

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。

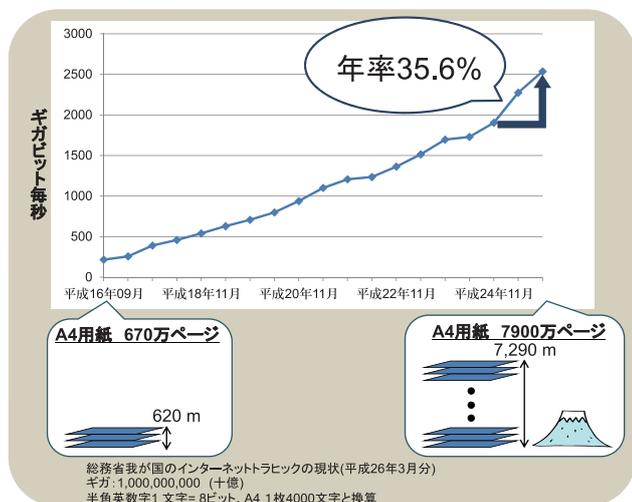


図2.1.1 日本のトラフィック推移

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)。

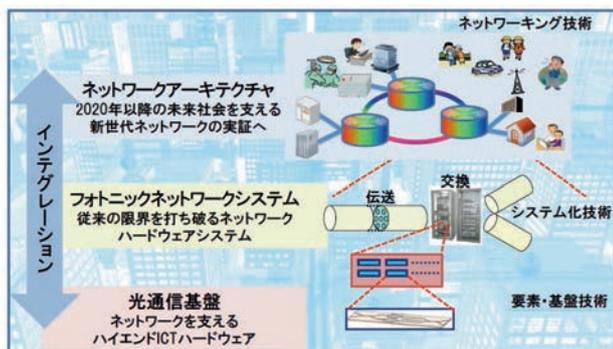


図2.1.2 光ネットワークを支える技術

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

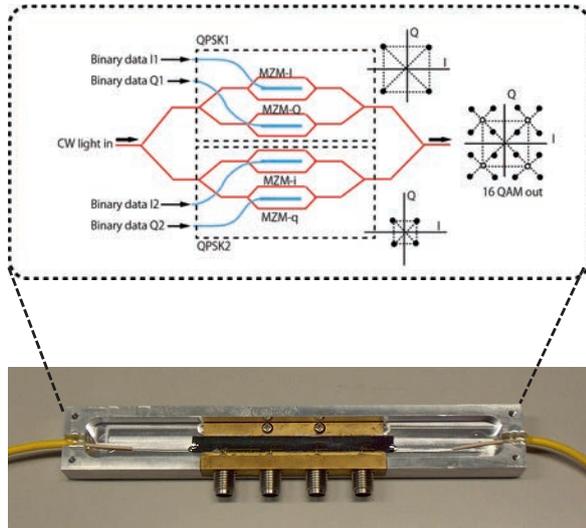


図2.1.4 16QAM 変調器

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7 m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)。

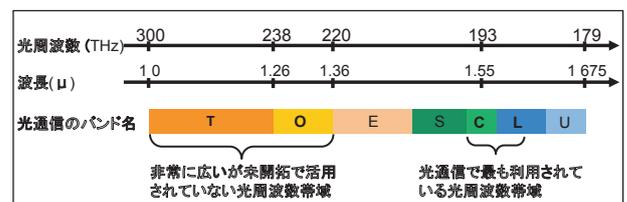


図2.1.6 光通信で割り振られたバンド名と光周波数(波長)

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。

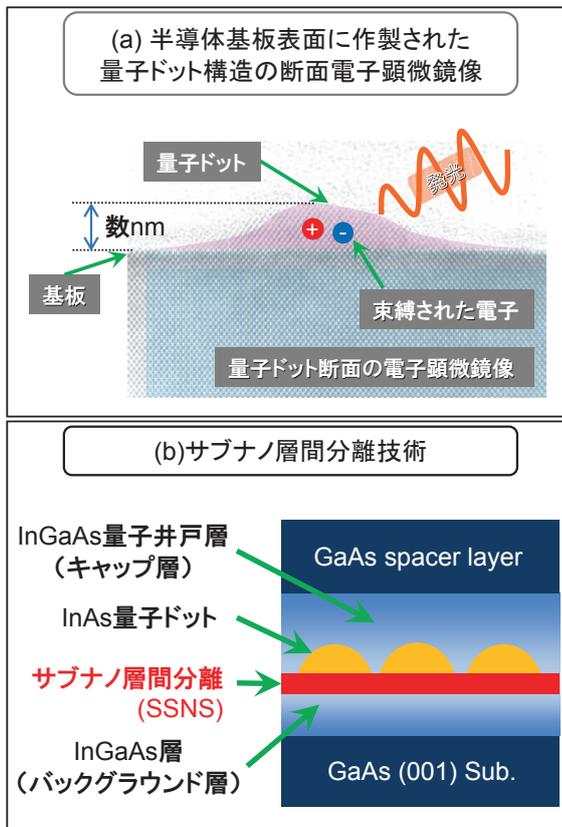


図2.1.7 高密度・高品質半導体量子ドット技術

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。

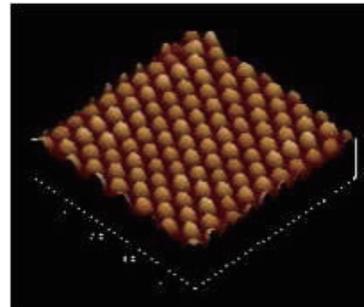


図2.1.8 世界最高密度量子ドット(300層の最上層)

(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。

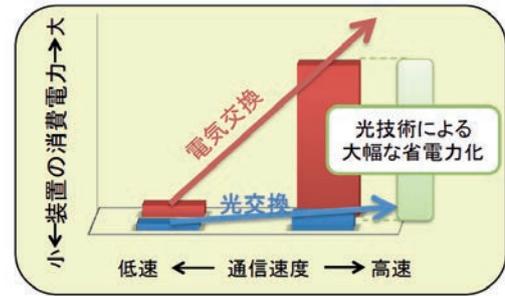


図2.1.11 光技術で省電力化

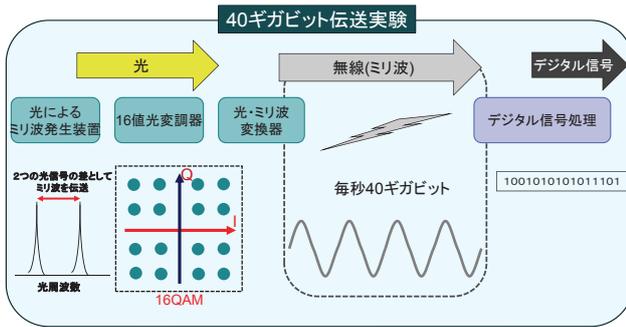


図2.1.9 高速無線信号生成

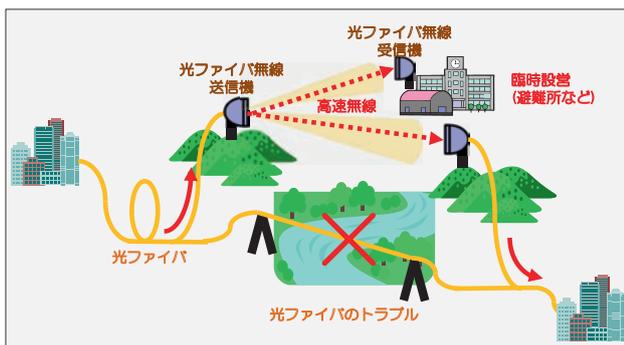


図2.1.10 光ファイバと親和性の高い臨時設営高速無線

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

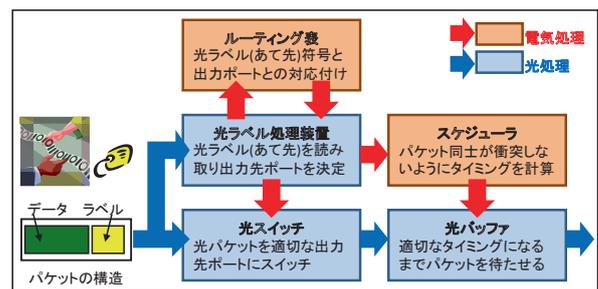


図2.1.12 進化し続ける光パケットスイッチプロトタイプ

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。

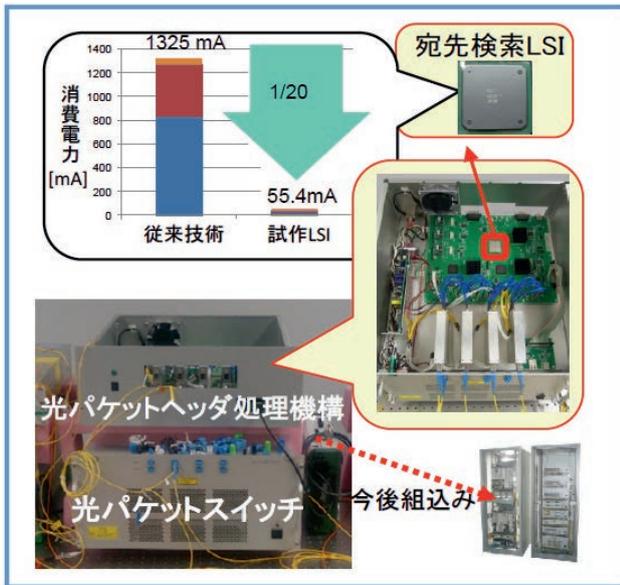


図2.1.15 光パケットヘッダ処理装置

(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

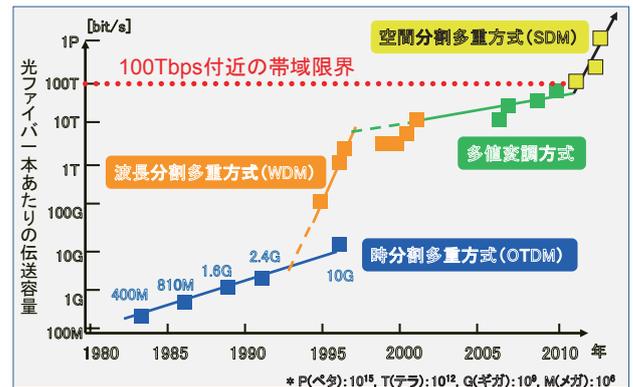


図2.1.16 光ファイバの伝送容量の推移

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

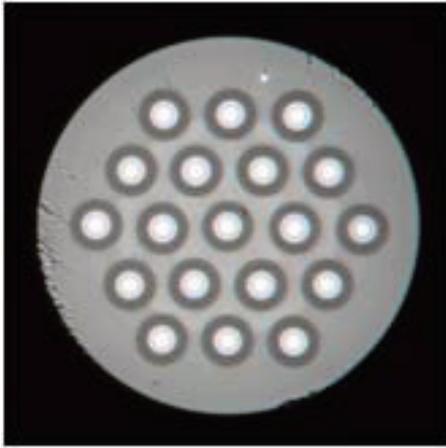


図2.1.17 19コア光ファイバ断面

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

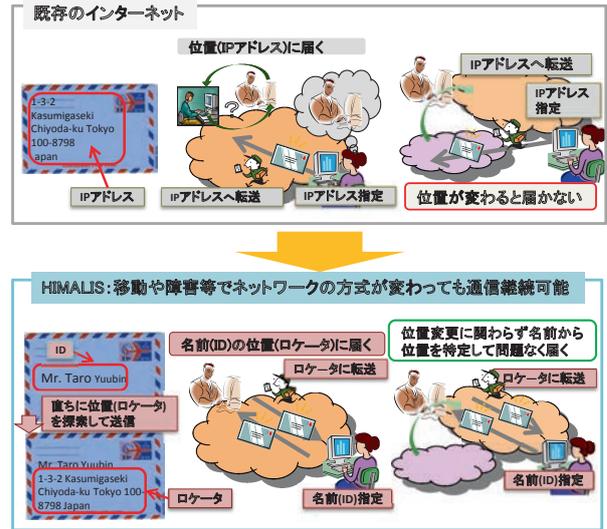


図2.1.18 ID・ロケータ分離機構イメージ

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。

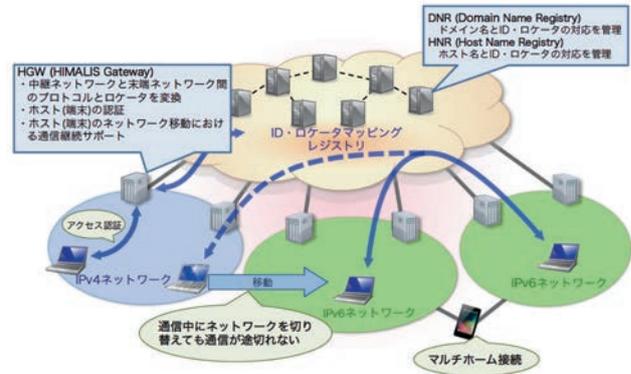


図2.1.19 HIMALISアーキテクチャ構成要素

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

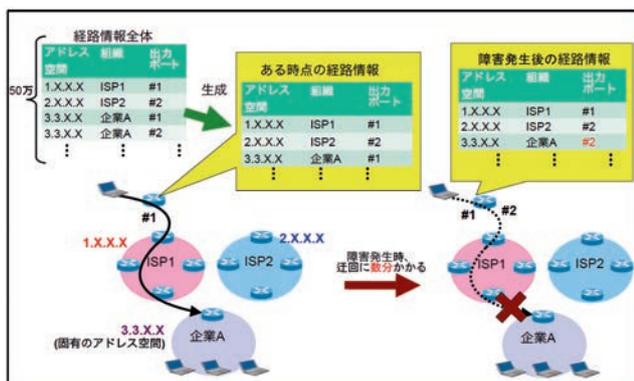


図2.1.20 インターネット経路切替

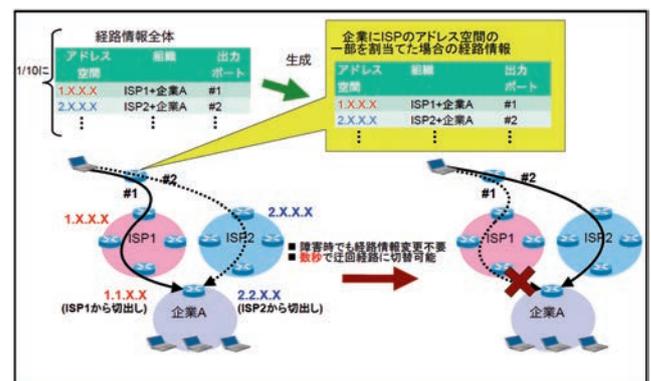


図2.1.21 複数ロケータ割り当て時の経路切替

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