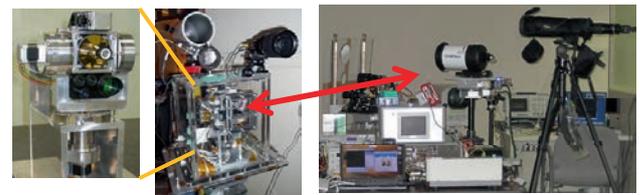


図2.3.12 ネットワーク化された光地上局テストベッド

(3) 小型衛星搭載機器を用いた光通信の衛星実証計画

小型衛星搭載用の小型光トランスポンダ(SOTA)の開発を進め、EFMの宇宙環境試験を行い、符号技術の検討及び地上局大型望遠鏡の新設を進めた。SOTAのEMやEFMと対向する距離約1 km間の光通信試験を行い、大気ゆらぎの影響下における光学的な捕捉追尾機能及び通信機能の動作を確認した(図2.3.13)。平成26年5月に、SOTAを搭載した50 Kg級小型衛星SOCRATESが打ち上げられ、実験も順調に行われている。



SOTAのEFM

対向試験装置

図2.3.13 距離約1km間の光通信試験

2.3.9 再構成通信機

近年の商用衛星の設計寿命は10年から20年程度であり、これまでの衛星搭載中継器は軌道上で搭載機器を変更できないことから、地上の技術革新があった場合、それに追従して新しい機能、性能の追加が難しかった。再構成通信機は自らの構成を変えることが可能で、かつ、仮に機器の一部が故障しても、機能が全て失われるのではなく、残った部分を有効活用し、再構成することによって段階的な能力低下が行える。そこで地上通信網との融合を含めたアプリケーション実験を考慮したEFMの開発を行った。さらに、再構成通信機自体の高機能・高性能化のための広帯域化を目指し、16 APSK-OFDM (3.2 Gbps) RF信号ダイレクト変復調装置を開発した。平成26年4月に10 GbEインタフェースを介して、4K超高精細映像のWINDS衛星映像伝送実験(図2.3.14)に成功した。

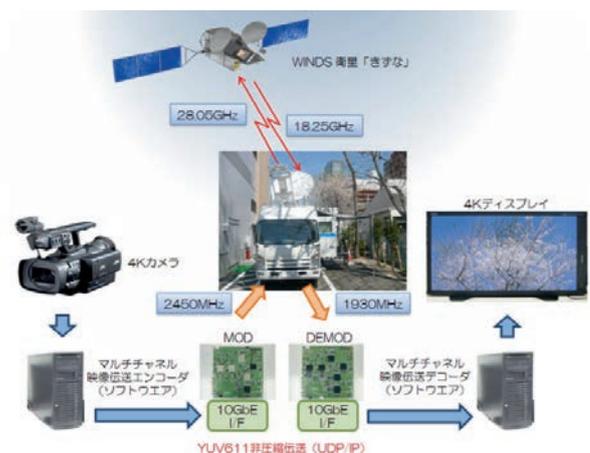


図2.3.14 16APSK-OFDM (3.2Gbps) 4K 超高精細映像 WINDS 衛星映像伝送実験概念図

2.3.10 軌道に関する研究

(1) 軌道上保全技術

故障衛星の遠隔検査技術の研究として、故障したターゲット衛星に接近し、画像情報処理により遠隔検査するための要素技術である衛星遠隔検査用カメラについて、デジタルカメラ及び画像処理装置から成るミッション機器を搭載したマイクロラブサット1号機が、平成14年に打ち上げられた。マイクロラブサット衛星が停波となった平成18年秋までの間に、民生技術を活用して開発した低コストで高性能な搭載計算機とカメラの軌道上遠隔検査の部分的先行宇宙実証に成功した。また、カメラ駆動用2軸機構や制御回路用の動作ソフトウェア・方向制御プログラムなどを開発し、機能試験用カメラの開発を完了した。さらに、ステレオカメラを用いた対象衛星までの距離測定方法を考案し、シミュレーションにより検証した。

(2) 精密軌道管理技術に関する研究

通信衛星の通信信号相関を用いる多地点受動測距方式を開発するとともに、主局における測距機能及び遠隔局を含む2局に拡張したリアルタイム測距機能を開発した。平成22年度に実用衛星通信システムに適用し運用した結果、世界水準の10倍の精度(10 cm)を得るとともに、軌道決定精度1 m (RMS) を実現した(図2.3.15)。これにより実用衛星での通信回線運用条件に合わせ、データ量を削減しても軌道決定精度を維持できることを示した。Cバンド及びKuバンド衛星の通信信号を受信し、衛星の軌道位置を監視する可動基線電波干渉計、Cバンド可搬型小型電波干渉計、光学望遠鏡による静止衛星軌道観測システムを組み合わせ、静止衛星軌道監視の長期的運用を平成12年度より実施した(図2.3.16)。特に混雑が激しい軌道位置に対し、高精度の連続監視データを取得し、衛星運用機関へ情報提供すると共に、平成13年度より望遠鏡画像に基づく静止衛星の位置情報をインターネット上で提供した。

低軌道小型衛星を観測可能とするため、既存の35 cm望遠鏡を改良し、衛星の位置検出精度を向上させ、低軌道衛星の追尾試験及び主焦点部に接続したCCDカメラによる撮像テストを平成25年度より実施した。小型光トランスポンダを用いた軌道決定の実験に向けて、衛星

からのレーザ光の波長に対する補正レンズ系の透過率の調査を実施した。SLR技術やキャリア信号を用いた受動測距による軌道決定技術の開発も継続した。

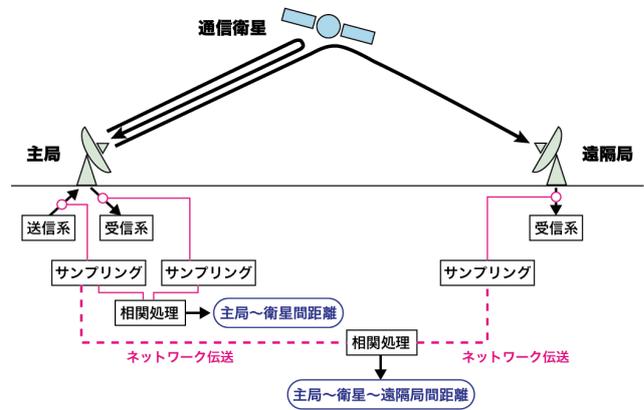


図2.3.15 リアルタイム多地点受動測距の原理

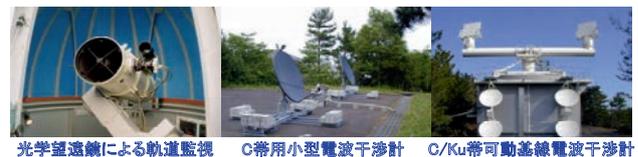


図2.3.16 光学望遠鏡と電波干渉計を組み合わせた軌道監視

2.3.11 適応型衛星通信技術の研究開発

Ka帯の降雨減衰対策の研究開発として、衛星と地球局が連携した適応通信制御による回線稼働率向上のための技術開発を平成19年度から22年度にかけて行った。APAA技術を高度化するスキャンニング型可変スポットビームアンテナ技術の研究を進め、ビーム指向方向やビーム径を可変とする光制御ビーム形成方式を開発した。多値変調技術、誤り訂正符号化技術及び送信電力制御等の組み合わせにより、Ka帯における回線マージンとして30 dB以上を確保し、回線稼働率が99.99%以上を確



図2.3.17 適応型デジタル中継器と対応する地球局装置を接続した総合試験環境の外観

保できることを示した。また、マルチビーム及び偏波多重技術等を総合して、周波数利用効率が10倍以上得られることを示した(図2.3.17)。

2.3.12 ミリ波衛星通信の研究開発

ミリ波帯で広帯域の実時間遅延(TTD)特性を有する光制御アレイアンテナ技術を開発・実証した。光制御アレイアンテナ技術において、レーザダイオード(LD)光源の温度・電流制御による振幅、位相制御を0.1 dB、0.3度の精度で達成した。アンテナ素子毎に光ファイバと変調器を用い、LDの温度と電流を制御する方式の光制御フェーズドアレイアンテナをマイクロ波帯において実証した。ミリ波衛星通信回線の降雨減衰補償技術では、複数のKu帯衛星の降雨減衰データを取得し、衛星軌道ダイバーシティにおいて方位差を40度とれば良いことを明らかにした。

電波利用料(平成17～21年度)により、地上と航空機を40 GHz帯のミリ波を用いた高速リンクを実現するため、航空機搭載アンテナ及び地上アンテナを開発した。航空機-地上局間で100 Mbpsの接続を達成し、インターネット接続を確立した(図2.3.18)。

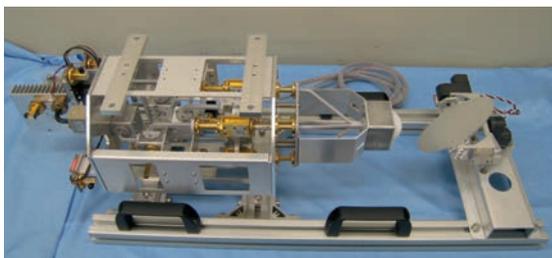


図2.3.18 航空機を捕捉追尾するミリ波帯地上アンテナ

2.4 ネットワークセキュリティ技術

2.4.1 第1期中期計画

(1) 概要

第1期中期計画においては、ネットワーク領域の研究開発の一分野として「情報セキュリティ分野の研究開発」が位置づけられ、「情報通信危機管理基盤技術の研究開発」及び「ネットワークセキュリティ技術の研究開発」が実施された。計画当初は、「情報通信部門非常時通信グループ」が情報通信危機管理基盤技術の研究開発に取り組んだが、平成16年1月に「情報セキュリティセンター（通称）」が発足し、1室3グループ体制（情報セキュリティ推進室、セキュアネットワークグループ、セキュリティ高度化グループ、セキュリティ基盤グループ）にてネットワークセキュリティ技術の研究開発を含む情報セキュリティ研究を一体的に推進し、かつ対外的な連携を一層強化するために産学官有識者から成る「情報セキュリティサポートメンバー会議」を開催するなど、社会ニーズも踏まえ、NICTにおける情報セキュリティ研究への取組みを本格化させた。

(2) 研究成果

a) 情報通信危機管理基盤技術の研究開発

- ①被災者安否情報登録検索 (IAA) システム (図2.4.1) の有効性を実際の災害を通じ社会にアピール。不正アクセス再現について、実験系の連携を実現。

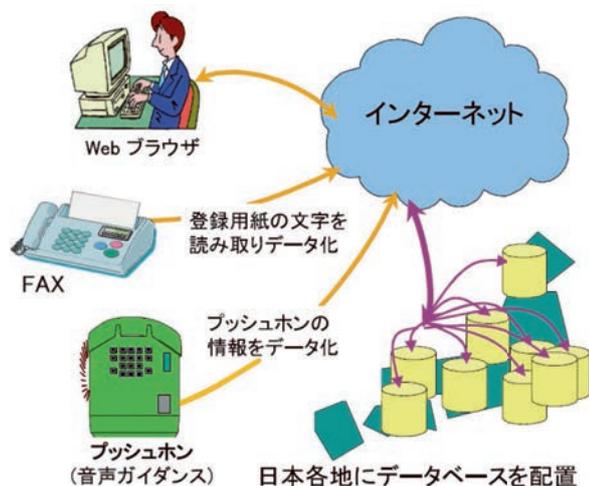


図2.4.1 IAA システムの概念図

- 平成13年に開発した大規模 IAA システムはこれまでいくつかの動作実績を積み重ね、新潟県中越地震等 (表2.4.1) で実際に運用すると共に、大量アクセスにも耐えられる体制にした。

表2.4.1 IAA システムの稼働実績

対応年月	実験運用対応内容
2000年4月	有珠山の噴火
2000年6月	伊豆諸島三宅島
2001年9月	米国同時多発テロ事件
2003年3月	イラク関連
2003年7月	宮城県北部地震
2003年9月	2003年十勝沖地震
2004年10月	新潟県中越地震
2004年12月	スマトラ沖地震
2005年3月	福岡県西方沖地震
2005年3月	スマトラ沖地震

- 不正アクセス再現実験を、目的に応じて実機の集合体 (SIOS) あるいは仮想マシンの集合体 (VM nebula) で実施可能とした。不正アクセスの模倣や過去の事案検索の環境も整備した。
- ②実時間トラフィック中のセキュリティイベントを2分以内に自動分析が可能な技術基盤を構築
 - イベントログ分析では、Telecom-ISAC、大学研究機関等との連携体制を確実なものとし、イベント分析用プラットフォームを構築すべく、要素技術、連携技術を確立した。
- ③匿名パスワード認証型グループ鍵交換スキームの概念と、Tempest fonts の有効性を確認し新たな画面再現対策手法を提案
 - 匿名パスワード認証型グループ鍵交換 (APAKE) スキームの概念を提案し、その実現手法としてプロトタイプを設計すると共に、その安全性を証明した (平成17年度)。
 - 電磁波による画面再現攻撃に対するソフトウェア的対策技術である Tempest fonts の有効性と限界を実験により評価し、改良方法を提案した (平成16年度)。PC から漏洩するモニタ表示画像情報に関する定量的評価手法を提案した (平成17年度)。

b) ネットワークセキュリティ技術の研究開発

- ① ハッシュ関数 SHA-1 の危殆化等に対し、セキュリティ技術への影響を解析し、問題点を調査報告することにより政府の政策に貢献
 - 独立行政法人情報処理推進機構 (IPA) と共同で CRYPTREC (2.4.3 (2) d) 参照) の中の暗号技術検討会の下に設置された暗号技術監視委員会を開催し、電子政府システムに利用されるべき安全性と処理性能を持つ暗号アルゴリズムを選定し、推奨暗号リストを策定した。
- ② IP トレースバック・アルゴリズム及び IP トレースバック技術について、基本的な機能設計を完了
 - ログ収集管理システム及び不正アクセス発信源探査技術を開発し、増加の一途をたどるネットワーク上の脅威に対して、対策を可能とするシステムを開発した。
 - 2.4 Gbps クラスのトラフィックに対して、超高速プローブシステムがトラフィック分析、情報収集、更に上位の情報収集システムへ必要な情報の引き渡しが可能であることを確認し、実用的プローブシステム開発への基盤を構築した。

2.4.2 第2期中期計画

(1) 概要

第2期中期計画においては、安心・安全のための情報通信技術領域の研究開発の一分野として「情報セキュリティ分野の研究開発」が位置づけられ、「ネットワークセキュリティ技術の研究開発」、「暗号・認証技術及びコンテンツ真正性保証技術の研究開発」、及び「防災・減災のための情報通信技術の研究開発」が実施された。研究体制としては「情報通信セキュリティ研究センター」の下、1室4グループ体制(推進室、インシデント対策グループ、トレーサブルネットワークグループ、セキュリティ基盤グループ、防災・減災基盤技術グループ)となった。

(2) 研究成果

a) ネットワークセキュリティ技術に関する研究開発

- ① インシデント分析センター“NICTER”の構築及び運用
 - 平成17年度にインシデント分析センター

“NICTER”(ニクター)の基礎検討を開始し、平成18年度の第2期中期計画期間開始時から研究開発を本格化させ、当該期間中に実用化レベルの技術水準を持つシステムを構築した。なお、NICTERの研究開発は第3期中期計画においても継続中であるため、詳細については2.4.3(2)においてまとめて記述する。

- 現状のインターネットだけではなく、IPv6環境におけるセキュリティ対策技術の研究開発を推進した。本取組の一環として、NICTが中心となって「IPv6技術検証協議会」を設立し、IPv6の一般家庭・企業等への本格的な普及に先立つ、抜本的なセキュリティ対策技術の検討を開始した。
- ② トレーサブルネットワーク技術の確立
 - トレーサブルネットワーク技術による遡及解析、現象の再現、情報漏洩範囲の特定に関する研究では、仮想マシンを用いた追跡技術において、Peer-to-peer (P2P) 型ネットワークにおける情報漏洩の追跡方式を開発した。
 - 発信元追跡技術に関しては、仮想マシンモニタを改良し、不正アクセス発生時点のメモリ、ディスク内容を捕捉可能とすることにより、メモリ内容を自動分析し、99%以上の確率でメモリ内の攻撃ベクタを捕捉できる機械学習アルゴリズムを開発した。
 - 再現ネットワークの活用による検証技術に関しては、大規模な再現・検証に必要なインターネットの模倣技術として、インターネットの中核部分である自律システム (AS) 間ネットワークの模倣について、実際の AS 間ネットワークの規模の3分の1に相当する10,000 AS から成る模倣 AS 間ネットワークの構築に成功した。
 - トレースバックの追跡性能向上のための研究開発の一環として、プライバシーを確保しつつ発信元追跡を実現する要素技術の研究を行った。プライバシー確保のため、紛失通信プロトコルを利用した秘匿共通集合計算プロトコルの研究を行い、紛失通信技術においては従来方式と比べ、数学的制約を大幅に緩和 (DDH assumption) することに成功した。

- 組織間でサイバーセキュリティ情報の交換を実現すべく、情報をコンピュータ上で扱うためのセキュリティの情報オントロジを構築した。本オントロジは、サイバーセキュリティの観点から必要なオペレーションドメイン、エンティティ、情報をモデル化しているため、交換すべき情報とその情報の利用形態を抽象化し共通化できる。サイバーセキュリティ情報交換フレームワーク(CYBEX)として国際標準化に貢献した。

b) 暗号・認証技術及びコンテンツ真正性保証技術の研究開発

- ①離散対数問題解読の世界記録(676ビット)を樹立(平成21年度)するとともに、離散対数問題に安全性を帰着させる暗号技術において適切なパラメータ選択を可能にすることで安全性向上に貢献した。
- ②公開鍵暗号RSAの安全性に関する予測を、素因数分解アルゴリズムの計算量コストと計算機環境の進化予想からまとめた。また、日本銀行と共同で暗号アルゴリズムの移行期間について定量的見積り手法を導出するなど、公的機関との連携を深めた(平成21年度)。
- ③CRYPTRECの運営について貢献し、次期電子政府推奨暗号の評価、利用者・運用者向けのガイドとなるリストガイドの作成、平成17年に発生したハッシュ関数SHA-1危殆化対策及びRSA-1024移行問題について貢献した。なお、CRYPTRECについては2.4.3(2)d)にまとめて記述する。

また、上記①～③に加えて、電磁波セキュリティの研究開発の取組として第1期中期計画で実施した2.4.1(2)a)③の研究を継続し、以下のような成果が得られた。

- IT機器が放射する電磁波に含まれる情報量を定量的に評価する手法を確立し、電磁波の受信から情報漏洩する脅威を明らかにした。電磁波と漏洩情報量の関係を明らかにし、適切な測定手法及び対策技術の効果の評価手法を確立した。
- 情報通信機器から漏洩する電磁波を介した情報漏洩について定量的な評価手法を確立した。また、対策技術については画面情報漏洩対策としてソフトウェアで実現する手法(図2.4.2)を開発した。この手法に関して特許を取得した上、ベンチャー

企業へ技術移転し製品化を実現した。

- ①「大規模災害時に強い通信技術」について、通信時間制限による輻輳制御技術や携帯電話ネットワーク及びアドホックネットワークについて、現実に近い詳細なモデルを用いてシミュレーション評価を実施。また、有無線統合アドホックネットワークによる自営通信機能の開発により、大規模災害時にも切れない通信技術を達成し、その技術を用いて災害対応ロボットの災害時の通信技術を開発した。
- ②「防災・減災情報を的確に収集・利用できる技術」について、被災地からの詳細情報が届かない段階で



対策前は傍受可能だが、対策後は傍受不可能



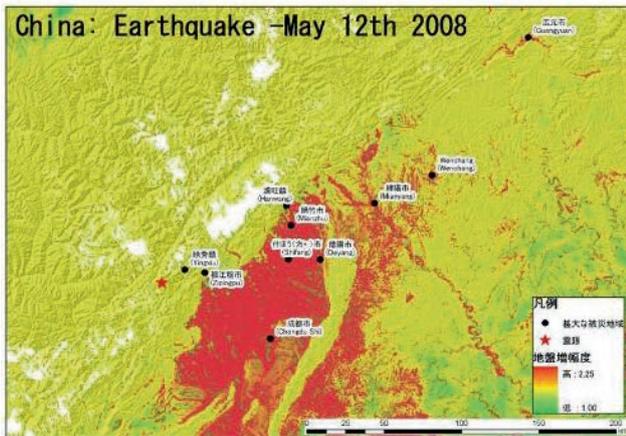
電磁波情報漏洩対策強化ソフトウェア CrypType

図2.4.2 電磁波による情報漏洩対策イメージ図

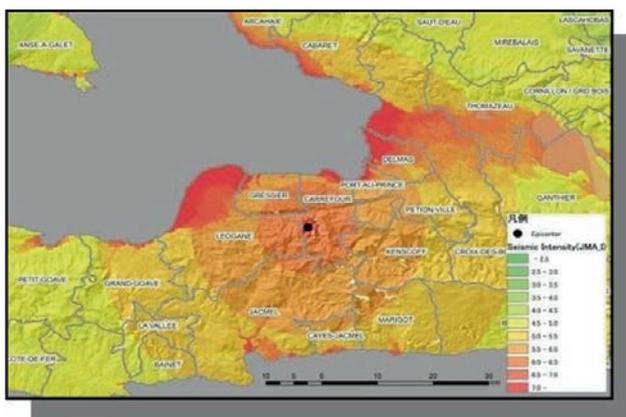
c) 防災・減災のための情報通信技術の研究開発

- ①「大規模災害時に強い通信技術」について、通信時間制限による輻輳制御技術や携帯電話ネットワーク及びアドホックネットワークについて、現実に近い詳細なモデルを用いてシミュレーション評価を実施。また、有無線統合アドホックネットワークによる自営通信機能の開発により、大規模災害時にも切れない通信技術を達成し、その技術を用いて災害対応ロボットの災害時の通信技術を開発した。
- ②「防災・減災情報を的確に収集・利用できる技術」について、被災地からの詳細情報が届かない段階で

あっても建物被害を迅速・大まかに推定する手法及び地震被害推定システムを開発し、技術移転を行った。図2.4.3に震度分布の推定結果および図2.4.4に地震被害推定システムを用いたデモの様子を示す。



(1) 中国四川地震の震度分布推定結果



(2) ハイチ地震の震度分布推定結果

図2.4.3 震度分布の推定結果



図2.4.4 APECにおける地震被害推定システムを用いた日本-タイ間の国際デモの様子

2.4.3 第3期中期計画

(1) 概要

第3期中期計画においては、ネットワーク基盤技術の研究開発の一分野として「ネットワークセキュリティ技術の研究開発」に焦点を当て、「サイバーセキュリティ技術の研究開発」、「セキュリティアーキテクチャ技術の研究開発」及び「セキュリティ基盤技術の研究開発」が進められている。研究体制としては「ネットワークセキュリティ研究所」の下、1室3研究室体制(企画室、サイバーセキュリティ研究室、セキュリティアーキテクチャ研究室、セキュリティ基盤研究室)となった。

(2) 研究成果

a) サイバーセキュリティ技術の研究開発(第2期中期計画期間の成果を含む)

平成17年度にインシデント分析センター“NICTER”の基礎検討を開始し、ダークネット(未使用のIPアドレス群)に届くトラフィックからインシデントの自動検出を行う分析エンジンや世界地図上でのダークネットトラフィック可視化エンジン(図2.4.5)のプロトタイプ開発を行うなど、ダークネット観測に関する実現可能性の検証を行った。



図2.4.5 2D版ダークネットトラフィック可視化エンジン(平成17年度)

平成18年度は、マルウェアの自動解析システムの研究開発に着手するとともに、マルウェア検体の収集機構の整備を開始した。また、ダークネットトラフィックを3D表示する可視化エンジン(図2.4.6)のプロトタイプ開発を行った。

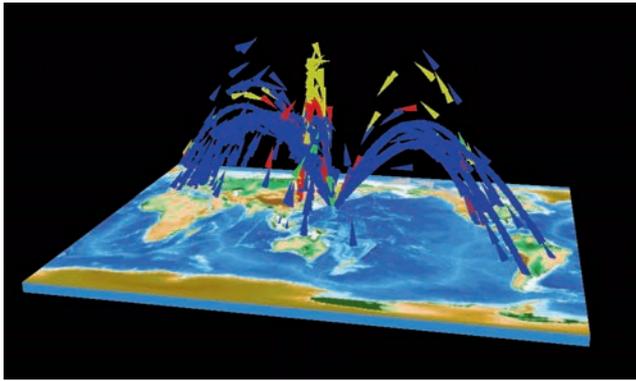


図2.4.6 3D版ダークネットトラフィック可視化エンジン
(平成18年度)

平成19年度には、国内のダークネット観測規模を倍増させ、NICTERの情報収集能力が大幅に向上した。また、NICTERのシステムデザインを一新し、大規模ネットワーク観測に基づくマクロ解析、マルウェア自動解析に基づくミクロ解析、そしてマクロとミクロを融合させたインシデント発生原因の自動推定という基本コンセプトを確立した。さらに、ダークネットトラフィック可視化エンジンの高度化を進めた(図2.4.7)。

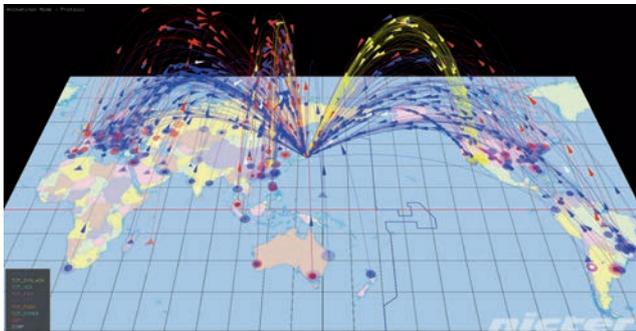


図2.4.7 ダークネットトラフィック可視化エンジン Atlas
(平成19年度)

平成20年度は、マルウェア検体の収集体制を強化し、複数の機関からマルウェア検体の提供を受け、ミクロ解析システムにおいて1日あたり数千検体の自動解析を開始した。さらに、ミクロ解析システムを応用した、マルウェア駆除ツールの自動生成及びユーザへの自動配布システムのプロトタイプ開発を行った。

平成21年度には、ダークネット観測規模を14万アドレスまで拡大するとともに、マルウェア検体収集能力強化を図るため高対話型ハニーポットを開発し、運用を開始した。また、外部の研究者にNICTERの各種収集情報を安全に提供するためのオープンプラットフォーム

“NONSTOP”(ノンストップ)の開発と試験運用を開始した。さらに、ライブネット(稼働中のネットワーク)のリアルタイム可視化システム“NIRVANA”(ニルヴァーナ)(図2.4.8)を開発し、国内企業への技術移転を行った。

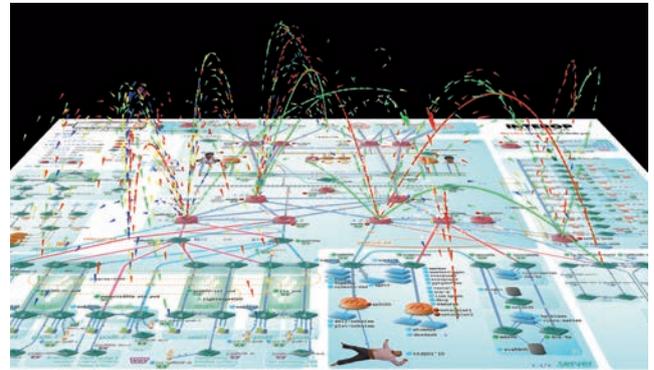


図2.4.8 ネットワークリアルタイム可視化システム NIRVANA
(平成21年度)

平成22年度は、大規模ダークネットに基づくアラートシステム“DAEDALUS”(ダイダロス)の開発を本格化させ、アラートの集約手法を確立するとともに、アラート管理用のWebインターフェースの開発を行った。また、機構内ネットワークにDAEDALUS及びNIRVANAを導入し、実環境での試験運用を開始した。

平成23年度は、異種センサを能動的に切り替え可能にする新たなダークネット観測アーキテクチャを設計し、基礎評価を行った。また、ダークネット観測結果を応用し、被災地周辺のネットワークの死活状況の推定を行うシステムACTIVATEの提案と基礎評価を行った。さらに、Webを介したドライブ・バイ・ダウンロード攻撃対策フレームワークの基礎設計及びプロトタイプ開発を行った。また、NICTERの観測結果の一部について、Webサイト“NICTER Web”(ニクター・ウェブ)(図2.4.9)での外部公開を開始した。

平成24年度には、DAEDALUSのアラート発生状況をリアルタイムに俯瞰可能な可視化エンジン“DAEDALUS-VIZ”(ダイダロス・ヴィズ)(図2.4.10)を開発するとともに、DAEDALUSのアラート情報を外部展開するための仕組みを整備し、国内企業への技術移転を行った。また、ダークネット観測規模を21万アドレスに拡大するとともに、サイバーセキュリティ分野における国際連携の一環として、NICTERセンサの海外展開を実施した。

さらに、標的型攻撃対策技術の研究開発に着手し、ライブネットに対する各種異常検知エンジンのプロトタイプ開発を行い、NICT内ネットワークでの実証実験を開始した。

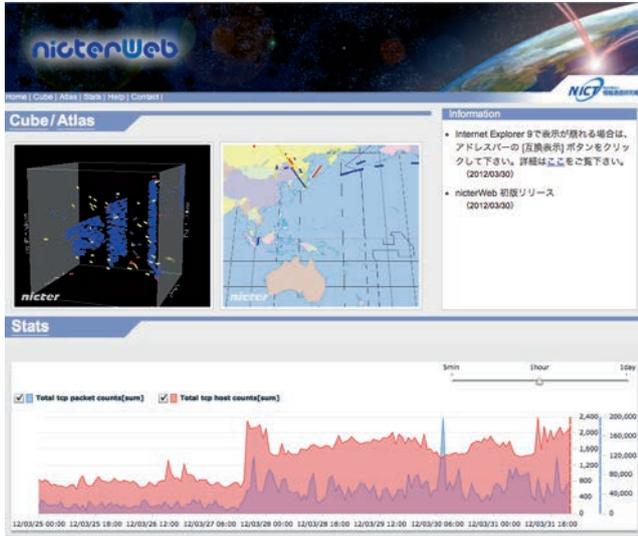


図2.4.9 NICTER Web (平成23年度)



図2.4.10 DAEDALUS-VIZ (平成24年度)

平成25年度は、標的型攻撃対策技術として、サイバー攻撃統合分析プラットフォーム“NIRVANA改”（ニルヴァーナ・カイ）（図2.4.11）を開発し、ライブネット観測・分析機能に加えて、各種分析エンジンからのアラート集約を可能にする分析基盤技術を確立した。また、NICTER センサの国内外への展開を引き続き実施し、ダークネット観測規模を約24万アドレスに拡大させた。さらに、財団法人地方自治情報センター（LASDEC）との連携の下、地方自治体への DAEDALUS アラートの提供を開始し、研究開発成果の実社会への導入・活用を進めた。

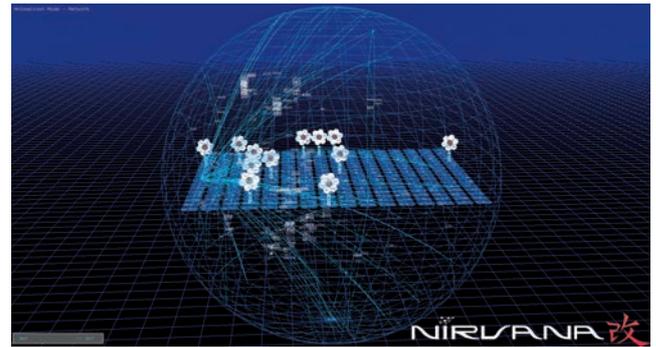


図2.4.11 NIRVANA改 (平成25年度)

b) セキュリティアーキテクチャ技術の研究開発

平成23年度には、ネットワーク利用において適材適所にセキュリティ技術を自動選択し最適に構成するためのセキュリティアーキテクチャの研究開発として、過不足のないセキュリティ技術を判断するための「セキュリティ知識ベース」及び「分析エンジン」の構築に着手するとともに、個別のネットワーク利用方法におけるセキュリティ上のリスクを可視化する「Risk Visualizer」の構築（図2.4.12）を行った。これは5万レコードの脆弱性データベースからネットワーク利用におけるリスクを可視化することが可能である。



図2.4.12 Risk Visualizer プロトタイプ

ネットワーク上に存在する様々なセキュリティ情報をお互いにリンクし、検索可能にすることにより、インターネットを巨大なセキュリティ知識ベースとする「Discovery」技術を構築した。また、インシデント発生時の情報交換を自動化し、オペレーションの自動化を補助する技術として、セキュリティ情報交換フレームワーク「CYBEX」及びインシデント情報を記述するフォーマット「IODEF extension」を構築した。

平成24年度には、ネットワーク利用者のセキュリティリスクを安全性理論に基づき分析し、可視化する「REGISTA」の構築を行い、その有効性を実証した。また、RFID タグなどのデバイスにおいても安全な認証方式 PUF (物理的複製困難関数) について、世界で初めて物理デバイスを用いて評価を行った。

10兆個のデバイスが接続されることを想定する新世代ネットワークにおいて、スケーラビリティ上問題となる、利用しないデバイスの認証の無効化処理について、従来の log オーダーの時間で処理が可能な「Revocable IBE/IBS」を確立し、性能上の実証を行った。これは特に使えなくなるデバイスが多数発生する災害発生時に、認証に必要な運用コストを低下させる効果が大きい技術である。

平成25年度には、StarBED³ (2.6.3 参照) 上に REGISTA システムと、仮想的なエンタープライズネットワークを構築し、エンタープライズネットワークへのリモートアクセスにおけるリスク評価を行った。また、REGISTA をスマートフォン対応とするために、Android のアプリケーション解析機能の追加及びその解析結果と脆弱性情報をセキュリティ知識ベースに蓄積できるようにした。さらに、スマートフォン向けのリスク解析結果可視化アプリケーションを開発した。

クラウド上で流通する情報におけるプライバシー保護方式として、匿名認証と部分秘匿認証を同時に行える黒塗り認証、情報を秘匿したまま計算ができる秘匿集合演算方式、インデックスサイズを 1/7 に削減した検索可能暗号方式を構築し、その安全性を検証した。

c) セキュリティ基盤技術の研究開発

情報通信ネットワークを誰もが安心・安全に利用するためのセキュリティ基盤技術の研究開発として、量子セキュリティ技術、長期利用可能暗号技術、実用セキュリティ技術、暗号安全性評価技術の高度化をテーマに掲

げ、実施している。

① 量子セキュリティ技術

量子セキュリティ技術のネットワーク化を進める上で統一的なセキュリティ評価手法を開発するため、量子秘匿雑音通信方式の安全性評価等を平成23年度に行った。また、量子鍵配送技術と秘密分散技術を組み合わせ、情報理論的に安全な認証機能付き秘密分散方式(図2.4.13)の基本設計を行い、平成24年度には機能拡張及び安全性検証を行った。平成25年度には量子 ICT 研究室等との連携プロジェクト「量子鍵配送を利用したセキュアネットワークの研究開発」において本認証機能付秘密分散方式を量子ネットワーク上で実装し、秘匿・認証ともに情報理論的安全性が保証された方式の世界初の実装となった。

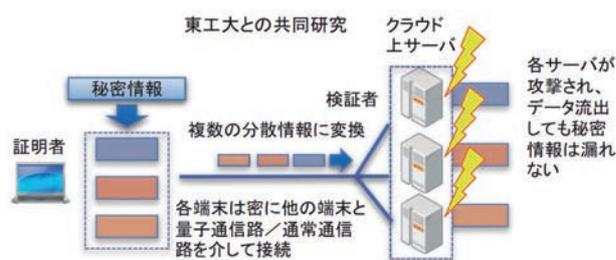


図2.4.13 認証機能付秘密分散方式

② 長期利用可能暗号技術

量子計算機が実現しても安全性を維持できる次世代の公開鍵暗号方式として、平成23年度には格子理論、符号理論の一種である LPN 問題を使った方式の基本設計を行った。また、Braid 群を用いた方式の基本設計を行うと共に安全性評価を行った。安全性評価においてはランダムサンプルアルゴリズムを改良し、従来の30倍の高速化を達成した。平成24年度は、格子理論に基づく方式に重点をおいた研究を行い、特に格子暗号の安全性評価に関してはその根拠となる最短ベクトル問題の難しさの評価を行い、これまでの世界記録を上回る825次元の問題を解くことに成功した。平成25年度は、格子理論に基づく新方式として、暗号化後にセキュリティレベルを変更できる世界で初めての方式を創出した。また、格子暗号の安全性評価を進展させた。

③ 実用セキュリティ技術

サイドチャネル攻撃等の実装攻撃に対する耐性を備えた実用的なセキュリティ技術の研究として、平成23年度は、コールド・ブート攻撃等による秘密鍵漏洩に対して耐性を持つ内積述語暗号の設計を行い、平成24年度には、機能拡張を行うと共に実装性能評価を行った。また、平成24年度には、センサに実装可能な軽量暗号をクラウド上で高速に並列復号処理する実装法を世界で初めて開発するとともに、軽量暗号に求められる安全性・実装性等の要件を規定した国際標準 ISO/IEC29192-1の規格化を完了した。平成25年度は、軽量暗号の評価基盤の構築を開始した。センサ及びクラウドサーバ上で様々な実装性能評価を行い、軽量ブロック暗号の既存暗号に対する優位点を明確化した。さらに、軽量暗号の活用が期待できるアプリケーションとして自動車や制御系、医療機器等でのニーズを調査した。また、機密レベルに応じた処理が可能なセキュアストレージシステム PRINCESS (図2.4.14)を開発した。



図2.4.14 PRINCESSの医療データ管理への応用例
ファイルの機密レベルに応じた共有方法を設定でき、ストレージ上で暗号化したまま、指定メンバーと安全にファイル共有できる。

④ 暗号安全性評価技術の高度化

電子政府推奨暗号の継続的な安全性評価と、将来の暗号技術移行指針への寄与として、電子政府推奨暗号リストに記載されている暗号及び新規応募暗号の安全性評価を行っている。平成23年度から平成24年度にかけては、次世代公開鍵暗号として注目されているペアリング暗号の安全性評価を行うため、

その根拠となっている離散対数問題を解く計算機実験を国立大学法人九州大学、株式会社富士通研究所と連携して行い、923ビットの離散対数問題を解くことに、世界で初めて成功した(図2.4.15)。なお、この記録は平成21年に、公立大学法人公立はこだて未来大学と共同で行って達成した世界記録をも遙かに上回る成果となった。また、ネットワーク上での安全な通信を支えている公開鍵認証基盤における公開鍵証明書のデータを収集し、そこで用いられている公開鍵の安全性を高速に検証し、脆弱性の分布を可視化するシステムの構築を平成24年度に開始し、平成25年度にはSSLサーバ証明書公開鍵検証システムXPIA(エクスピア)として完成した。

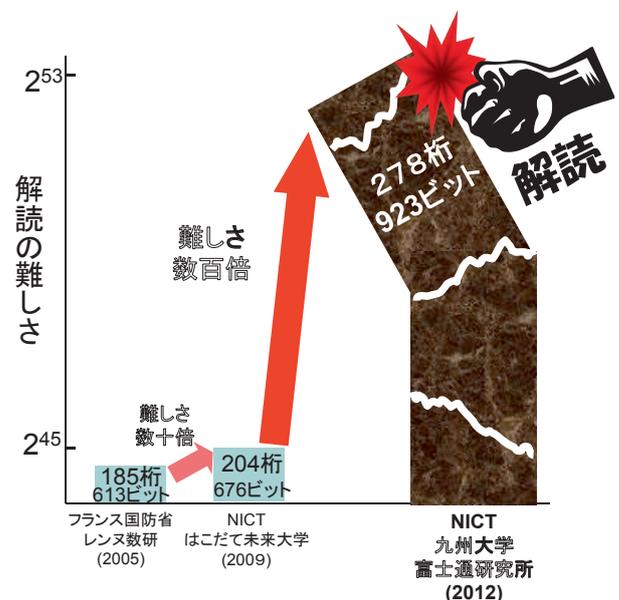


図2.4.15 離散対数問題ベース暗号解読世界記録

d) CRYPTREC

情報通信におけるセキュリティの基盤技術であり、社会インフラに組み込まれつつある暗号技術がその機能を十分に果たしていくためには、容易に解読・危殆化されるものであってはならず、コンピュータの性能の向上や予期せぬ解読技術の発見等を考慮に入れれば、より安全性の高い暗号技術の開発・普及が必要不可欠となる。

総務省、経済産業省、NICT及び独立行政法人情報処理推進機構(IPA)が共同で運営するCRYPTRECは、客観的な評価により安全性及び実装性に優れると判断される暗号技術をリストアップすることを目的に評価活動を

開始し、電子政府推奨暗号リスト(平成15年2月20日)を公表し、その後、平成15年度から暗号技術の監視及び評価活動を継続して行ってきた。

さらに、平成24年度には、この電子政府推奨暗号リストを改定し、暗号技術の安全性及び実装性の観点に加えて、政府調達等における入手し易さや導入コスト、相互運用性と普及度合いの観点も取り入れた新しいリストとして、CRYPTREC 暗号リスト(平成25年3月1日)を公表した。

以下に年代ごとの主な活動を記す。

(1) 平成16～20年度

- ・電子政府推奨暗号の監視を含む、暗号技術の安全性に関する調査(ハッシュ関数 MD5・SHA-1 及び 1024ビットの素因数分解問題に対する安全性に関する見解等)を行った。
- ・暗号モジュール評価基準及び試験基準の策定、暗号モジュールへの非破壊攻撃及び破壊攻撃に関する調査(ISO/IEC 19790 及び ISO/IEC 24759 策定への協力等)を行った。
- ・電子政府推奨暗号リスト(平成15年2月20日)の改定に向けた骨子及び公募要項の作成を行った。

(2) 平成21～24年度

- ・電子政府推奨暗号リスト(平成15年2月20日)の改定に向けた暗号技術の公募及び安全性・実装性評価を行った。
- ・リストの改定における暗号技術に対する製品化・利用実績等の評価について評価方針や評価基準、国際標準技術等との整合性等の検討を行った。

(3) 平成25年度以降

- ・CRYPTREC 暗号リスト(平成25年3月1日)記載の暗号技術等の安全性・実装性に関する検討を行った。
- ・注意喚起レポートの公表や暗号技術ガイドライン(SSL/TLS や SHA-1)の作成を行った。
- ・暗号の普及促進・セキュリティ産業の競争力強化及び暗号政策の中長期的視点からの取組の検討を行った。

表2.5.1 NICT が成立に大きく貢献した将来ネットワーク領域の ITU-T 勧告 (○はエディタとしての貢献も含む)

ITU-T Y.3001 (平成23 年5月)	Future Networks: Objectives and Design Goals	将来ネットワークの4個の目的・方向性(サービス指向、データ指向、環境指向、社会経済指向)と12個の設計目標を規定	
ITU-T Y.3011 (平成24 年1月)	Framework of Network Virtualization for Future Networks	1つの物理ネットワーク上に複数の仮想ネットワーク構築を可能にするネットワーク仮想化に関する勧告	○
ITU-T Y.3021 (平成24 年1月)	Framework of Energy Saving for Future Networks	ネットワークの環境負荷低減に関して、トラヒックのピークシフト、キャッシュの有効利用、クロック速度変更、スリープモード等によりネットワークのエネルギー効率を改善する方向性を記載	
ITU-T Y.3031 (平成24 年5月)	Identification Framework in Future Networks	モビリティをサポートし、データにアクセスしやすくするための識別子の条件整理	○
ITU-T Y.3032 (平成26 年1月)	Configurations of node identifiers and their mapping with locators in future networks	将来網におけるノード識別子の構成法、位置識別子、ノード識別子と位置識別子の交換法	○
ITU-T Y.3033 (平成26 年1月)	Framework of Data Aware Networking for Future Networks	データ指向ネットワークの全体像と、名前付け、経路制御、キャッシュ、セキュリティ、モビリティ等の設計目標	○

Slate：クリーンスレート)」の設計、長期的研究、既存技術からの移行を十分に考慮する実装という目標レベルでは共通していた。平成19年に、基礎研究から応用に至るまでのロードマップの作成、社会・経済的側面の検討、国際標準化の推進、実証実験などを推進する母体として「新世代ネットワーク推進フォーラム」が設立され、NICT が事務局を務め現在に至る。また、同年、「新世代ネットワーク研究開発戦略本部」が発足し、新世代ネットワークのビジョンや、研究開発を先導する中長期的な戦略の策定、研究開発戦略やロードマップの国内外への戦略的発信などを実施した。

第3期中期計画期間の平成23年度から平成27年度は、新世代ネットワークの詳細設計を実施する、いわば「新世代ネットワークをどう創るか」のフェーズであり、NICT では1年前倒して、平成22年度から新世代ネットワーク戦略プロジェクトを立ち上げ、平成27年度末までに NICT の JGN-X に新世代ネットワークのプロトタイプを構築することを目指し、産業界や学術機関と連携しつつ研究開発を実施している。多岐にわたる新世代ネットワーク構築の要素技術群をシステム化するにあたって、新世代ネットワークの基本構造の構成技術に関する研究開発及び複合サービス収容ネットワーク基盤技術の研究開発の2つの大きな括りを用いて、それぞれの技術をシステム化することを目標としている。

あわせて、国際的なポジションの確保のために、国際連携・国際標準化活動を推進している。欧米との研究開発連携の枠組を構築し、NICT 及び産学が新世代ネットワークに関する国際連携研究を開始し、特に ITU-T の

将来ネットワークに関する標準化活動等を推進し、平成23年度に成立した ITU-T Y.3001 をはじめとする将来網の勧告化(Y.3000シリーズ)に貢献した(表2.5.1)。

2.5.2 新世代ネットワーク研究開発戦略本部

新世代ネットワーク研究開発戦略本部(以下、戦略本部)は、平成19年10月に新世代ネットワークに関する研究開発を戦略的に推進するために発足し、平成22年度末に解散した。戦略本部は、新世代ネットワークに関する中長期的な研究開発戦略を策定すること、国際的な連携・競争の中で先導的・主導的役割を果たすこと、長期的・国際的視野を有する ICT 関係の研究開発人材を育成することなどを目的とした。

戦略本部は、発足以来、産学官の連携による研究開発推進体制の整備や今後の国際連携のための関係構築を行ってきた。また、集中的に今後の ICT 分野における研究開発戦略を検討する戦略ワーキンググループ(以下、戦略WG)を内部に設置している。戦略WGでは、新世代ネットワークによる社会問題解決の方向性とそのため技術要件及び新世代ネットワークによる将来の社会ビジョンとそれを実現する技術要件をまとめた報告書「新世代ネットワークにおけるビジョンと技術要件」を平成20年に公表した。ここでは、様々な社会問題や課題を ICT で解決することを基本とし、第1に、現在の社会問題—エネルギー、災害、医療、格差社会、少子高齢化、食糧などの負の部分をはできるだけ最小化し、第2に、人の知の領域を増やす、あるいは、生活の質を向上させる、

生産性を向上させるなど新しい価値を最大化し、第3に、グローバル化が一層進むことによって生じる紛争や対立、格差、過疎といった問題に対して、多様性を尊重し、新たな協調を促進するようなネットワークを構築する、の以上3点をビジョンとして掲げた(図2.5.3)。



図2.5.3 新世代ネットワークビジョン

その後、前述のビジョンを実現するために必要な様々な技術要件を抽出し、それらの中から新世代ネットワークの設計目標として、5つのネットワークターゲット：「価値を創造するネットワーク」、「トラスタブルネットワーク」、「生活環境を支えるネットワーク」、「ユーザが制約を意識しないネットワーク」、「地球にやさしいネットワーク」を打ち出した。そして、これらのネットワークの研究開発戦略を示した「新世代ネットワーク技術戦略(中間報告)」を平成21年に公表した。また、これらの技術の実現を支えるネットワーク科学に関する研究開発戦略としての「新世代ネットワークファンダメンタルズ」を図2.5.4に示す。

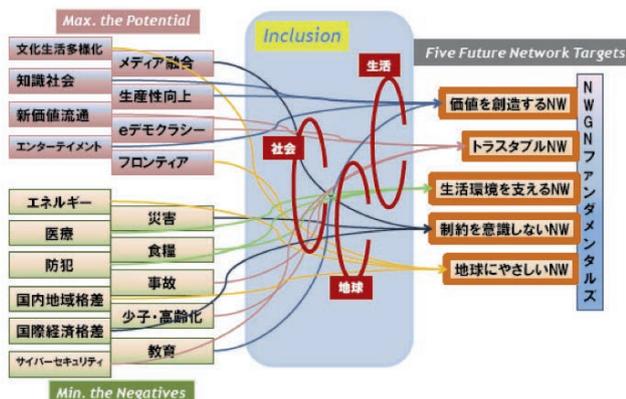


図2.5.4 ビジョンから5つのネットワークターゲットへ

この戦略に基づき、新世代ネットワークの実現を目指し、有線・無線をシームレスにとらえ、物理層からアプリケーション層まで、先端技術から応用技術までを総合的に推進する、新世代ネットワーク推進プロジェクトが平成22年から始まった。

2.5.3 AKARI アーキテクチャ設計プロジェクト (AKARI プロジェクト)

NICT は平成18年5月に、NICT と大学を中心としたAKARI プロジェクトを開始した。このプロジェクトは、現在人類が抱える様々な問題を解決し、地球規模での文明の更なる発展を支え、未来社会を支えるネットワークを白紙からデザインし、平成23年度までに新世代ネットワークに資する要素技術を確認して、20～30年後の情報ネットワーク社会とその基盤ネットワークの実現等を目標にした。新世代ネットワークの要求条件、設計目標、設計原理、有望な要素技術等をまとめた、新世代ネットワークアーキテクチャ概念設計書第1.0版を平成19年4月に公表した。

AKARI プロジェクトは、新世代ネットワークの全体構成及び構成要素を構築する際の判断基準となる設計原理として、結晶合成、現実結合、持続進化という3原則を掲げた(図2.5.5)。これは、新世代ネットワークが、人類の多様な要求を許容し、現実社会と仮想ネットワーク空間のギャップを埋め、人類の進化の可能性を促進するための基盤を提供すると考えていることによる。

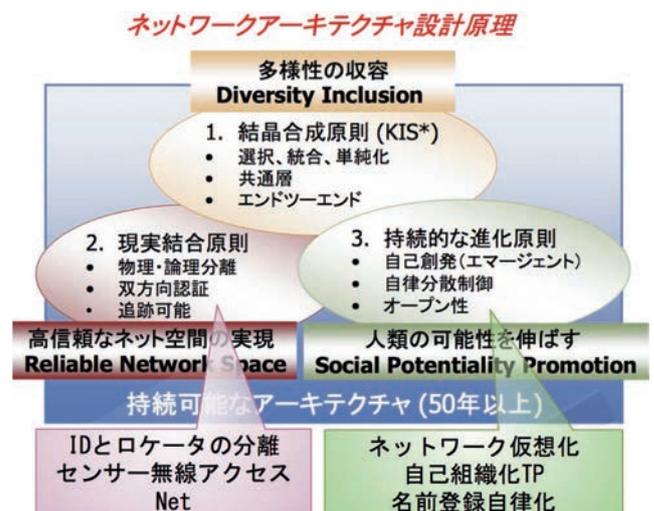


図2.5.5 AKARI アーキテクチャの設計原理

要素技術として、ネットワーク自動構成技術、パケット・パス統合ネットワーク技術、ネットワーク仮想化技術という、先述の新世代ネットワーク戦略 WG の5つのターゲットのうちユーザに制約を意識させないネットワーク実現に貢献する技術や、地域センサ・無線ネットワーク技術という生活環境を支えるネットワーク実現に貢献する技術、ID・ロケータ分離構造というユーザ（ここではアプリケーション開発者）に制約を意識させないのみならずネットワーク階層構造の見直しまで示唆した提案などを行った（図2.5.6）。また、新世代ネットワーク実現にいたる過程に有用なネットワークテストベッドへの要求条件を提案している。

NICT では、AKARI プロジェクトの設計原理と概念設計を基に、平成27年度の要素技術確立と JGN-X 上での新世代ネットワークのプロトタイプ構築を目指し、ネットワークシステムを開発しつつ、それをネットワークテストベッドで利用し広域に展開しながらそれらの概念に基づいたシステムを開発し、実験的に実証している。例えば、ネットワーク自動構成技術は、HANA というシステムに結実し、平成24年度以降 JGN-X の仮想 IP ルータを使い広域展開されている。地域センサ・無線ネットワークは、NerveNet というシステムとして発展し、北海道岩見沢市や NICT 本部での実証試験を経て、平成24年度に無線リンク部に WiFi 及び WiMAX を用いたシステムが国立大学法人東北大学構内に無線テストベッドとして整備された。

2.5.4 新世代ネットワークの基本構造の構成技術に関する研究開発

新世代ネットワークの基本構造（アーキテクチャ）の構成技術に関しては、ネットワーク仮想化技術、モバイルネットワーク仮想化技術、光パケット・光パス統合ネットワーク技術及びスマートネットワーク構築技術の確立を目指している。以下それぞれの技術を概説する。

(1) ネットワーク仮想化技術

ネットワーク仮想化技術とは、共有された物理的な基盤ネットワークを複数の論理的なネットワークとして見せる技術である。これによりサービスごとに仮想化されたネットワークを構築でき、サービスからの要求に基づいて、ネットワーク内に分散クラウド用の計算リソース等を配置し、サービスに応じたネットワーク内処理を実現することができる。ネットワーク仮想化技術は、同時に新世代ネットワーク技術の既存技術にとらわれない白紙からの設計という思想による基本構造の構成技術を実験的に評価・確認するための利用が期待されている。これはネットワークの仮想化を通して、ユーザが、複数のネットワークアーキテクチャを、共有された基盤ネットワーク上に独立に構築、実験、評価をすることが可能になるためである。

ネットワーク実証実験のための基盤技術の研究開発として、PC をノードとするネットワーク仮想化テスト

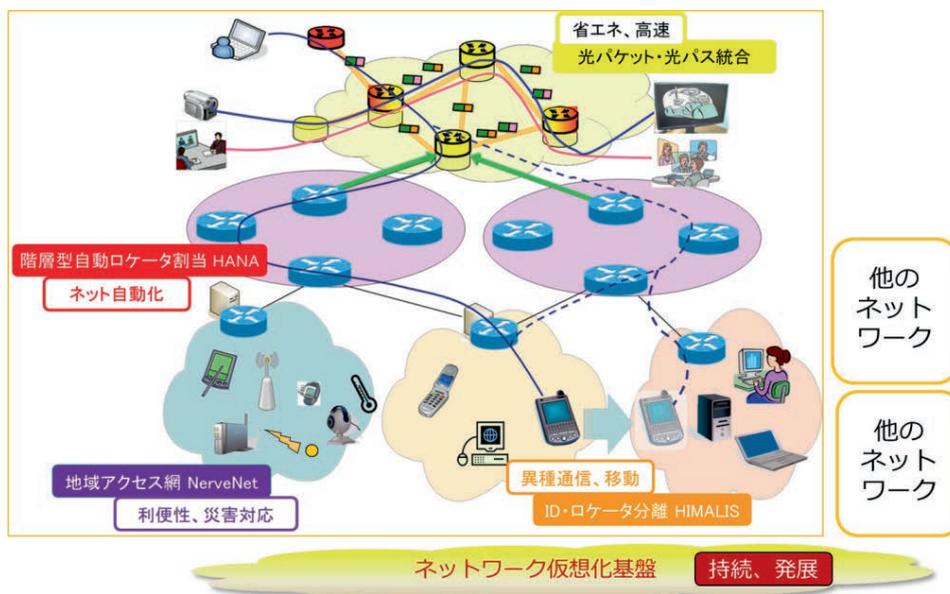


図2.5.6 AKARI アーキテクチャの実装

ベッド CoreLab を国立大学法人東京大学との連携で開発し、展開した。プリンストン大学の PlanetLab をベースとして独自に拡張した管理機能を開発し、仮想資源については、KVM によるホスト型仮想化(スループット・ジッタ・移植性に優位)、OpenVZ によるリソースコンテナ型仮想化(スライス数の観点で拡張性の高い)技術を選択可能なネットワーク仮想化技術を平成20年頃に開発した。また、同時期に仮想資源へのネットワークイメージの高速インストール技術を開発した。これらを、平成21年頃に JGN2 plus に展開して実験できる環境を整えた。当初は、オーバレイの機能のみであったが、トンネル通信機能 GRE を組み込んでより汎用性の高いシステムに拡張、また、OpenFlow 技術を組み込んで、クリーンスレートで高速なシステムに拡張した。

一方、産学との連携により、商用レベルのネットワーク装置をベースに更なるネットワーク仮想化技術の高度化を図った。具体的には、仮想化ノードをルータと OpenFlow スイッチ、汎用サーバをベースに開発し(図2.5.7)、複数のスライスを、それぞれネットワークサービスやアプリケーションの開発を望む利用者に提供する仮想ネットワークのプロトタイプを平成23年までに開発した。平成24年からは、JGN-X 上での試験運用



図2.5.7 仮想化ノード



図2.5.8 NW 仮想化テストベッド

が行われ、複数の研究開発プロジェクトが成果実証のためにそのネットワークを利用している(図2.5.8)。

(2) モバイルネットワーク仮想化技術

モバイルネットワーク仮想化は前述のネットワーク仮想化をモバイルネットワークに拡張するものである。ここでは、概念目標として BYON の実現を提案している(図2.5.9)。BYON では、無線基地局まで伸張されたネットワーク仮想化の技術と、仮想化された資源の移動技術を駆使することで、通信デバイスのモビリティをサポートしながらも、常にユーザの近傍に局所化された専用ネットワークを構築することを目指している。これによって、例えば移動先であってもプライベートネットワークと社内向けネットワークの双方に対して、異なる通信経路や通信プロトコル、また異なる通信品質やセキュリティ性能を保持しながらアクセスすることが可能となる。さらに、BYON の概念では、通常クラウド内に集約されているアプリケーションサーバや制御サーバの機能を、必要に応じてユーザデバイスの近傍に移動させる概念を含む。これによって、デバイスは物理的に遠方にあるクラウドとデータを送受信する必要がなくなるため、アプリケーションレベルでの即時応答性が期待できると同時にネットワーク内トラフィック削減にも貢献できる。また、物理的なデータの到達範囲が限定されることは、本質的に閉域性の高いネットワークを構築することと同じであり、セキュリティ上の脅威に対して耐性の高いネットワーク構築方法とも言える。

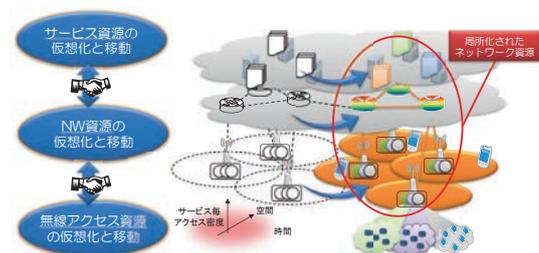


図2.5.9 BYON の概念

これを実現するために、NICT では、平成24年に仮想無線インタフェースの概念を提唱した(図2.5.10)。仮想無線インタフェースは無線基地局が備える物理的な無線インタフェースを適切に抽象化して仮想基地局を構成するための機能モジュールである。例えば、登録サービ

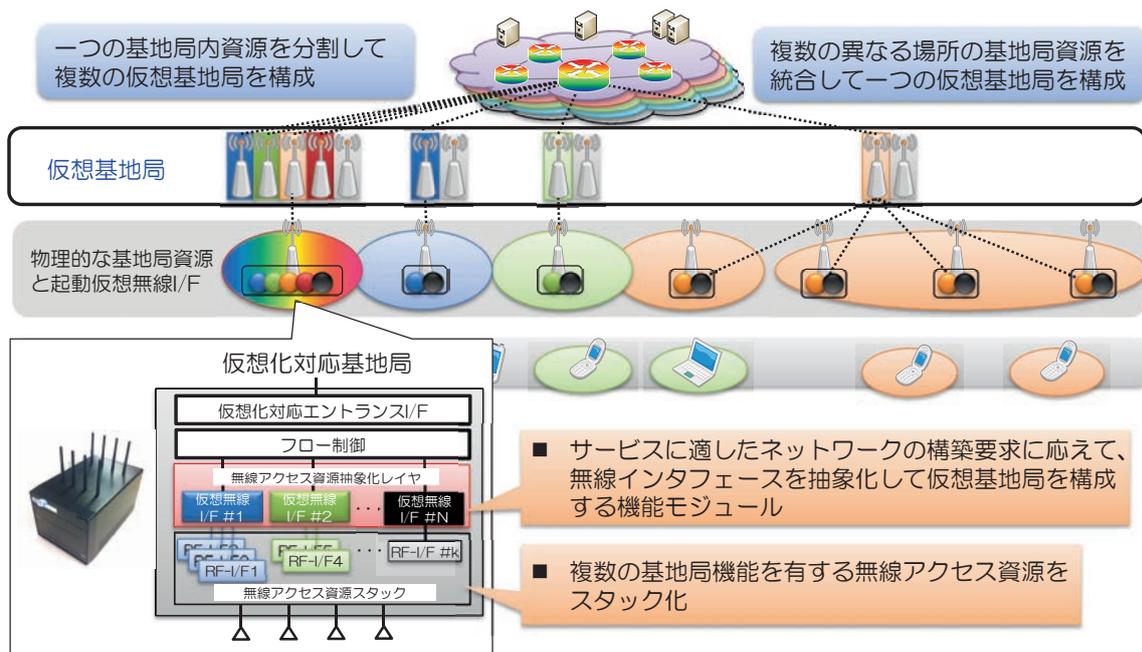


図2.5.10 仮想無線インタフェースの導入と仮想基地局

スに対して構成される仮想ネットワーク毎に仮想基地局を構成し、同仮想ネットワーク上のアプリケーションサーバと端末間のデータの橋渡しを担う。なお、単一の基地局資源を論理的に分割して複数の仮想基地局を構成する場合と、複数の場所の基地局資源を論理的に統合して、単一の仮想基地局を構成する場合の2種類を実現する必要がある。とりわけ後者については、サービス提供エリアを拡大したうえで、提供サービス毎に異なるポリシーの異種無線アクセスシステム間ハンドオーバー制御を採用する等、サービス毎に異なるネットワーク制御を実現するために重要な研究課題と考えている。現在NICT構内にワイヤレス仮想化テストベッドを構築しており、平成26年度末にはNW仮想化テストベッドとの接続を計画中である。

(3) 光パケット・光パス統合ネットワーク技術

パケット交換サービスとエンド・ツー・エンドのパスサービスを利用者に提供する光パケット・光パス統合ネットワーク技術の開発により、これまで以上に高速で安価なサービスと低遅延で低データ損失なサービスを単一光ネットワークで提供することを目指す。ネットワーク事業者視点では、大量のデータ交換能力、省エネルギー、柔軟で効率的な資源利用を簡素な制御で実行するネットワークとなる。具体的な要素技術の成果は2.1.2

に述べたが、JGN-X への実装という観点からは、平成24年に、JGN-Xの光ファイバを含み総長で244 km、最大同時に4パケットを保持できる光バッファを有する光パケット・光パス統合ノード装置を開発し、5ホップ、244 km 伝送した際のパケット誤り率が $10^{-4} \sim 10^{-9}$ 程度の性能をもつことを示した。また、平成25年にOpenFlow 技術との連携に成功した。

(4) スマートネットワーク構築技術

現在のネットワークで問題となっているのは、(1) 経路表の肥大化に起因した、パケットの宛先検索を高速化するための回路の規模と処理量の増加、経路が安定するまでの時間の増加、(2) 複数のレイヤのネットワークを同時に管理運用することによる管理運用コストの増加、(3) アドレス、名前解決の手動設定による人的ミスに起因する安定性の低下、(4) 移動通信時の遅延の増大や異種プロトコル間の情報の不達、等があげられる。

上記の問題を解決するスマートネットワーク構築技術の研究開発の実施により、利用者に高い利便性と信頼性を提供し、可用性が高く運用管理が容易なネットワークを構築した。より具体的には、2.1.3で記したID・ロケータ分離ネットワーク HIMALIS、及び階層型自動ロケータ割当機構 HANA などの開発により実現した。JGN-X への展開という観点では、平成24年に、JGN-Xの仮想

IP ルータ8台を用いた広域ネットワークを構築し、そこから、HANA を用いて階層アドレス構造に従い自動的にIPv4、IPv6アドレスをルータ及びホストに割り当てるネットワークを構築できるようにした。また、同じく平成24年に、端末が有するネットワーク層プロトコルがIPv4であるかIPv6であるかに依存せず動作するアプリケーションを支えるHIMALISをLinuxのカーネルに実装したホスト及びゲートウェイ機構を持ち、HANAによりロケータを割り当てられるネットワークを構築し、小金井からJGN-X上のHANA基幹ルータに接続した。これらJGN-Xでの構築は継続中で、現在、ネットワークに接続するノード数を増やしながらか、実験を実施している。図2.5.11に以上の概略を示す。

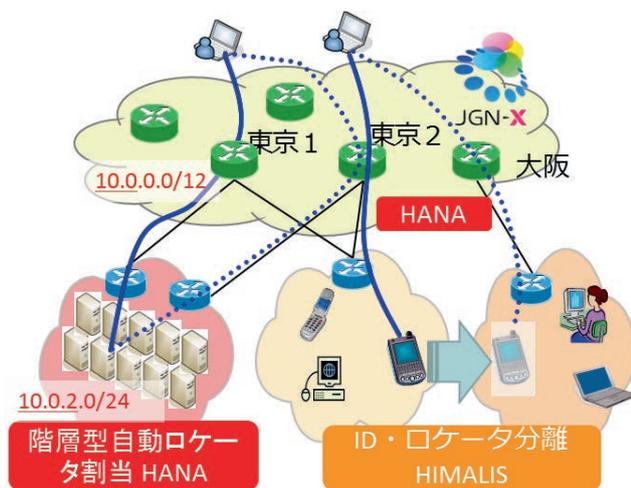


図2.5.11 スマートネットの概念

2.5.5 複合サービス収容ネットワーク基盤技術の研究開発

複合サービス収容ネットワーク基盤技術に関しては、超大規模情報流通ネットワーク技術と価値を創造するネットワークサービス基盤技術の確立を目指している。以下それぞれの技術を概説する。

(1) 超大規模情報流通ネットワーク技術

有無線のネットワーク技術やデバイス技術の発展により、従来は困難であった小さなモノやセンサのネットワーク接続が可能になりつつある。そうした背景のもと、モノやセンサを含む実世界に存在するデバイスを活用し、生活に密着した高度な情報サービスを提供する、いわゆ

るスマートサービス(スマートシティ、スマートホーム、スマートカー、スマート医療等)の実現に対する期待が高まっている。スマートサービスの本格的実現には、様々な技術的課題があるが、特に、ユーザ端末・モノ・センサー・デバイス等の膨大かつ多様なノードをいかにネットワークサービスに接続し、利用可能としていくかが、大きな課題である。近い将来、ネットワークに収容すべきノードの数は兆単位に及ぶといった予測もある。しかし、そうした膨大なノード群を従来のインターネットが基本とするクライアント・サーバを中心としたアーキテクチャで収容することは、莫大なコストとリソースを必要とし、現実的ではない。

超大規模情報流通ネットワークプロジェクトでは、こうした課題の解決を目指し、膨大かつ多様なノード群をネットワークに収容し、様々なスマートサービスを実現可能とする「超大規模情報流通ネットワークサービス基盤」の研究開発に取り組んでいる。大規模化・多様化に対応していくため、各ノードが自律的に動作して規模拡張性を保ち、処理の共有化やデータ転送の最適化等をネットワーク全体として実現する分散型のアーキテクチャを基本としている。ここで開発された技術によって構成されるミドルウェア実装をPIAXと呼び、JGN-X上で利用できるテストベッドを平成24年度から一般公開している(<http://piax.jgn-x.jp/index.jp.html>)。

(2) 価値を創造するネットワークサービス基盤技術

価値を創造するネットワークサービス基盤は、従来のように伝送技術だけに焦点を置くのではなく、ユーザの一手前までがネットワークであり、価値の創造やイノベーションの創出を支援する機能までも含めて提供すべきと考え、その主体である情報サービスへと接続対象を拡大し、情報サービスを様々な組み合わせることで人々の生活や社会システムに直接働きかけることができるようなネットワーク基盤作りを目指している。SCNは、サービス連携に連動して動的にネットワーク資源を制御するための技術で、OpenFlowに代表されるようなプログラム可能ネットワーク基盤と、サービスコンピューティングやクラウドなどの情報サービス基盤の中間に位置するミドルウェアとして実現される。プログラム可能なネットワークは、ソフトウェアからネットワークを操作するためのAPIやコマンドを提供しているが、SCN

ミドルウェアはこの機能を活用して、ネットワークの構成をアプリケーションの実行に適した形に自動的に調整する。

SCN ミドルウェアは、①アプリケーション要求を宣言的に記述するための宣言的サービスネットワーク記述言語 (DSN)、②プログラム可能なネットワークを制御するためのコマンドを実行するためのネットワーク制御プロトコルスタック (NCPS)、③ DSN 記述を解釈し NCPS のコマンド列に変換する機構、によって構成される (図2.5.12)。アプリケーションが DSN を使って「このサービスとこのサービスの間でこんなデータをやり取りしたい」という簡単な要求を与えると、それらのサービスが動いているノードを探したりデータをやり取りするパスを設定したりする NCPS のコマンドを生成し、アプリケーションの要求を満たす最適なネットワークを自動的に作成する。

毎回アプリケーション開発者の要求に対してネットワークの再設定をする必要がなく、管理負荷を軽減することが可能になると期待される。

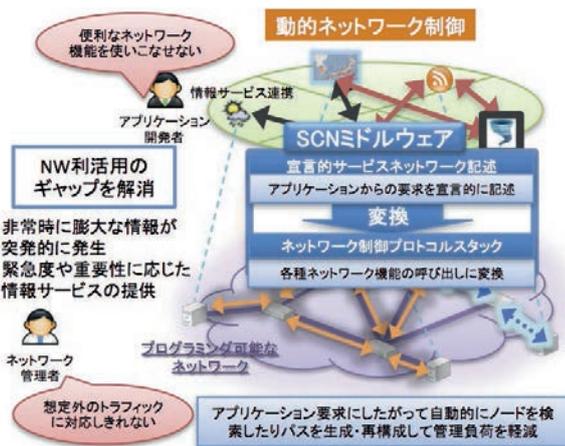


図2.5.12 SCN 技術の概要

SCN ミドルウェアの効果は、災害時など既存システムで想定していない事態が発生した際、ネットワークの高い処理性能と拡張性を生かしながら、膨大な情報を組み合わせることで集約・分析したり、情報サービスの代替サービスを発見し提供したりするなど、既存の情報サービスを様々に組み合わせ刻々と変化する状況に対応させたい場合に発揮される。SCN ミドルウェア技術を利用することで、突発的なアプリケーションからの要求に対しても、ネットワークを動的かつ継続的に再構築することができるようになる。これにより、アプリケーション開発者にとってはネットワークの性能をより効果的に利用できるようになり、またネットワーク管理者にとっては

2.6 テストベッド技術

2.6.1 概要

テストベッド研究開発推進センターでは、テストベッドを活用した研究開発体制を強化しつつ、広域テストベッドネットワーク「JGN」及び大規模汎用ネットワークエミュレータ「StarBED」を運用し、その利活用を促進している(図2.6.1)。

通信・放送機構(TAO)時代の平成11年に研究開発テストベッドネットワーク「Japan Gigabit Network」(JGN)の運用を開始し、平成16年には、大規模マルチキャスト環境やIPv6テストベッドを整備した「JGN2」、平成20年には、新世代ネットワークの開発を見据えた先進的なテストベッド「JGN2plus」として技術動向を踏まえながらネットワーク機能・性能を拡充し、その運用を通じて先進的なネットワーク技術の研究開発や多様なアプリケーションの実証実験等、幅広い研究活動を推進してきた。

また、StarBEDは、TAO時代の平成14年に、512台のPCサーバを相互接続スイッチで接続した大規模汎用のインターネットシミュレータとして構築され、運用を開始した。平成18年には、ミッションスコープをユビキタスネットワークに拡大し、StarBED2としてバイナリーコードレベルで最終製品に近い形でのシステム検証ができる1,000台以上のPCサーバから成るテストベッドを構築し、提供してきた。

これらの運用を通じて、ICTの先進的な研究開発を推

進するとともに、人材育成、地域の研究活動、技術の産業化、国際連携等の促進に貢献し、併せて、様々な知見やノウハウを集積してきた。

平成23年4月、NICTの第3期中期計画スタートに合わせ、テストベッド研究開発推進センターを設置し、テストベッドを活用した研究開発体制の強化とともに、機能・性能をバージョンアップしたJGN eXtreme (JGN-X)及びStarBED³の運用を開始した。

JGN-Xでは、構築・運用の目的を新世代ネットワークの確立とその展開にフォーカスし、日本を縦断する広域ネットワークに様々な新技術を実装するテストベッド環境を活用することで、ネットワークユーザと効果的に連携して、無線・光技術の統合管理、ネットワークの仮想化、多種多様レイヤの運用管理等の研究開発を加速している。

StarBED³では、ミッションスコープを新世代ネットワーク及びそのセキュリティ、サービスに関する技術の研究開発に拡大するとともに、様々な有線・無線が混在したネットワークやサイバーフィジカルシステムへと手法の拡大を図り、大規模エミュレーション基盤としてソフトウェア実装レベルでの実証・検証を可能とするテストベッドを提供し、ネットワーク研究開発を支援している。

当センターでは、これらJGN-XとStarBED³との融合を通じて、シミュレーション、エミュレーション、広域実システム実験までシームレスに実現可能な有無線統合テストベッドを構築してきた。このテストベッド環境

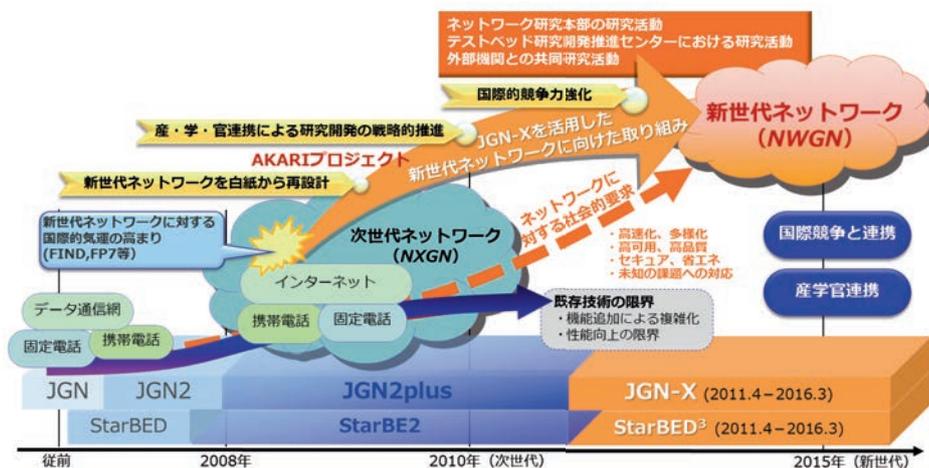


図2.6.1 新世代ネットワークに向けた取組

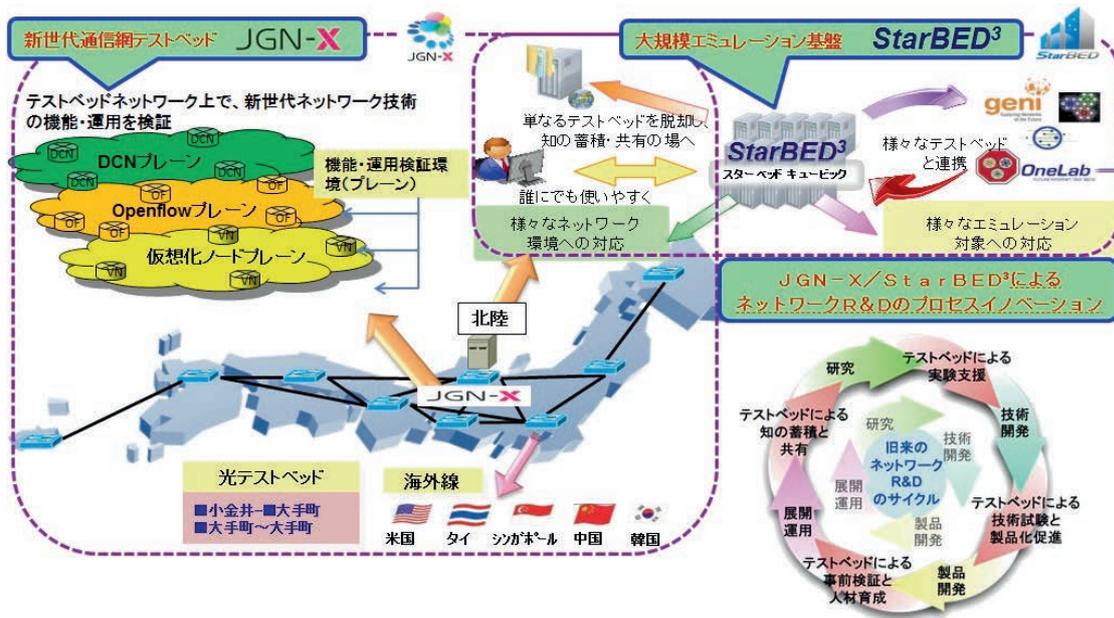


図2.6.2 JGN-X と StarBED³ の概要

を活用し、産・学・官による新世代ネットワーク技術の研究開発と実証をスパイラル的に進展させ、その成果を本環境にタイムリーにフィードバックするとともに、国内外のテストベッドとの連携を拡大していくことで、新世代ネットワークのプロトタイプの新規創出を目指している(図2.6.2)。

2.6.2 JGN の研究、提供サービス、成果

(1) JGN

JGN とは、通信・放送機構 (TAO) が超高速光ファイバ通信網 (ギガビットネットワーク通信回線) と共同利用型研究開発施設 (ギガビットラボ) (図2.6.3) を整備し、平成11年度より平成15年度末までの間、大学、研究機関、行政機関、地方自治体、企業等に開放した広域テストベッドネットワークである。

JGN は、全国10か所の ATM 交換設備及び54ヶ所の接続装置を超高速光ファイバ (最大2.4 Gbps) で結んでおり、当時では世界でも類を見ない大規模な IPv6 対応テストベッドでもあった。

また JGN 関連設備としては、民間企業・研究機関向けに開放されている「共同利用型研究開発施設」(ギガビットラボ: 5か所) と、高速ネットワークの運用・管理技術等に関する TAO の直轄研究施設である「リサーチセンター」(4か所) を整備していた。これにより、光ファ

イバ社会の早期実現に資する研究開発を促進した。

(2) JGN2

JGN2 は、NICT が平成16年4月から平成20年3月まで運用した全国規模のオープンなテストベッドネットワークであり、次世代のネットワーク (NGN) 関連技術の一層の高度化や多彩なアプリケーションの開発など、基礎的・基盤的な研究開発から実証実験までを推進することを目的として整備された。一般の研究者の方々に幅広く活用いただくとともに、全国7か所に整備されたりサーチセンターによる先端的な研究開発の実施により、次世代ネットワークへの道筋を拓き、さらにこうした研究活動を通じて、国際連携の強化、ICT 人材の育成、地域の活性化、産業の活性化に大きく貢献した。

NGN 環境における重要ポイントの1つでもある VoIP/SIP 機器の相互接続試験を主導的立場で実施し、実証実験には、国内外の数多くの機関が参加し、マルチベンダによる機器の相互接続性が確認できた。また、本接続実験にて発見した問題点を踏まえて、技術仕様等を TTC 及び IETF へ提案し、国内・国際標準化活動に貢献した。

IPv6 の普及に向けて、JGN2 IPv6 ネットワークの設定・運用、さらに IPv6 マルチキャストの信頼性検証や負荷検証、相互接続性検証、Firewall の IPv6 化検証等を実施し、各種機器の実用化へ貢献した。複数の放送局と共同

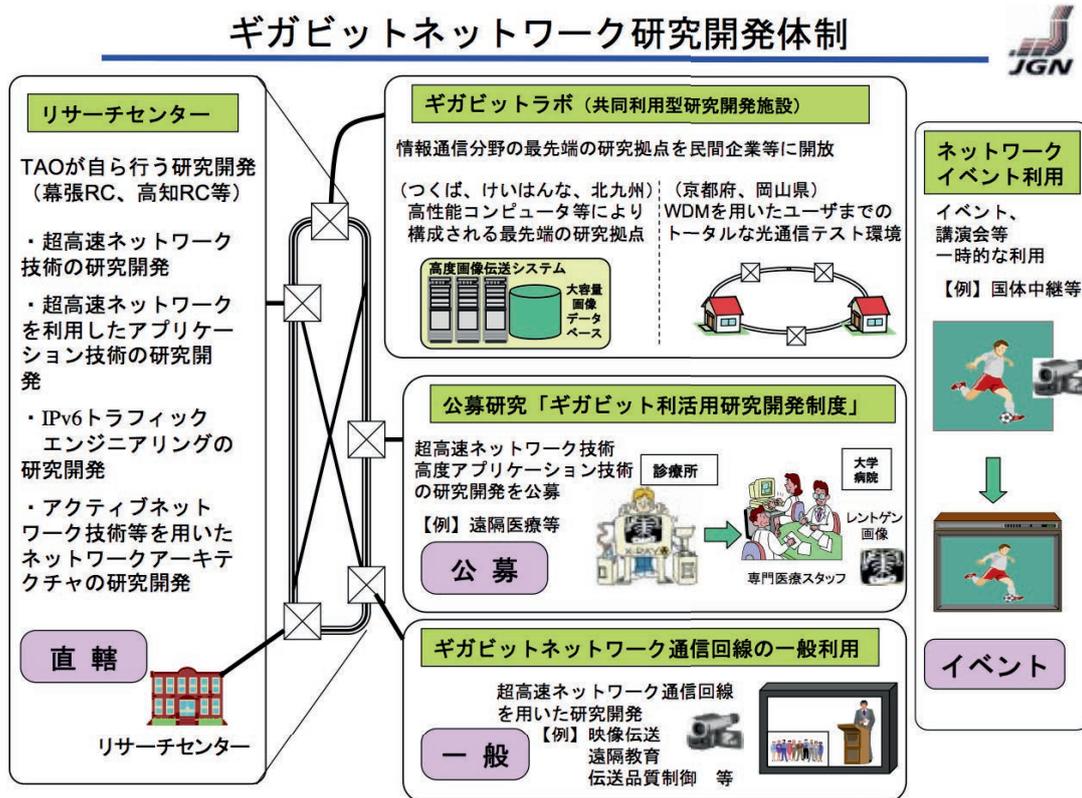


図2.6.3 ギガビットネットワーク研究開発体制

で行ったさっぽろ雪祭りのHD映像伝送実験では、IPv6の放送での実用性を実証した。

研究開発テストベッドネットワークを介したネットワークの研究活動の国際化が著しく進み、各国ネットワークの相互接続が盛んになった。JGN2も米国、タイ、シンガポールへの国際回線を整備し各国のネットワークとの相互接続を図ることにより、国際共同研究プロジェクトを推進することで、我が国の国際競争力の向上と、国際連携を通じた技術の国際展開に注力した。毎年、世界最大規模のデモ展示を開催するSCにも、リサーチセンターをはじめ多数のプロジェクトが参加し、中でも長距離・大容量データ転送速度の世界記録を更新(平成16～18年)するなど、国際競争力の向上としても大きな成果を挙げた。

さらに、平成17年には、光ネットワークの制御プロトコルであるGMPLSを用いたネットワークについて、複数キャリア間・複数ドメイン接続であるE-NNIを世界で初めて実証した。この成果が世界的に評価されたことで、日米の共同研究へと発展し、平成18年にはGMPLSネットワークによる世界初の2国間接続実験を行い、日米3地点間での10 GbpsのE-NNIパスに成功し

(図2.6.4)、技術の実用化及び国際展開に貢献した。また、アジア・太平洋地域との各種の共同研究活動を通じて、我が国が得意とするIPv6の普及を目指す等、我が国の技術の国際展開にも大いに貢献した。



図2.6.4 日米のマルチドメイン間でのGMPLS相互接続実験の構成

また、全国47都道府県のアクセスポイントを有効活用し、JGN2の利用母体である次世代高度ネットワーク推進会議利用促進部会及び全国11地域に設置された19の地域協議会を中心として、全都道府県で各所の研究プロジェクトが立ち上がり、地域の研究活動の活性化に大きく貢献した。地域情報ハイウェイ等との相互接続も積極的に行われ、複数の地方自治体がJGN2を介して公共分野のアプリケーションに関する実証実験等に参加

したり(図2.6.5)、地方自治体の横の連携を強めるなど、新しい形での地域の交流も促進された。

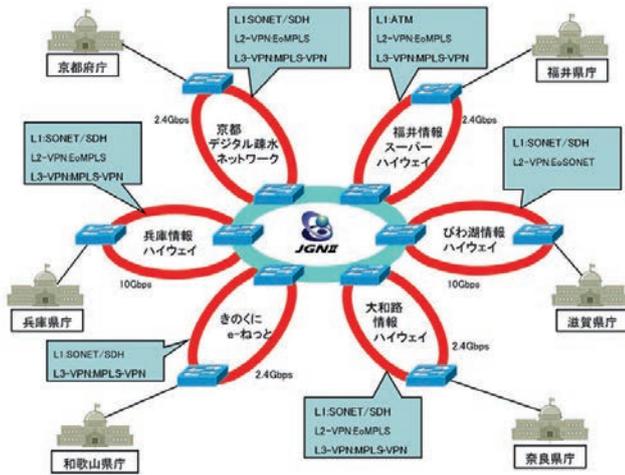


図2.6.5 地域情報ハイウェイ接続のネットワーク構成図
兵庫・京都・滋賀・福井・奈良・和歌山における事例

(3) JGN2plus

JGN2plus は、新世代ネットワークの実現に向けたネットワークに関する運用・管理・利活用技術等の研究開発を行うため、平成20年度から3か年運用・活動してきた。

これらに関連する様々な研究活動を NICT 大手町ネットワーク研究統括センターに集約し、産学官の連携を図りながら研究開発活動を実施した。さらに、新世代ネットワークに係る国内外研究開発プロジェクトとも連携しつつ、全国の主要な拠点と海外の拠点(米国、シンガポール、タイ、韓国、中国)を結ぶ研究開発テストベッドネットワークである JGN2plus を運用することにより、国内

外の研究機関と連携した研究開発・実証実験等を推進した。

マルチメディアサービス制御技術(IMS)対応のソフトウェアを開発し、各国との相互接続試験(平成20~22年)において高評価を受け、国際標準化団体へ技術寄与した。またこのソフトウェアをオープンソースとして公開し(平成22年)、25か国156ユーザからダウンロードされた。

また、オーバレイエージェントプラットフォーム「PIAX」をサービスプラットフォームとしてJGN2plus上に展開するとともに、NICT北陸リサーチセンターのネットワークシミュレーション装置上で大規模シミュレーションを実現するデモシステムを開発し、気象センサーネットワークプロジェクト(Live E! プロジェクト)と連携して、平成21年には、「CEATEC 2009」で開催した「NICT スーパーイベント」において、世界最大規模(100万ノード1,000億データエントリ)のシミュレーションデモを行った(図2.6.6)。また、PIAXの一部をオープンソースとして公開し、世界42か国で1,800回以上ダウンロードされた。

新世代ネットワーク技術である DCN、OpenFlow、仮想化ノードを JGN2plus で機能拡張及び運用検証し、平成23年のさっぽろ雪まつりでは複数の新世代のネットワーク技術の同時運用の総合実証を行い、放送局が使用するコンテンツの放送配信に成功した。さらに、標準化作業中の IPv6 トンネルプロトコル技術を実装した SA46 T を日本とタイで接続し、ハイビジョン映像伝送の世界初の実験を行った。

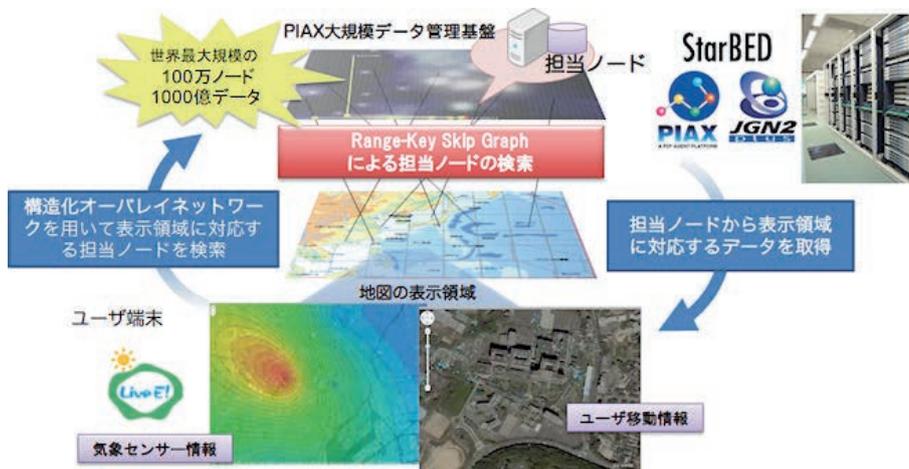


図2.6.6 PIAX を利用した実証実験概要

一般利用においては、平成21年の皆既日食ライブ高品質映像伝送実証実験において、複数拠点からの動画ソースをリアルタイムに国内32か所、海外5か所以上と、世界最大規模での配信の成功に寄与した(図2.6.7)。また、国立大学法人東京大学が、SCにて「バンド幅チャレンジ」に参加し、Webを介した日米間データ転送で6.5 Gbpsを達成し、「バンド幅チャレンジ・インパクト賞 (Impact Award)」を受賞するなど国際的に技術をアピールした。



図2.6.7 皆既日食中継の実証実験

(4) JGN eXtreme (JGN-X)

JGN-Xは、日本全国更には海外に及ぶ広域ネットワーク(L2/L3)を構築し、ネットワーク研究の実証実験のための基盤サービスとしてIP仮想化サービス(仮想ネットワーク、仮想ルータ、仮想計算機、仮想ストレージ)を提供している。また、新世代ネットワークの要素技術として、SDN/OpenFlow(RISEテストベッド)、DCN、PIAX、仮想化ノード等を展開し、試験サービス(パートナーシップサービス)の運用を通じて、それらの高度化を図っている。さらに、これらの基盤技術の有機的な連携(ネットワークオーケストレーション)の実現を目指している。

近年、ネットワークにおける通信制御の仕組みを、従来のように中継機器内にプロトコルとして一体化した形で実現するのではなく、機器の外部のコントローラにより自由にプログラム可能にするSDNという考え方が提唱され、研究開発が広く進められている。NICTでは、平成21年よりJGN2plusの上にOpenFlowネットワークを広域展開し、トラフィック制御やアプリケーションとネットワークの連携など、様々な実証実験を行ってきた。こうした実証実験で得られたノウハウを生かし、平

成23年にこのOpenFlowネットワークをテストベッドRISEとして再構築し、サービスを開始した。大規模ネットワークへのSDN/OpenFlow導入に必要なマルチテナント化を実現する階層分散コントローラアーキテクチャを検討し、複数ドメイン環境でドメイン内及びドメイン間の情報管理、共有の仕組みを開発した。また、下位物理ネットワークから独立してトポロジを自由に実現する機能を開発した(図2.6.8)。更には、光コアネットワークとエッジL2ネットワークとのSDN連携も検討しており、NICT光ネットワーク研究所の開発した光パス・光パケット統合ネットワークに、SDN/OpenFlowのネットワーク抽象化モデルを適用し、イーサネットベースのSDN/OpenFlow環境のRISEと相互接続、OpenFlowコントローラによる統合制御を実現した。

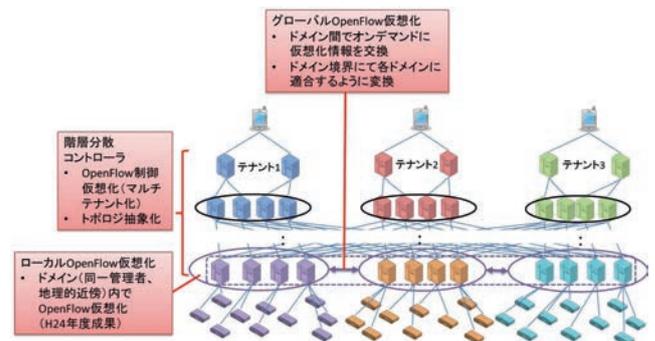


図2.6.8 大規模SDN/OpenFlow仮想化のアーキテクチャ

運用管理に関しては、JGN-XとStarBED³の多種多様な仮想リソースを統一的に記述し、インフラ横断的なテストベッド環境の構築を実現する統合管理運用フレームワークのプロトタイプを開発(国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学との共同研究)し、JGN-Xの基幹ネットワークサービスとして導入を進めているVPLSネットワークの管理運用において、JGN-Xでのサービス提供モデルに合わせて設定を抽象化し、インタフェースをベンダー独立に実現するシステム(GINEW)を開発、JGN-Xで試験的に導入した(国立大学法人東京大学、慶應義塾大学との共同研究)。

また、災害時に断絶したり非常に狭帯域となる可能性がある被災地のネットワークに対して、被災地側及び広域側の両方でSDN技術を応用し、それらの連携により状況に合わせたサービス最適化を実現する制御の仕組みを検討し、プロトタイプを実装(NECとの共同研究)し

た。さらに、岩手県遠野市に SDN/OpenFlow 技術を応用した災害時等でも切れないネットワーク環境として本実装を展開し、災害時のシナリオに基づいた実証実験（IT 活用型防災訓練）を遠野市の協力を得て実施した。さっぽろ雪まつりでは、東京－大阪間で試験的に確保した 100 G 回線及び JGN-X への実展開用の 100 G 対応機器を用い、8 K ライブ映像の非圧縮伝送に成功し、さらに 100 G 対応のモニタリングによる高精度分析も実施した（図 2.6.9）。

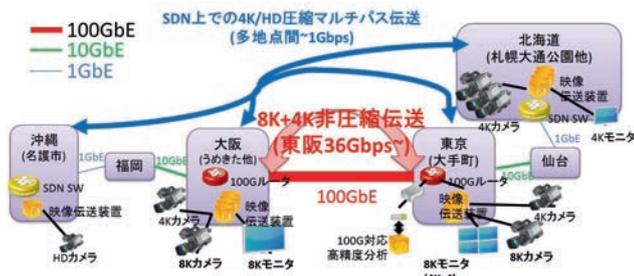


図 2.6.9 さっぽろ雪まつりでの実証実験概観

2.6.3 StarBED の研究、成果



図 2.6.10 StarBED の研究設備

(1) 第 1 期プロジェクト「StarBED」

平成 14 年 4 月に、通信・放送機構（TAO）により、石川県能美市に、

- ・ IT 研究開発の促進
- ・ 北陸エリアでの研究機関の集約による地域産業の振興

を目的として、512 台の PC サーバを相互接続スイッチで接続した大規模汎用インターネットシミュレータ「StarBED」が設置され、「北陸 IT 研究開発支援センター」が開所された（図 2.6.10）。StarBED ではインターネットや企業内ネットワークのような実環境で実際に動作するソフトウェアのバイナリコードや、ハードウェアそのものを動作させ、その結果を分析することを重視しており、このような実験環境を数値シミュレーションとは区

別しエミュレーション環境と呼んでいる。小規模なエミュレーション環境は従来から研究開発を行う組織等で構築されることもあったが、その管理コストから大規模化や常設化は難しかった。StarBED は大規模なネットワークテストベッドを常設し、複数の大学や企業、研究機関、地方自治体といった組織で共有することで設置コスト、管理コストを低減し、研究開発をより容易に行うための設備として構築されたもので、平成 15 年には、遠隔地からでもインターネット経由で利用できるように改善された。

(2) 第 2 期プロジェクト「StarBED2」

平成 18 年 4 月には、168 台の PC サーバを追加導入し、トータル 680 台の PC サーバから成る、第 2 期プロジェクト「StarBED2」として、ユビキタスネットワークをも対象としたネットワークテストベッドとしても利用できるよう機能拡張を行うことを念頭に置き、環境の提供を開始した。

平成 18 年 6 月、「北陸 IT 研究開発支援センター」は、「北陸リサーチセンター」に名称が変更され、NICT の研究開発拠点として、次世代ユビキタスネットワークシミュレーション技術の研究開発とその成果技術のテストベッドへの適用、利用者への提供を行った。

StarBED2 プロジェクト当時は、多数の異種メディアやシステムのインターネットへの収束が進み、インターネットへの依存度が急激に高まり始め、その一方で、高度ユビキタスネットワーク環境を実現するためのセンサーネットワークやホームネットワークのように、IP 技術を活用しインターネットと綿密に関係するものが、ある意味で独立した新しい形態のネットワークとして実用化され始めた（図 2.6.11）。

このように多数の異種ネットワークの複合体としての高度で大規模なネットワークシステム（次世代ユビキタスネットワーク）が社会基盤になりつつある中、その信頼性・安全性及び開発効率に対する要求が急速に高まりつつあった。こうした要請に応えるため「StarBED2」では、次世代ユビキタスネットワークシミュレーション技術の研究開発として、

- ・ ユビキタス環境シミュレータ技術
- ・ ディペンダブルインターネット検証技術
- ・ ディペンダブルユビキタスネット検証技術

に取り組むとともに、その後も設備の拡張を行った。平成21年4月には、トータル1,070台のPCサーバから成る、世界最大規模のエミュレーション基盤となった。そして、平成22年12月には、次世代ユビキタスネットワークを構成する各種ネットワークシステムの検証技術が迅速かつ高精度に行えるシミュレーション環境の構築技術を確立した。

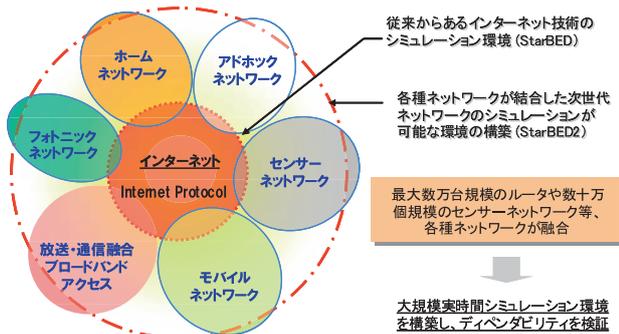


図2.6.11 インターネットを取り巻くネットワーク

(3) 第3期プロジェクト「StarBED³ (スターベッド・キュービック)」

平成23年4月に、テストベッド研究開発推進センターに所属する研究室となり、名称も「北陸 StarBED 技術センター」に変更された。同時に、プロジェクトの名称も「StarBED³ (スターベッドキュービック)」とし、ミッションスコープを新世代ネットワーク及びそのセキュリティ、サービスに関する技術の研究開発に拡大して、

テストベッド研究開発推進センターの「JGN-X」との相互連携を図りつつ、大規模エミュレーション基盤として、新世代 ICT システムへの対応や R&D ライフサイクルサポートを目標に掲げ、以下の研究開発を開始した (図2.6.12)。

- ・有線と無線が混在し、物理線からアプリケーション・サービスまで複数の層にまたがった様々なネットワーク環境への対応
- ・クラウドコンピューティングやサイバーフィジカルシステム (CPS) などの新しいコンピューティングパラダイムへの対応
- ・大規模エミュレーション環境 StarBED に、様々なネットワーク関連技術の各開発段階における検証や実験を柔軟かつ容易に受け入れ可能とするため、ユーザインタフェースの強化
- ・単一のエミュレーション環境だけでは機能にも規模にも限界があるため、他のテストベッドと連携することで機能や規模の強化

その研究成果の一例として、「Interop Tokyo 2014」で、ネットワークの可視化と直感的な操作を実現した「インタラクティブ無線メッシュネットワーク計画」、及びサイバーフィジカルの検証環境として構築した「実験住宅 iHouse を活用したサイバーフィジカルシステム (CPS) 検証環境の構築」の展示を行った。

StarBED³は平成26年10月現在、合計1,398台のPCサーバ規模まで拡張され (図2.6.13)、ノード数で100万台レ

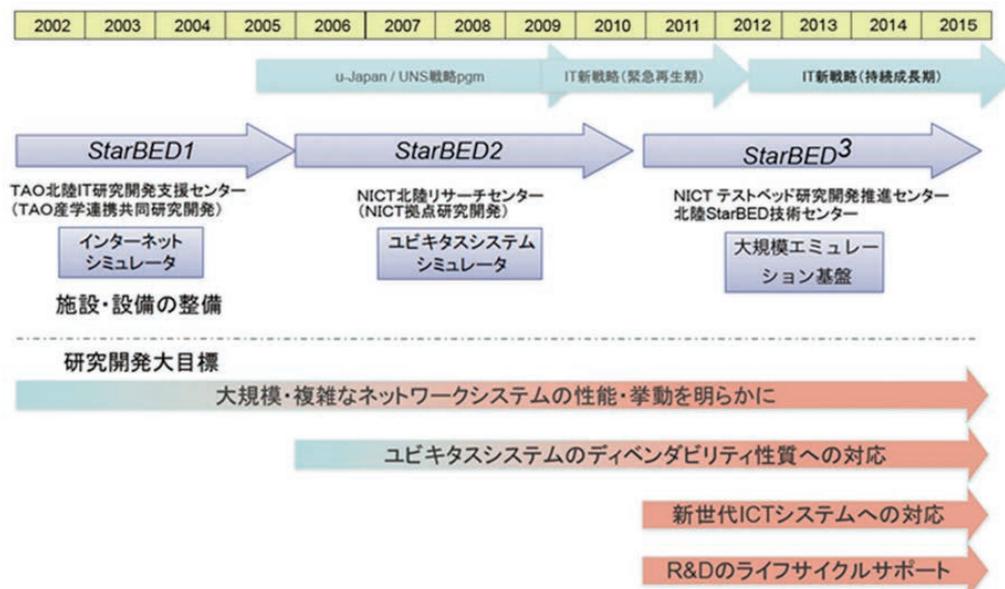


図2.6.12 StarBEDの変遷

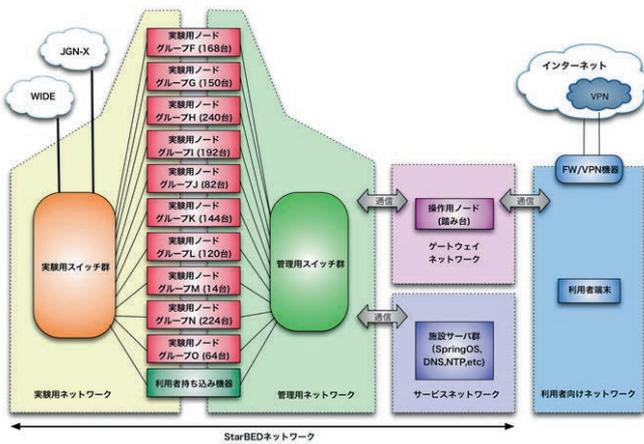


図2.6.13 StarBED³のシステム構成 (平成26年10月現在)

ベルまでのエミュレーションに対応可能な、世界最大規模のエミュレーション基盤として運用が続けられている。

このようにStarBED³は、世界の先端を行くエミュレーション環境とそこで開発された最新の技術により、新世代のネットワーク関連技術の研究開発を支える総合的研究基盤を構築するとともに、様々な有線・無線が混在したネットワークやサイバーフィジカルシステムへと手法の拡大を図り、大規模エミュレーション基盤としてソフトウェア実装レベルでの実験・検証を可能とするテストベッドの提供と、ネットワーク研究開発の支援を行っている (図2.6.14)。

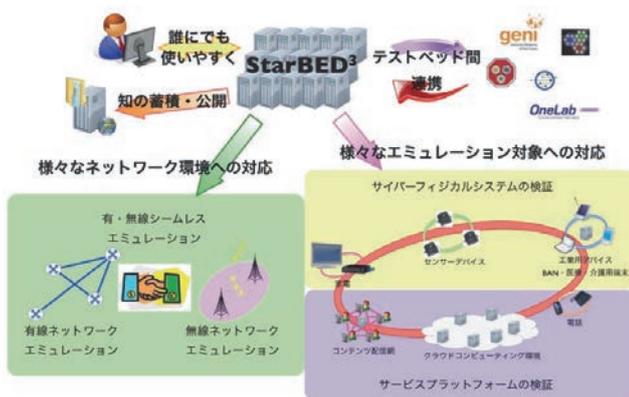


図2.6.14 StarBED³の狙い