

21世紀ネットワーク基盤技術研究開発戦略 「ICTの新パラダイムを創生」

21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議 報告書(案)

平成17年7月

21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議

報告書目次

第1章	はじめに	…	1
第2章	21世紀ネットワーク基盤技術の現状と動向	…	10
	2－1. 我が国における取組状況	…	10
	2－2. 諸外国における取組状況	…	16
	2－3. 21世紀ネットワーク基盤技術の動向	…	21
第3章	21世紀ネットワーク基盤技術の研究開発課題	…	26
	3－1. 次世代フォトニックネットワーク	…	26
	3－2. テラヘルツICT	…	49
	3－3. 量子情報通信	…	53
	3－4. ナノITネットワーク	…	62
第4章	分野融合領域の研究開発への重点的取組	…	66
	4－1. 分野間の連携による効果が期待される研究領域	…	66
	4－2. 分野間の連携による効果が期待される研究開発課題	…	67
第5章	21世紀ネットワーク基盤技術の確立に向けた研究開発戦略	…	78
	5－1. 研究開発推進方策	…	78
	5－2. 研究開発の推進体制	…	82
	5－3. 総合的な研究開発戦略	…	85
	むすび	…	87
	用語解説	…	88
	参考資料	…	105

第1章 はじめに

1-1. 2010年に実現を目指す「u-Japan政策」

1-1-1. u-Japan政策の背景

(1)e-Japan戦略の進展

平成13年に政府として掲げたe-Japan戦略に基づき、「2005年までに世界最先端のIT国家となる」との目標に向け、産学官を挙げた取組が進められた結果、我が国では世界で最も高速で安価なブロードバンド環境が実現されており、現在はICTの利活用を促進するため7分野における先導的利活用の取組が進められている。

こうした取組を通じて、今後も我が国の社会経済活動の一層のICT化が進展すると見込まれる。特に、ICTが生活の隅々にまで普及するようになると、これまで以上のネットワーク効果が発揮され、「人と人」から、「人とモノ」、「モノとモノ」のコミュニケーションまでもが現実のものとなり、「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」簡単にネットワークに接続できるような社会を迎えることとなる。

(2)社会的課題への対応

e-Japan戦略の大目標を達成しつつあるが、2006年以降にはわが国は今以上に少子高齢化に直面することになる。少子高齢化の進行は労働力人口の減少や消費の減退を意味し、経済全体の縮小を招く。この「少子高齢化」を大前提として、生活・社会、医療・福祉、治安・防災、経済・産業等の各分野において想定されている社会的課題を図1.1に示す。

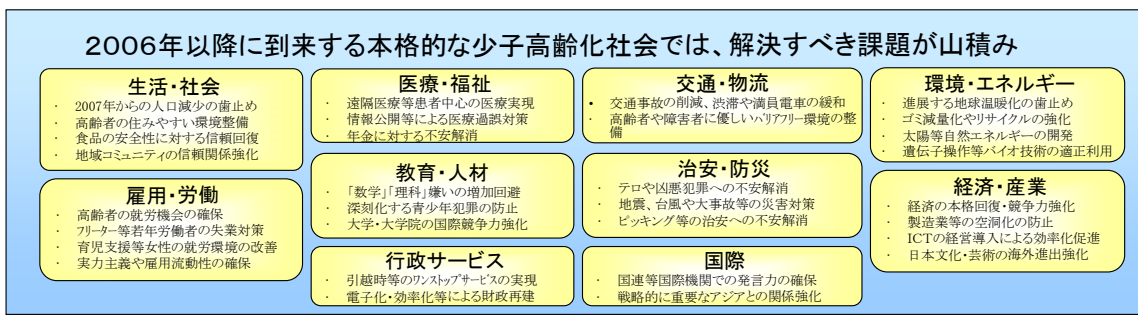


図1.1 2006年以降に日本が本格的に直面すると考えられる課題

これらの諸課題は3つの観点で整理できる。

- ① 安定した快適な生活、高齢者や職をもたない若年層等への配慮やおもいやり、さらには安心な交通、乗客のイライラ解消等「心」の問題にも踏み込む将来課題。
→ 「人に優しい心と心の触れ合い」という表現で総括することが可能である。

- ② 食や医療、ゴミ、行政サービス等、従来は供給者側の観点や都合を優先してサービスされてきたものが、時代の変化に伴い、一定の限界に直面しつつある。利用者側の視点に立った利便性の向上に軸足を移す大きな変革が現在進行中ではあるが、これからもさらに到来するであろう将来課題。

→「利用者の視点が融け込む」という表現で総括することができる。

- ③ 画一的で独創性に欠けると評されてきた日本の風土の中で、コンテンツ利用、生涯学習、協業等、個人の夢や独創性の発揮、地域の特色や独自性を生かした活性化を促すための将来課題。

→「個性ある活力が湧き上がる」という表現でまとめられる。

1-1-2. u-Japan政策の大目標:フロントランナーとしての2010年の目標設定

「2006年以降も世界最先端であり続け、2010年には世界最先端のICT国家として先導する」ための大目標として、総務省では、昨年12月に「u-Japan政策」を策定した。

u-Japan政策の特徴は、フロントランナーとしての「先導」の役割である。世界最先端レベルのICT国家たる地位を揺るぎないものとし、インフラと利活用のバランスの取れた独創的・創造的な日本発の社会モデルを世界に提示し世界を先導することによって、世界に貢献することが日本に求められている。変化の激しいICT分野では、技術革新の動向を踏まえることが不可欠であり、目標年次は2010年としている。

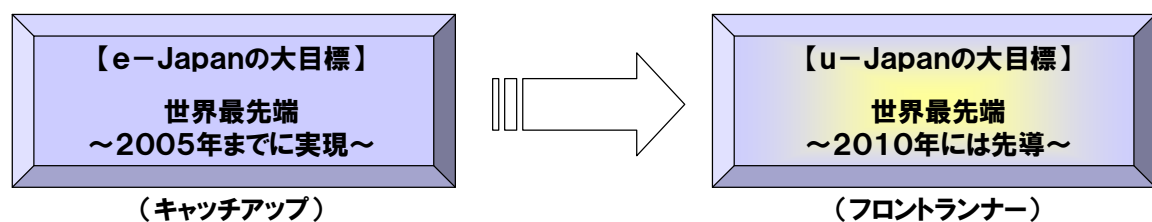


図1. 2 u-Japan政策の大目標

1-1-3. u-Japan政策の基本思想:「e」から「u」への進化

以下に述べる3つの基本軸を有した「u-Japan政策パッケージ」を着実に推進することにより、「e」から「u」への進化を現実のものとし、u-Japan政策のキャッチフレーズともなる「価値創発」に結実させていく必要がある(図1.3)。生活の隅々にまで融け込む草の根のようなICT環境というインフラ面と、21世紀の社会課題を解決

するための創意工夫という利活用面とのバランスのとれたリッチなICT空間が拡大することによって「価値創発」が起こり、社会全体の「質」の向上を実現していくことが期待されている。

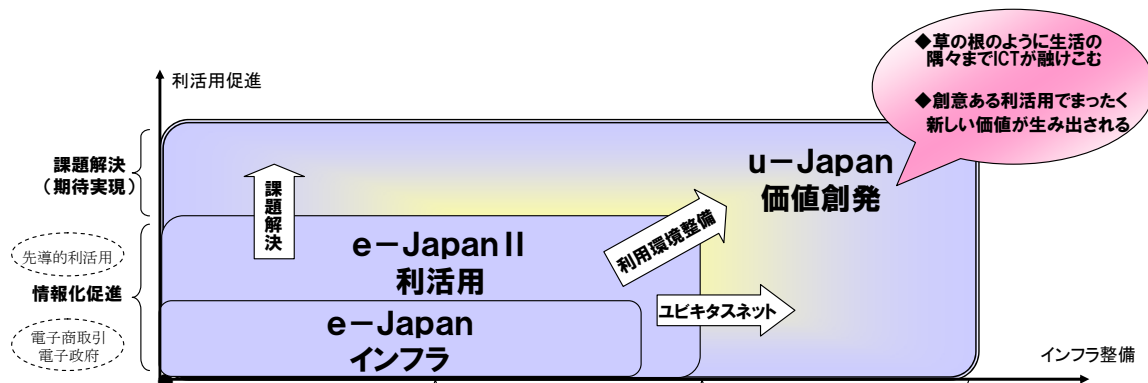


図1.3 u-Japan政策の基本思想:「e」から「u」への進化

1-2. u-Japanの目指すべき社会

1-2-1. u-Japanの理念

2010年のユビキタスネット社会の実現に向けたu-Japanの基本理念は、一つの「U」と三つの「U」から構成される。第一の「U」は、「ユビキタス(Ubiquitous)」を意味し、インフラとしての「基盤性」に着目した理念である。残りの三つの「U」は、「ユニバーサル(Universal)」、「ユーザ・オリエンテッド(User-oriented)」、「ユニーク(Unique)」を意味し、生活者ニーズから抽出された将来課題の三分類を踏まえ、ユビキタスネット社会が実現した際の「成果」に着目した理念である。

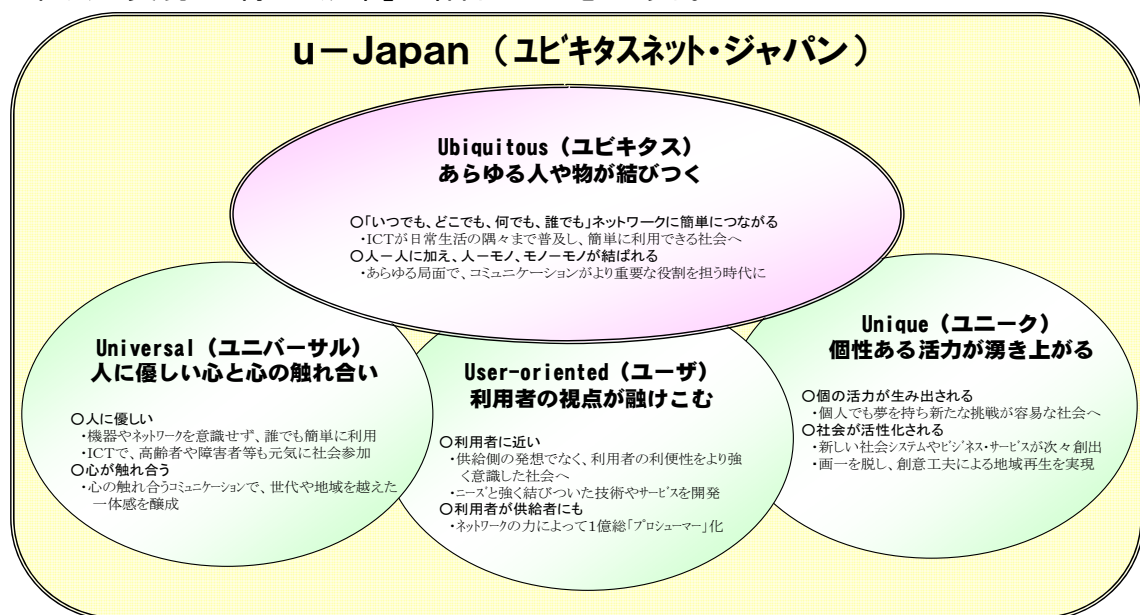


図1.4 u-Japan政策の理念

(1) 基盤性に着目した理念－「ユビキタス」

「ユビキタス」は、ICTが日常生活の隅々にまで普及し、「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」ネットワークに簡単につながる社会を実現することである。「人と人」のコミュニケーションに加え、「人とモノ」や「モノとモノ」、さらには状況や事象といった「コト」までもがネットワークを通じて結ばれ、あらゆる局面でコミュニケーションがより重要な役割を担う時代となる。「ユビキタス」が実現することによって、シームレスなネットワーク環境が整い、利用者は従来のネットワークが抱えていた以下の様々な制約から解放されることとなる。

① 「ネットワーク」の制約からの解放

従来のネットワーク環境では、エリアに応じてサービスを選択する必要があり、地理的なデジタル・ディバイドの存在により、そもそもサービスの利用すら困難な地域も存在する。ユビキタスネット社会が実現すれば、地理的・空間的な束縛から解放され、個別のネットワークが互いにシームレスに接続され、利用者がどこにいても必要なネットワークを利用できる環境となる。また、分散型の大容量ネットワークが実現すれば、ネットワークの通信能力の束縛から解放され、誰もが利用したい時に利用したいだけの性能を享受できる環境となる。

② 「端末」の制約からの解放

従来の端末では、情報通信サービスに利用できるのは通信や放送の機能を有したものに限られ、ネットワークごとに利用できる端末の種類も限られている。ユビキタスネット社会では、通信機能の搭載が容易となり、ネットワークに接続する端末の範囲は飛躍的に拡大する。すなわち、身の回りのあらゆるものがネットワークに接続し、情報をやりとりすることが可能となる。

③ 「サービス」や「コンテンツ」の制約からの解放

未来のサービスやコンテンツは、供給者側が仕様や条件を決めるのが通常であった。ユビキタスネット社会では、オープンな仕様のもとでシームレスな接続が前提となることから、利用者側は自己にあわせた多様なサービスやコンテンツの利用が可能となる。

④ 「ネットワーク・リスク」の制約からの解放

従来のネットワーク環境では、利便性が飛躍的に向上した反面、盗聴や改ざん、なりすまし、不正アクセスやウイルス等のリスクも高まりつつあり、安心してネットワークを利用することを妨げている面がある。ユビキタスネット社会においては、ICTの利活用に関する高度なセキュリティ技術の実現や利用環境整備等により、このようなリスクを大幅に低減することが可能となる。

(2) 成果に着目した理念－「ユニバーサル、ユーザ・オリエンテッド、ユニーク」

u-Japanの残りの三つの理念は、生活者ニーズから導き出された「成果」の理念としての「ユニバーサル」、「ユーザ・オリエンテッド」、「ユニーク」である。

① 「ユニバーサル(Universal)」

これは、ユニバーサル・デザインの考え方を浸透させることによって、「人に『優』しい心と心の触れ合い」を実現することを意味する。高齢者や障害者も含め、できるだけ多くの人々が使えるように配慮したデザインとするとともに、個別ニーズに応じた支援も受けられるようにすることで、誰でもICTの機器やサービスを簡単に利用でき、高齢者や障害者等も元気に社会参加する優しい社会へと移行する。心の触れ合うコミュニケーションを実現し、世代や地域を越えた一体感が醸成されることが期待される。

② 「ユーザ・オリエンテッド(User-oriented)」

これは、利用者重視の視点を徹底することによって、「利用者の視点が『融』け込む」社会を実現することを意味する。従来は供給者側の発想が主であり、技術やシーズ先行で商品やサービスが開発・提供される傾向が強かったが、ICT利活用の広がりと共に、利用者のニーズや利便性をより強く意識することが不可欠となる。ユビキタスネット社会では、利用者自身が供給者となることも不可能ではなくなり、いわゆる「プロシューマー」化が進行し、まさに利用者の視点が供給サイドにも融け込む形となる。

③ 「ユニーク(Unique)」

これは、ICTが有するエンパワメントの力を最大限に活かすことによって、「個性ある活力が『湧』き上がる」社会を実現することを意味する。既存のエスタブリッシュメントにとどまらず、個人でも夢を持ち新たな挑戦が容易となり、個の活力が生み出される社会へと移行する。また、新しいビジネスやサービス、さらには新しい社会システムや価値観が次々に創出されるとともに、地域の固有資源を活かした創意工夫による地域再生が促進され、これまでの画一社会から脱皮し、個性豊かに活性化された社会の到来が期待される。

1-2-2. u-Japan政策パッケージの概要

u-Japan政策は、u-Japanの理想的な社会像を実現するための政策であり、u-Japan実現に向けて、まずはICTをフルに利活用したソリューションに取り組んでいくことが有効である。u-Japan実現に向けた課題に対する3つの観点を踏まえた政策パッケージを形成していくこととしている。これを踏まえ、「u-Japan政策パッケージ」の全体像をまとめたのが図1.5である。政策パッケージの柱となるのは、「成果」に着目した3つの理念に対応する三つの政策群である。

① 第一の柱は、「ユビキタスネットワーク整備」である。シームレスなユビキタ

ネットワークの整備を進め、サイバー空間の拡大と実物空間への浸透を促進する。

- ② 第二の柱は、「ICT利活用の高度化」である。本格的な少子高齢化社会を迎え将来課題が山積する中、社会的課題の解決にICTを役立てるよう、利活用の視点を転換する。
- ③ 第三の柱は、「利用環境整備」である。「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」ネットワークにつながるユビキタスネット社会に向けての不安や障害を速やかに解消するために、ICTの利用環境整備を抜本的に強化する。

また、以上の三つの柱に共通する「横断的戦略」として、「国際戦略」と「技術戦略」があげられる。ユビキタスネット社会は本質的にグローバルであるため、国際的なネットワークや市場の視点が不可欠となる。また、ユビキタスネット社会は技術革新が原動力となっており、ICT分野の研究開発や標準化が戦略的に重要となる。

なお、図1.5の上部には、u-Japanの「成果」に着目した理念にも対応する「人に優しい心と心の触れ合い」、「利用者の視点が融け込む」、「個性ある活力が湧き上がる」が記されている。ICTの利活用がこれらの課題の解決に寄与し、「価値創発」につながるよう、「u-Japan政策パッケージ」を、民産学官が一体となって集中的重点的に取り組み、実行に移していくことが重要である。

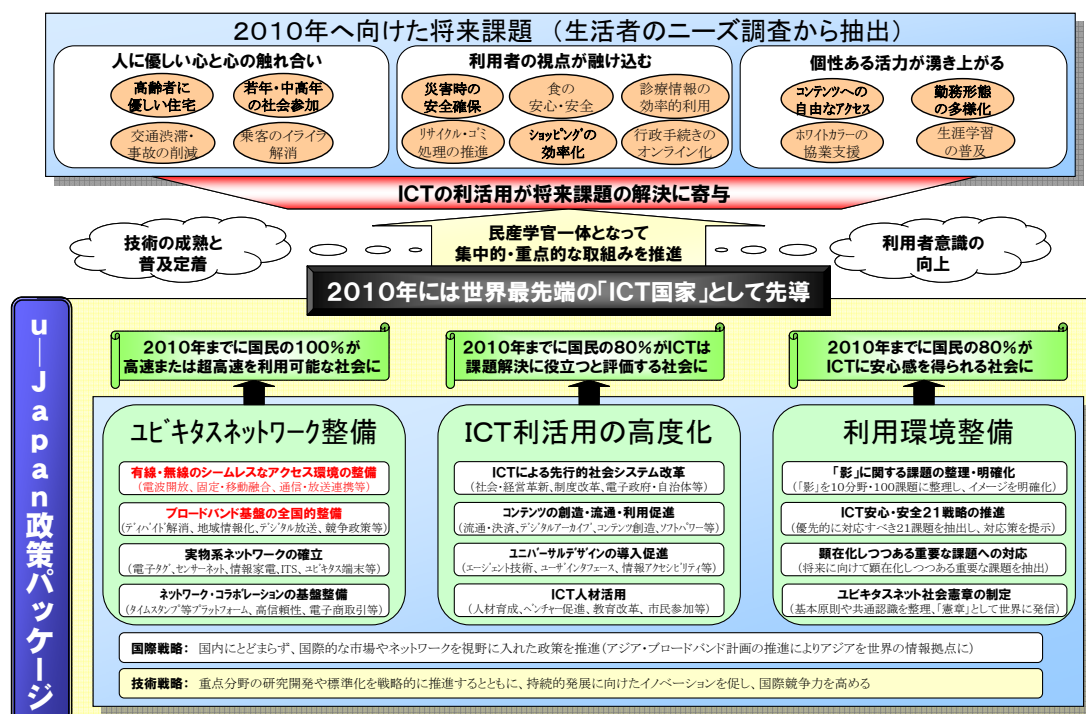


図1.5 u-Japan政策パッケージの全体像

1-3. 21世紀のネットワーク基盤技術確立の意義

1-3-1. 新たな基盤ネットワーク技術に対する社会の要請

現在、わが国では世界一「高速で安価な」ブロードバンド環境が実現しており、平成16年度末のブロードバンド契約者数は二千万加入に迫っている。特に、平成16年度第4四半期には加入者光ファイバ(FTTH: Fiber to the Home)の増加がDSLを上回るなど、ブロードバンド利用の進展に伴い、アクセス系でのフォトニック技術の普及が進展している。これに伴い、幹線系やノード系の大容量化・高機能化が求められている。

また、今後のユビキタスネット社会では、「いつでも、どこでも、誰でも、何とでも」ネットワークにアクセスできる環境が実現され、「人と人」、「人とモノ」、「モノとモノ」の間の通信が行われるようになることに伴って、通信量はますます増大することから、ネットワークに対する大容量性、高品質化等に対する要請は一層高まると見込まれる。

このように我々を取りまく時代状況は目まぐるしく変化している。

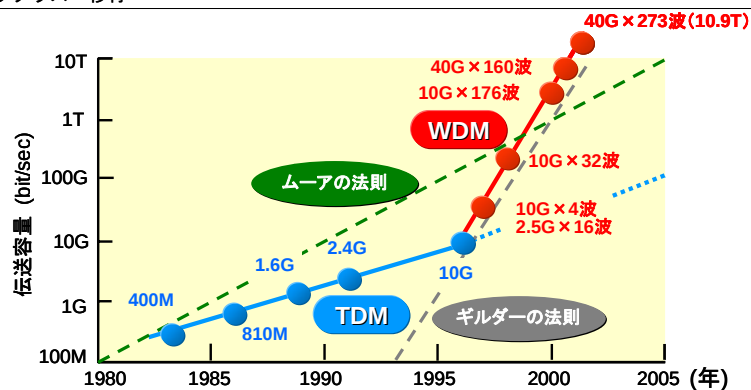
半導体を始めとしたシステムの集積度は18ヶ月で2倍になる(「ムーアの法則」)

とされており、5年間で約10倍、10年間では約100倍になると見込まれる。また、通信容量の爆発的拡大(半年間で約2倍)と単位当たり通信コストの飛躍的低下(「ギルダーの法則」)とされており、通信容量は概ね5年間で1000倍が求められると考えられる。

以上から5年で10倍から1000倍の大容量化を達成していくことが求められる。

このため、ノードの処理能力として、2015年にはペタビット、2025年にはエクサビットにも達すると見込まれる。

ネットワークの処理を全て光化することで、通信容量はテラクラスから、ペタクラス、ヘキサクラスへ移行



ムーアの法則 : インテルのゴードン・ムーア前会長が唱えた法則。
「半導体の集積度(能力)は、18ヶ月で2倍に向上する」という半導体業界の経験則。
ギルダーの法則 : 経済学書でハイテク評論の第一人者でもあるジョージ・ギルダー氏による予測。
「通信容量の爆発的拡大(半年間で約2倍)と、単位当たりの通信コストの飛躍的低下」という内容。

図1.6 光技術による超高速化への対応

こうした、ネットワークの大容量化を現在の技術をベースに実現しようとした場合に

は、ルータ等の装置のサイズ、消費電力が桁違いに大きなものとなるため、装置設置スペースの制約や地球環境問題への対応などから、大きな問題が生じることとなる。このため、こうした制約を解消する新たなネットワーク技術の確立が要請される。

また、近年の半導体単体での処理能力向上に加え、グリッド等ネットワークを活用したシステムの処理能力向上、ストレージネットワークによる容量拡大や世界最高性能スーパーコンピュータ、超巨大データベースの開発競争等、ネットワーク上を転送される情報の重要性、容量の拡大に伴い、暗号技術に対する一層の信頼性の向上が求められる。

こうした社会的な要請にこたえていくためには、様々な制約を有する現在のネットワーク技術では性能限界が訪れることから、今後10～20年を見据え、ネットワークの大容量化、省電力化、絶対安全性を有する通信システムなどを実現する新たな技術の確立を戦略的に進めて行くことが必要である。

1-3-2. 「制約の解消」から「限界の打破」へ

かつての電信や電話が実用化された時代と比較すると、技術変革が格段に早くなっている。こうした変化に対応し、短期的な対応が必要であることは当然であるが、現在の原理に基づく技術改善や個別の技術課題の解消といった当面の対応のみに留まる限りは、遠からず新たな制約が生じ、抜本的な解決につながらないことは明らかであり、10～20年後を見据えた抜本的な対策を講じていくことが戦略的に重要である。

しかしながら、わが国では長引いたバブル後の経済停滞、民間企業における短期的利益追求型研究開発の重視等が相まって、基礎・基盤的分野の研究開発は十分に実施されてきたとは言い難い。

このため、前項で述べたような社会の要請に真摯に向き合い、本質的な解決を目指すには、現在のシステムの動作原理が本質的に有する限界を打破するための、新たな原理やメカニズムを確立することが求められる。このため、国、大学、産業界が協力して、出口を見据えた上で、革新的な技術を実現するための基礎・基盤的な研究開発を強化し、長期的な視点から取り組むことが必要である。

1-3-3. 今後の産業の「種」となるネットワーク基盤技術

今後に段階的に訪れると予想されている様々な物理的な限界・制約を解消し、新たな原理に基づく21世紀ネットワーク基盤技術の確立を図る必要がある。具体的には、前期のようなネットワークの大容量性、省スペース・省エネルギー等の観点から、以下の技術について重点的に取り組むことが必要である。

(1) フォトニックネットワーク技術

信号を電気信号で処理することによる電子の移動速度の限界があり、これを打破するため全ての処理を光で行うことが求められる。

(2) テラヘルツ技術

電磁波による無線通信やセンシングは、現在ミリ波と光の間の「テラヘルツ波」と呼ばれる周波数帯での利用が未開拓であるが、その実現により100Gbps級の通信や遮蔽物を透過しての詳細なセンシングや高度な生体認証が可能となり、社会の安全・安心環境の実現に貢献する。

(3) 量子情報通信技術

量子コンピュータでも解読不能な、無条件安全性を保証できる量子暗号を実現し、古典的な情報理論の限界(シャノン限界)を打破する大容量通信を実現する。

(4) ナノICT

ナノスケール動作において新機能の発現を利用して、現在のシステムの千分の一程度のスケールと消費電力の装置を実現することにより、地球環境問題の解決とネットワークの大容量性の実現を一挙に解決する。

これらの技術はいずれも、基礎的・先端的で研究リスクが大きく、長期的に研究開発に取り組む必要があり、長期的なロードマップを作成し、総合的かつ計画的に推進する必要が認められるので、これらを「21世紀ネットワーク基盤技術」と位置づけ、研究開発戦略について検討することとした。

第2章 21世紀ネットワーク基盤技術の現状と動向

2-1 我が国における取組状況

2-1-1 フォトニックネットワーク技術

近年のインターネットの急速な普及やブロードバンド環境の進展等により、ネットワーク上のトラフィックは、急速の増大している。このトラフィックの増大に対応するため、これまでも図2. 1及び図2. 2のような技術の進展が図られてきた。

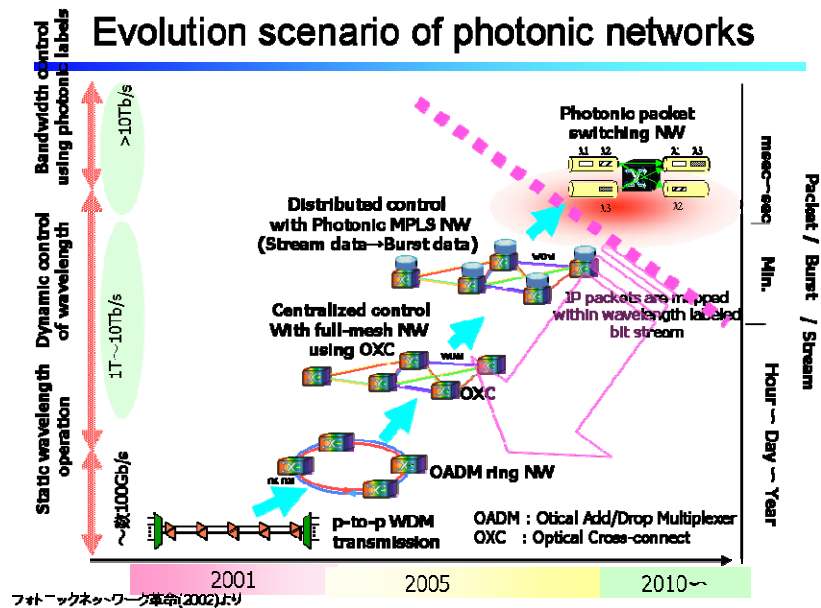


図2. 1 フォトニックネットワークの発展段階

光ファイバ伝送技術の進展

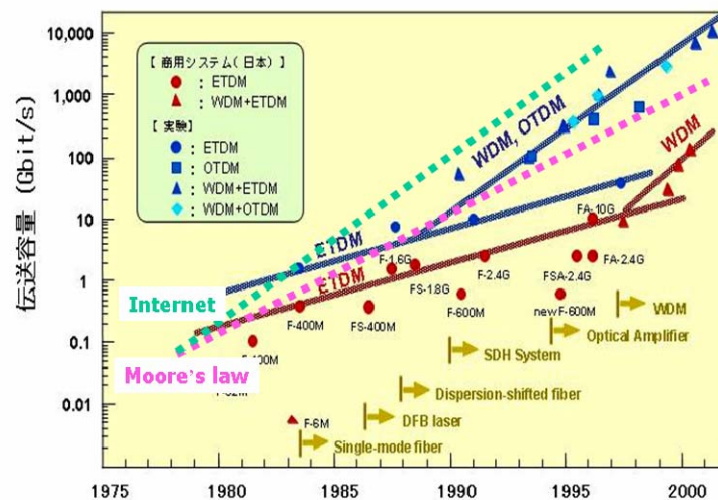


図2. 2 光ファイバ伝送技術の進展

総務省では、高度情報通信ネットワーク社会に不可欠な超高速ネットワークの実現のために、幹線系・アクセス系のネットワークのみならずインターネットの端から端までの全ての情報伝送処理を光領域で高品質・効率的に行う技術について研究開発を推進している。

平成13年度から17年度まで、独立行政法人情報通信研究機構による委託研究開発として、産学官の研究能力を結集してトータル光、光アクセス網、光バーストスイッチに関する課題を実施している。

表2. 1 独立行政法人情報通信研究機構における委託研究

委託研究テーマ	委託研究 期 間	研究開発の目的
トータル光通信技術の研究開発	H.8～H.17 (10 年間)	高度情報通信ネットワーク社会の本格的な到来に えるため、光通信を電気信号に変換せずに中継する 全光処理により、光の広帯域特性を活かした大容量 で柔軟な光ネットワークの構築に必要な光通信シ ステム技術の実現を図るため、100 nm 程度の帯域を もつ、160Gbps/ch 以上、伝送距離数千 km 以上の超 高速波長分割多重伝送の実現、10Tbps 級の広帯 域・高密度波長多重(WDM)信号光を数千 km 伝送す るための伝送技術、10,000 以上の光回線を自由にル ーティング可能な超高速・高効率全光ネットワークシ ステムの構成法の確立など、システム技術の研究開発 を進めると共に、これらシステム技術の実現に必要な サブシステム技術として、全光クロック抽出技術の研 究開発、超高速変復調技術、超高速 WDM 光多重・分 離技術、光増幅器技術の研究開発を行う。
フォトニックネットワークに 関する光アクセス網高速 広帯域通信技術の研究開 発	H.12～H.17 (6 年間)	通信需要の爆発的な増加に対応するため、バックボ ーンネットワークの高速広帯域化、アクセス網からの 全通信経路での広帯域化を行うとともに超高速な光 信号制御・管理技術を実施する。
光バーストスイッチングを用いたフォトニックネットワ ーク技術の研究開発	H.13～H.17 (5 年間)	フォトニックネットワークを実現する技術として、光バ ーストスイッチングを用いたネットワークがある。これ は、バーストデータ伝達に必要な時間だけある波長を 割り当て、ネットワークリソースの使用効率を高めた 光伝達網である。本研究開発は、光バーストスイッ チングルータに必要なデバイス及びシステム技術、ネッ トワーク制御等のソフトウェアを開発し光バーストスイ ッチングのプロトタイプの実現するための技術基盤を 確立する。

本研究開発の実施に当たっては、幹線系、アクセス系、ノード系にまたがる研究テーマと多くの研究参加機関間の連絡調整を円滑に行うため、技術企画調整会議を開催し、チーム間における情報共有によるプロジェクト内の連携強化及びプロジェクト間の連携の促進が図られている。

フォトニックネットワーク技術企画調整会議

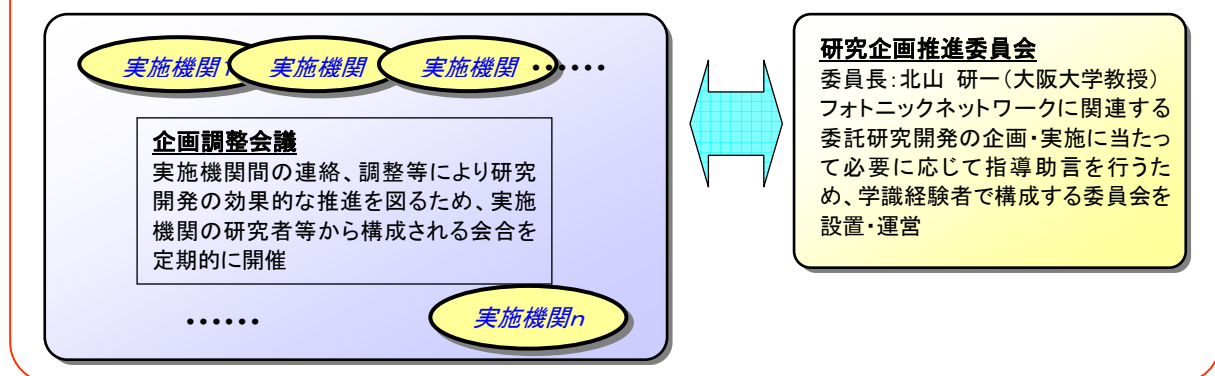


図2. 3 フォトニックネットワーク技術企画調整会議による総合調整

本研究開発により下記のような世界最先端の研究成果が得られている。

- ✚ 1本の光ファイバで波長の異なる64波を多重化し、毎秒43ギガビットの情報を載せて6000km(大陸間回線相当)を伝送することに成功。
- ✚ 低コストでネットワーク構成が可能であるとして注目されているCWDM(Coarse-WDM: 低密度波長多重)の実現に必要な、広い波長域(100nm超)を増幅可能な光増幅器を開発。
- ✚ 世界で初めて1波長当たり毎秒160ギガビットの情報をやりとり可能な光送受信装置の開発に成功し、640km長距離伝送(基幹通信網への適用が可能)を実現。電気機械制御の微小ミラーによる世界最小、最速の切り替え時間の高速光スイッチ(256x256チャンネル)を開発、テストベッドを用いた実験において、世界で初めて、信号を従来に比べて10倍以上高速の20ミリ秒で光のまま経路変更・制御できることを実証。
- ✚ 各地点間の通信接続を光波長単位で迅速、柔軟に設定可能な都市内光通信ネットワーク向け経路制御システムをユニットサイズ(幅483、高さ132mm)で実現。

また、情報通信研究機構では、平成13年度から平成17年度において、ペタビット級の伝送容量を実現するため、光の属性を極限まで利用して多重・長距離伝送を実現するフォトニックリンク技術、ノードにおける転送・処理を光領域で超高速に実現するフォトニックノード技術等の基礎技術の研究開発を実施している。

本研究開発において、これまで以下の成果を上げている。

- 光符号分割多重技術と波長多重技術により光信号の周波数利用効率が世界最高となる1.6bit/s/Hzの高密度多重伝送に成功した。
- 超高速非線形光通信サブシステムの研究開発を実施し、多値化とOTDM併用による160Gbit/s ASK-DPSK方式伝送フィールド実証実験をJGN II光テストベッド(約200km)にて世界で初めて成功させた。
- 更にOCDM方式に関してJGN II光テストベッドを活用して世界で初めて200km区間で多重伝送フィールド実証実験を産官連携により成功させた。
- 回線(波長)を効率的に利用できる光パケットルーティングネットワーク実現のためのノード技術に関し、光符号ラベル認識処理技術および光バッファを用いた光パケットスイッチのプロトタイプを世界に先駆け開発、入出力インタフェース速度を160Gbit/sまで性能向上させた。

上記のように、総務省においてネットワーク基盤技術の研究開発を一元的に行っているが、この他に文部科学省において、新機能デバイスの基礎研究が、また経済産業省において、機器・デバイス開発が実施されている。

また、超高速フォトニックネットワークの早期実現を図るため、民間企業や大学・研究機関、有識者、国等が結集し、超高速フォトニックネットワーク開発推進協議会が設立(2001年2月)、各種シンポジウム開催等を通じた情報交流や普及啓発活動等が行われている。

※「超高速フォトニックネットワーク開発推進協議会」

超高速フォトニックネットワークの早期実現を図るため、民間企業や大学・研究機関、有識者、国等が結集し、超高速フォトニックネットワークの実現に必要な技術の研究開発に関して、その方向性や方策の検討、情報交流や普及啓発等を行い、もって世界の情報通信技術の発展に寄与するため、平成13年2月に設立された非営利団体である。

超高速フォトニックネットワークの早期実現のための技術動向調査、方策の検討・提言、情報交流・普及啓発、民間企業、大学・研究機関、有識者、国等の連携等を目的とし、その達成のため、協議会のもとに技術調査部会および企画部会を設置し、具体的な活動が行われている。

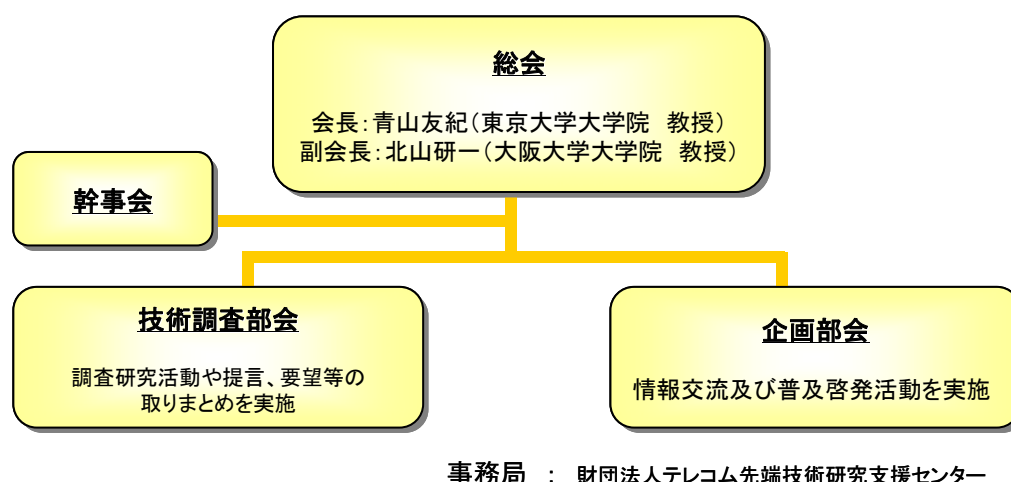


図2. 4 超高速フォトニックネットワーク開発推進協議会体制図

2-1-2. テラヘルツ技術

テラヘルツ技術は、従来、その周波数帯における信号源・検出器の開発が遅れていたことや、水の吸収が大きく影響するなどにより利用が難しく、応用分野は分光などの特殊な計測・分析分野、あるいは電波天文等に限定されていた。現状の取組としては、競争的研究資金や国の研究機関（独立行政法人）、大学などによる、基礎・基盤研究が中心であり、これまでにいくつかのプロジェクトがあるものの比較的小規模で特定目的型であった。最近になり、テラヘルツ波を利用した分光・イメージングの実用化に向けた研究、フォーラムや学会活動も活発化してきており、今後は多様なICT利活用へ向け、計画的なプロジェクト研究への取組が必要となっている。

総務省関連では、平成14年度から戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)において、大学・民間等によりテラヘルツ波発生・検出技術及びデバイス技術等の研究開発が行われている。また、情報通信研究機構においては、テラヘルツ時間領域分光システムやテ

ラヘルツデバイスの研究開発が行われ、広帯域(数 THz)テラヘルツ分光システムについては、この成果を受けてメーカーによる製品化が完了している。また、超高速通信システムに向けたデバイス(HEMT)については試作等、研究が進められている。

上記のように、総務省においてテラヘルツ波のICT利用へ向けた基盤技術の研究開発が推進されているが、この他に文部科学省において、新規センシング技術や物性科学等、テラヘルツ波技術の基礎研究が進められている。

また、テラヘルツ技術の研究開発・標準化・応用に関する調査研究、産業の振興、研究交流、普及啓発等を目的としたテラヘルツテクノロジーフォーラムの設立(2003年10月)や関連学会における専門委員会の設置の他、テラヘルツ技術に関する国際会議の開催など、フォーラムや学会活動が活発化してきている。

※テラヘルツテクノロジーフォーラム

- ・ テラヘルツ技術を早期に普及し応用分野を開拓するため、テラヘルツ技術の更なるレベルアップ、標準化、調査研究、情報の収集、関係機関との連絡調整、普及活動等を行い、新産業創出に寄与することを目的として、平成15年8月に設立。
- ・ 現在までに約300名の会員を超える組織となっており、テラヘルツ応用分野の中心的組織として役割大。

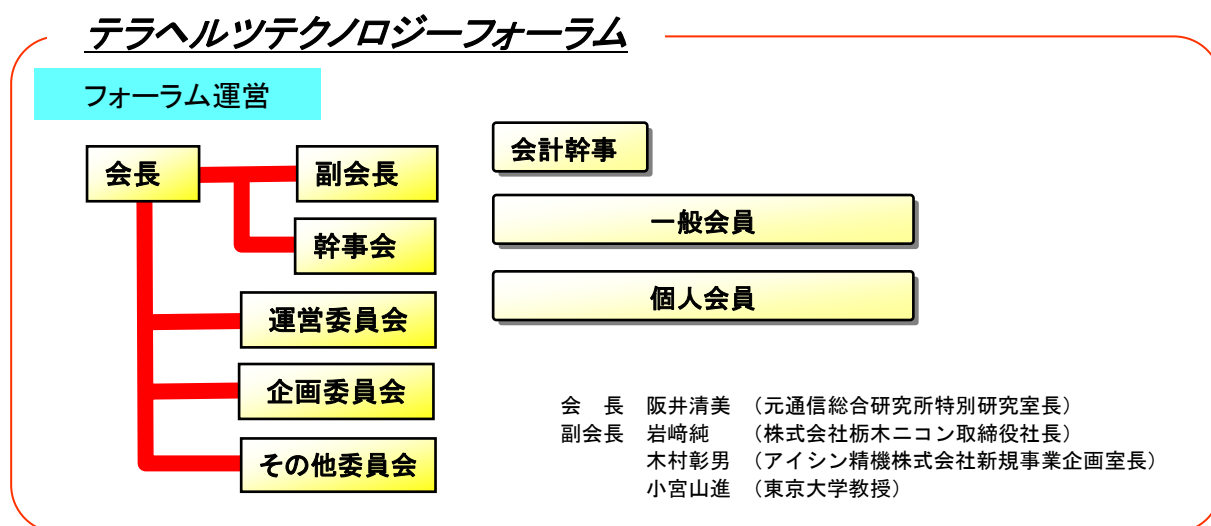


図2. 5 テラヘルツテクノロジーフォーラム

2-1-3. 量子情報通信技術

総務省では平成13年に「量子情報通信研究推進会議(座長:江崎玲於奈 芝浦工業大学学長)」を設置し、量子情報通信技術に関する研究開発を戦略的かつ総合的に推進してきた。具体的には、情報通信研究機構(NICT)からの委託で次の3課題が実施されている。

- ・ 「量子暗号技術の研究開発」(平成13年度~17年度):東京大学、三菱電機、NEC
- ・ 「量子もつれ光子対通信技術の研究開発」(平成15年度~17年度):NTT
- ・ 「光通信波長帯量子制御光変復調技術の研究開発」(H16~20年度):産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、日本大学

これまでに、三菱電機が96kmの量子暗号鍵屋外伝送実験に成功し、NECは、150kmの鍵配送や100kbpsの量子暗号鍵配送(距離は40km)の他、架空ファイバを用いた暗号鍵の2週間連続生成に成功している。また、NTTは、20km離れた1対の光子間で相関を保持する

ことに成功している。

一方、総務省の戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)により、量子情報通信の基礎研究に関する課題が大学、民間等により行われている。これまでに、3者間量子テレポーテーションに成功(東大:2004年)、半導体を用いた量子もつれ光子対の発生(東北大:2004年)等の成果が得られている。

情報通信研究機構では、量子通信の基礎研究が実施され、量子通信の2つの基本原理である量子情報源符号化と量子通信路符号化の原理実証、半導体受光素子による光子数識別器の開発、時間波形の制御された単一光子発生に成功するなどの成果が得られている。

また、上記研究開発実施機関の研究代表者等で「研究代表者会議」が構成され、研究者間の活発な意見・情報交換の場となっている。

※量子情報通信研究代表者会議

- ・平成13年9月以降毎年2回開催し、SCOPE公募研究採択チーム、NICT委託研究チーム、NICT自主研究チーム相互の情報交換及び研究テーマの検討を実施。2005年7月現在、我が国23の研究チームから構成される。
- ・情報の内容によっては守秘義務を課すことで、チーム単独では入手困難な情報を容易に共有可能としているほか、チーム間におけるノウハウの共有により、当該分野の研究開発全体のポテンシャルアップに大きく寄与。
- ・専門の異なるチーム間の連携により、迅速で多様な情報収集・分析と質の高いテーマ検討が可能になるなど役割大。

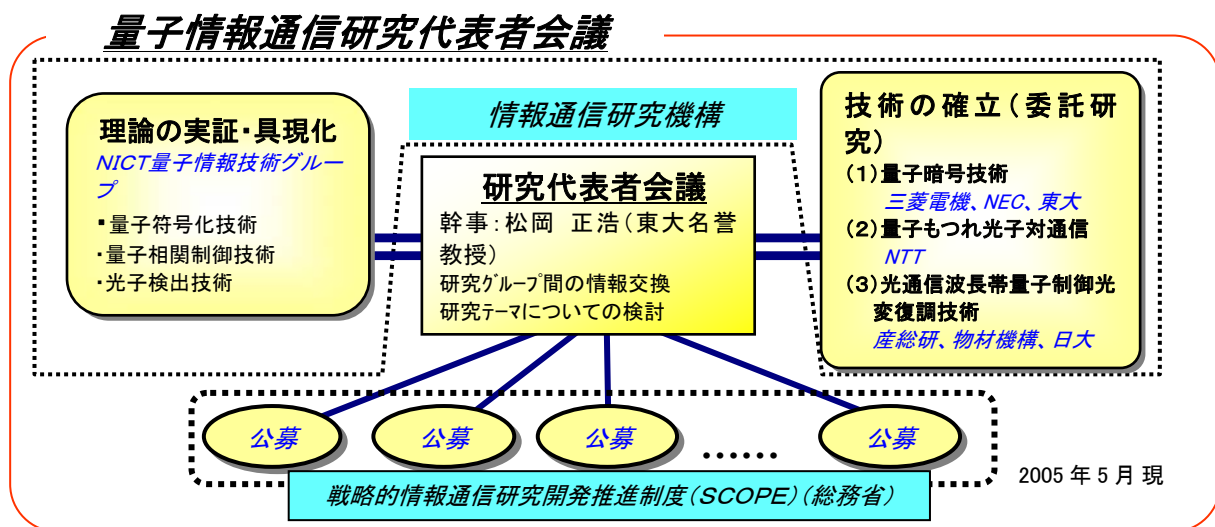


図2. 6 量子情報通信研究代表者会議による総合調整

上記のように、総務省において量子情報通信技術の研究開発を一元的に行っているが、この他に文部科学省において、量子コンピュータの実現を目指し、量子情報処理関連の研究が進められている。

2-1-4. ナノIT

我が国におけるナノITに関する取組は、競争的研究資金や国の研究機関(独立行政法人)、大学等による基礎研究を中心としたものとなっている。これらの多くは、ナノ技術を活

用した新機能の創出、デバイスの極限性能の達成を主眼にしている。今後はこれらの基礎研究と並行して、ネットワーク基盤としての出口を明確化した目的研究としてのプロジェクトを計画的に推進する必要がある。

総務省関連の取組としては、平成14年度から戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)が実施されている。大学・民間からの公募に基づき、ナノ・バイオテクノロジーを用いた情報通信デバイス、低消費電力情報通信デバイス等に関する研究課題が採択され、研究が推進されている。また、情報通信研究機構においては、分子素子、ナノワイヤー等の新機能・極限技術の研究が行われている。

これら基礎研究に加え、総務省からの民間委託により平成16年度から5ヶ年の計画で、「ナノ技術を活用した超高機能ネットワーク技術の研究開発」が実施されている。本プロジェクトは、ナノデバイスの新機能・高性能をネットワーク上で検証することを目指した、目的研究として実施されている。第一の研究開発課題は、半導体量子ドット光非線形素子を用いた全光学的中継技術であり、複数の WDM チャンネルを一括して再生中継することにより、中継器の大幅な省電力、小型化をはかることを目指している。第二の課題は半導体量子ドット狭線幅レーザを用いた高効率伝送技術であり、多値変復調技術の導入により周波数利用効率の改善を目指している。第三の課題はフォトニック結晶構造光集積デバイスを用いた高機能ノード技術である。フォトニック結晶基板上に光スイッチ、光遅延回路などの各種光回路を集積することにより、ワンチップ上で光パケットをアド・ドロップする機能を実現する計画である。第四の課題は、近接場光を用いたナノ・インターフェース技術であり、アクセス網において、超高速の光―電気インターフェースを低価格で実現することを目指している。これらの研究開発を通じ、2008年度までに、ネットワークの飛躍的な高機能化を実現する要素技術を確立することを目指している。

上記のように、総務省においてナノ技術を活用したネットワーク技術の研究開発を行っているが、この他に文部科学省において、様々な応用の可能性に向けたナノデバイス基礎技術の研究が進められている。

2-2. 諸外国における取組状況

諸外国においても、各国の政策の下、次世代ネットワークの実現を意識し、テストベッドによる実証実験や研究開発プロジェクトでの最先端基盤技術開発が積極的に進められている。

ネットワークの大容量化や広域化は、サービスの電子化(電子政府、電子商取引、eラーニング等)、情報のデジタル化(デジタルシネマやデジタル図書館等)がトリガーとなり進んでいる。最先端のネットワークを検討するにあたっては、医学、気象、宇宙等の科学研究の進展とそれに合わせたネットワークコンピューティングの展開や教育コミュニティでのネットワーク利用を意識することも重要である。このような観点から、欧米で行われているテストベッドでの検討では、研究ネットワーク上でアプリケーション実証が主眼のひとつとなっている。特に最先端の大容量研究ネットワークでは、その中でフォトニックネットワーク技術の果たす役割について、アプリケーションとの連携も考慮しながら、検討が行われている。

一方、諸外国において、ナノ技術を様々な分野に応用する取組が国家戦略として位置づけられている。この中で、ナノ技術を活用したIT、ネットワークの高機能化 も最重要課題の一つとして取り上げられている。

2-2-1. 米国における取組状況

米国では、DARPA、NSF 等が中心となって国防目的主導の先端技術開発プログラムや超高速エレクトロニクス分野のプログラムを戦略的に推進している。DARPA のプロジェクトは、将来を指向し基礎的研究を行っている大学と企業の間を埋めることを意識したものであることを謳っている。まずは先端研究の実証を行える研究ネットワークを準備し、そこで大学間や産学共同研究を進め、実証実験のフェーズを経て、最終的には技術を産業界に移転するという明確な戦略を持っている。

さらに米国ではテストベットや研究開発プロジェクトに加え、国防省が主導で次世代ネットワークを実際に構築する動きもある。インターネットが ARPAnet から発していることがその典型例であるといえるが、戦略的、政策的な意思をベースに研究開発が推進されている面があることを十分意識しておく必要がある。

フォトリックネットワーク技術関連としては、DARPA の DOD-N(Data in the Optical Domain Networks)プロジェクトで、100Tbps 以上のスケーラブルな光ルータの実現が目標とされている。さらに個別の要素技術の検討に主眼をおいた研究開発プロジェクトも進められている。代表的なものとしては、米国 DARPA の Microsystems Technology Office (MTO) のプログラムがあり、その中で、Chip Scale Wavelength Division Multiplexing、Optical Code Division Multiple Access、Chip to Chip Optical Interconnects 等が検討されている。

表2. 2 DARPA/NFS によるフォトリック関連プロジェクト

DARPA 関連		
Next Generation Internet	2002 年 終結	SuperNet の研究開発(WDM による>100Gbps ネットワークとその運用管理技術) Internet2 の構築と運用研究
Chip to chip inter-connects	進行中	シリコンチップ間の光接続技術。プロセッサ間の 40Tbps の接続などを目標とする。
Chip-scale WDM	進行中	WDM 技術を利用した次世代ダイナミック、リコンフィギュラブル網、およびそのコンポーネントの研究を行う。
Optical CDMA	進行中	光 CDMA に向けたハードウェア技術(符号化、復号化)、およびネットワーク方式の提案を行う。
Photonic A/D technology	進行中	光処理による信号のデジタル化処理技術の確立を目指す。モード同期レーザや高速変調器の開発が中心。
Analog optical signal processing	進行中	光アナログ信号処理技術による、RF システムの性能向上をめざす。高性能光検出や、任意光波形発生などを行う
NFS 関連(一部)		
TeraGrid Pj.	進行中	科学技術計算用のグリッドシステムPj。計算機間を最大 40Gbps で接続し 20Tflops の実現を目指す。

テラヘルツ技術関連の状況は以下のとおり。

・**TIFT** (Terahertz Imaging Focal-plane-array Technology): セキュリティ応用の小型高感度テラヘルツ波センシングシステムの開発。

・**TFAST** (Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitter): (2003～2006年) 高速通信、フェーズドアレーアンテナ送信機のデジタル化応用の超高速IC開発(クロック周波数 100GHz 以上)。

・**SWIFT** (Submillimeter Wave Imaging FPA Technology): (2005年～) セキュリティ、防衛用イメージング応用のサブミリ波FPAに係るコンポーネント開発。

また、DOE 関係では、高出力テラヘルツビーム源の開発が進められており、Thomas Jefferson 研究所をはじめ、テラヘルツ自由電子レーザー開発が急ピッチで進められている。開発後は、基礎科学のみならず、様々なデータベース構築に利用されるものと予想される。

一方、複数の企業が、テラヘルツ技術関連の製品開発を行っている。

- ・Picometrix 社により、スペースシャトル外壁タイル内部の欠陥検査テラヘルツイメージングシステムが開発され、NASA で実用。その他、様々な応用を開拓中。

- ・Coherent 社は、テラヘルツ帯小型高出力炭酸ガスレーザーを開発。環境・天文応用に加え、イメージングシステム開発を展開。

- ・Agilent Technologies 社、Physical Sciences Inc.、Northrop Grumman 社、Boeing 社、Lockheed Martin 社等により、テラヘルツ光のセキュリティ分野への応用開発が進行中。

量子情報通信技術関連では、NSF(全米科学財団)により、量子計算分野及び量子光学分野の研究開発を推進(最近3年間で約 40 億円)している他、DARPA 等が中心となり、3～5年間の研究プロジェクトを推進している。DoD(The Department of Defense)は総額 20.6 百万ドル(約 22 億円)出資して量子暗号などの量子情報プロジェクトを推進中。全体的には 50 百万ドル(約 55 億円)がここ数年のうちに量子暗号に対して投資されると予想される。また、NIST(国立標準技術局)では、独自の研究部門により、量子デバイス等の研究開発を実施している。

ナノ技術に関しては、国家ナノテクノロジー戦略(2000年1月～)のもとに、広範な研究開発に対して積極的な予算措置が講じられ、省庁を越えた枠組みで研究が推進されている。5つの大きな取組「グランドチャレンジ」の一つにおいて、ナノエレクトロニクス、ナノフォトリクス等の活用による大容量、省電力、高密度等の超高機能ネットワーク技術に関するプログラムが推進されている。

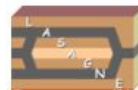
2-2-2. 欧州における取組状況

欧州における研究開発プロジェクトは、現在第6次のプログラム(FP6)が進行中であり、次の第7次(FP7)(2006 年に第1次募集開始予定)に向けた準備を行っている段階である。ネットワーク基盤技術関連については、7つの優先テーマの一つである Information Society Technologies (IST)プログラムを中心に、産官学連携の研究が活発になされている。IST の目的は、欧州の IT テクノロジーにおけるリーダーシップを確保するとともに、欧州域内のビジネスや産業でイノベーションや競争力を高め、ひいては欧州市民に貢献することにある。将来のコンピュータやネットワークを用いて、人に優しいアプリケーション・サービスを実現するための多くの取組が、2010年までにサービス提供することを目指してなされている。欧州プロジェクトの特徴は、まず、長期ビジョンに基づく全体計画をベースに、テーマを基礎から応用まで具体的に細分し、各々のテーマに関連する技術を得意とする機関が協力して研究を遂行していることである。

IST プログラムの中で、フォトリックネットワークから光信号処理まで要素技術を含め幅広く検討が進められており、フォトリック関連だけでも 60 以上のプロジェクトがあるが、そのうちシステム関連の主なものを表 2. 3に示す。

表2. 3 フォトニック関連のIST(FP6)のプロジェクトの例

名称	タイプ	期間	予算	備考
NOBEL	総合プロジェクト (IP: Integrated proj.)	04.1~05.12 (24months)	13.7M €	Next generation optical networks for broadband European leadership
e-Photon/One	NoEプロジェクト (Network of excellence)	04.2~06.1 (24months)	2.9M €	Optical Networks: Towards Bandwidth manageability and cost efficiency
GANDALF	特定目的プロジェクト (STREP: Specific targeted research proj.)	04.1~05.12 (24months)	1.9M €	Gigabit access network using remote delivery optical feeder for heterogeneous broadband wireless and wireline nodes
LASAGNE	特定目的プロジェクト (STREP: Specific targeted research proj.)	04.1~06.12	2.7M €	All-optical label swapping employing optical logic gates in network nodes
BREAD	連携プロジェクト (Coordination proj.)	04.1~06.06 (30months)	1.7M €	Broadband in Europe for all: A multi-disciplinary approach



IST においても、パッシブおよびアクティブネットワーク技術から将来的な光ルーティング技術、大容量ネットワークから超高速光信号処理に到るまで、現状考えられるフォトニックネットワーク関連のテーマが網羅されている。また、拡大EUをカバーする研究・教育ネットワークとして GEANT1 に続き GEANT2 が進行中であるなど、欧州における産官学の研究開発コラボレーションは活動として既に根付いている。今後、関連する各研究開発プロジェクトの有機的な連携、さらには、IST プログラム以外のプロジェクトとの連携を推進する動きが予想される。

また、テラヘルツ技術に関しては、FP5、FP6 において、2000年以降、テラヘルツ波の安全性を検討するとともに、医療、通信応用を目指した研究が活発化している。また、英国では、フレームワークと連動して、LEEDS 大学を中心に、大型の研究予算も割り当てている。

・**WANTED** (Wireless Area Networking of Terahertz Emitters and Detectors): (英: 2000~2003年) 1~10THz の広帯域半導体発振器や検波器を開発し、テラビット級 WAN の可能性を検討。

・**TERAVISION** (Terahertz Frequency Imaging Systems for Optically Labeled Signals): (英: 2000~2003年) 高出力・小型近赤外短パルスレーザーを用いた医療応用小型テラヘルツパルスイメージング装置の開発。関連して、ベンチャー企業を通じた技術の事業化も進展(TeraView 社)。

・**NANO-TERA** (Ballistic Nanodevices For Terahertz Data Processing): (仏: 2001~2004年) テラヘルツ帯信号処理デバイスの研究。

・**SUPER-ADC** (A/D converter in superconductor-semiconductor hybrid technology): (スウェーデン: 2002~2004年) 高温超伝導体と半導体とのハイブリッドによる超高速AD変換器の実現を目指した研究。

量子情報通信に関しては、FP6において、量子暗号のネットワーク化を目指すプロジェクトが2004年4月に開始されている。

- ・ **SECOQC** (Development of a Global Network for Secure Communication based on Quantum Cryptography) : 41研究機関、12カ国(Austria, Belgium, Canada, the Czech Republic, Denmark, France, Germany, Italy, Russia, Sweden, Switzerland, United Kingdom)参加の共同プロジェクトで、11.4 百万ユーロ(約 16 億円)出資。4 年間で量子暗号ネットワークを構築することを目的とし、コヒーレント型量子暗号や量子ワイヤレスを含む研究開発が計画。

また、FP6において2002年よりナノテクが重点分野にとりあげられ、ISTの中の「コンポーネントとマイクロシステム」、「マイクロ・ナノシステム」、「光・光エレクトロニクス・フォトリック機能コンポーネント」において、ナノ IT・ネットワーク関連技術の研究開発が実施されている。その他、スイスの TopNano21、ドイツのナノコスモプロジェクト、英国の IRC など、欧州各国で積極的に国家戦略が展開されている。

2-2-3. アジア・パシフィックにおける取組状況

中国、韓国、オーストラリア、シンガポールなどアジア・パシフィック地域でも、国家戦略としてネットワーク基盤技術関連プロジェクトが推進されている。

中国では、873プロジェクトにおいて、光バーストスイッチング、波長変換技術、光メモリ等の研究開発を、973プロジェクトにおいて、光 MEMS、超高速光情報処理技術等の他、量子通信・量子情報の研究開発を実施している。また、国家自然科学基金委員会(NSFC)により、テラヘルツ帯物理・デバイス・応用技術に関するプロジェクトが2003年より5ヶ年で進行中である。ナノテクに関しては、総合ナノテク・プロジェクトが2003年11月より進行中である。第10期五か年計画(2001~2005年)において、ナノ光エレクトロニクス、ナノ電子材料・デバイス、集積化技術に関するプログラムを実施している。

韓国では、国立研究機関や大学により、テラヘルツ分光・イメージング技術の研究が行われ、最近、ETRI がテラヘルツ波応用技術への取組を開始している。また、量子情報関連の大型プロジェクトが開始された他、ナノテクファブセンターが設立された(2002年)。ナノ IT 関連としては、21世紀 R&D プロジェクトの一環でテラレベル・ナノデバイスプログラムを実施している。

オーストラリアでは、豪州研究会議及び参加研究機関からの出資(300万豪ドル/年、5年間で、クイーンズランド大学等、国立大学連合による研究コンソーシアム「量子コンピュータ技術センター」が設立され(2000年1月)、ナノ技術に関しても国策として戦略的に推進されている。

シンガポールでは、政府の研究開発プロジェクトの一環で、シンガポール大学等が実用規模の量子暗号網の実証システム構築を開始した(2002年)他、量子コンピュータの基礎研究を実施している(約3億5千万円/3年間)。また、2002年1月、シンガポール大学にナノサイエンス・ナノテクノロジー戦略が設立された(65百万\$)。

2-3. 21世紀ネットワーク基盤技術の動向

2-3-1 フォトニックネットワーク技術

米国では2003年にDARPA(Defence Advanced Research Project Agency)が“Data in the Optical Domain Networks (DOD-N)”等のハイリスク・ハイリターンの革新的な研究課題への挑戦を再び開始しており、EUにおいてもIST (Information Society Technology)のプログラムにおいて将来の布石を着々と打っている。

現プロジェクトによる2003年までの取組を第1段階の研究開発とするならば、今後2010年までの期間は、このような直面する問題に対する解決策を提供する研究開発を実施する第2段階といえる。第2段階の取組としては、以下のような4つの方向性が考えられる。(図2.7参照)

- ◇ ユーザ主導型のサービスを提供することができるネットワークのカスタマイゼーション
- ◇ ボトルネックがなくシームレスでかつセキュアなネットワークを構築する
- ◇ エレクトロニクスの限界を超える性能をフォトニック技術で実現する
- ◇ IPベースにとらわれず新たなアーキテクチャを探索し、将来に耐え得る高信頼・高機能なネットワークを実現する

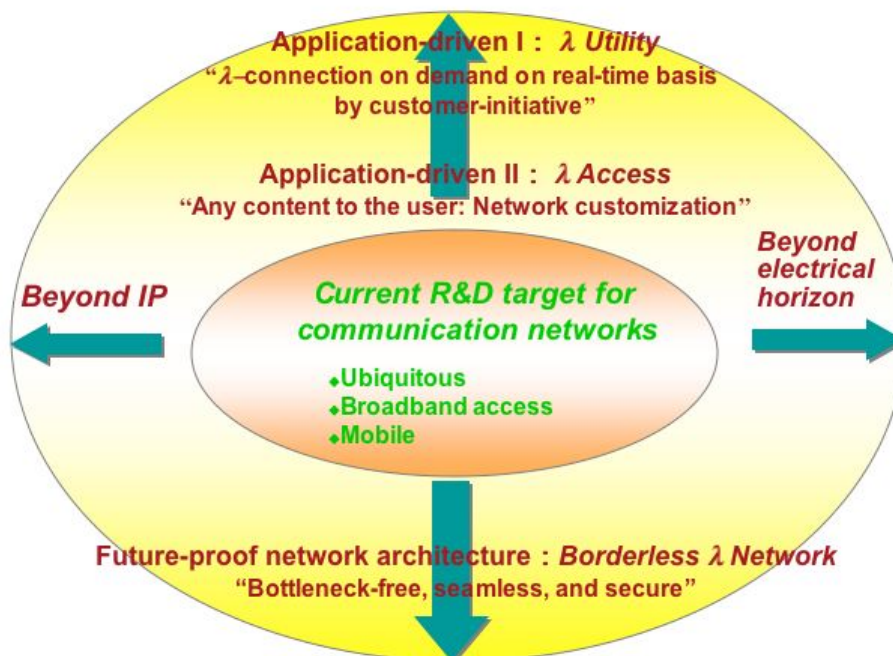


図2.7 次世代フォトニックネットワーク R&D の方向性

前節で述べたように、諸外国においてもアプリケーションとの連携、フォトニックネットワークそのものの検討、さらにはその個別要素技術の検討と、広い範囲で国家レベルのプロジ

エクトが進められており、その中で産官学連携が行われている。今後のネットワークの進展を考えると、波長をベースとしたネットワークの構築はもちろんであるが、 λ をベースにネットワークリソースをオンデマンドで利用できるようにすることが、グリッドコンピューティングやアプリケーション駆動型のネットワーク利用を実現するには不可欠となる。このような課題に取り組む応用駆動型の研究開発プロジェクト、それを実現するためのフォトニックネットワークのプロジェクト、さらにはリンク技術やデバイス技術といった要素技術を検討するプロジェクトを我が国でも積極的に推進することが不可欠な状況であるといえる。

2-3-2 テラヘルツ技術

テラヘルツ技術は様々な分野に関連しているが、技術的には、波長(周波数)や発生法の違いなどにより、テラヘルツ波(Terahertz Waves)、テラヘルツフォトニクス(Terahertz Photonics)、テラヘルツエレクトロニクス(Terahertz Electronics)に大別される。これらの技術は、これまで各々個別の進展を遂げており、対象となる応用分野も、物性・生体分析、情報通信、エレクトロニクス等、個々の技術にほぼ対応して想定されるものであった。

近年、上記3技術の進展がさらに進み、テラヘルツ帯において共存・融合が始まっており、「テラヘルツテクノロジー」の形成に向けた動きが見られる。テラヘルツテクノロジーにより、新たな応用の可能性を含め、次世代の産業に大きな役割を果たすことが期待されるようになってきている。

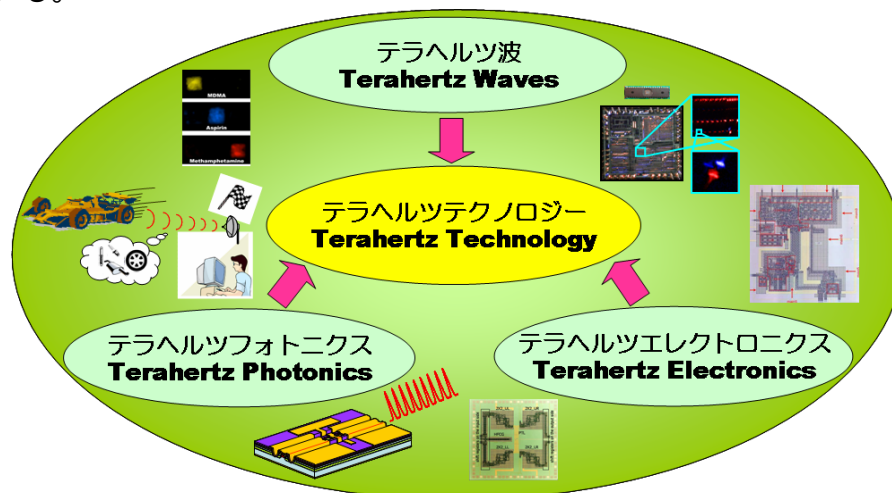


図2.8 テラヘルツ技術の進展

① テラヘルツ波分野

- ・ 時間領域テラヘルツ電磁波発生・検出手法の開発。これは、フェムト秒レーザを用いることで、超高速電流変調を実現し、超高速光スイッチを用いて、極短電磁波パルスの発生と時間遅延を用いたその電磁波波形の時間領域検出を実現。現在ではそのフーリエ成分が数十 GHz から百 THz を超える超ブロードバンドテラヘルツ波が実現されており、様々な分析応用やそのシステム開発が行われている。（通信総合研究所(当時)が、広帯域(数 THz)テラヘルツ分光システムを開発(1990年代前半)し、栃木ニコンにより2003年に製品化)
- ・ 光通信帯波長 1.5 μ m 光源を用いたテラヘルツシステム開発が進展。テラヘルツフォトニクスとの融合により、バイオメトリクス・センサーネットワークへの展開が期待される。
- ・ 近年、高精度に制御された半導体量子井戸構造におけるサブバンド間遷移を利用したレーザ(量子カスケードレーザ(QCL))の研究が活発化し、現在までに 2 THz

程度までの発振が確認されている。国内でも、種々の手法による THz 波発生が行われてきているが(東北大通研、NTT、東北大、東工大)、QCL に関しては欧米に先行されており、今後、国内で重点的な取組が望まれる。

- ・ 検出技術に関しては、東大で量子ドットによる THz 単一光子検出に成功するなど先端的な成果が出ている一方、実用化に向けた高性能 THz 検出器の開発が望まれている。

② テラヘルツフォトニクス分野

- ・ 光・電磁波変換の研究が急速に進展し、フォトミキシング技術を用いて、高出力のテラヘルツ波の発生が可能となっている。
- ・ 120GHz キャリアによる 10Gbps 無線伝送実験(NTT)など、この技術を用いて、100 GHz を超える周波数の無線通信研究が始まったところで、数 10Gbps の無線通信が実現可能となる。
- ・ また、現在、波長分割多重(WDM)技術で行われている光通信において、将来の大容量化を目指し、ソリトン通信などの研究開発も進んでおり、1 チャンネルあたりサブテラビットの情報伝達可能。
- ・ これらにより、テラヘルツ技術が情報通信技術にブレークを与え、新しい応用展開も含めて大きな進展をもたらすことが期待される。

③ テラヘルツエレクトロニクス分野

- ・ 超高速半導体を用いた HEMT の最大発振周波数が 0.5 THz を超え(阪大、富士通、NICT)、また、集積化により超高速 AD 変換器等の開発も進んでいる。
- ・ また、超伝導単一磁束量子論理回路の研究では、動作周波数 20 GHz のマイクロプロセッサが動作し、40 GHz × 4=160 Gbps の光パケットスイッチも既に実現されており、テラヘルツデジタル信号処理技術を利用できる環境が整いつつある。
- ・ これらの研究が個々に進めてきた研究開発を統合的に推進することで、テラヘルツ無線における要素技術、テラヘルツセンシングにおける信号処理回路など、新しい応用が切り開かれることが期待。

2-3-3 量子情報通信技術

2002年6月、スイス id Quantique 社が世界で初めて量子暗号装置を商用化して以来、欧米ベンチャーによる製品化が相次ぎ、現在では、100km 程度の鍵配送ができるようになっている(但し、生鍵であって、必ずしも安全性が確保されたものではない)。国内でもNICT委託研究による成果を活かし、2007年頃までに、100km 圏で 50kbps 程度のシステム製品化が見込まれており、短距離、1 対 1 の量子暗号については実用段階に入ってきたと言える。量子暗号システムの市場は、ここ数年で200百万ドル(約220億円)に達するとの予想もある(MagIQ VICE PRESIDENT, Andrew Hammond 氏)

一方、こうした1対1のリンクとしての利用からネットワークでの利用実現へ向けた動きが欧米で始まっている。米国では、BBN Technologies 社、ハーバード大学、ボストン大学が6地点を結ぶ量子暗号ネットワークの屋外実証実験に成功している(2004年7月)。スイスでは、id Quantique 社とデックポイント社が共同で、量子暗号を使ったネットワークサービスのデモを行っている(2004年9月)。さらに、NIST(National Institute of Standards and Technology)のチームが Acadia Optonics と共同で、自由空間 730m の距離で最大 1Mbit の鍵を共有(2004年7月)するなど、光ファイバを用いない自由空間量子暗号への取組も始まっている。

しかしながら、上記いずれのシステムにおいても量子状態を保ったまま中継する技術がないため、量子暗号を送信できる距離に限界があり、更なる長距離化のためには、量子中継を実現する必要がある。

近年、国内外で通信波長帯動作を目指した量子ドットの研究が数多く報告されている。国内で、富士通/東京大学により、埋め込まれた量子ドットから $1.3\mu\text{m}$ 帯単一光子が放出され、世界初の通信波長帯動作単一光子発生器が開発されるなど、量子情報システム応用に向けた、デバイス技術の顕著な進展が見られる。量子暗号装置の高性能化が期待される。

また一方で、量子テレポーテーションなど、量子もつれをベースとした量子情報通信ネットワークの実現に向けた基礎技術も着実に進んでいる。

2-3-4 ナノITネットワーク

1970年の江崎、Tsu による半導体超格子・量子井戸の提案により、電子の閉じ込め効果を活用するデバイス研究がスタートした。量子井戸における二次元の電子の運動を一次元化した量子細線が1980年に楸により提案され、1982年には 荒川・楸により、電子の運動を零次元にした量子ドットが提案、レーザへの応用が示された。また、周期的な屈折率分布を持つ新しい光ナノ構造により光の存在自体を制御する、フォトニック結晶については、1980年代末、米国において研究がスタートし、国内では京都大学等で研究が進められている。

近年、光ネットワークの高機能化や量子情報通信等への幅広い応用を切り拓く要素技術として、これら量子ドットやフォトニック結晶をベースとしたデバイスの高性能化に関する研究開発が国内外で活発化している。

量子ドットデバイスに関しては、従来の光半導体デバイスの性能を大幅に改善した、高速変調量子ドットレーザ、量子ドット波長変換素子、量子ドット光増幅器等の実用化に向けた研究が進んでいる。また、通信の大容量化に向けたコヒーレント光通信用光源として、量子ドットの特性を生かし従来の半導体レーザに比べ4分の一の線幅を有する狭線幅レーザの検討も開始されている。また、新しい機能を有するデバイスとして、量子情報通信に向けた量子ドット単一光子発生素子に関して基礎的な研究が開始され、実用化の検討が進むと期待される。また、従来のバルクや量子井戸半導体には不可能であった多波長一括能力や、従来材料に比べて一桁速い非線形応答を利用した、量子ドット波形整形素子の開発も進んでいる。

今後、全光学的再生中継、光パケット処理などのフォトニックネットワーク技術や高効率量子暗号通信システムなど、ナノ技術のシステム応用が期待される。将来のフォトニックネットワークの大容量化、高機能化を実現するにあたって、これまで電子技術を用いて行なわれていた信号処理の一部を光領域で行なうことは、装置の低消費電力化、超小型化をはかる上でも重要な課題である。その実用化には、ナノ技術にかかる期待が大きい。

光信号処理の導入が期待されるシステムの一つは再生中継器(2R/3R)であり、この技術により、ネットワークのスケラビリティ、柔軟性が著しく改善される。全光学的な波形整形回路としては、これまで半導体光増幅器を用いたマッハツェンダー干渉計スイッチ、半導体過飽和吸収素子、半導体および光ファイバを用いたリミッタ増幅器、高非線形光ファイバスイッチなどが検討されている。今後これらの光回路の性能向上がはかられ、一部が実用に移行するものと思われる。160Gbps 以上の動作速度では、フォトニック結晶構造/新規高非線形材料を用いた高非線形ファイバスイッチが、40Gbps では集積化が可能な半導体デバイスが有望である。半導体デバイスでは、量子ドットの利得飽和や過飽和吸収を利用した波形整形素子の性能向上が期待される。

波長をラベルとしたスイッチングは実用化の域に近づいているが、より細かい粒度（究極的には IP パケット）でのフォトニックスイッチング技術も重要性を増している。フォトニックスイッチングの導入により、IP ルータの性能を飛躍的に向上させる可能性があるためである。これまで、既存の光スイッチ、光遅延回路などを用いて、原理検証のための実験が行われてきた。しかし、本格的な実用化に向けては、各種光回路の集積化が必須の課題であり、フォトニック結晶構造を核とした光集積回路技術の確立が強く望まれている。

また、大容量光ネットワークを最大限に利用し、ネットワーク利用者の享受し得るアクセス速度の向上として反映させるためには、電気（または電波）による伝送とアクセス系ネットワークとの接続部において、超小型、超省電力の光-電気変換インターフェース機能が必要である。しかしながら、近い将来、FTTH におけるユーザー側の光-電気変換インターフェース装置においてアクセス速度の制限が生じることが懸念されており、高機能インターフェース装置の実現は重要な開発課題となっている。そのため、波長より小さなサイズの近接場光を利用したナノ・インターフェース技術等により、アクセス速度の向上を図り、ネットワーク全体にわたり超高速データを滞り無く伝送・処理できる技術を開発することが望まれている。

第3章 21世紀ネットワーク基盤技術の研究開発課題

3-1 次世代フォトニックネットワーク

フォトニックネットワーク技術は、ネットワークの高速大容量性・広帯域性を可能にするとともに、光による高速信号処理を可能にするという点で超高速ネットワークに貢献する。このような次世代のフォトニックネットワークの実現に向けた研究開発課題として、ネットワーキング技術、リンク技術、超高速信号処理に分類し、それぞれについて短期的・中期的に実現すべき課題の整理を行った。ノードの高機能化とともに、それをネットワークとして運用・制御するための技術開発や、ネットワーク構成自体をどうすべきか、という「アーキテクチャ」の研究が重要となる。中長期的には、光のままパケットの行き先を識別する技術など、光の性質を極限まで追求し、ネットワークとして使えるようにするための課題が重要である。

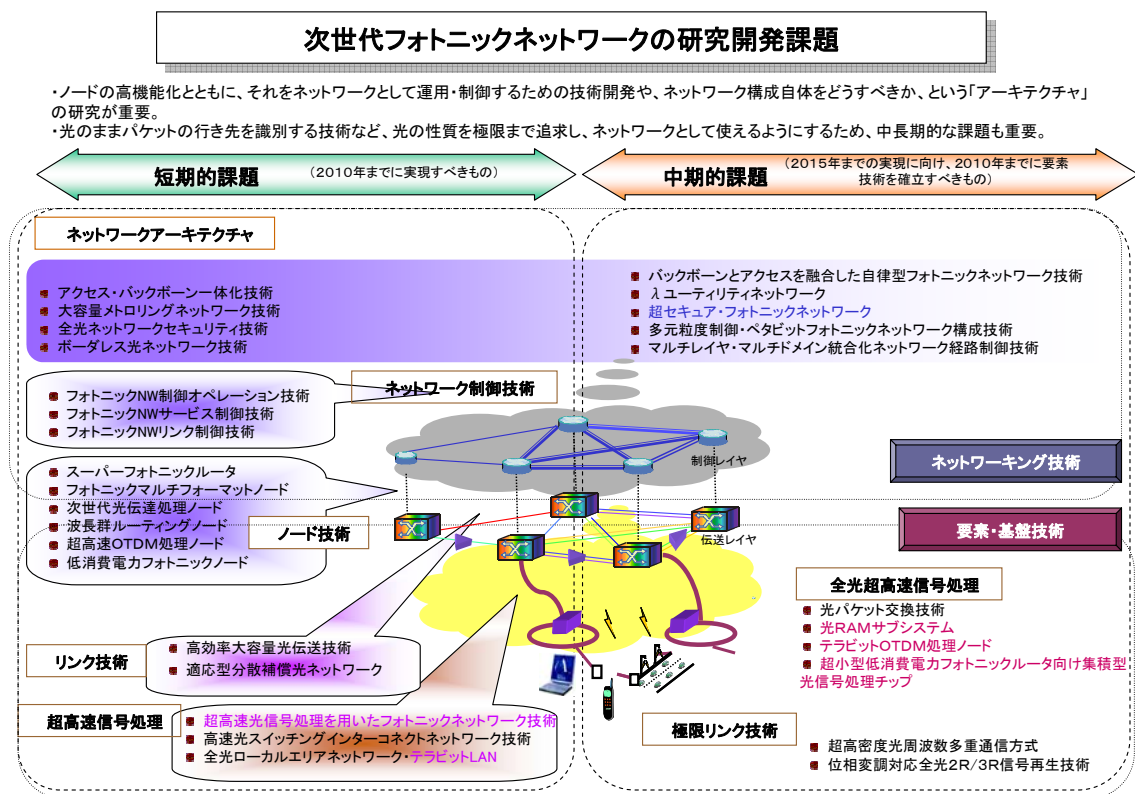


図3. 1 次世代フォトニックネットワーク研究開発課題

3-1-1. ネットワークアーキテクチャ

多様化するサービスの実現に向けたネットワークアーキテクチャの課題は、それらの多様化するサービスを効率よくネットワークに收容して行くための基本路線を明確にすることである。

IP ネットワーク技術は、様々なサービスを同一のネットワークに收容することが可能な技術である。可変長パケットを用いた通信であること、アドレスを指定だけでコネクションレスな通信がエンド間で可能であることなどを特徴とする IP ネットワークでは、転送すべきデータを任意の大きさの IP パケットに変換し目的地アドレスを付与するだけで、様々なサービスに利用することが可能である。サービスが異なっても転送を行なうネットワークを構成する機器が同一であることにより、サービスごとに特殊なネットワークを構築する必要がないために経済的であり、新たなサービスが必要になっても最小限のコストでサービス提供が可能となる。ネットワークの制御が分散しているためネットワーク規模に関わらずネットワークの運用が可能なことで、地球規模のネットワークにまで成長してきた。

IP ネットワークはこの優れた特徴を生かし、コンピュータ間のデータ転送を目的として作られ創設時期から常に発展し続け、データ通信だけではなく、PC、WWW、クライアント・サーバの普及とともに音声、画像、動画、コンテンツなどのメディアを多用する種々のサービスを收容してきた。しかし、近年の常時接続、ブロードバンド、ピアツーピアなどのネットワーク使用環境の大きな変化により、IP ネットワークに対するサービス要求が一層多様化されてきており、従来の IP ネットワークの持つサービス能力ではカバーしきれなくなっている(図3. 2参照)。益々増大する種々のネットワークサービス要求条件を実現することが今後の IP ネットワークでは重要な課題である。関連する重要項目を以下にまとめる。

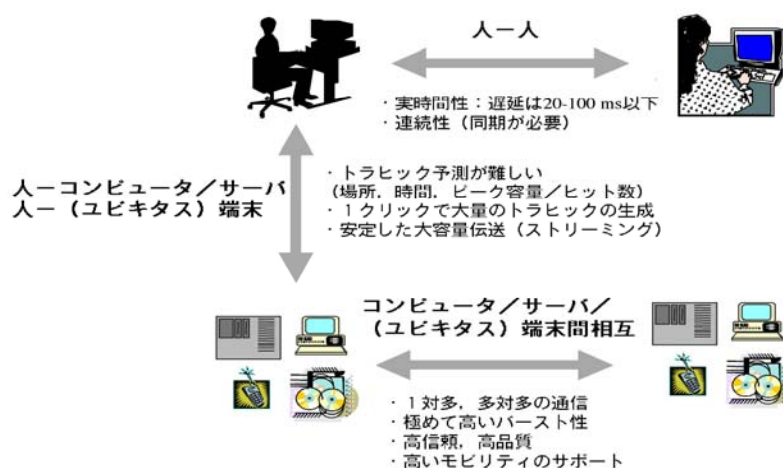


図3. 2 アプリケーションの多様化とネットワーク要求条件の多様化

- (1)従来のIPネットワークでは、IPアドレスで管理された均一なネットワークが原則であったが、この原則を破る機能拡張が行われだしている。(IPSEC、NAT、Firewall、MPLS 等)
- (2)リアルタイム性、低遅延性を要求するトラフィックなどの、トラフィック種類(品質要求条件)の多様化
- (3)エンド・エンドによるコネクションレスから、マルチポイント通信・放送や経路選択要求などへの通信形態の多様化

多様化するネットワークサービスをストレスなくネットワークに収容するためには、IP などの上位ネットワークレイヤを共有することにより、多くのサービスを経済的にネットワークに収容することが可能であるが、全てのサービスを画一的に収容することは、必要なネットワークサービス要求条件の種類が大きいため無理がある。このサービスの多様化に対する対策としては、

- (1)新たなサービス要求を実現することが可能な新しい、IPを発展させた或いはIPに代わる上位ネットワークレイヤ(次世代のIP)を構築する。
- (2)必要なネットワークサービスのサービス要求条件の種別により、それぞれ最適なサービスネットワークを選択し分配する。
- (3)選択・分配されたそれぞれのサービスネットワークでは、上位レイヤ(次世代IP)と下位レイヤ(複数種類の光レイヤなど)の組み合わせにより、種々のネットワークサービス要求条件を実現する。

という方法が考えられる。

このように、種類の異なるネットワークサービス要求条件を実現する複数種類のサービスネットワークをシームレスに統合して構築することが重要な課題となる。この統合化されたネットワークを構成するサービスネットワークのうち、多くのサービスに共通したネットワークサービスパラメータを実現するサービスネットワークは現在のIPネットワークと同様、最も経済的なネットワークとなる。いわばこの最大公約数的なサービスネットワークでは、必要なネットワーク機器の共通部分が大きいため経済的なサービス収容が可能となる。個別のネットワークサービス要求条件を実現するために(光レイヤなどの)下位レイヤを含む扱いを差異化したネットワークでサービスを実現する場合は、他のサービスとの共通性が少ない分割高になるが、その分差異化されたサービスが受けられることとなる。

多様化するネットワークサービスをストレスなく実現するためには、基本的にネットワークの高速大容量化が必要であり、これが進展すると究極的には種々のネットワークサービス要求条件はかなりの部分共通に達成されることには有る。しかし、ネットワークの高速大容量化だけでは解決出来ない、多くのサービス条件が確かに存在する。

以上の考えの下にネットワークアーキテクチャに関する重要な技術課題と研究開

発目標を以下にまとめる。

＜技術課題＞

ユーザ速度の向上に伴い、アクセスネットワークとバックボーンを一体化することで、トータルネットワークを最適化すると同時にそれに必要な技術開発が課題。

メトロネットワークについては、光信号のカットスルー性を有効利用した方式を適用し、その高速光ラベル処理と高速信号伝送によって、より大容量でフレキシブルなマルチプロトコル・リングプラットフォームを実現。また、ドメインネットワーク内に限らずドメイン間でも光パスを設定可能なネットワーク・アーキテクチャ、および制御方式に関する検討が必要。中期的には、光パケットルーティング技術、光バースト送受信技術、全光再生技術、各通信(変復調)方式の対応を可能とするマルチプロトコル送受信技術による柔軟なフォトリックネットワーク網の研究開発が重要。他方、トランスペアレント光ネットワークを実現する上で重要な、物理レイヤの脆弱性をつく攻撃にも備えた全光ネットワークのセキュリティも重要な課題。ノード間の接続を保護するセキュアなインターフェースと、ネットワーク間の接続を保護するセキュアなノード(光ファイアウォール)を検討する必要。更に、主信号を暗号化すると共に、制御信号も暗号化し、これらの鍵を量子光通信技術により安全に配信できる超大容量で超セキュアなスーパー光ネットワークを実現。

＜研究開発目標＞

2008年

- ・数 G クラスアクセス技術、TOS 制御技術等の開発
- ・オンデマンド λ VPN と光バースト信号など、マルチフォーマットに対応する光信号制御技術の確立
- ・ドメイン間のシームレスな光パス設定機構実現
- ・ネットワークスケーラビリティの確保
- ・高度に符号化された光周波数キャリアによるセキュアな光伝送技術
- ・光レベルのセキュリティ検討

2010年

- ・10 ギガクラスアクセス収容技術、TOS を考慮したアクセス技術、アクセス管理技術、バックボーン幹線を含めたネットワーク全体の制御管理技術等の確立
- ・マルチリング間を跨ぐ光バーストネットワーク構築技術、高速光バースト伝送信号の品質モニタ、監視技術の確立
- ・グローバルスケールでのパスの設定、解除の自動化
- ・動的光パス設定変更での光レーヤー上位レーヤ間協調
- ・160Gb/s 級の高速光 MUX/DMUX 技術、ユーザ向け Gb/s 光バースト受信技術等の

開発

- ・全光ネットワークにおける攻撃、妨害及び盗聴からの保護・検出手段の実装（光ファイアウォールの実現）
- ・光量子通信により、鍵の配信距離の確保とこれを用いた光パス設定の実現

2015年

- ・各ユーザ 10Gb/s 級の配信を可能とする全光再生技術の開発
- ・ノードにおける全光処理を実現
- ・主信号および制御信号を含めた、全光型のテラビット級で超セキュアなスーパー光ネットワークの実現

3-1-2. ネットワーク制御技術

現状のネットワークから、フォトリック技術をベースとした将来のネットワークへ発展していく過程で、「相互接続性」、「相互運用性」、「拡張性」を担保しつつ、シームレスに発展していくためのマイグレーションシナリオを考慮し、ネットワーク全体を効率よく運用・管理・制御するためのネットワーク制御技術の開発が重要である。本節では、ネットワーク制御技術の観点からネットワークを構成する既存の構成要素を含めてネットワーク全体を、如何に効率よく運用・管理・制御するかという点に着目して課題を整理する。研究成果を具体的に普及させるためには、標準化組織（ITU-T, IETF 等）で議論されている GMPLS（Generalized Multiprotocol Label Switching）等の内容を十分把握し、発展させる事も重要で有る。以下にネットワーク制御技術に関する課題をまとめる。

現状のネットワークの問題点として第一に、大規模ネットワークの運用管理コストの増大が挙げられる。様々なネットワークサービスを提供し、かつ年々増加するトラフィックを処理するためにネットワークの大規模化・多様化が進み、それにともない管理運用コストの増大が重要な課題となっている。しかもそのネットワークは特定キャリアの特定の運用/管理システムだけで構築する時代ではなくなり、マルチキャリア、マルチ管理ドメインのヘテロロジーニアスなネットワーク構造を考える必要があり、これは一層の運用/管理コスト増をまねく。

また現在のインターネットのような Best Effort で品質/信頼性の保証されないネットワークでは、将来の高機能サービスを提供するのには不十分であり、現状のインターネットサービスの低価格性を維持しつつ、リーズナブルなコストでより高信頼なコアネットワークを構築することが必要である。さらに、将来は大容量な光パスを様々な形態で実現する高機能ネットワークサービスの実現が期待されているが、現状の制御機能ではこれは達成できない。現時点では大容量の光パスは、主としてバックボーンネットワーク上で集中管理的に管理制御されており、かつ静的な運用に留まっている。このような光パスをより自由に簡易に制御できることが必要であり、利用時間の短い

パスや帯域を自由に変えられるパスを提供し、且つその制御インターフェースをユーザに開放するサービスも将来的には重要と考えられる。

このような問題点を鑑み、解決すべき課題を以下に整理する。まず、現状のネットワークオペレーションの状況を下記にまとめる。

- ・運用コストを削減可能なネットワーク運用管理

大規模なコアネットワークを管理する場合、従来は集中管理的なネットワーク管理システム(NMS: Network Management System)を導入していた。この構成では、ネットワーク規模の拡張性に欠け、ネットワーク装置構成の簡易な変更や、パスのダイナミックな運用が困難であるという課題が有る。

- ・サービス要求レベルに応じたネットワーク信頼性の提供

特にトラフィックが集中するコアネットワークにおいては、キャリアとして信頼性の高いシステムを導入することで、その対価として高コストなネットワーク管理となっている。ユーザのサービス要求が多様化し、且つネットワークサービスの低価格化を維持すべき現状から、均一な信頼性提供だけでなく、サービス要求に応じたマルチグレード信頼性機能の提供が必要と考えられる。

- ・様々な形態の光パスの簡易な制御

長期間帯域固定で光パスを設定する管理形態はパスの利用度が低く、また、オンデマンドでのパスハンドリングが困難である。様々な特性をもつパスを簡易に制御できる機構が必要である。

- ・ネットワークリソースを有効活用するマルチレイヤ TE 制御

ネットワークリソースを効率よく運用するトラフィックエンジニアリング(TE: Traffic Engineering)技術を、光波長リソースだけの単一レイヤで実行するのではなく、IP レイヤも含めたマルチレイヤのリソースを連携させて更に効率よく実行することが有効で有る。

- ・光リンクアグリゲーション

現状のルータ/スイッチ間の Ethernet リンク(10/100 base-T/GbE など)では帯域拡大、冗長化の観点からリンクアグリゲーションが用いられる場合が多い。しかしながら、インターフェースが高速化するにつれてリンクアグリゲーションをノード側がどこまでサポートできるかは不明である。また、テラビット級ノードでは、インターフェースの高速化及び多ポート化が実現され、またリンクも大容量化されることから、ノード間においても光リンクアグリゲーションの導入が必要と考えられる。

以上の課題は現状のエンドユーザ間を結ぶネットワークに対して今後解決すべき制御技術の課題である。今後ネットワークはエンドユーザ間を結ぶだけではなく、コンピュータ、サーバなどのマシーン-マシーン間を自在に結合する利用法も増え、その場

合、ノード数が増大するとともにネットワーク制御速度も向上させる必要があり、ネットワーク制御技術によるネットワーク資源の最適運用を実現するためには以下の課題も重要である。

・ネットワークおよびネットワークコンピュータ資源の自動発見・最適化技術

広域分散処理環境でネットワーク制御を実現することにより、ネットワークおよびコンピュータ資源を自動的に発見し、それらを必要な時に必要なだけ調達して、必要な処理を必要な時間内に実行することが可能となる。フォトリックネットワークによる高速データ伝送と、自動発見、自動経路設定、自動障害回復などを行う現状の限られた機能の GMPLS を発展させたプロトコル群との連携により、自動的に多様な資源を自在にアプリケーションに割り当てるシステムを構築することができる(図3.3参照)。

以上の考えの下にネットワーク制御技術における重要な技術課題と研究開発目標を以下にまとめる。

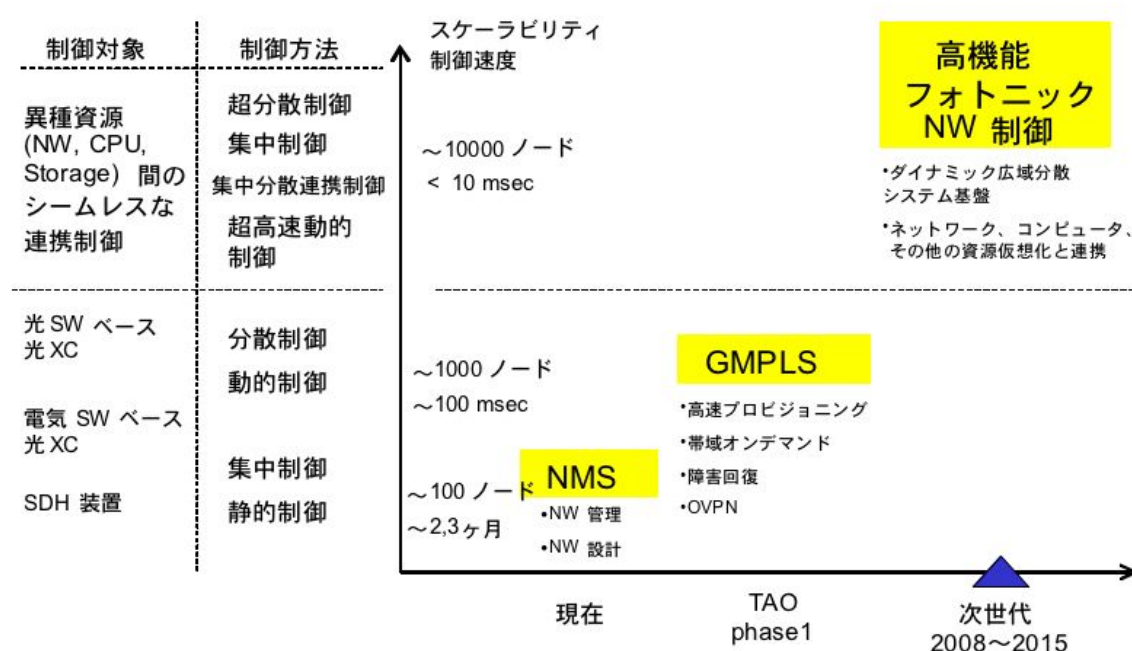


図3.3 次世代フォトリックネットワーク制御技術

<技術課題>

GMPLS 分散制御と OpS 集中制御の連携による運用コスト低減。プロテクション/リストラクションのグレード多様化と、連携運用による故障復旧機能の低廉化。GMPLS

共通リソース管理による高コストパフォーマンスな光パス広帯域提供サービスの実現。光パスのオンデマンド制御。フォトリックネットワークによる高速データ伝送と、自動発見、自動経路設定、自動障害回復などを行う GMPLS を発展させたプロトコル群との連携により、自動的に多様な資源を自在にアプリケーションに割り当てるシステムを構築する技術。また、複数のリンクを論理的に束ねることにより大容量のリンクを実現する、リンクアグリゲーション(LAG)技術の開発が課題。グリッドコンピューティング、超高精細映像等の大容量高速データが日常的にやり取りされる状況を想定し、ペタビット級の転送処理能力とともに、きめ細かく柔軟な光パス容量制御を実現する技術の開発が課題。既存の経路制御方式にとらわれない、フォトリックネットワークを核としたマルチレイヤ・マルチドメインネットワークにおける統合化経路制御技術の開発が課題。

＜研究開発目標＞

2008年

- ・GMPLS技術の確立
- ・コスト性能比の高い分散処理アプリケーションシステム実行環境を可能とする構成を検討
- ・40GbE方式の開発
- ・LMP／RSVP拡張機能の開発

2010年

- ・次世代GMPLS、フォトリックGRID－NW制御技術
- ・ダイナミック広域分散システム 基盤等GRID向けフォトリックNW制御方式の検討
- ・100GbE方式の開発
- ・障害情報転送機能等の開発による伝送路との連携
- ・テラビット級光信号の再生増幅技術、ペタビット光ノード構成技術
- ・10Gb/s～1Tb/s 程度まで、柔軟にパス容量を設定可能なネットワーク構成技術
- ・マルチレイヤ・マルチドメイン統合化経路制御プロトコルの設計

2015年

- ・2008年までに確立した各要素技術を用いたネットワーク構成技術、システム化技術の確立
- ・マルチレイヤ・マルチドメイン統合化経路制御プロトコルの試作

3-1-3. ノード技術

光と電気の緊密な連携による大容量化・高機能化を両立させ、トラフィック需要に柔軟に対応し、高度な通信品質保証を可能とする高機能フォトリックノード技術を開発する。

ネットワークサービスの多様化とともに、膨大なトラフィックの収容が必要となる将来のネットワークにおいて、ネットワークノードを高速化、大容量化するためにはフォトリソニックノード技術が必須である。現在、光クロスコネクタ(OXC)技術はネットワーク上での応用という実用の段階に入っている。

また、光パスを動的に割り当てる光バーストスイッチング(OBS)技術は、既存デバイス技術を基に新しい制御方式を導入するというアプローチにより、北米、韓国、日本(NICT プロジェクト等)で盛んに研究されている。また光パケットスイッチング(OPS)技術についても、光バッファや大規模超高速スイッチ等の実現の難しさが有るが、世界的に研究が進められている。まず、これらのノード技術における現状の問題点、解決すべき技術課題について述べる。

現在開発されている光ノードの大半はプロトタイプシステム、或は、研究実験用ネットワーク向けのシステムである。研究実験レベルから実用化レベルに到達するためには、収益を生むサービスのビジネスモデルの確立、サービスを実現させるためのさらなる経済性・運用性・信頼性の向上が必要である。さらにその導入を加速する為には、透明性(トランスペアレンシ)、超広帯域性、超長距離伝送性の最大化などが重要であり、これらの光技術の本質的な利点を活かすためには、チャレンジすべき未開拓の技術領域が有る。以下に現状の問題点、解決すべき課題を具体的に述べる。

- ◇ 経済性: 電気スイッチングを適用したノードに対する優位性を実現することは当然として、規模の拡大(容量増加)に対しても小さなノードコストの増加で対応出来るアーキテクチャを実現する必要がある。
- ◇ 運用性: 導入後のネットワークの運用コストは、サービス提供価格を支配する要因となる。前項にのべた制御機能を実装し、要求される制御性能を満足する必要がある。
- ◇ 信頼性: 光ノード及びネットワークとして、Best effort レベルの信頼性から、既存のSDH/SONET レベルの信頼性に至る多様なレベルの信頼性要求に対応できる技術の確立が重要である。
- ◇ 拡張性: 初期投資の低減、需要に対応した効率的な追加投資という観点から、光ノード規模及びネットワーク規模の拡張性は、実用ネットワークにおいて重要な課題である。スモールスタートの実現と拡張性の担保の両立が必要である。
- ◇ 省電力: 既存電源設備の利用、電力費用の節減という現実的な要請はもとより、パッシブデバイスによるルーティングを活かした光ノードの省電力化は今後増々重要な課題となる。
- ◇ 小型化: 経済性や省電力と同様、光ノードの小型化も重要な課題である。
- ◇ 透明性(トランスペアレンシ)の活用: 光スイッチングを適用した光ノードでは、光スイッチのトランスペアレンシーにより、信号速度(ビットレート)、変調方式(振幅変調、位相変調)、多重化方式(TDM、WDM、OTDM)、転送方式(ストリーム、バースト、パ

ケット)に依存しないスイッチングを実現することが可能である。多様なフォーマットに対してハードウェアが汎用性を有すると同時に、多様なフォーマットの混在も許容することが出来る。電気スイッチでは実現できない汎用性や多様なフォーマットの信号の収容という光技術特有の機能を有する次世代の光ノードは重要となる。

- ◇ 超広帯域性の活用: 光スイッチングを適用した光ノードでは、光の超広帯域性により、ポート当たりの帯域が 1Tbit/s を上回る広帯域を実現することが可能である。具体的には、超高速信号 (40Gbit/s~160Gbit/s) やその波長分割多重 (WDM) 信号の一括スイッチングが可能である。この光特有の特徴の活用により、電気スイッチを適用したノードをはるかに凌ぐ超大容量の次世代光ノードの実現が可能となる。
- ◇ 超長距離伝送性の活用: 光ファイバの低損失性、光増幅器の光増幅特性、分散補償技術、非線形を利用した伝送技術、誤り訂正符号技術、等により、超長距離伝送を可能とする高度な光リンク技術が確立されつつある。本技術を光スイッチングノードに適用することにより、光ノードの高コスト化の主要因となっている光/電気変換インターフェースの省略、或は、数量削減により光ノードの大幅な経済化が実現され、光ノードの実用化の加速や適用領域拡大を期待することができる。特に、総伝送距離が中程度であるメトロネットワークでは、顕著な光ノードの低コスト化が実現でき、重要な課題である。

以上の考えの下にノード技術における重要な技術課題と研究開発目標を以下にまとめる。

<技術課題>

光と電気の緊密な連携による大容量化・高機能化を両立させ、トラフィック需要に柔軟に対応し、高度な通信品質保証を可能とするフォトニックスルータの要素技術を確立する必要。このため、光ファイバで伝送された波長分割多重 (WDM) 信号を一括してスイッチングする、あるいは、WDM 信号を複数に分割した“波長群”を単位としてスイッチングする技術が不可欠 (図3. 4参照)。現状、ソフトウェア処理や電氣的ハードウェア処理により行われているインターフェースやゲートウェイ内部の処理に積極的に光処理技術を導入し、高速且つ透明度の高い光ノードを構築することが重要。また、多様な伝送方式、伝送速度等の信号を様々な品質要求に応じて転送可能にする光ノード技術の確立が重要。粒度の異なるデータなど、サービスに応じて柔軟に対応することで、伝送効率の向上、伝送遅延の抑圧、フェアネス確保等 QoS の向上が可能。光のカットスルー技術の活用や低消費電力光スイッチの開発等による、光ネットワークの省電力化。

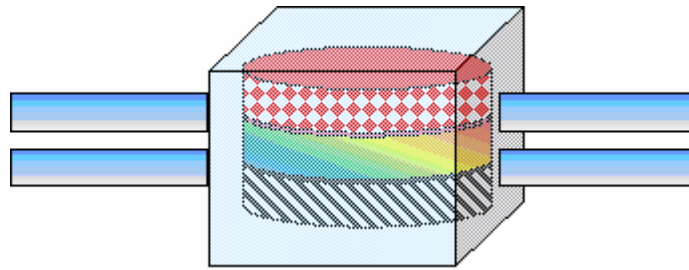


図3. 4 波長群パス／波長パス／光バースト(光パケット)多元光ルーティングノード

＜研究開発目標＞

2008年

- ・ 40Tbps級ノード(40Gbps／ポート)の要素技術確立
- ・ 波長群ルーティング方式の最適化
- ・ 数十 Tbps の光スイッチングの実現
- ・ 数百 ns オーダ高速光スイッチング、高速制御回路技術
- ・ 上記に対応するシグナリング/ネットワーク技術、ノード構成技術
- ・ トランスペアレンシ光ノード構成検討、光のカットスルー技術による低消費電力の定量化、低消費電力光スイッチの基本技術開発

2010年

- ・ 40Tbps級ノードのシステム化技術、ノード制御管理技術確立
- ・ 数百 Tbps の光スイッチングの実現
- ・ 波長群ルーティングノードの試作
- ・ 数十 ns オーダ以下の高速光スイッチング、高速制御回路技術
- ・ 上記に対応するシグナリング/ネットワーク技術、ノード構成技術
- ・ 光ノード経済化、従来ノードに対する優位性
- ・ 制御・管理機能の充実
- ・ 多様な信頼性レベルへの対応
- ・ 電気・光技術を適用的に用いた光ノードのアーキテクチャ
- ・ 低消費電力光ノードの試作

3-1-4. リンク技術

リンク技術の開発は、周波数利用効率の改善による波長多重チャネルの高密度化と伝送速度の向上による「リンク容量の拡大とコスト低減」を実現することと、光ノード技術の高機能化に対応し、エンドユーザやネットワーク運用者の利便性を向上させる、「ネットワーク接続容易性の向上」の2点が課題である。

限られた帯域内で波長多重数を増加するためには、波長多重チャネルの高密度

化（周波数利用効率の向上）が有効である。高密度波長多重化を実現するための技術としては、狭スペクトル変調信号の利用、偏波多重／分離技術、等が考えられる。狭スペクトル変調光信号を得る方法としては、通常の NRZ/RZ 光信号に変わって、デュオバイナリ光信号や光多値変調信号のように新しい光変調技術を用いることが有効と考えられる。このうち、光変調信号の多値化は、光信号のスペクトル幅を一定に保ったまま、光信号で伝送される情報量（ビット数）を増加させることが可能となるため、周波数利用効率向上のために非常に有効である。特に、PSK（Phase-Shift Keying）、FSK（Frequency-Shift Keying）などの光位相を用いる変復調方式は ASK（Amplitude-Shift Keying）よりも原理的に受信感度に優れることが知られている。これらの方式は送受信機構成が複雑で高コストとなること、非線形効果に敏感で伝送特性に難があることから商用システムへの本格導入は見送られてきた。今後、電子回路・光デバイス技術を進展させ、様々な高度な変復調方式による周波数利用効率の優れた送受信技術を開発する必要がある。

周波数利用効率は図3. 5に示す様に、現行の $0.1 \sim 0.2 \text{ bit/s/Hz}$ から最終的には 2.0 bit/s/Hz に上昇させることが目標となる。さらに、周波数利用効率の高い多値変復調方式は、高度な FEC (Forward Error Correction) 技術、波形整形技術の併用が前提となると思われるため、これらの技術も課題である。

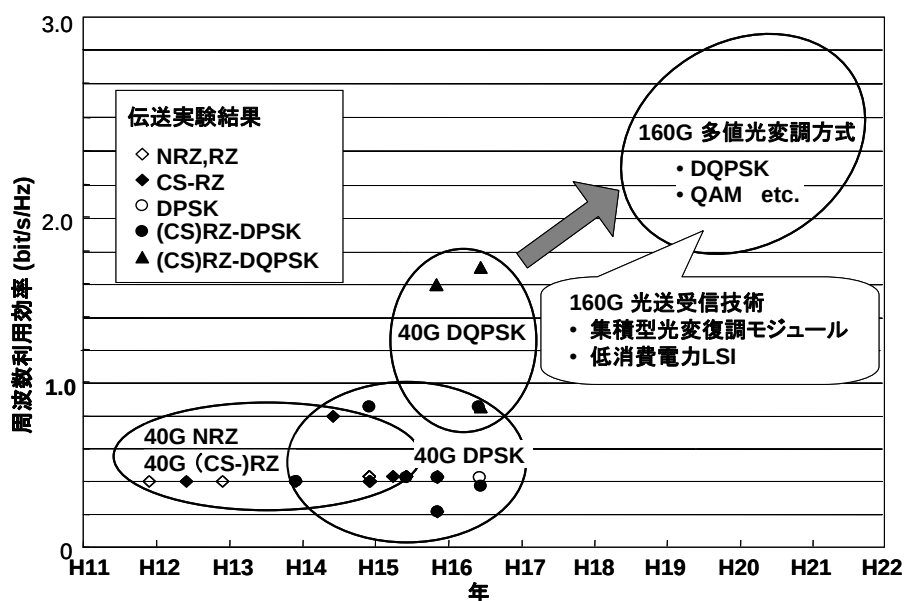


図3. 5 周波数利用効率向上の推移と開発目標

変復調方式はユーザ、サービスの多重分離技術としても期待されている。例えば SCM (Sub carrier multiplexing) 方式は周波数多重された RF 信号をアナログ的に光信号に重畳する方式でありユーザ多重分離は電気信号処理によって安価に

実現されている。SCM は無線システムとの親和性から広く実用化されている。また、光周波数をキャリアとして信号を多重化しヘテロダイン、ホモダイン検波によって分離・復調する技術もコヒーレント光通信方式として技術蓄積されている。さらに、OCDM(Optical Code Division Multiplexing)[13]は光パルス位置や位相情報を用いたコード多重方式で、WDM 技術と併用することで非常に多くのユーザを収容できる技術として期待されている。

次世代フォトニックネットワークを支える光ファイバの研究開発も非常に重要である。開発すべきファイバの種類は図3. 6に示す様に多岐にわたるが、ここでは、次世代大容量フォトニックネットワークにおける超波長多重伝送用光伝送路あるいは超高速伝送用光伝送路を実現するための技術目標と限界を打破するための課題について述べる。

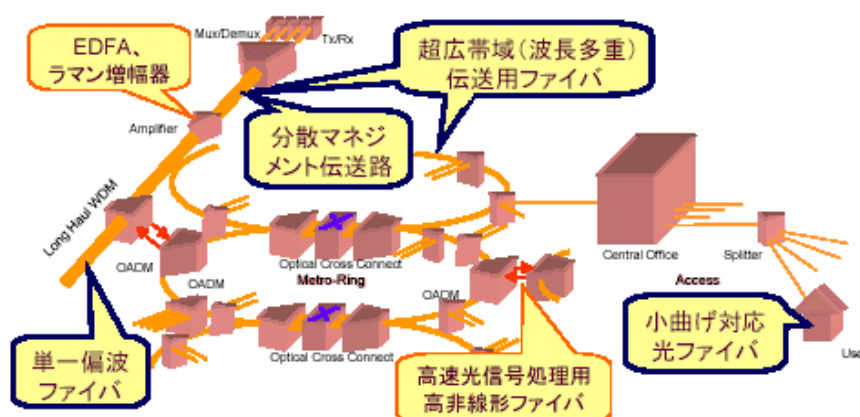


図3. 6 次世代フォトニックネットワークに必要な光ファイバ

超高効率なリンク技術を実現するための光ファイバに要求される項目は、(1)伝送帯域の広帯域化、(2)分散及び分散スロープの低減、(3)非線形性の低減、等が挙げられる。特に超波長多重伝送用光伝送路を実現するためには広帯域化が重要であり、分散スロープや累積分散の低減が求められる。また、非線形性低減のためには光ファイバへの入力パワーの低減が必要であり、その観点から光ファイバの低損失化、特に分散マネージメント伝送路における後段負分散ファイバの低損失化、が必須である。

一方、従来は、分散と非線形性のトレードオフを解消するために光ファイバの

屈折率プロファイルを最適化することで解決する努力がなされてきたが、例えばフォトニッククリスタルファイバなど新規な機能、構造を持つ光ファイバなどを導入し、光ファイバの設計自由度を付与することにより、分散及び非線形性のさらなる最適化を実現できる可能性が考えられるため、そのような新しい光ファイバを新世代伝送路に適用すべく検討を行う必要もあると考える。

伝送用ファイバの特性に限界が見えてきているなかで、コア/クラッド構造では実現不可能な特性を実現可能なフォトニック結晶ファイバ(PCF)が、非線形性や伝送損失限界に対するブレイクスルーとして期待されている。伝送用ファイバとしての応用として、将来のホームネットワークや光インタコネクションを実現する際に必要となる小曲げ半径ファイバを PCF で実現する試みもなされてきている。例えば、コアの周囲に 6 個の空孔を配した孔アシスト型 PCF においては、 $\phi 10\text{mm}$ に曲げた状態において 0.05dB/turn という極めて小さな損失が報告されており、将来の WDM 光インターコネクション等で要求されるであろう、小曲げ径の状態でも波長依存性のない光ファイバとして孔アシスト型 PCF は有望である。

次にネットワーク接続容易性の向上に関する課題を述べる。現状の伝送システムは、光パワーレベルや分散補償器配置等の装置設定をほとんど半固定的な設定で行っているために、様々な伝送パラメータ変動への対応が煩雑化し、多種類のデバイス調達や作業工数により大幅なコスト増大につながっている。このような各種パラメータの設定が自動化されれば、大幅なコスト低減および時間短縮が期待される。また、 40Gb/s を超える超高速信号では、波長分散などの光伝送パラメータの変化を検出して適切な値を自動的に維持する機能が必須となる。これらの光の自動ネットワーク設定技術としては、図3. 7に示す、光パワーレベル、波長分散、偏波モード分散(PMD)のモニタおよび補償技術が重要となる。

さらに、光バースト/光パケット伝送が必要となる次世代フォトニックネットワークにおいては、それらのモニタおよび補償を高速パス切替えに追従させるため、 μs 程度の高速デバイス・モニタ技術とネットワークマネジメントとの連携方法の確立が必要になると考えられる。それと併せて、ネットワークのフレキシビリティや高品質性を確保するための、波長変換技術、光 2R/3R 技術の重要性も高くなってくる。

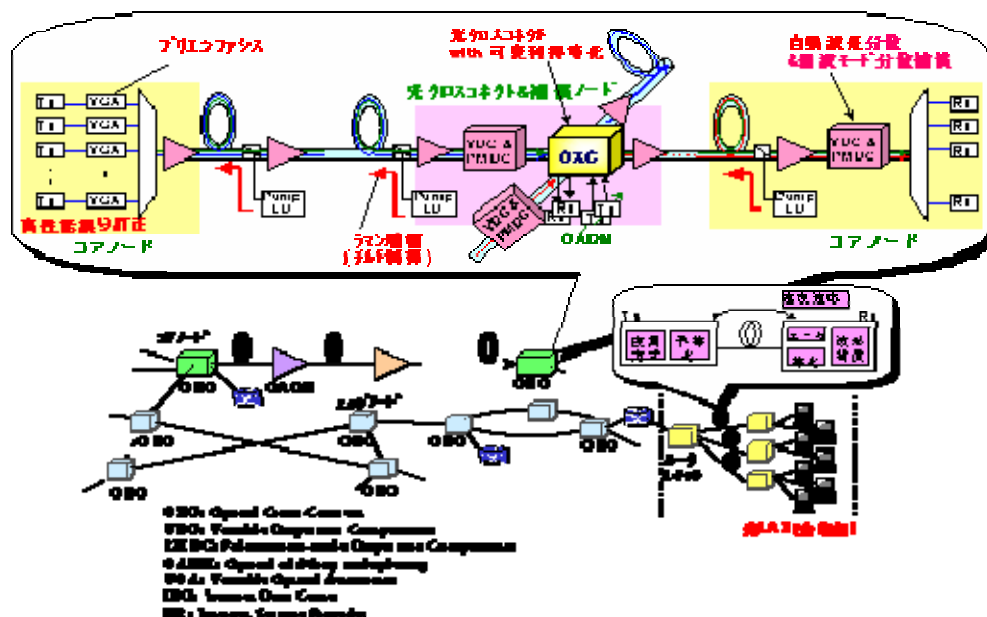


図3.7 フォトニックネットワーク自動設定技術

また、電気回路による、接続の自動化技術も重要である。電気回路によって自動化される項目としては、波長分散や PMD によるひずみ補償が挙げられる。電気回路による適応補償技術は、さまざまな波形処理(信号処理)を行えること、光伝送で必要な各種回路との集積によって小型化が図れることに利点がある。現在のところ、このような電気回路による処理技術として、電気分散補償技術(Electronic Dispersion Compensation: EDC)が進められている。この EDC のような受信機での補償に加えて、送信器側での予等化、複雑な非線形等化、さらには伝送路にあわせたリンク速度の自動調整が今後重要になっていく。

以上の考えの下にリンク技術における重要な技術課題と研究開発目標を以下にまとめる。

<課題の概要>

多値変復調技術等による周波数利用効率、エネルギー効率の向上した大容量光伝送技術の開発が課題。更に、これを発展させた超高密度周波数多重通信方式の開発により、限られた帯域を最大限活用する、大容量かつ省エネルギーの光伝送技術を確立。また、ファイバ環境による分散特性変動のみならず、光パス(経路)変更に伴うダイナミックな適応型分散補償ネットワークの開発が課題。

<研究開発目標>

2008年

- ・ 1波長当たり 40Gb/s～80Gb/s の信号を 200 波長程度収容する伝送技術を確立、

周波数利用効率として、1bit/s/Hz 以上を実現

- ・可変型波長分散補償デバイス: 低損失(5dB 以下)、広帯域(160Gbit/s まで)
- ・偏波モード分散補償方式: 高速(1ms 以下)

2010年

- ・1波長当たり 80Gb/s～160Gb/s の信号を 1000 波長収容する伝送技術を開発、周波数利用効率として、2bit/s/Hz 以上を実現
- ・適応型波長・偏波モード分散光ネットワークのテストベッド検証

2015年

- ・超高密度光周波数多重通信を実現するための光送受信器の開発
- ・DQPSK 方式を超える多重変復調に必要な符号化・復号化技術の開発

3-1-5. 超高速信号処理技術

次世代フォトニックネットワークは、多様化大容量化したネットワークを、ユーザから見て簡素化し、人の五感にとって快適なネットワーク環境の提供を目指している。そこでは、従来技術が根ざす電子デバイス速度に起因するさまざまなボトルネックが顕在化することが必至であり、これらを克服し得る新技術として光信号処理技術の開発が急務になっている。特に、人の五感にうったえる膨大なアナログ信号を、デジタル技術をベースとしているフォトニック・ネットワークで伝達するには、インターフェースとして超高速 AD 変換技術が必要となろう。実際、その一例としてリアルタイム(すなわち非圧縮)超高精細画像伝送技術の必要性が指摘されている。このような高精細画像のデジタルコンテンツが普及するには、大規模外部記憶装置とこれ进行处理できる大容量サーバや SAN の技術が必要である。そして、サーバや SAN が大容量化するには、光インターコネクト技術の発展が不可欠である。一方、これを利用する LAN やアクセス系もこれに対応した大容量化が必要となり、さらには、PC のネットワーク・インターフェース・カード(NIC)も 100Gbps 以上の伝送速度が必要となるだろう。

このように、コンテンツが大容量化・高速化するにつれて、そこに端を発するネットワークは、さらに大容量化・高速化が必要になってくる。WAN では、ペタビット級のルータ処理能力に加え、多様化するネットワークの利用効率を最大に高めるために、パケットスイッチの高速化が必須となる。

このように、来るべき u-Japan 構想において、予想されるボトルネックはそのほとんどが、電子デバイスの限界に根ざしている。

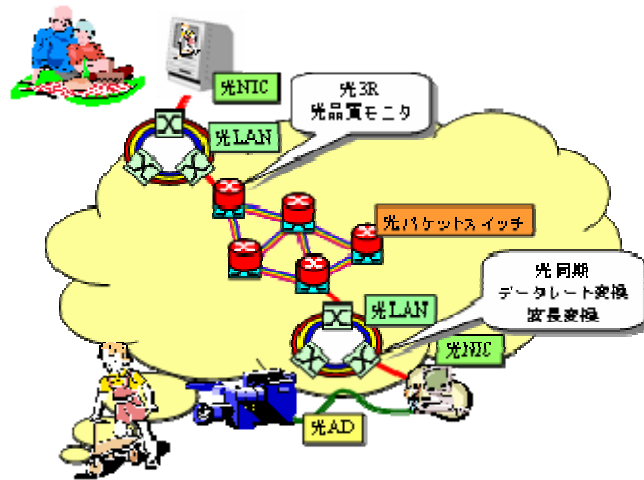


図3. 8 次世代フォトニック・ネットワークにおける超高速信号処理

技術の適用領域

本課題では、光半導体デバイスや光ファイバ等の非線形光学材料を応用することにより、ネットワークの物理層における電子デバイスの限界を克服した、超高速光信号処理技術を開発する。図3. 8に、次世代フォトニック・ネットワークに置ける超高速信号処理技術の適用領域を俯瞰する。以下では、課題の概要に続き、具体的にに取り組むべき重要な技術課題について言及し、最後に開発目標をまとめる。

<課題の概要>

一般に、超高速信号処理を実現するには、多くの共通要素技術の開発が重要となっている。それは、電子デバイス速度限界を超える 100Gbps 級の処理速度を実現する新しい光領域での多重化技術であって、具体的には、光同期、全光データレート変換、波長変換、光信号再生(光 3R)、OTDM、光信号品質モニタ、光 AD 変換、光バッファ、光 RAM などの技術である。これらは概ね、(光 RAM を除いては、)半導体光増幅器や光ファイバなどの非線形デバイスをベースとして実験室での原理検証が行われているが、フォトニック・ネットワーク実現へ向けた実用化検討までには至っていない。増大するネットワーク・トラフィックからの将来ニーズに間に合うべく早急な技術開発が望まれている。以上の要素技術開発を進めながら、具体的には、以下の開発課題に取り組む。

(ア) 高速光スイッチングインターコネクトネットワークの技術開発に関する、多ポート高速光スイッチングデバイス、高速制御回路技術、信号制御・スケジューリング等シグナリング/ネットワーク/ノード構成技術、電気光融合技術、バンド幅拡大のための波長多重および低消費電力、高速光インターフェース回路技術(～40Gb/s)等を開発する。

(イ) 中期的には、伝送される光信号自体が行き先を認識する光パケット型の交換

を実現するため、全光信号処理技術を基本とした光ルータ技術等の研究開発が重要課題であり、このために、読み書き可能な光メモリ機能の実現が不可欠となる。フォトリソグラフィやナノ構造材料を活用し、各種機能材料をハイブリッド集積した超小型低消費電力フォトリソルータ集積型光信号処理チップを実現する。

(ウ)アクセス系としては、既存 Ethernet ベースの LAN を阻害せず、超高速なシリアル IF と WDM パラレル IF 技術を包括的に扱い、オンデマンドなテラビット IF を提供するための技術が重要。具体的には、超高速光信号処理の優れた特性を活用したテラビット信号を処理可能な OTDM 処理スイッチを開発し、これを用いた超高速光同期ノード、超高速サーバ間データ転送、超高速ストレージアクセス、超高速光配信などへ応用することにより、光ネットワーク全体の超高速化を目指す。

以上の取り組みによってさまざまな技術が実現されるが、以下ではその代表技術として、光 AD 変換、光 LAN、光 NIC、光パケットスイッチ、光 RAM、光信号処理集積回路について詳説する。

光 AD 変換

画像通信に対する要求はより高品質なものへと移行している。ハイビジョン TV の 4 倍程度の解像度がある超高精細画像 (Super High Definition Images, SHD 画像) の研究開発が行われている。SHD の動画像の原信号は、800 万 (3840 × 2048) 画素、各色 8bit、毎秒 24 フレームの動画像データとしても 4.5Gbps の情報量を有する。NHK が目指す SHD では 48Gbps の転送速度が必要とされている。このように大容量化する信号処理においては、AD 変換技術の高速化が重要になる。

AD 変換は、標本化、量子化、符号化なる 3 つの操作によって構成される。これら 3 つの信号処理は全て電気処理により行われており、その処理能力には以下のような理由で変換速度 (標本化周波数) や解像度に限界があることが知られている。それらは、1. 様々なノイズによる標本化のタイミングの揺らぎ (aperture)、2. 比較器を構成する電子デバイスの応答速度の限界 (ambiguity)、3. 電気回路の熱雑音 (thermal)、4. ハイゼンベルグの不確定性原理 (Heisenberg) である。

理想的な AD 変換の場合には量子化の際の近似による量子雑音のみが生じるが、標本化の速度と符号数の積 ($P = 2 \times n \times f_{\text{samp}}$) はハイゼンベルグの不確定性原理による制限のみとなり、現在の AD 変換よりも 4 桁程度高速な AD 変換が実現できることになる。しかし、実際には上に述べた 1~4 のような要因により、そこまでの高速化を行うことができない。

高速なAD変換を目指して、図3. 9に示すように並列処理を導入し電気処理での高速化が図られてはいるが、さらなる光AD変換の高速化を考えると、電気領域での量子化、符号化の操作がボトルネックとなることは明らかである。そこで、図3. 1, 3. 2に示すように量子化、符号化まで光で高速処理を実現する全光AD変換が必要である。

全光 AD 変換の研究は、すでに非線形ファイバを用いたものが提案されているものの始まったばかりであり、解決されるべき課題が多数残っている。標本化、量子化、符号化全てを光処理で高速に行うことが出来る安定で高性能な全光 AD 変換装置の実現が期待されている。

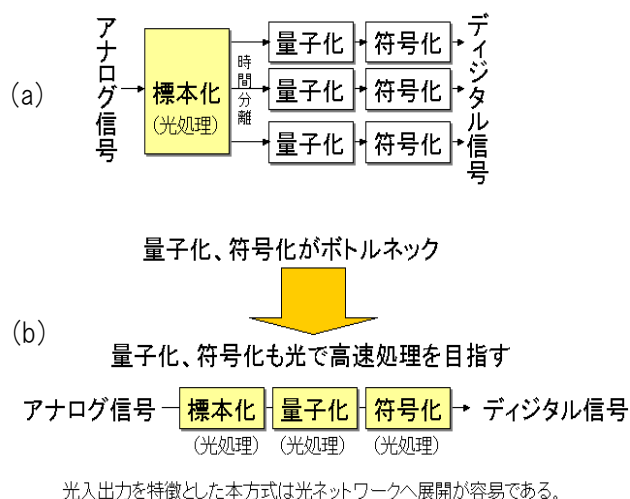


図3. 9 目指すべきAD変換

超高速光 LAN

光 AD 変換が必要となるようなネットワークでは、LAN といえども極力電子デバイスに依存しない光をベースとした超高速化の検討が必要となってくる。LAN という限られたエリアの中でユーザを OEO 変換なしに end-to-end で全光接続するには、従来のイーサネットとは、混在可能でありつつも全く異なるアーキテクチャを導入する必要がある。超高速光 LAN 内のルーティング方式には大別して二つの方式が考えられる。第一の方式は各ハブでアクティブに光マトリックススイッチを切り替えて経路決定する方式であり、第二の方式は波長を端末(=MAC アドレス)に割り当てて、各ハブではパッシブに経路決定する方式である。第一の方式では、高速光スイッチと波長チャネル有効利用のための全光波長変換器を各ハブに分散して配置する。一方、第二の方式はルータに集中して波長資源があり、高速光スイッチと波長割当のための全光波長変換器を有する。第二の方式では、割当波長数が端末数以上でなくてはならないので、スケラビリティが問題となる。超高速光 LAN 実現に向けて、両方式のアーキテクチャの詳細検討を進め、同時に要素技術の開発をする必要がある。

光 NIC

現在の超高速・大容量転送のボトルネックは、PC インターフェース部分と LAN への接続部分で、これは、NIC(Network Interface Card)の通信能力に依存している。今後、PC からの I/O に 10Gigabit Ether が導入され、伝送端末でも I/O がとなると、LAN が

ら外部への接続の部分で輻輳が生じる可能性があり、そこにボトルネックが移動すると考えられる。しかしながら、伝送終端装置での大容量化が進み、そのボトルネックも解消されていくと考えられる。さらに、光 LAN が進めば、よりいっそう、PC から外部へつながるインターフェースへの負担が大きくなり、より大容量の外部への接続とその効率的な切り替えが必要になるだろう。

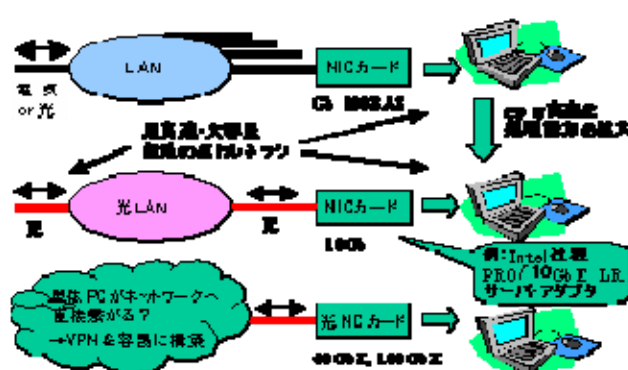


図3. 10 光 NIC 技術の流れ

これらの問題を解消させるために、個別の PC インターフェースでの直接のネットワークへの接続が期待される。それにより、図3. 10に示すように、光 LAN 同士を接続するという考え方より、PC とネットワークの接続の中から、仮想的に独立したネットワークが組まれる VPN (Virtual Private Network) のような構成に、ネットワーク自体が発展していくことが期待される。また、PC が集中したストレージエリアネットワーク (SAN) へ直接接続して、一時的に Physical な光パスをネットワーク上にはることによって、それをコンピュータのバスのように扱い、一体のハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) が形成されるような構成も実現される。これにより、ネットワークに接続したサーバに強力な CPU を持ち、簡易なインターフェース端末だけをどこにでも持ち運び、どこでもプライベートコンピュータのような扱いが実現できる。このような技術を可能とするには、光信号処理技術をベースとした超高速光 NIC カードというコンセプトが考えられその実現が鍵となる。

全光パケットスイッチ

次世代フォトニック・ネットワークでは、ネットワークのスループット向上のために、超高速光バースト／パケットスイッチの研究開発も重要である。そこで光パケットスイッチ内部の機能ブロックごとに技術的な飛躍が要求される。図3. 11に取り組むべき研究課題をまとめる。

現状では光デバイスで光メモリが作製できないため、まず、電気処理と光処理の切り分けを明確化する必要がある。光パケット自体は非同期で送信されるが、信号処理の段階では装置内で同期をとりながら処理を行わなければならない。従来の光 PLL では、OEO＋電気 PLL や短光パルス光源を用いてクロック抽出までは研究されてきたが、更にクロック光と処理対象の信号光の時間タイミングを合わせないと処理が行えず、その機構は未完成の域を出ない。パケット処理を自律的に行うための光同期技術の確立が必須である。

電子回路無しで光パケットをバッファする技術は、これまでもいろいろな技術をベースに検討されてきたが、ビット拡張性と遅延量の任意性、小型化をすべて満足する技術はまだ実現されていない。したがって、電機と光の切り分けをどうするかを考える一方で、逆にこれらの特性を実現することを目指すべきであろう。光バッファは、光パケットスイッチの実現だけでなく、光同期技術にも活用できるため重要度が極めて高い。

従来ネットワークでのプロテクション機能・光パス設定機能のためには、スイッチング速度が 10ms 以下あれば十分であることから、光スイッチは、挿入損失の小さい PLC や MEMS の研究が中心に進んできている。しかしながら光パケットスイッチではヘッダ処理が ns オーダで行われるため、これまでよりも格段に高速な光スイッチに適した材料やスイッチ構成の研究が重要である。

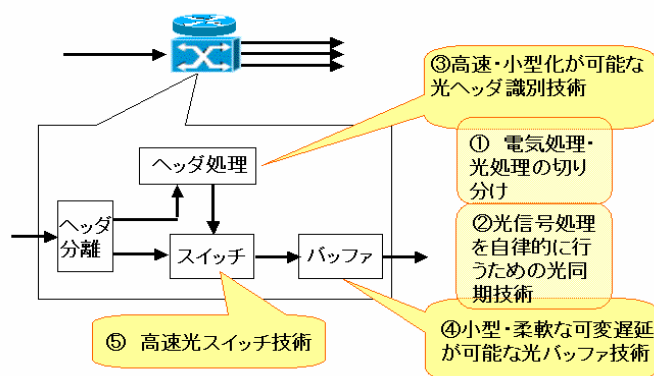


図3. 11 全光パケットスイッチの研究課題

光 RAM、超小型導波路型光信号処理集積回路

長期的には、光 RAM なる革新技術の創出に期待したい。光 RAM によって、光パケットスイッチのスループットが飛躍的に向上し、大容量高精細映像データへの高速アクセスなどが可能となる。光 RAM は、現時点では、実現からは程遠い状況にあるといわざるを得ない。そのため、光 RAM 実現には、材料レベルからの基盤研究が重要であって、当面は本命技術を絞らずに広く研究を促進することが重要と考えられる。光 RAM 技術創出には、たとえば、光双安定、EIT、モード同期技術とフォトニック・結晶や量子ドットなどのナノ技術を組み合わせた高機能光集積回路に関するさまざまな基盤材料研究の活性化が不可欠であろう。光 RAM 技術は光信号処理技術の究極であって、電子デバイス限界を解決するために究極的 Missing Link となっており、難易度は高いが重要度も同様に高い。

以上のように、光をベースとした超高速信号処理技術は基礎的な提案・検討こそされているものの実用化へ向けた検討は始まったばかりである。しかしながら、ネットワークのトラフィックは依然として増大し続け、電子デバイスの速度は実用レベルで 40Gbps にも達している。したがって、電子デバイスの限界といわれている 100Gbps へのスピード要求が顕在化するまでに、超高速光信号処理技術の早急な開発が望ま

れる。

＜研究開発目標＞

2008年

- ・超高速光信号処理を用いたサブシステム基礎検討
 - 光 AD 変換、光3R、OTDM スイッチなど
- ・数十×数十、ns オーダ多ポート高速光スイッチング、高速制御回路技術
- ・40Gbit/s 小型、低消費電力、高速光インターフェース回路基本技術
- ・100Gbit/s 級のIFとネットワーキング技術を開発し、100G イーサNW技術のコアコンピタンスを確立
- ・160Gbit/s スループットの超高速光インターコネクト要素技術確立

2010年

- ・超高速光信号処理を用いたサブシステムの実証とビットレートフォーマットのトランスペアレント化
- ・数百×数百、ns オーダ多ポート高速光スイッチング、高速制御回路技術
- ・40Gbit/s、波長多重、小型、低消費電力、高速光インターフェース回路技術
- ・40Gbit/sのデータ書込・読込を可能とする光メモリの開発
- ・光パケット・ラベル認識技術の開発
- ・フォトニック結晶やナノ構造材料による超小型導波路型光信号処理の原理確認
- ・640Gbit/s サーバ間データ転送、超高速ストレージ アクセス、超高速光配信の実現。640Gbit/s スループットの超小型 WDM 光インターコネクト技術確立

2015年

- ・全光ルータを用いた光交換機の実現
- ・1Tbit/s サーバ間データ転送、超高速ストレージアクセス、超高速光配信の実現

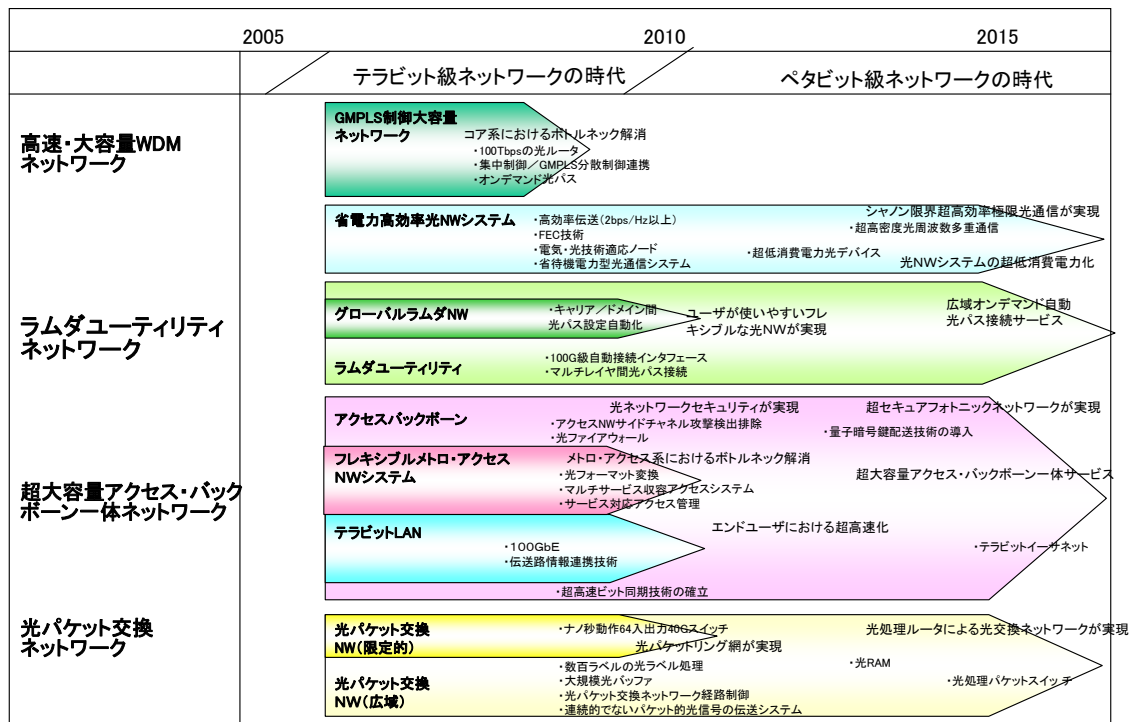


図3. 12 次世代フォトニックネットワークの技術開発ロードマップ

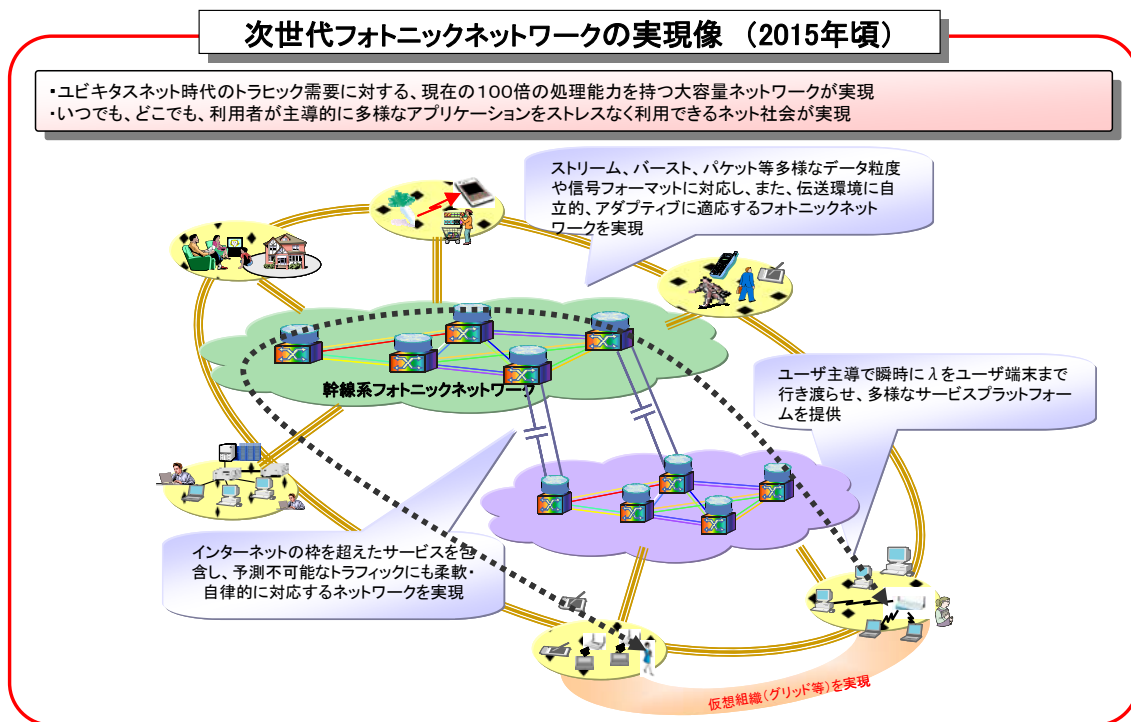


図3. 13 次世代フォトニックネットワークの実現像 (2015 年頃)

3-2. テラヘルツICT

テラヘルツICTの研究開発課題としては、超高速無線システムやテラビット光通信等を実現するための高速・広帯域なテラヘルツICTと、リモートセンサーや遠隔センシングシステムを実現するためのテラヘルツ波センシングの2つが挙げられる。一方、これらを支えるための基盤技術についてはまだ確立しておらず、THz帯のデータベース整備や周波数標準、計測技術も課題として重要である。

3-2-1 高速・広帯域テラヘルツICT

数十 Gbps の超高速無線システム実現のため、広帯域の周波数資源を利用できるサブテラヘルツ以上の周波数帯での無線伝送システム開発が必要である。更に、大容量無線ネットワークのテストベッドを構築し、非常時に既存ネットワークの代替となるディペンダブルなネットワークの実現を目指す。ネットワークの超高速化に対しては、(サブ)テラヘルツデバイスの高集積化により、ノード処理能力の飛躍的な向上が期待される。

- ・ サブテラヘルツ帯の無線伝送システムとしては、0.2～0.5THz において大気吸収が比較的小さい周波数帯域をキャリア周波数として使用することが考えられる。実用化にあたっては、アンテナを含めた送受信機の高機能化と低損失化等、システム化技術の研究開発が必要である。また、ナノスケール HEMT 等、半導体デバイスの更なる高性能化が不可欠である。要素技術として、サブテラヘルツ帯高効率アンテナ技術や半導体送受信機・アンテナ一体化技術、高出力・低雑音 MMIC 技術及びこれらの開発に必要な設計・シミュレーション技術、特性評価技術等が重要である。
- ・ 2010年頃までは、エレクトロニクスを中心として 0.2～0.5THz の周波数帯の開拓に注力。それ以降、量子カスケードレーザの長波長化等により、0.5～3THz の周波数利用実現を図ることで未開拓周波数帯の解消を目指す。また、いずれの周波数領域に対しても、高感度のテラヘルツ検出器の開発が重要課題である。
- ・ 上記無線応用の他、ネットワークの超高速化が重要課題。160GHz 動作の LSI として有望な単一磁束量子回路等の高集積化により、ノード処理能力の飛躍的な向上を目指す。
- ・ 基盤技術として、テラヘルツ帯における光－電波直接変換技術、テラヘルツ帯を効率良く微細回路に導く技術、テラヘルツ帯の材料開発等が重要。テラヘルツ帯材料のデータベースは共通基盤として整備する必要がある。

＜研究開発目標＞

- ・ 2008年までに、数十 Gbps 無線システムの構成要素技術ごとの実証実験、遮断周波数 0.7THz のトランジスタ、0.3THz 帯 MMIC の開発、サブテラヘルツ大規模単一磁束量子回路のプロセス確立。
- ・ 2010年までに、数十 Gbps 固定無線システムの伝送実証、遮断周波数 1THz のトランジスタの開発、160GHz 動作ハイエンドルータの実証、1.5～3THz 帯量子カスケードレーザの実現、光－電波変換による 0.5～1.5THz 帯無線技術の開発。
- ・ 2013年までに、災害時等 THz帯臨時ネットワークテストベッド構築や、0.5～3THz のキャリア周波数による無線システムプロトタイプの開発し、百 Gbps 無線システムの伝送実証を図る。

3-2-2 テラヘルツ波センシング

テラヘルツ周波数帯の特徴を活かした高度なイメージング認証技術、物質固有のテラヘルツスペクトルを利用した多様なセンシングを遠隔的に行うとともに、その取得データを、ネットワークを介して利用できる技術等の開発により、安全・安心な社会実現への貢献が期待される。

- ・ 数～数十 m 離れた地点から、ガス、化学物質、生体関連物質等の存在を検出し、成分分析を行うことのできるリモートセンサシステム、テラヘルツ帯電磁波を用いることで、外乱光に強く、被走査者に走査を意識させない画像取得型生体認証技術、動画イメージを周波数 2～10THz の帯域で得られるカメラシステム等の開発が課題である。要素技術として、画像分析技術、読み出し回路技術等の他、高感度リニアアレー、THz帯焦点面アレー等検出技術、高輝度光源の開発が必要である。
- ・ 上記システムを実現する上で、量子カスケードレーザ(QCL)等の高輝度テラヘルツ帯光源が要素技術として重要であり、高温動作・連続発振化が課題。高ピーク出力連続波長可変光源としては、p型ゲルマニウムレーザが有望であるが、現状では極低温・強磁場での動作のため、実用に適した環境で動作可能にする必要がある。また、ナノエレクトロメカニカル構造(NEMS)を用いたナノボロメータ等、超高感度・室温動作のテラヘルツ検出器に対する中期的な取り組みが必要である。共通基盤として、各種物質の分光学的データベースの整備が必要である。

＜研究開発目標＞

- ・ 2008年までに、THz帯波長可変光源、多波長光源集積化技術、及び高感度リニアアレー検出器、焦点面検出器アレー(128x128 画素以上)の開発、

QCLの発振波長帯域の拡大。

- ・ 2010年までに、各種THz遠隔センサー、THz帯画像取得型生体認証技術、THzイメージングシステムのデモンストレーション、QCLの常温付近での発振を実現する。
- ・ 2015年までに、THz 帯遠隔分光装置のデモンストレーション、反射測定によるリモートセンシング技術(特に建造物内の透視)の実現、THzセンサーネットワークのテストベッド構築を実現する。

3-2-3 基盤技術

種々のテラヘルツICTの応用開発を進める上で、EMC、周波数標準、分光データベース等、基盤技術の確立が必要。技術基準・規格整備等、実用化に必要な環境整備を研究開発に並行して実施する必要がある。

- ・ テラヘルツ帯における機器及び生体EMCに関して、規格を定め、試験を行うことのできる環境と技術を整備する。要素技術として、高出力波長可変光源、高感度検出器、THz帯電波暗室等の開発が必要である。
- ・ 種々のテラヘルツ通信応用や各種応用において必要となる周波数標準を整備する。要素技術として、標準用THz信号源、周波数信号フィードバック及び安定化システム、絶対周波数測定システム等の開発が必要である。周波数標準は、テラヘルツ帯ネットワークアナライザ等、テラヘルツ帯計測装置の開発にも不可欠である。

各種物質の分光学的データを収集、データベースとして蓄積し、公開することが課題である。効率的なデータベース構築を図る上で、小型、かつ高速データ収集が可能な高速スキャン型広帯域テラヘルツ分光イメージング装置の開発が必要である。また、各種材料・物質内におけるテラヘルツ波の伝搬・吸収等基礎現象の解明が課題である。

<研究開発目標>

- ・ 2008年までに、THz帯機器 EMC 規格・生体 EMC 規格整備に必要な各種測定装置、光源等を開発する。
- ・ 2010年までに、THz帯機器 EMC 規格・生体 EMC 規格の整備、THz周波数標準・トレーサビリティの整備、各種材料、生体高分子等、分野毎の THz分光データベースの構築を実現。
- ・ 2015年までに、リアルタイム測定可能な小型広帯域分光装置の実現、分野毎 THz分光データベースの統合を実現する。

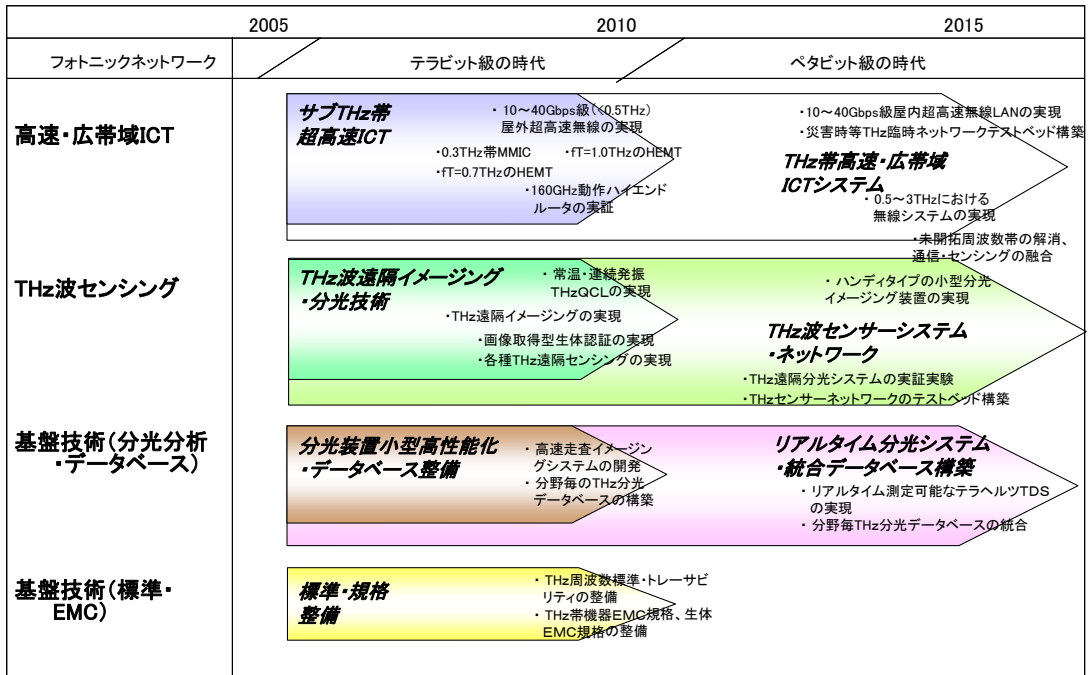


図3. 14 テラヘルツ ICT の技術開発ロードマップ

テラヘルツ波の特徴を活かし、大容量ネットワークとのシームレス接続や環境等多様なモニタリング、高度なセキュリティ技術等が実現し、ユビキタスネット社会における非常時高信頼ネットワーク構築、ICTによる安全・安心の確保へ貢献。
2010年までに、要素技術や共通基盤技術の確立、大容量無線や各種センシングシステムが実現
2015年までに、災害時等THz臨時ネットワークテストベッド構築や無線・センサー統合ネットワークが実現

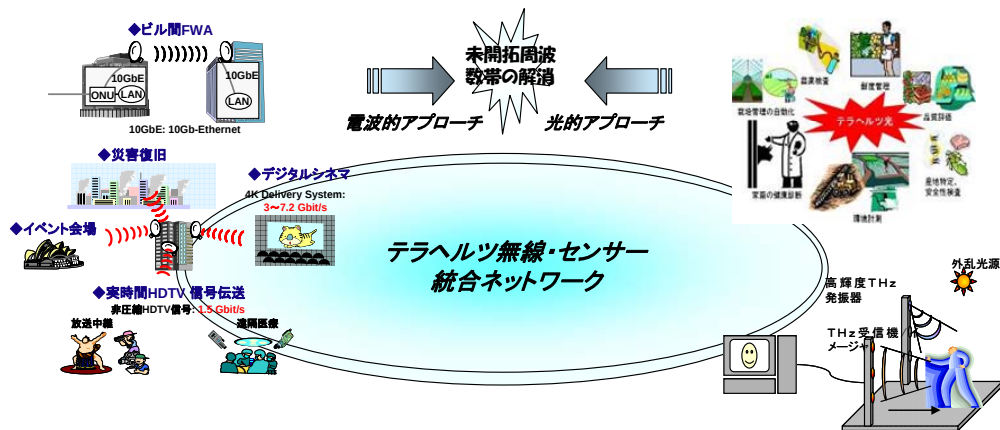


図3. 15 テラヘルツICT実現像

3-3. 量子情報通信

無条件安全性の保証された量子暗号を都市内ネットワークへ適用することが重要な課題である。中期的には、量子暗号以外のセキュリティ技術や将来の量子情報通信ネットワークの基盤となる量子中継等の要素技術の実現に向けた課題に取り組む必要がある。

また、共通要素技術として、光源、検出等のデバイス技術の他、理論研究など基礎・基盤的な研究課題も極めて重要である。

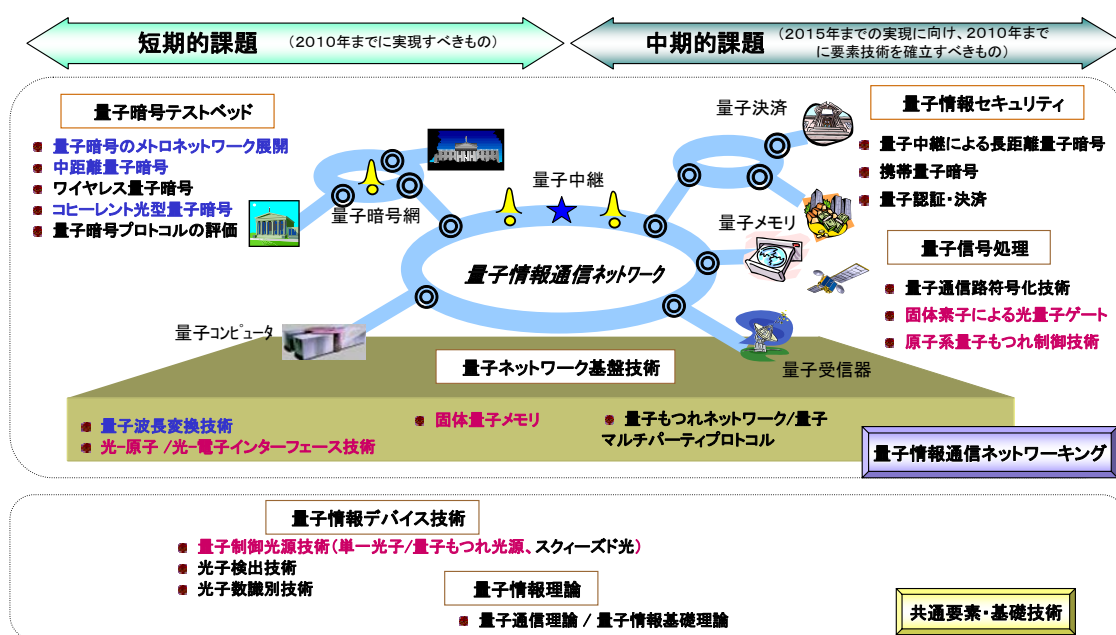


図3.16 量子情報通信の研究開発課題

3-3-1. 量子情報セキュリティ

安全で安心なネットワーク社会の実現に向けて、物理層において無条件安全性を保証できる量子情報セキュリティ技術は極めて重要であり、国家戦略的研究課題と言える。これは物理法則に基づく、従来にはない暗号方式を提供するほか、既存暗号の飛躍的性能向上にも有効である。

これまで研究されてきた主な方式は、秘密鍵を光子レベルの信号と光子検出器によって共有する量子鍵配送(QKD)方式で、主にNICT委託研究として、1対1のリンクとして実証実験が進められてきた。今後ネットワークへの実装を開始し、セキュアな都市内ネットワークを実現する。中期的には QKD 以外に量子認証等のセキュリティ技術にも取り組み、将来的な量子セキュリティシステムの構築を目指す。

量子鍵配送(QKD)システムをメトロネットワークへ展開するため、複数の QKD 装置間の接続を動的に切り替え、任意の QKD 装置間で鍵配送を行い、盗聴検出があった場合でも、鍵配送レートを劣化させることなく最適迂回経路を設定可能とする制御技術確立する。このための要素技術として、超低損失、高速の光スイッチ技術が重要である。

また、制御性の良い単一光子源の組み込みや単一光子/量子もつれあい 光子源を利用することにより、QKD システムの小型・高性能化、鍵配送距離の伸長が可能となる。例えば、これまでの BB84 型量子暗号の他、時間軸上に展開された光子に位相情報をのせて伝送する、「差動位相シフト型量子暗号」も重要である。この方式は、一部の BB84 型量子暗号のように、往復伝送路を用いる必要がなく、また量子中継技術の適用が比較的容易であると考えられている。また、将来の大規模な量子暗号ネットワークの実現に向け、量子もつれ光子対をベースとした鍵配送ネットワークの研究開発を進めることが重要である。ネットワーク内にもつれ光源等の共有システムを持つことで、利用者は受信器のみで利用可能となり、簡便で柔軟な量子暗号ネットワーク構成としてもメリットがある。本格的な量子中継の前段階としての意義も大きく、量子リレーを実現するなどにより、量子暗号ネットワークを段階的に拡大していく必要がある。

一方、単一光子や量子もつれ光子対を光源とするのではなく、既存の技術であるコヒーレント光源とホモダイン検出を用いた量子鍵配送プロトコルも提案され、理論解析と実験が進められている。このようなプロトコルは基本的にはコヒーレント光通信の延長の技術で実現可能であるという利点を持つ反面、単一光子のような離散的な量ではなくコヒーレント光の振幅、位相という連続量にエンコードを行うため損失や盗聴に弱く、BB84 などに比べ無条件安全な通信距離は限定されてしまうという問題点がある。さらなる安全性の解析や、より効率的なプロトコルの開発などの理論的検討が重要である。

これらの量子暗号は、光ファイバネットワークへのシステム実装に加え、空間通信系への実装も重要である。量子ワイヤレス通信技術の開発により、移動体やアドホック型のネットワークを含む、柔軟性に富む量子情報ネットワークの構築が可能となる。量子レベルのビームリンク技術、送受信技術を実現、近接距離間用途(端末-端末間、地上短距離間通信など)への適用を図るとともに、QKD の有無線シームレス接続を目指す。波長帯としては、生体への安全性、水の吸収を避けて長距離化をねらうという観点から、1540nm 以上のアイセーフ帯が重要である。ファイバ系との親和性からも好ましい。

秘密鍵の共有に基づく QKD 方式の他にも、新たな量子暗号の可能性を研究して

ゆく必要がある。例えば、情報理論的安全性を保証する従来の暗号理論に光自身の持つ量子揺らぎなどの量子効果を組み込むことでも、高い安全性を実現する暗号が可能になると期待される。無条件安全の保証が可能かどうかなど、今後の研究が必要であるが、幾つかの異なる方式を相補的に進め、将来、システム実装の容易性やコスト、安全性の需要レベルに応じて、多くの選択肢が揃えられるよう前広に研究開発を進める必要がある。

なお、量子暗号の実用化試験に際しては、セキュリティ保証の評価基準が必要であり、調査と策定作業を進める必要がある。また、これら各種の方式を複数検討し、現在の暗号システムと共存するセキュアなネットワーク構築に向けた技術開発を行うことが重要である。

また、中期的には、携帯量子暗号装置、携帯型量子認証等、QKD 以外の量子セキュリティ技術の研究開発が重要である。要素技術として、量子メディア変換技術、量子バッファ、認証プロトコル等の研究開発に取り組む必要がある。

研究開発目標としては以下のとおり。

2008年：

- ・50km 圏 100kbps 程度のメトロ対応量子暗号の実現
- ・各種量子暗号方式の無条件安全性証明
- ・セキュリティ保証の評価基準策定

2010年：

- ・単一光子源組み込みによる 100km 圏 1Mbps 級(秘密鍵としては 200kbps 程度)のメトロ対応量子暗号の実現
- ・近距離(<1km)ワイヤレス量子暗号の実現
- ・各種量子暗号プロトコルの評価

2015年：

- ・量子中継による長距離(>>100km)量子暗号の実現
- ・携帯電話等への搭載も可能な量子認証システムの開発

3-3-2. 量子通信ネットワーク基盤技術

最終的な量子情報通信ネットワークの形態としては、各自が小型量子計算機を含む量子情報端末を携帯し、また公共の場にも配置され、近距離から遠距離、有線及びワイヤレスすべてにおいて、量子計算、量子暗号、量子通信に基づく超高速処理・通信及び秘匿性保証が備わった高度ネットワークが考えられる。そのためにはまず、鍵配送距離の飛躍的伸長に必要な量子中継等、将来の本格的な量子情報ネットワークを実現するために不可欠な基盤技術を確立するための研究開発を着実に進めることが重要である。光-原子間、光-電子間での量子状態の転写技術

は、量子通信ネットワークのノードを形成するために必須である。研究開発の過程では、未知の物理現象を発見できる可能性も高く、基礎科学的意義も大きい。

量子中継に不可欠な、量子状態のメディア変換を可能とするため、光と原子/電子間での量子インターフェースの実現が課題であり、固体素子と原子系の二つの方式で相補的に進める。

固体素子では、まず量子情報を安定に保持できる緩和時間の長い素励起状態を見つけ出し、それを制御する技術確立する必要がある。次に、光の量子状態とのインターフェースを取る方法として、固体基板にドーピングされた不純物準位の電荷やスピンと光とのコヒーレントな相互作用を用いる方法、量子ドット構造・フォトニック結晶構造などの人工的な量子構造中の素励起とのコヒーレントな相互作用を用いる方法などの研究を進める必要がある。

原子系では、光共振器を介して光子と原子/イオン間での量子的インターフェースを取る方法、光と原子集団間のコヒーレントな相互作用で量子状態の転写を行う方法などの研究は必要である。

光の転送に有利な波長が $1.5\mu\text{m}$ であるのに対して、光の検出やメモリに適した波長は異なっており、量子状態を異なる波長に変換する技術が今後非常に重要なものとなる。量子状態を損なうことなく自在に波長変換を行う技術の開発により、伝送、信号処理、検出を各々に適した波長帯で行うことのできる、フレキシブルな量子ネットワークシステム構成が可能となる。

これら量子波長変換技術や量子メディア変換技術を用いて、光の量子もつれをネットワークに展開し、量子情報の分散処理を行うことにより1対多、多対多の量子暗号プロトコル(量子マルチパーティープロトコル)を実現する。基盤研究として、量子計算量・通信容量理論も重要である。

研究開発目標としては以下のとおり。

2008年:

- ・原子/イオン系の冷却、量子もつれ制御技術の開発
- ・光と結合する安定な素励起の探索と制御技術の開発
- ・ナノ構造、フォトニック結晶作製技術の適用による光アクセス技術の開発
- ・光パラメトリック過程の低損失化と高効率化

2010年:

- ・光子ーイオン間、光ー原子集団間での量子状態転写、及び光子ー電子スピン-核スピン間での量子状態転写の実証
- ・核スピン等による固体量子メモリの開発

- ・量子波長変換技術の原理検証とシステム実験
- ・量子マルチパーティプロトコルの実装法、量子分散処理用デバイスの開発

2015年:

- ・少数ビットの演算による量子マルチパーティプロトコルの実現

3-3-3. 量子信号処理

光の波としての性質を極限まで制御することで、毎秒 10^{15} (ペタ)ビットを超える伝送容量が実現できると言われているが、さらにその先の毎秒 10^{18} (エクサ)ビットの容量は光波通信技術の延長線上には見えてこない。これは、1 パルス辺りの光強度が極端に弱くなり、パルス光自身の持つ量子揺らぎの影響が無視できなくなるためである。この状況でさらなる通信ネットワークの超大容量化を目指すためには、極端に微弱なコヒーレント信号から最大限の情報を取り出すため量子計算による光の量子信号処理、すなわち量子符号化が必須の手段となる。少数ビットでも光領域で量子計算が実現すれば、それによる小規模量子符号化を古典符号と組み合わせることで、従来の光通信の性能限界(シャノン限界)を凌駕することができる。これは将来的に毎秒エクサビットという通信領域への扉を拓く新たな原理として期待される。一方、短・中期的にはこのような光通信の性能限界は、深宇宙通信など、極限的な通信領域において先に到達するため、まずはこのような通信系における量子符号化の重要性が高まるものと予想される。

量子符号化技術の実現を目指すには、受信信号のコヒーレント光パルス間で最適な量子もつれ状態を生成する光量子ゲートの実現、光量子ゲートの組み合わせた小規模量子計算による量子符号化の実証、といったように中・長期的展望に立ち段階的に着実な研究開発を進めることが重要である。

まず小規模な光量子計算を実現するためには、要素技術として、非古典光の生成・制御技術、高感度光子数識別技術などが必要となる。また、将来的に量子回路を大規模化、集積化するためには、固体EIT、微小共振器、フォトニック結晶等の技術を利用した固体素子による光量子ゲートの実現・デバイス化も重要な課題である。

小規模光量子計算が可能となれば、通信以外の長期的な応用として、計測技術が考えられる。冷却イオン系による量子計算に基づくハイゼンベルグ限界測定を行うことで、究極の測距技術や周波数・時間標準技術への応用を目指す。

研究開発目標としては以下のとおり。

2010年:

- ・3~4モードの光量子計算システム構築、ホモダイン限界を超える量子受信器の

原理実証実験

- ・少数(単一)光子での光量子ゲート実現
- ・N~4個程度による冷却イオン系ハイゼンベルグ限界測定実験、原子系量子もつれ制御技術による量子測距・時刻同期の物理スキーム探索

2015年:

- ・測定誘起型非線形過程による量子一括測定の原理実証、小規模量子符号化の実現
- ・光量子ゲートの量子中継、量子通信への適用
- ・量子時計プロトタイプの開発、原子系量子もつれ制御技術による量子測距・時刻同期の原理実証

3-3-4. 共通要素・基礎技術

量子情報通信の基礎研究及び実用化研究にとって必須となる技術として、単一光子状態や量子もつれ光子対状態、スクィーズド状態、量子もつれビームなどの非古典的状态を生成する量子制御光源技術と、光子を高感度・高精度で検出する光子検出技術がある。実用化研究の観点からは、量子鍵配信システムを製品レベルへ高性能化するために、通信波長帯における単一光子源と単一光子検出器の性能を早急に向上させる必要がある。基礎研究の観点からは、量子情報通信の原理を世界に先駆けて実証するための高度な非古典光源技術と高感度の光子数識別技術を開発してゆく必要がある。

量子鍵配信システムを高性能化するための単一光子源としては、通信波長帯においてオンデマンドないしは規則的タイミングで単一光子状態を発生できることが望まれる。可視帯や近赤外帯ではさまざまな固体デバイスで単一光子源の研究開発が行われているが、 $1.3\mu\text{m}$ 帯、さらには $1.55\mu\text{m}$ 帯へ長波長化するための研究開発は遅れている。これらの波長帯を狙うためには、半導体量子ナノ構造に基づく単一光子源の研究開発を戦略的に進める必要がある。量子もつれ光子対源に関して、通信波長帯において制御性の高い発生が望まれており、単一光子源と同様、半導体量子ナノ構造に基づく方式に注力する必要がある。

上記のような、離散量に基づく量子情報技術に対して、スクィーズド状態は、これに相補的な連続量に基づく量子情報技術を提供する。光ネットワークの基幹回線を通流れるコヒーレント状態は、基本的に連続量に基づいて制御がなされており、光の位相や振幅といった連続量に対する量子情報処理技術が実現されれば、情報通信技術は、従来の光通信から自然な延長線上で新たな研究開発フェーズへ移行することができる。当面は、連続光及びパルス光の両方で高利得のスクィーズド状態を

生成する技術を確立する必要がある。波長帯は、関連する要素技術が揃っている近赤外帯で重点的に進め、通信波長帯については、高利得化への方策は依然不透明な部分があるが、光ファイバや擬似位相整合導波路デバイスで、性能改善を一步一步進めてゆく必要がある。

また、光子検出器は、量子情報通信にとって必須のデバイスであるにもかかわらず、世界的にも開発が遅れており、極めて重要な技術課題である。主要研究機関の共通の最優先課題は、量子暗号用の光ファイバ通信波長帯光子検出器の高性能化(高量子効率、低ダークカウント等)である。これに対する方式は、化合物半導体デバイス、短波長用増幅デバイスへの波長変換方式、超伝導エッジセンサーなど複数あり、並行して進める必要がある。中期的には、光領域での高度な量子信号処理へ向けて、近赤外、通信波長帯における光子数識別器の実現を目指す。

また、量子通信路容量の解明等に寄与する量子通信理論や、量子もつれの基本的性質、定量化法の解明に関する量子情報基礎理論の研究により、量子情報ネットワークシステム高性能化への指針を構築する。

研究開発目標としては以下のとおり。

2008年:

- ・半導体量子ナノ構造に基づく通信波長帯単一光子源の試作(電氣的トリガーによるオンデマンド発生機構の確立とモード制御の最適化)
- ・パラメトリック下方変換で生成した量子もつれ光子対の一方を測定してゲーティングすることにより、単一光子源を実現する方式で、発生効率の上限を確認
- ・近赤外/通信波長帯パルス・スクイズド光源(4~6dB)の開発
- ・通信波長帯光子検出器の開発(量子効率 40%、繰り返しレート 10MHz 以上、暗計数 1.0×10^{-6} /パルス以下、アフターパルス発生率 1.0×10^{-4} /パルス以下)。
- ・ホモダイン検波の広帯域化(SN 比 10dB 程度で数 GHz 程度)

2010年:

- ・小型の通信波長帯オンデマンド単一光子源(繰り返しレート 100MHz、一光子確率 >0.3 、二光子確率 $<10^{-3}$ 、強度相関係数 $g^{(2)}(0) < 0.1$)
- ・半導体量子ナノ構造に基づく通信波長帯用量子もつれ光子対源のデバイス試作と原理確認
- ・擬似位相整合導波路デバイスや光ファイバ波長変換方式による通信波長帯用量子もつれ光子対源(100kc/s、偏光相関ビジビリティ 95%)の開発とゲーティングに基づく高品質単一光子源(一光子確率 >0.6 、二光子確率 $<10^{-3}$ 、強度相関係数 $g^{(2)}(0) < 0.04$ 等)への応用
- ・近赤外/通信波長帯で 8dB 程度のスクイーミングを可能とする生成方式の開拓と

小型化、広帯域化

- ・通信波長帯光子検出器の高性能化(量子効率 65%程度、時間分解能 1ns 以下、繰返しレート100MHz 以上、暗計数 1.0×10^{-6} /パルス以下、アフターパルス発生率 1.0×10^{-5} /パルス)
- ・光子数識別技術の開発: 近赤外帯や通信波長帯で量子効率 90%以上、繰返しレート 10MHz 程度、暗計数 10c/s 以下、繰返しレート 1MHz 程度
- ・量子回路設計理論の構築と実験への提供

2015年:

- ・光子数識別器(近赤外・通信波長帯)の量子効率・分解能の更なる向上、新方式の検討(原子ガス、新規材料等)
- ・量子ネットワーク理論の構築とネットワークシステム実験への提供

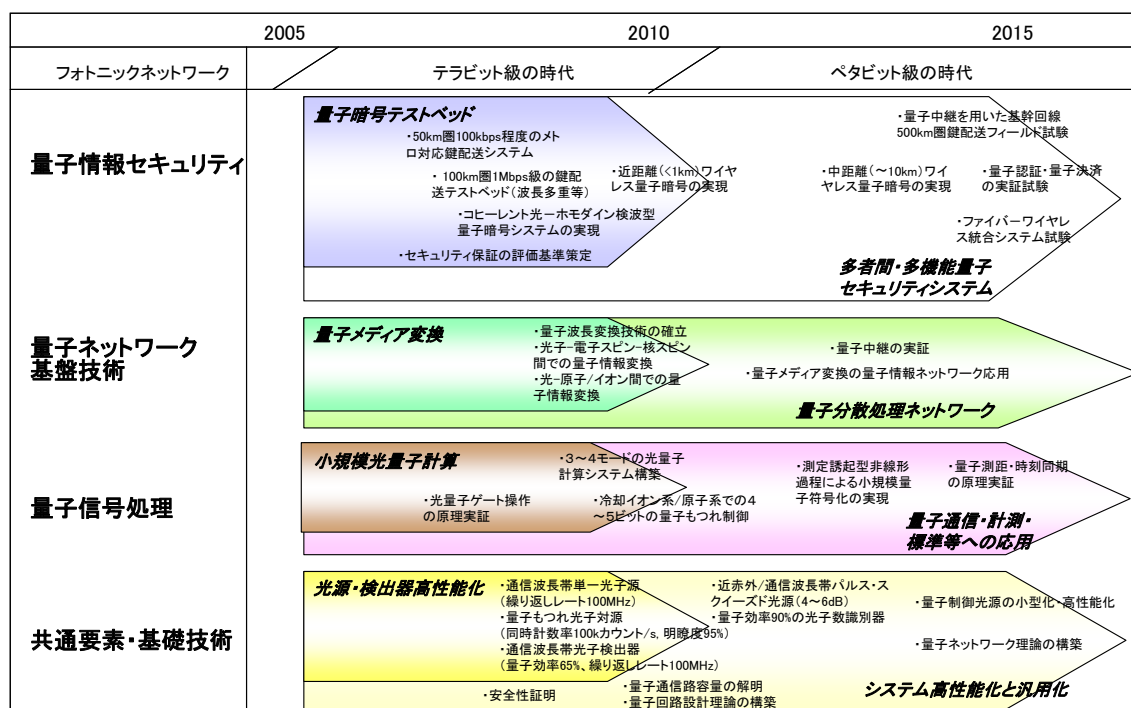


図3. 17 量子情報通信の技術開発ロードマップ

要求に応じて量子暗号鍵の供給が可能となることで、極めて安全性の高い都市内ネットワーク(無線リンクを含む)が2010年頃に実現する。また、2020年頃には量子中継の実現により、全国どこからでも極めて安全にデータを送受信できるネットワークが形成可能となる。

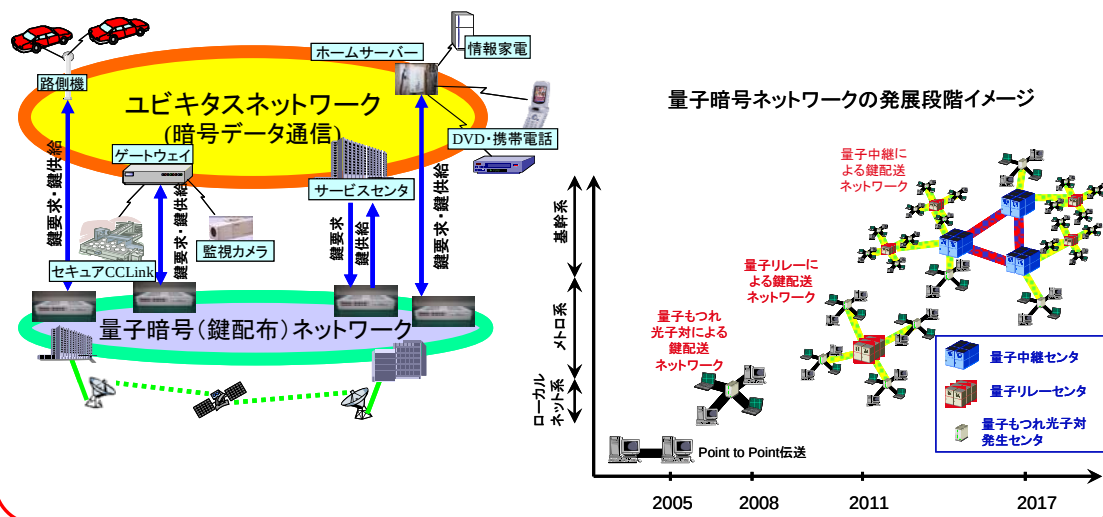


図3. 18 量子情報通信の実現像

3-4. ナノITネットワーク

ナノITネットワークの研究開発課題としては、ナノ技術を活用したデバイス技術等の開発促進することにより、各分野(次世代フォトニックネットワーク、テラヘルツICT、量子情報通信)への応用を図ることが上げられ、また、ネットワークへ適用するための基盤技術確立も課題である。

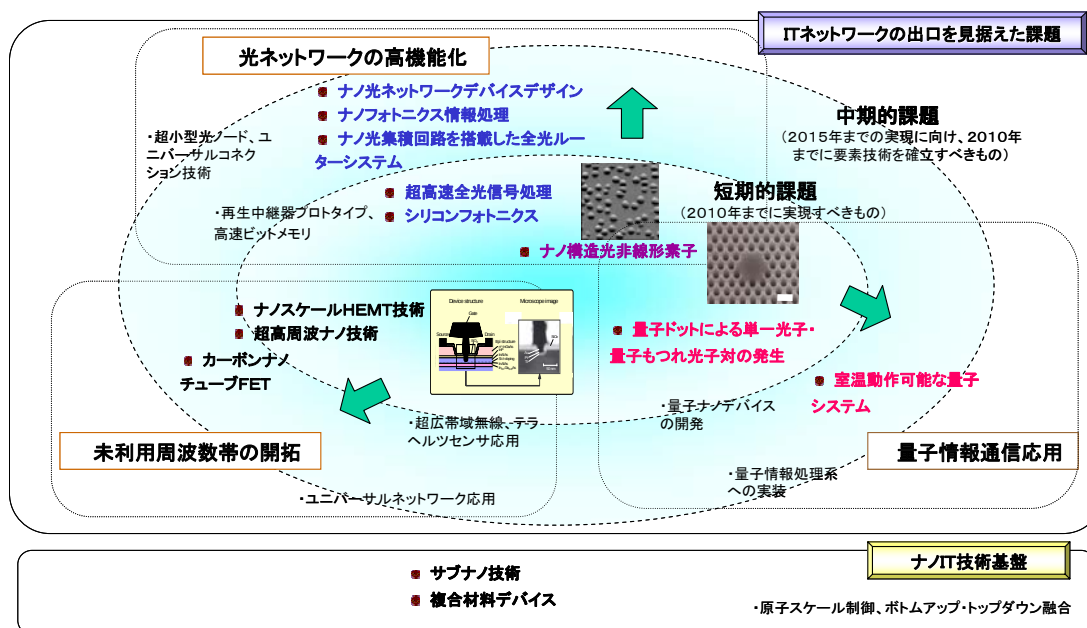


図3. 19 ナノITネットワークの研究開発課題

3-4-1. 光ネットワークの高機能化

ナノ技術の活用により、光ネットワークの量的伸長だけでなく、「光ネットワーク機能性の拡充」や「光ネットワーク信頼性の高度化」など、光ネットワークの質的拡充を図る。

技術課題としては以下のとおり。

- ・ 1.55 μm 帯に応答する量子ドット技術や、従来の光ファイバに比べて50～100倍の高い非線形性が期待できるフォトニック結晶ファイバ技術を確認し、フォトニックネットワークへの適用を図る。
- ・ 加工性・低コスト性に優れるシリコンを母体としたフォトニクス技術の研究開発により、光通信機器大量生産と大幅コストダウン、小型集積化を図るとともに、究極的な光・電子融合技術への展開を検討する。
- ・ ナノテクノロジーにより光非線形効果の制御技術や光伝播の制御技術を発展させ、電子回路では制御困難な 160Gbps 以上で動作する全光信号処理回路を開発する。
- ・ 量子ドット、フォトニック結晶、MEMS、CMOS フォトニクス技術の融合による

ワンチップナノ光集積回路、及びそれを搭載した低消費エネルギーの全光ルーターシステムを開発する。

- ・ 近接場光を情報キャリアとして、少数のナノ物質を微視的励起することにより新規光デバイスを動作させ、それらを組み合わせて通信と情報処理の枠組みを超えた、新たなITシステムの構築を目指す。
- ・ 数値的手法と物理的手法によるネットワークシミュレータを準備し、デバイス性能・機能をパラメータとしてネットワーク性能・機能を分析するなど、ナノ光デバイス標準化を含めてより効率的なシステム開発技術を確立する。(光ネットワーク高信頼化にも指針提供。)

研究開発目標としては以下のとおり。

- ・ 2008年までに、 $1.55\mu\text{m}$ 帯量子ドット作製条件の確立(高速非線形応答、低チャープ性、波長一括等を利用した光増幅器、波形整形素子、狭線幅レーザ、波長変換素子等を実現)させると共に、光学利得や光波制御機能を有するシリコンデバイスの実現し、光メモリ(ビットメモリ、パッファメモリ)の原理確認を完了する。
- ・ 2010年までに、スイッチング速度 0.1 ナノ秒以下で、3R中継、信号の add/drop や波長変換、ラベル識別の動作実証、ナノ光導波技術とナノデバイス技術による光集積度拡充及びそれによる機能発現、インターコネクションへの適用など CMOS 技術との融合及びそれによる機能性拡充、高速動作ビットメモリ、光 RAM 用ナノ素子の開発、ナノITネットワークのモデル化と評価を実現させる。
- ・ 2015年までに、1チップで全てのルーティング機能を実現し、光ルーター駆動制御系の小型化、ネットワークの戦略的構築法や運用効率化、高信頼化設計を実現させる。

3-4-2. 未利用周波数帯の開拓

ナノ技術活用により、光と電波の狭間にあって良質の信号源、光源等の開発が遅れていた、テラヘルツ技術の開発を促進し、テラヘルツ帯の利活用を図る。

技術課題としては以下のとおり。

- ・ Siに比べ1桁以上高い電子移動度を持つ化合物半導体にナノゲート構造を形成することで、バリスティック輸送現象の顕在化によりテラヘルツ動作が可能な超高速素子(ナノスケールHEMT)を実現する。
- ・ サブミリ波からテラヘルツ波に至る超高周波電磁波資源を本格開拓するため、量子カスケードレーザ、サブバンド間遷移デバイス等、ナノ半導体技術(信号源、検出器、端末、センサ、その他)の確立を目指す。

- ・ バリステック伝導特性を有するカーボンナノチューブを複数本並べたチャネル構造の形成により、テラヘルツ動作の超高速素子(カーボンナノチューブFET)を実現する。

研究開発目標としては以下のとおり。

- ・ 2008年までに、45nmHEMTや超高速光通信用ICを開発する。
- ・ 2010年までに、超高速ADC(>100G サンプルング/s)の開発、40Gbps 以上の超広帯域ワイヤレス伝送技術、テラヘルツ帯センシングへの展開を進めると共に、並列チャネル・カーボンナノチューブFET(200GHz 動作)を開発する。
- ・ 2015年までに、ナノゲート・カーボンナノチューブFET(テラヘルツ動作)を開発する。

3-4-3. 量子情報通信応用

量子ドットやフォトニック結晶技術の活用により、量子ナノデバイス技術の開発を促進し、量子情報通信への応用を図る。

技術課題としては以下のとおり。

- ・ In(Ga)As をベースとする量子ドットを活性媒体として、フォトニック周期構造との集積により、1.3~1.55 μm 帯の単一光子の発生、ないしは複数光子対の相関制御を可能とするデバイスの実現を目指す。
- ・ 量子ドット、フォトニック結晶、MEMS の融合による、小型で室温(もしくは高温)動作可能な高効率量子暗号通信システムを開発する。

研究開発目標としては以下のとおり。

- ・ 2008年までに、フォトニック周期構造による単一光子発生の制御を実現させ、2010年までに、量子もつれ光子対の発生と制御を実現するとともに、1.5 μm 帯で動作する単一光子発生素子を開発する。
- ・ 2015年までに、室温動作可能な単一光子発生素子・検出素子を開発すると共に、量子中継を含む量子暗号通信システムを開発する。

3-4-4. ナノIT技術基盤

ナノ技術をITネットワークへ適用する上で必要となる基盤技術として、サブナノ領域の構造制御技術、新材料と半導体との複合デバイス技術等の確立を図る。

技術課題としては以下のとおり。

- ・ ナノ技術を確実なものとするためには、サブナノ領域の精度を有する構造制御性が必要であり、トップダウン手法とボトムアップ手法のクロスオーバーにより、ナノ技術の選択肢を拡充。

- ・ 有機デバイスだけでなく、分子デバイス、バイオデバイスなどの実用化も視野に入れ、それらの新興デバイスと半導体デバイスとの融合により、相補的機能を発揮する複合材料デバイスを開発。

研究開発目標としては以下のとおり。

- ・ 2010年までに、基盤的サブナノIT技術、融合的結晶成長技術・プロセス技術を確立すると共に、簡単な有機融合デバイスの試作を完了し、2015年までに、サブナノ制御されたナノITデバイスやバイオ・分子融合デバイスの試作を完了する。

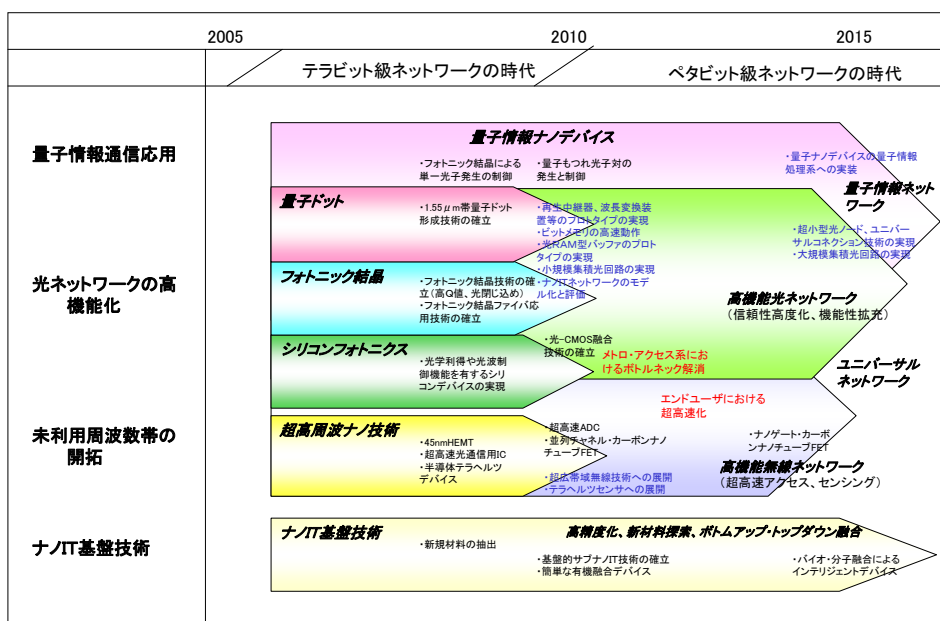


図3. 20 ナノITネットワークの技術開発ロードマップ



図3. 21 ナノITネットワークの実現像

第4章 分野融合領域の研究開発への重点的取組

4-1. 分野間の連携による効果が期待される研究領域

前章で述べたように、「次世代フォトニックネットワーク」、「テラヘルツICT」、「量子情報通信」及び「ナノITネットワーク」の4つの基盤技術分野それぞれにおいて、個別の技術目標を有する一方、ルータの高機能化、量子ネットワークの実現など、21世紀ネットワーク基盤技術としての共通目標を達成することが期待されている。基盤技術分野相互の連携による効果が期待される研究領域を検討する上で、以下のような視点が重要である。

- ア. 光ルータの高度化に向けて、ルータの3大構成要素(スイッチ、ラベル認識、バッファ)を光で実現することが重要である。貯めるだけでなく、自由自在に取り出したりアクセスしたりする機能を光で実現すること(光 RAM)が今後の課題であるが、ナノ技術活用により光 RAM の実現が期待される。
- イ. 短期的に実現可能なルータとしては、光と電気の物理的性質の違いを反映し、適材適所を考慮した光・電気ハイブリッド方式が重要である。(消費電力については、システム全体で見て比較すべき)。電子デバイスの性能も上がってきているので、情報共有を図った上で進めるべきである。(例:160GHz 程度までは光と電気の両方で進めるのが良い。)
- ウ. 上記に関しては、視点を広げて国全体として幾つか違ったアプローチをしてみて、総合比較することも重要である。
- エ. 実用化に近い量子暗号鍵配布を如何に情報ネットワークとして上手く使っていくか、という利用技術を考えていくことが重要である。無条件安全性を保証する量子暗号と、従来方式との併用、ネットワークの各レイヤーでの役割分担を図り、全体システムとして非常に高いセキュリティを達成することを考えていくのが良い。
- オ. 量子中継は量子情報伝送の長距離化にとって極めて重要な技術であり、中継用デバイス技術は量子情報とナノITとの連携効果が期待できる研究領域である。(光 RAM は量子情報処理にとっても有用)
- カ. テラヘルツ波による分析能力が、暗号モジュール等情報セキュリティ製品の安全性解析に役立つ可能性がある。

上記のような視点から、基盤技術分野相互の連携効果を活用して取り組むことが望まれる課題として、次節の6つの研究開発課題が考えられる。

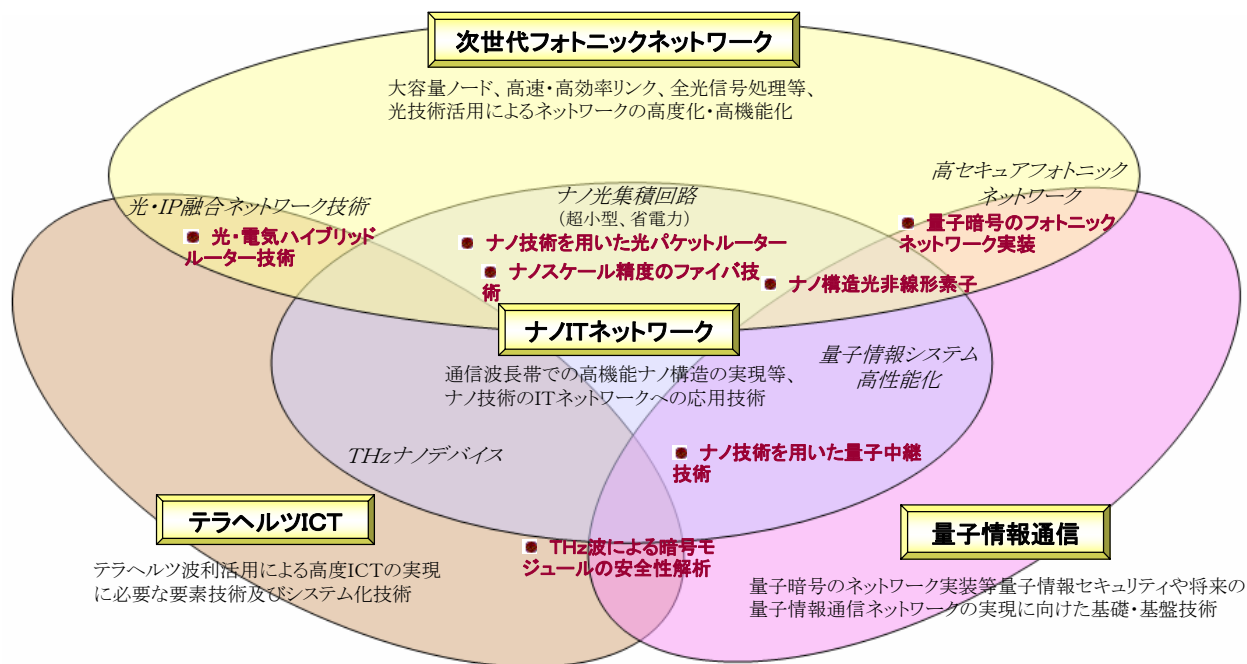


図4. 1 分野間の連携による効果が期待される研究領域

4-2. 分野間の連携による効果が期待される研究開発課題

(1) ナノ技術を用いた光パケットルーター

ブロードバンド化の進展に伴ってネットワークトラフィックは10年で1000倍に達する驚異的な速度で増加し続けている。光通信に関しては波長多重技術の導入によりこのような急速なトラフィック増に対応できる技術的な見通しがたっているが、ルータ等でのノード処理が新たなボトルネックとなってネットワーク容量を制限しつつある。現在のルータは大部分が電子回路による処理に依存しており、光は入出力に用いられているに過ぎない。このため処理能力は電子回路の速度で制限されており、飛躍的な能力向上には高速な光を用いた処理が不可欠であると予想される。また、電子回路による情報処理は能力増に伴って消費電力の増加が不可避であり、地球温暖化防止の視点からも光化による抜本的な省エネルギー化が不可欠である。

しかしながら光技術は従来専ら伝送用をターゲットに開発されてきたためルータ等の情報処理に適用できる技術は乏しく、特に部品レベルでは光メモリ・光スイッチ等情報処理に不可欠な技術が根本的に不足している。進展の著しいナノ技術を用いた光部品開発はこのような状況を打破し根本的な技術革新をもたらすものと期待されており、特に光メモリ・光スイッチに関しては重要な応用分野として期待されている。光部品での大幅な技術革新はルータアーキテクチャの抜本的な変化をもたらし、ルータの飛躍的な能力向上と大幅な省エネルギーを同時に達成できると期待される。

現在、ルータ市場は米国(シスコシステムズ等)がほぼ独占しており、国内メーカーは専らルータの部品を提供するにとどまっている。これに伴い IP 標準化等においても米国企業を中心に決定され日本の影響力が低下しており、将来の情報化への懸念材料となっている。将来の光パケットルータにおいても DARPA を中心に巨額な研究資金を投入し部品開発からシステム設計まで強力に研究を推進しており、将来の光ルータにおいても米国独占を継

続しようと思図している。欧州はこれに対する危機感を強めており、EC が主導して光ルータ研究を強化してきている。一方、国内では通信バブル崩壊に伴いメーカーの研究開発余力が大幅に低下し特にこの分野での立ち遅れが目立っており、研究開発戦略の根本的な建て直しが不可欠である。

最先端ナノITデバイスとフォトニックシステムとの融合により光技術に根本的技術革新をもたらし、ルータの処理容量の飛躍的な拡大と消費電力の大幅低減を実現する。図4. 2に光ルータと電気ルータの構成の概略を示す。電気ルータでは前述した処理能力増に伴う電気スイッチ、ラインカードの消費電力に加え、光電気(O/E)変換を繰り返すことが必要のため消費電力が増加してしまう。光ルータではすべて光のまま処理を行うことにより、消費電力の問題が解決されることに加え、光が持つ高速性を維持したまま処理可能なため処理容量の飛躍的な拡大も期待される。しかしながら、トラフィックの急増を考慮すると開発に許される期間は短く、光技術の段階的導入と飛躍的な技術革新とを並行して推進する必要がある。具体的なシナリオとしては、2010年を目途に光電子融合型光パケットルータを開発し消費電力の飛躍的な削減を推進する(目標1)。同時に将来の全光パケットルータ実現に向けた抜本的な基本技術確立を進め、全光ルータによる究極的な消費電力削減と飛躍的な処理容量拡大を目指す(目標2)。これらの目的のため光パケットの行き先を認識する光ヘッダ処理技術、光スイッチおよびバッファ技術、中でも最も開発の遅れている光RAM型バッファの実現が重要である。図4. 3に電気ルータ、光電子融合型ルータ、全光ルータについて3代構成要素に対する研究開発の流れ及び図4. 4に重要なパラメータの一つである消費電力の比較を示した。光ラベル処理においては複雑な制御を必要とすることもあり当初は消費電力削減に重点を置いた光電気融合型の光ラベル処理の検討を行い、究極の技術としての全光処理の実現を目指す。光スイッチ、光RAMにおいてはナノ・フォトニック技術を活用した研究開発が重要である。図4. 5に光ルータの構成と光ラベル処理回路、光スイッチの具体例を示す。光ラベル処理には、光のシリアル-パラレル変換技術を用いてMUX/DEMUX を実現し大幅な消費電力の削減を図り、その後究極の零消費電力ラベル認識技術である光相関を用いたラベル処理技術の確立を目指す。光スイッチは平板光波回路(PLC)を用いてボード上にハイブリッド実装しているのが現状であり数十 cm 角にとどまっている。これを半導体ナノ加工技術を用いた大規模半導体モノリシック回路の実現より十 mm 角に縮小し、さらにフォトニック結晶技術を組み合わせることにより最終的には数 mm 角で大規模な光スイッチを実現する。

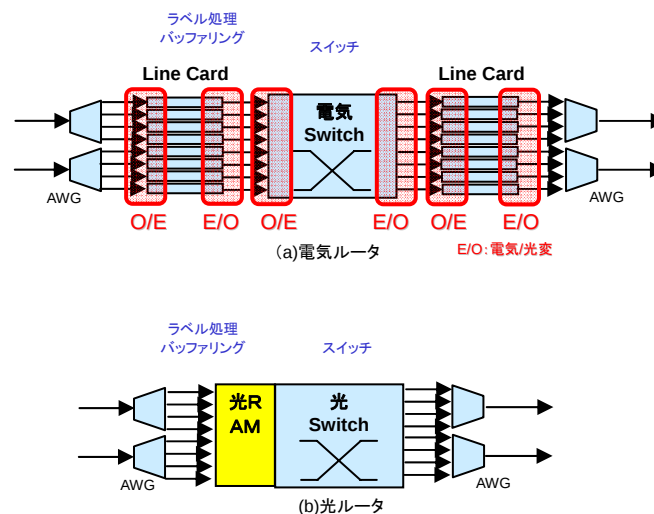


図4. 2 電気ルータと光ルータの構成比較

図4. 6に光 RAM 型バッファの概念図と具体例の一例を示す。光バッファリングでは所望の場所に信号光を振り分ける光アドレッシングと入力した光信号をビットごとあるいはパケットごとに保持する光 RAM が必要となる。光アドレッシングには高速な切り替え速度を有する半導体マトリックススイッチの実現が必須であり、光 RAM の実現のためには超小型・超低エネルギーで双安定動作可能な素子の開発が必須である。このためには半導体ナノ微細加工技術、フォトリソ技術による超小型・超低消費電力の集積型光RAMの実現が期待される。例えばフォトリソ技術はフォトリソ技術を構成するナノホールをの周期、サイズを変えることで高い Q 値を持った共振器を作ることができ、波長と時間を制御することで高い Q 値を持つ共振器内に光を閉じ込めることが可能である。また、光パルス共振器にそって掃引することで、共振条件を満たす場所の情報を読み出すことが可能である。この現象を使うことで光の記憶、読み出しができる。光 RAM を含むバッファリング技術については、光電子融合型を含めた複数のアプローチについて検討し、総合的に比較する。全光パケットルータに関しては2010年までに全光パケットルータ基盤技術を確認し、2015年までにスループット 1Pbps のプロトタイプを開発することを目標とする。

光ルータは日本が得意とする光技術を駆使して初めて完成させることができるものであり、光ルータの実現には日本の技術力が一番近い所にある。完成の暁には大きなマーケットが期待できる。ネットワークの高度化、環境負荷低減、産業へ大きな貢献が図られるものと考えられる。以上から、光の属性を限界まで追求する、「極限フォトリソネットワーク技術」として研究開発を実施することが望ましい。

	現状 微細加工技術向上による 電子回路の高速化追求	目標1 光電子融合技術の 限界性能の追求	目標2 ナノフォトリソ技術 によるブレークスルー
光ラベル 処理技術	全電気処理 ・電気インターフェイス⇒高消費電力 ・電子回路がデータレートを制限	光電子融合処理 ・光インターフェイス⇒低消費電力 ・電子回路による速度制限なし	全光処理 ・光相関処理⇒極低消費電力 ⇒究極の超高速処理
光バッファ リング技術	電気インターフェイス+ SRAM/DRAM ・ラインカード方式のため容量負荷大 ・高速化困難、遅延大、高消費電力	光インターフェイス+ SRAM ・共有バッファ方式により容量負荷低減 ・高速化、低遅延化、低消費電力	光アドレッシング+ 光RAM ・ナノデバイスによる超小型化、 低消費電力化、高速化
光スイッチ ング技術	電気駆動型-電気スイッチ ・大規模化困難、高速化困難 ・遅延大、高消費電力	電気駆動型-光スイッチ ・大規模化容易、高速化容易 ・低遅延、低消費電力	光駆動型光スイッチ ・O/E変換なしで超高速、極低遅延 ・低消費電力

図4. 3 ルータの基本機能に対する研究開発の流れと特徴

	電気ルータ (Cisco CRS-1)	光電子融合ルータ	全光ルータ
要素技術	・電気インターフェイス + 電子回路 ・電気駆動- 電気スイッチ	・光インターフェイス + 電気回路 ・電気駆動- 光スイッチ	・光相関処理 ・光駆動- 光スイッチ
O/E 変換数	6 回	0-2 回	0 回
消費電力	500kW	70kW	10kW
架数	80 台	10 台	2 台

100Tbpsルータを想定

図4. 4 ルータの光化によるメリット

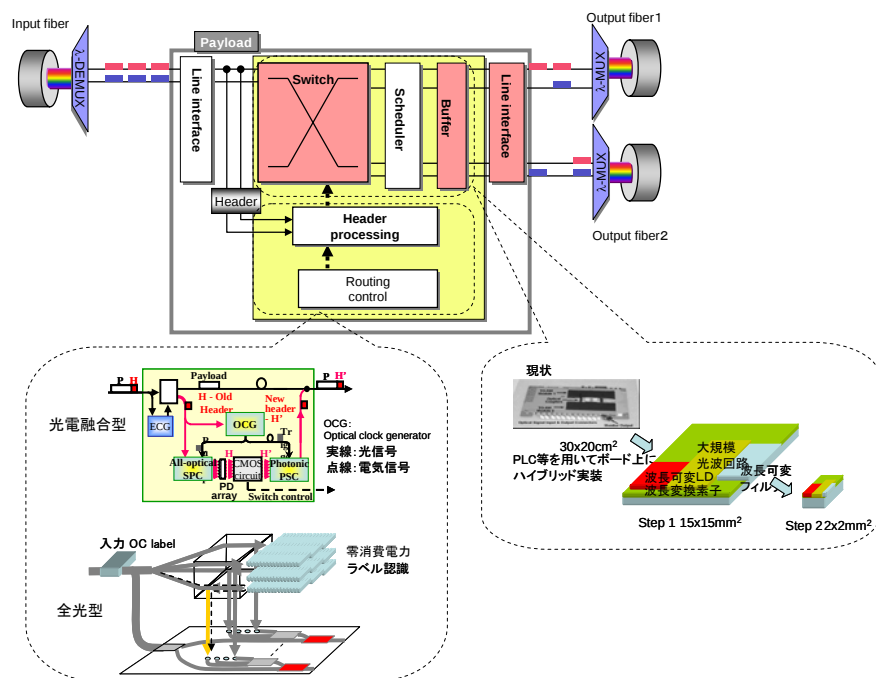


図4. 5 光ルータの構成と光ラベル処理回路、光スイッチの具体例

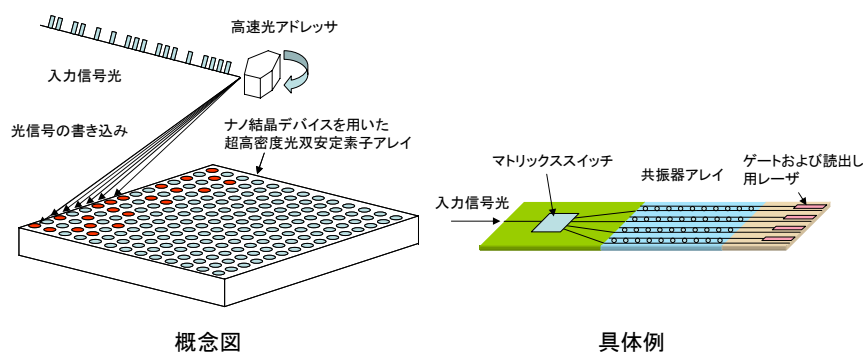


図4. 6 光RAMの概念図と具体例

(2) 光・電気ハイブリッドルーター技術

ネットワークの基盤技術としてのハイエンドルーターは、現在のトラフィックの伸びを考慮すると、2010年程度には基幹系として総スイッチング容量として 50-100Tbps が必要となる。しかしながら、これを現在の技術の延長線上で構成しようとする、発熱回避の必要性から生じるスループットの低下とレイテンシの増大、また実装におけるピンネックの問題を解決することができない。したがって、単体で処理能力の高い 160Gbps のラインレートを持つ新しい技術によるIP ルーターが不可欠となる。このIP ルーターは、高スループットかつ低電力性を兼ね備えている必要がある。

IP ルーターは、IP パケットの前処理を行うラインカードとIP パケットの行き先を切り替えるスイッチカードからなる。スイッチカードには、スイッチのほかにアドレスデコードやバッファリング、衝突回避のためのスケジューリング制御も含まれている。これらの各コンポーネントは要求される回路規模や処理速度が異なる。また、全光パケットルーター用コンポーネントの開発レベルもさまざまであることから、160Gbps のラインレートを持つ IP ルーターの早期

開発には光・半導体(化合物・CMOS)・超伝導技術の利点を生かした融合システムが有望と考えられる。たとえばラインカードは、高速性は必ずしも重要でないが複雑な処理が必要となる。したがって、半導体集積回路技術が有望である。スイッチには高速性が求められる。光技術と超伝導単一磁束量子(SFQ)回路がその条件を満足させられるが、パケットのデータ部分の光/電気変換が不要であることから光技術の適用が有望である。一方、スケジューリング機能は、ある程度の処理機能(集積度)とともに超高速性が要求される。これには、すでに集積回路が構築可能で高速性・低電力性を兼ね備えた SFQ 回路が有望である。アドレスデコード、バッファリングにも SFQ 回路の適用が考えられる。また、それぞれのデバイス間の信号変換には、柔軟な設計のできる化合物半導体技術が適している。(図4. 7参照)

このような光技術と電気技術を融合したハイブリッドルーターは、各デバイスの長所を生かすことにより成り立っている。長所を発揮できる部分では、低消費電力化も期待できるため、高密度実装が可能となり、レイテンシの大幅な低減化が期待できる。また、システムレベルでの省電力化も可能となる。さらに、早期開発が見込め、今後のトラフィックの伸びに十分対応可能と考えられる。すなわち 100Tbps の総スイッチング容量を持つ大容量ルーターを早期に実現するために、もっともポテンシャルの高いアプローチと考えられる。

光・電気ハイブリッドルーターの開発には、フォトリックネットワークとして開発中の光コンポーネント技術とテラヘルツ ICT として扱われる超高速信号処理回路技術の融合が必須である。そこに使われる光集積回路技術、化合物半導体集積回路技術、SFQ 集積回路技術などはいずれも日本が先導的に研究を進め、かつある程度見通しの立った技術分野であり、世界に先駆けてハイブリッドルーターの開発を行う下地が整っていると言える。また、早期開発によって世界標準化も見込める。

既に述べたように光・電気ハイブリッドルーターは複数の技術の長所の集積である。個々の技術の開発レベルやシステムからの要求に合わせて柔軟に技術を選択することができる。たとえばアドレスデコードが光集積回路技術で実用化レベルとなったら、それをすぐにシステムに組み込むことが可能となる。また柔軟性は、ネットワークの基幹部分のみならず、超並列コンピュータのノード切り替えスイッチなど新たな分野への適用も促進する。さらには日本が先導する先端的技術の融合が相乗効果を生み出し、新しい産業分野を形成していく可能性も秘めている。

光・電気ハイブリッドルーターの実現に向けては、個々の技術の高度化はもとより、技術間の信号の授受方法等、実装技術の開発が求められる。2008年までに個々の基盤技術の確立の後、実装技術も合わせて2010年には 100Tbps 級ルーターのプロトタイプを開発する。

以上のように、光・電気ハイブリッドルーターは、日本が先導して進めるべき開発課題であり、また情報通信の基盤技術として導入が強く求められる技術である。

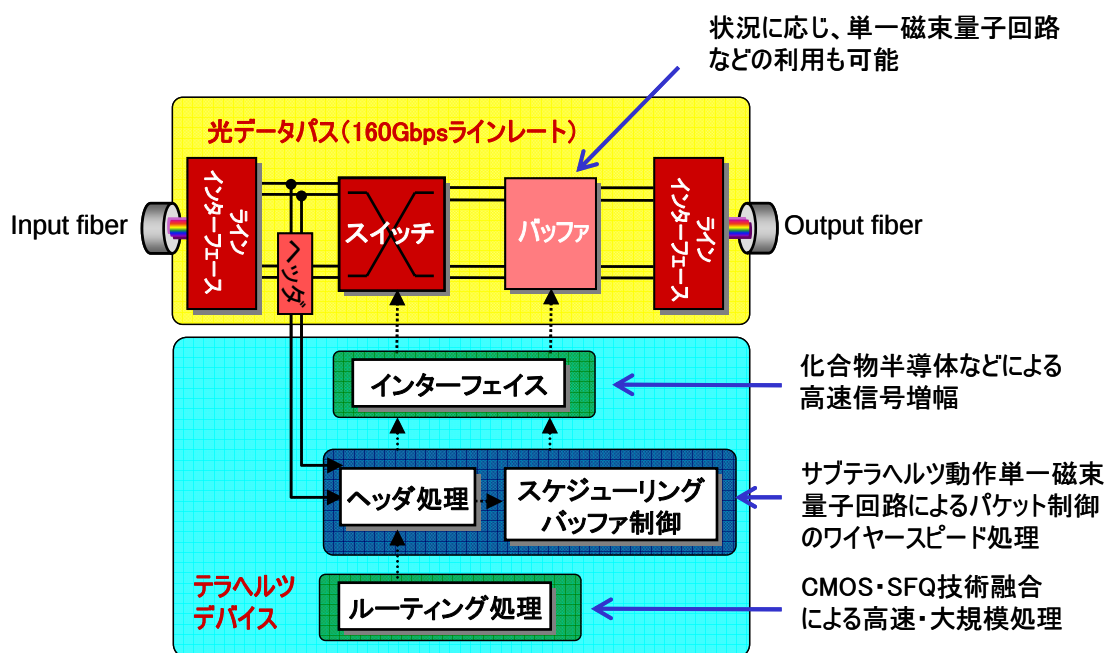


図4. 7 光・電気ハイブリッドルーター構成イメージ

(3)量子暗号のフォトニックネットワーク実装

2001～2005年度「量子暗号技術の研究開発」プロジェクトにおいて、無条件安全性が保証された量子鍵配送技術の研究開発が実施され、これまでに1対1での量子鍵配送のフィールド試験や製品化のための小型化に成功している。今後、量子鍵配送技術を世界に先駆けて暗号インフラストラクチャとして実用化するためには、本技術を1対1からマルチパーティー化(1対多)して拡張すると同時に、広域化と高速化を実現することが重要課題である。このためには、光スイッチング技術、フォトニック結晶ファイバ技術、WDM 技術、高速高感度光受信技術に代表されるにフォトニック技術との連携が不可欠である。さらに、量子鍵配送ネットワークインフラとしての、インターオペラビリティ、可用性／信頼性実現に向けたプロトコル技術、システム・インフラストラクチャ管理制御技術の確立が前述課題とあわせて重要となる。

上記課題実現のため量子鍵配送システムをフォトニックネットワークへオーバーレイさせることを前提に光スイッチング技術、フォトニック結晶ファイバ技術、WDM 技術、高速高感度光受信技術、に代表されるフォトニックネットワーク技術を量子暗号鍵配信技術に融合させる。次に GMPLS とフォトニックネットワークにおけるプロトコル技術の適用、新プロトコル技術の創出によりネットワークそのものの可用性、信頼性を向上させる。その後、開発した技術によって、暗号インフラとしての大規模テストベッドを構築し、実環境での暗号ネットワークの性能実証実験を行い、2010年までに実用レベルの量子鍵配送インフラストラクチャ QKI(Quantum Key distribution Infrastructure)基盤を確立する。

以上、基盤技術に加えてネットワーク化、広域化、マネージメント化によって完成度を高め実用レベルの鍵配信インフラストラクチャ(QKI 基盤)の確立を行うために「量子情報セキュリティ」の研究開発を実施すべきである。

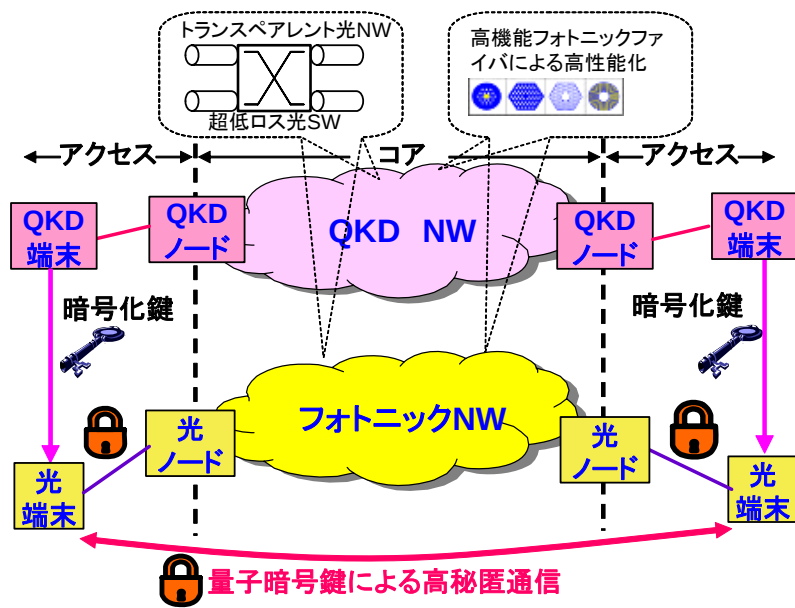


図4. 8 量子暗号のフォトニックネットワーク実装概念図

(4) ナノ技術を用いた量子中継技術

量子鍵配送技術は、数十 km の都市圏ネットワークでの実用化が目前まで来ているが、従来技術では安全性を保證できる量子鍵配送の範囲は 200km 程度が限界とされている。さらに都市間(数百～千km)、大陸間(数千～1 万km)へ拡張するためには、増幅器を使えない量子状態を壊すことなく中継してゆく量子中継技術を開発する必要がある。また、限界以内の距離でもファイバの損失のため伝送レートは距離に対して指数的に減少するため、実用的な伝送レートを確保するには量子中継を用いて伝送スパンを短くすることが有効である。

量子中継には、量子もつれ状態を共有して量子テレポーテーション技術によって量子状態を伝送してゆく。量子もつれ状態の共有を実現するためには、高効率な量子もつれ状態光源、量子もつれ状態に対する量子一括測定その他、中継点間を光子が伝送される間(ミリ秒以上)量子状態を保持する量子バッファが不可欠である。量子バッファ内での量子状態の保持には、緩和時間の長い電子スピンや核スピンなどの量子状態を用いる必要がある。このため、光子からバッファへの量子状態の媒体変換技術や、量子状態に影響を与えずに光子の到着を検出する量子非破壊測定が必須となる。

量子中継は単に伝送距離の延長にとどまらず、量子中継のために開発した技術は多者間の量子ネットワークや分散型量子情報処理にも適用できる。このような技術は、将来の高度な量子ネットワークの実現に不可欠である。

上記のような新規の機能を実現するためにはナノITデバイス技術との融合が極めて重要である。例えば、量子ドットの励起子の状態は光子の偏光状態と一対一に対応するため量子もつれ光子対の発生や光子から励起子への媒体変換に利用できる。この際、変換効率を向上するためにフォトニック結晶を用いた微小共振器により光子を量子ドットの周辺に閉じ込めることが考えられる。固体基板中にドーブした不純物の安定な励起子状態や電子スピン状態を用いる方法も考えられる。このような微細な領域に局在する電荷励起やスピン励起を個々に制御し、光子を捕獲して、必要なときに射出させるためには、ナノ技術の活用が不可欠である。ナノITデバイス技術の究極は1原子・1電子の制御であり、この意味で量子情報技術との融合は必然である。

このような究極の情報処理デバイスの実現にはナノ技術研究を推進し、1量子レベルでの制御を可能にする必要がある。また、量子情報通信に必要な機能を実現するためには、それぞれに異なった特性と適応分野をもつ光子・電子・核スピンなどを統合したデバイスを作成する必要がある。このため、従来独立して研究が進められてきた異なる材料系や技術分野における融合・協力を促進していかなければならない。一方、量子情報技術では、ナノITデバイス技術を土台にして、量子情報処理に必要な物理機構の開拓やデバイス開発を行う。その際、ナノITデバイス技術との連携を密接にし、可能なブレークスルーを視野に入れた上で量子中継に必要なスペックの実現に向けたシナリオを明確化し、ナノ技術に対しても研究開発の指針を与えることが必要である。

2010年までに量子メディア変換技術を実現し、2015年までに量子中継のプロトタイプを開発することを目標とする。

以上、光子とナノ材料の互いの長所を生かした究極的な情報処理デバイスの可能性を追求し、さらに高度なセキュリティを保證する量子ネットワークを実現する、「量子ネットワーク基盤技術」として研究開発を実施することが望ましい。

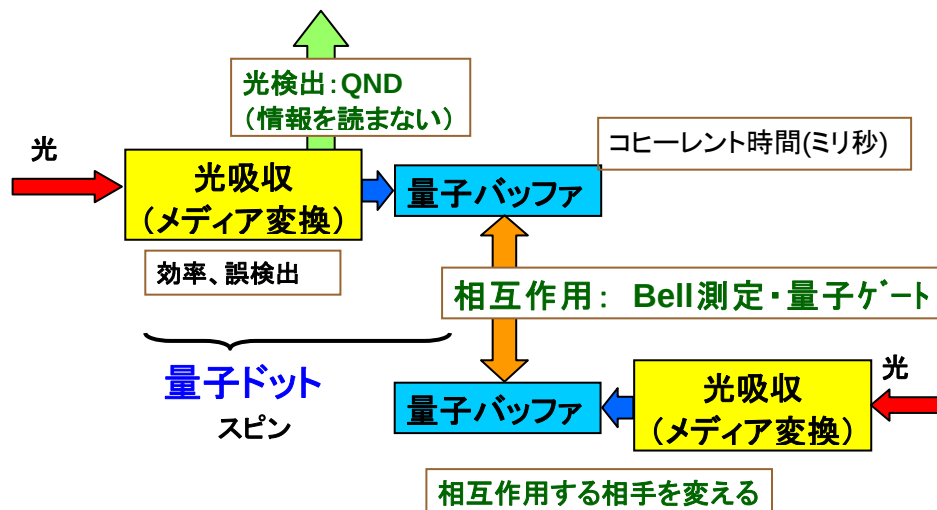


図4. 9 量子中継デバイスの概念図

(5) ナノスケール精度のファイバ技術を用いた高機能フォトニックネットワーク

高機能フォトニック・ノードや超高速伝送の実現に不可欠な要素技術である波長変換や光3R実用化には、実用的な非線形デバイスの開発が重要である。非線形デバイスとしての光ファイバは、100THz以上の超高速応答性を有するだけでなく雑音、信頼性など実用化まで見据えた特性で優れている。しかし、さまざまな要求特性を安定的に達成するにはナノスケール制御による高非線形ファイバの実現が鍵である。

ナノスケール制御は、フォトニック・バンド・ギャップを用いたファイバの実現でも非常に重要である。これにより、伝送距離が100倍拡張できる理想的光伝送路が実現する可能性がある。u-Japan 構想において、大容量・高機能化と同じくらい重要なセキュリティに関しても、高機能フォトニック結晶ファイバは量子情報通信を飛躍的に高める可能性がある。このように、フォトニックネットワークを構成する高機能光伝送路に広く用いられる、従来にない革新的な超高精度ファイバ技術の実現が期待される。

実際の研究開発にあたっては、フォトニック結晶ファイバのタイプによって難易度が極めて高いものがあるため、リスクを十分考慮しながら進めるが、2010年までにナノスケール制御の見通しを立て、非線形ファイバデバイスの実用化およびフォトニック・バンド・ギャップファイバ製造技術確立し、2015年までに損失 0.1dB/km 以下の広帯域ファイバを開発することを目標とする。高機能光伝送路の実現を目指し、材料だけでなく、サブシステムや伝送リンクとしての特性評価・最適化を図る。大容量・高機能化を目指すだけでなく、量子情報通信への積極的活用も検討し、次世代フォトニックネットワーク全体の幅広い応用に対応する。

以上から、ナノスケール精度ファイバ技術を用いたフォトニックネットワークは、光伝送路の究極技術として、光の属性を限界まで追求する、「極限フォトニックネットワーク技術」として研究開発を実施することが望ましい。

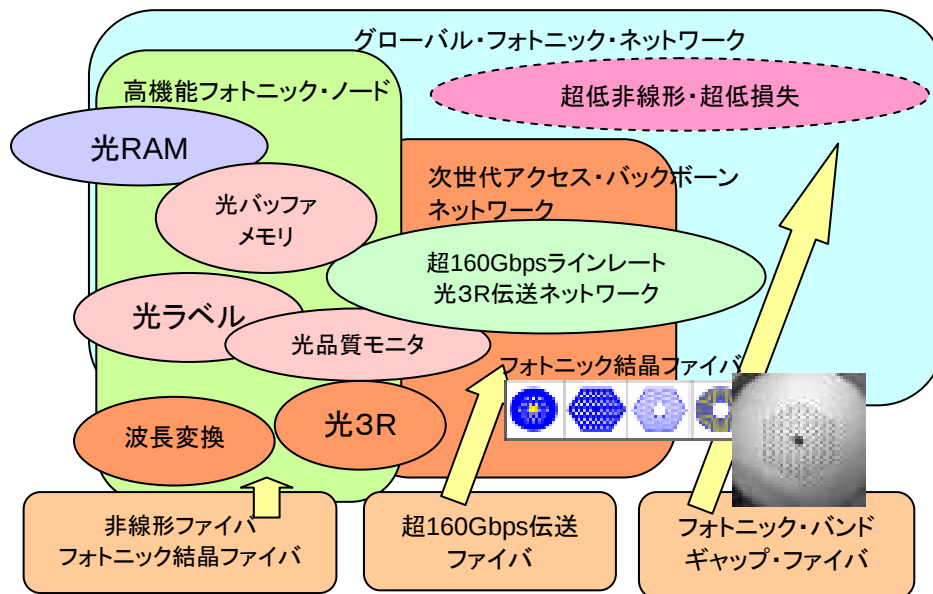


図4. 10 ナノスケール精度ファイバの高機能フォトニックネットワークへの応用

(6) テラヘルツ波による暗号モジュールの安全性解析

情報セキュリティ製品を支えるハードウェア暗号モジュールの安全性を保証するためには、耐タンパー性の評価が不可欠である。特に、ハードウェア暗号モジュールからの物理的情報漏洩を用いて暗号解読を行う、いわゆる「サイドチャンネル攻撃」の脅威は、近年の科学技術の発展とともに急速に増大している。この攻撃は、暗号アルゴリズムの数学的構造そのものに対して行われる従来の暗号解読とは大きく異なり、なんらかの暗号機能が実装されたハードウェアが実際に動作する際に発する物理的シグナルを直接捕らえ、それらを秘密情報の解読に利用するものである。消費電力や漏洩電磁波、さらにはデバイスの動作に伴う微弱な発光をシグナルとして攻撃する方法など、既に幾つかの攻撃方法が知られており、このような攻撃に対する耐性の確立、さらには、より一般的なタンパー攻撃に対する安全性の解析が急務の課題となっている。

本研究課題では、サイドチャンネル攻撃への耐性チェックのための新しい安全性解析ツールとして、暗号モジュールの動作条件に依存した物理的漏洩情報を、テラヘルツ波の特有のイメージング(構造解析)機能を用いて収集する技術を開発する。実装された暗号モジュールの内部の状態変化やそれに伴う物理的漏洩情報について、テラヘルツ技術を利用してデータの収集を行う技術確立するとともに、物理的漏洩情報を制御するための知見を得ることを目的とする。さらには、ISO などで進められている暗号モジュールの標準化への貢献も視野に入れるものとする。また、長期的な展望として、量子情報技術を用いた究極的な耐タンパーデバイスについても、検討を開始する。

具体的問題意識の共有と連携により、テラヘルツ技術とセキュリティ技術両分野の研究を加速する効果が期待される。本課題は、安心・安全ユビキタスTHz技術の中で研究開発を実施することが望ましい。

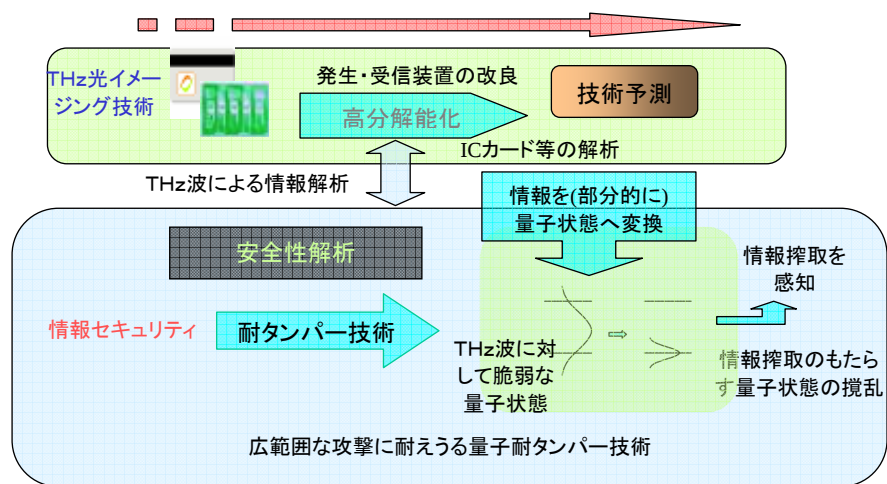


図4. 11 テラヘルツ波による暗号モジュールの安全性解析概念図

第5章 21世紀ネットワーク基盤技術の確立に向けた研究開発戦略

本章では、第3章で述べた4つのネットワーク基盤技術分野それぞれにおける研究開発課題及び第4章で述べた分野間連携による融合プロジェクトを総合的に推進していくための研究開発推進方策及びその推進体制を議論し、最後に研究開発戦略についてとりまとめる。

5-1. 研究開発推進方策

今後我が国が世界最先端のネットワーク基盤を構築していくためには、光技術をコアにした「フォトニックネットワーク技術」、安全・安心のためのセンシングなどを可能とする「テラヘルツ技術」、新概念によりセキュアかつ大容量通信を実現する「量子情報通信技術」及び省電力・高機能ネットワークを実現する「ナノICT」のそれぞれに関する短期から長期にわたる研究開発課題のうち、リスクが大きいものや民間・大学のみでは実施が困難なもの等については、国が中心となり、産学官の研究能力を活用して総合的かつ計画的に研究開発を推進していく必要がある。

(基本的な考え方)

研究開発推進の基本的な考え方としては、萌芽的な研究テーマについては、競争的資金の活用により基礎的な研究開発を進めるとともに、基盤技術やシステムについて具体的な実現目標を設定して実施すべきものについてはプロジェクト方式で推進し、その成果として、タイムリーな標準化・実用化などを進めて行くことが望ましい。

独立行政法人情報通信研究機構は、基礎から基盤・実証・応用に至るまで一環した研究開発を推進する中核的機関と位置づけられ、自ら基礎的研究開発を実施する他、産学官の研究者の結集するプロジェクトの運営管理やオープンラボの構築・運用、標準化や研究者育成において大きな役割が期待される。

また、4分野間の連携効果を予め考慮した研究開発計画を策定することにより、全体として効率的かつ効果的な実施を確保していくことが求められる。

具体的な研究開発推進方策は、以下のとおりである。

5-1-1. 「超大容量フォトニックプラットフォーム」プロジェクトの推進

我が国が世界に誇る「光」技術をフルに活用し、超高精細映像の普及等により広く一般利用者がギガビット以上の通信容量を迅速に自在に利用できる環境を実現するための「超大容量フォトニックプラットフォーム」の実現に向け、以下の4つの技術課題をプロジェクト方式で戦略的に推進することが必要である。

(プロジェクトの達成目標)

- ・100Tbpsの世界最高性能の光ルータを2010年までに実現
- ・テラビット級のイーサネットアクセス技術を2010年までに実現
- ・光メモリを含む全光パケット処理集積型光ルータを2015年までに実現
- ・光の属性を活かして、利用者が光波長(λ)を自在に利用し、数十ギガビットの通信を自在に行う環境を2010年までに実現

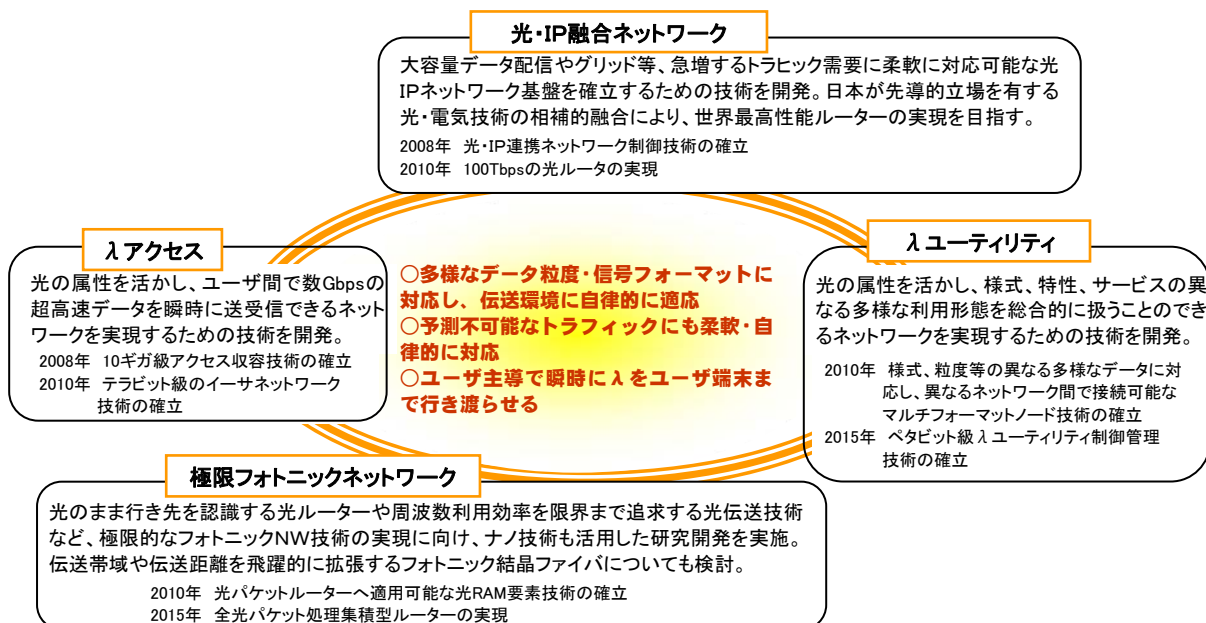


図5. 1 「超大容量フォトニックプラットフォーム」プロジェクトの推進戦略の全体像

5-1-2. 「テラヘルツ技術」プロジェクトの推進

電波と光の中間領域であるテラヘルツ帯は、これまで利用が十分に進展していないが、透過性を含む高度なセンシングや大容量の通信を可能とするなど、大いなる可能性を秘めたスペクトラムの新大陸である。その実現に向けては、萌芽的な基礎分野の研究を競争的資金により推進するとともに、2つの技術課題をプロジェクト方式で推進するほか、センシングに必要な分光データベースの構築やEMCの規格の確立などに取り組んでいく必要がある。

(プロジェクトの達成目標)

- ・遠隔からのガス、危険物検出、生体認証の基盤技術を2010年までに確立
- ・40Gbps級超高速無線LANを2013年頃までに実現

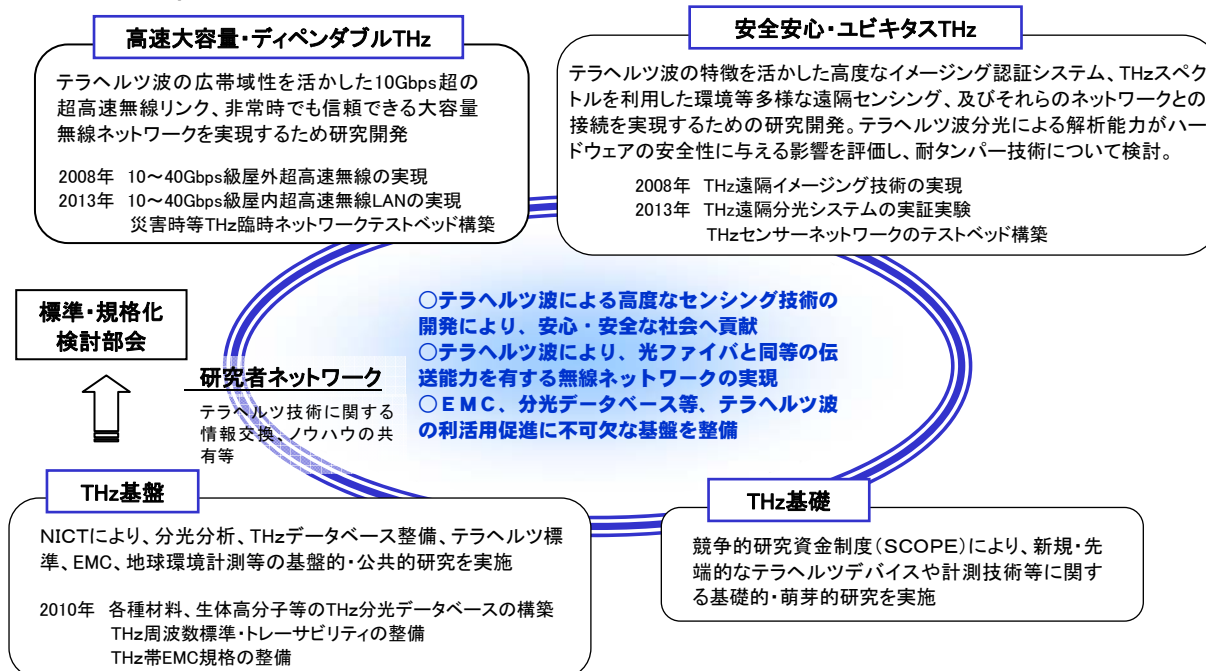


図5. 2 「テラヘルツ技術」プロジェクトの推進戦略の全体像

5-1-3. 「量子ICT・ネットワーク」プロジェクトの推進

光や電子の「量子」としての性質を活用し、原理的に全体盗聴不可能なセキュアな通信と新概念による超大容量性を有するICTネットワークを実現するため、萌芽的研究を競争的資金により実施するとともに、以下の4つの技術課題に関してプロジェクト方式で推進するほか、量子暗号の安全性に関して評価を行い、安心して利用できる環境を整備することが必要である。

(プロジェクトの達成目標)

- ・都市内(100km圏内)量子暗号鍵配信システムを2008年までに実現
(近距離(1km以内)ではワイヤレス量子通信を同時期に実現)
- ・量子メディア変換を2010年までに、量子中継を2015年までに実現
- ・シャノン情報理論を超える光量子計算システムを2010年までに実現
- ・大容量通信のための量子信号処理(符号化)を2015年までに実現

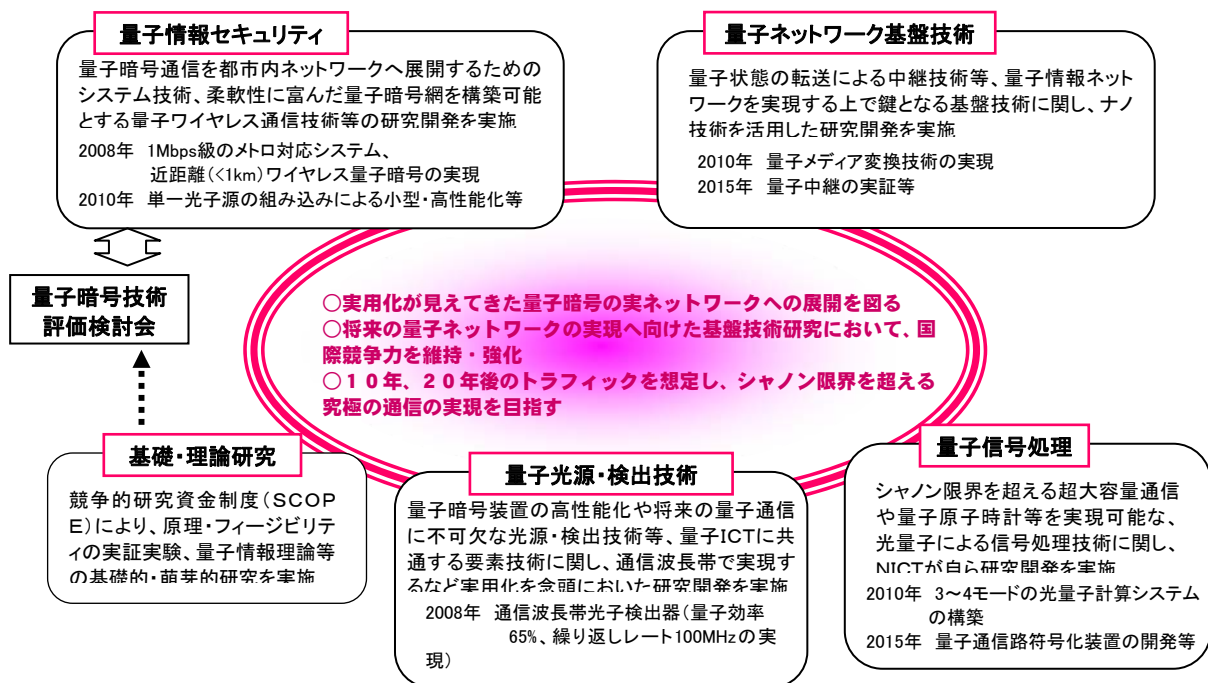


図5.3 「量子ICT・ネットワーク」プロジェクトの推進戦略の全体像

5-1-4. 「世界最先端ナノICT」プロジェクトの推進

我が国が世界をリードするナノ技術を活用し、ICTの国際競争力を維持・強化するとともに、ICTにおける新パラダイムを創生するため、萌芽的研究を競争的資金により実施するとともに、以下の技術課題をプロジェクト方式により推進することが必要である。

(プロジェクトの達成目標)

- ・光再生中継器の小型・省電力化(目標:約千分の一)を2008年までに実現
- ・近接場光による信号処理基本技術を2010年までに実現

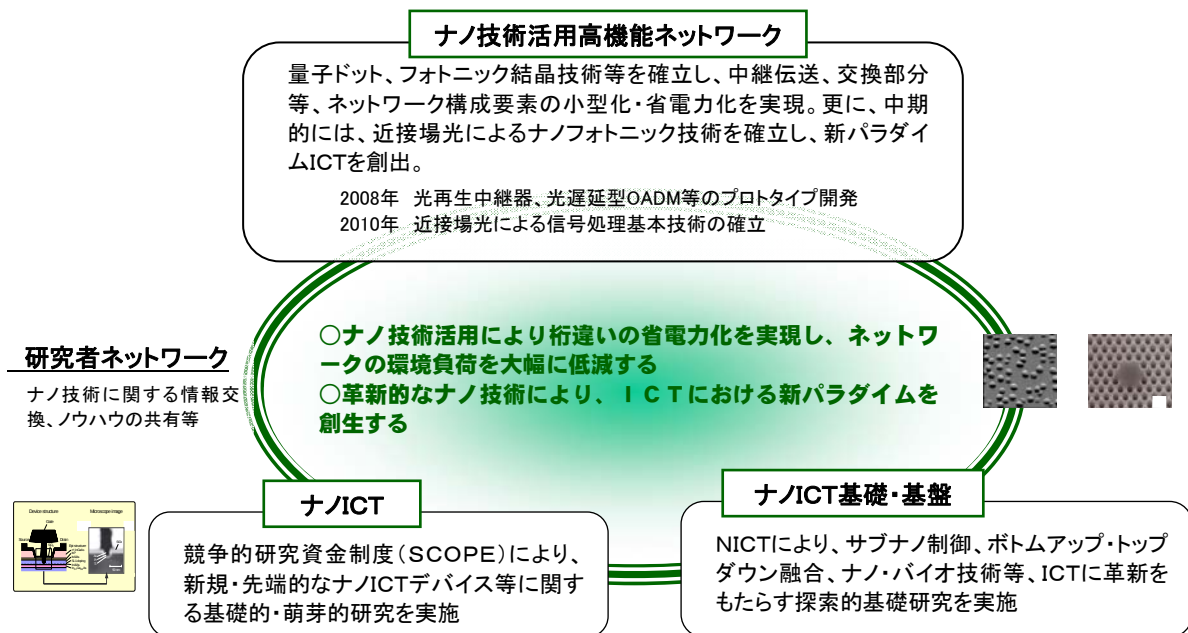


図5. 4 「世界最先端ナノICT」プロジェクトの推進戦略の全体像

5-1-5. 分野間連携を考慮した総合的な推進方策

既に見たように、4つの基盤技術分野相互間の融合領域の連携効果が期待できる研究課題は以下の6つのテーマが想定されており、これらについてはプロジェクト間での重複を排除し、明確な役割分担・責任体制のもとで実施し、その結果が共有できるよう進めていくことが必要である。

- (1) ナノ技術を用いた光パケットルーター
- (2) 光・電気ハイブリッドルーター
- (3) 量子暗号のフォトニックネットワーク実装
- (4) ナノ技術を用いた量子中継
- (5) ナノスケール精度のファイバ技術を用いた高機能フォトニックネットワーク
- (6) テラヘルツ波による暗号モジュールの安全性解析

これらの分野間連携を考慮した総合的な推進方策は以下のとおりである。

研究開発フェーズに対応した課題解決を図るため、テストベッド型、共通利用施設型、COE型など各分野の現状に応じて開放型研究開発拠点の整備が求められることとなる。第2章で述べたように、オープンラボによる産学官連携の成功事例も見受けられるが、今後の研究開発課題及び現状の研究推進体制における課題を考慮すれば、今後は以下のようなオープンラボの整備により、産学官連携や研究者育成などを推進していくことが必要である。

(1) 新世代光テストベッド

今後のフォトニックネットワーク技術の進展を考慮すれば、最先端の研究成果をタイムリーにテストベッドに適用することにより、開発成果の技術検証とテストベッドの高度化が同時に達成される。また、テストベッドとして利用されることにより管理・運用技術や利用技術の高度化も期待できるなど、大きな相乗効果が見込まれる。

光テストベッドに関しては、JGNIIにおいて、テストベッド運用結果がシステム技術開発にフィードバックされることで、商用化に向けた研究開発が効果的に進められているところ。今後は、次世代フォトニックネットワークの実用化を促進する高度な光テストベッドの構築を図る他、複数地点を結ぶ量子暗号フィールド実験等にも対応した世界最先端の実証試験環境を整備する必要。

- ・フォトニックNWプロジェクトで開発された成果をテストベッドに実装することで、テストベッド自体の高度化、先端性を常に実現
- ・量子暗号の標準化、相互接続に関し、フォトニックネットワーク関連研究者・技術者と連携して、技術シナジーを追求することで、高セキュリティネットワークの実用化が促進
- ・中長期的には、量子中継の実証実験等にも対応可能な、究極の光テストベッドの構築を目指す。

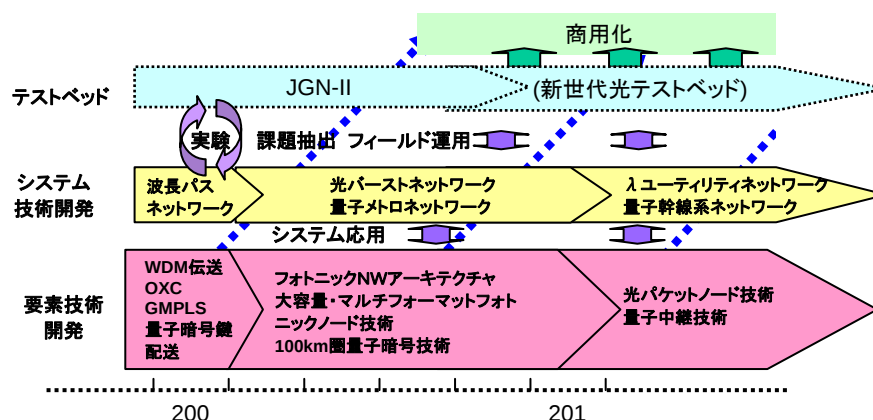


図5.6 新世代光テストベッドによる産学官連携の推進

(2) THz-BASICセンター

テラヘルツ波ICT応用システムの開発を推進するため、テラヘルツ光源やテラヘルツ分光装置等の共通利用設備、小型・高性能なシステム実現の鍵となるテラヘルツデバイスの試作開発設備等、未開拓周波数領域の技術開発に必要な基盤環境を一体的に提供する開放型研究開発拠点の整備が必要である。

本センターを構築することにより、複数の基盤設備を一カ所で利用可能となることから、相乗効果が期待できるとともに、多様な分野の研究者の学際的交流、人材育成にも貢献すると考えられる。

THz-BASICセンター

(Terahertz – Broadband Applications and Sensors for Info-Communications)

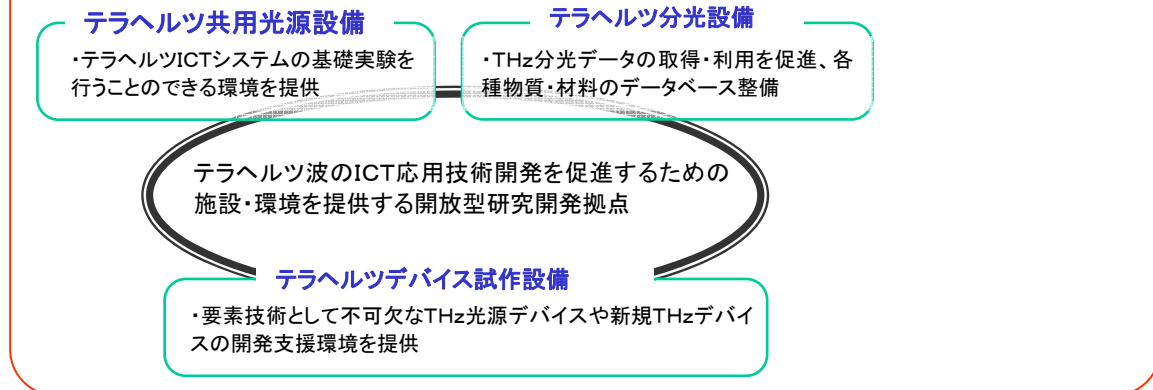


図5. 7 THz-BASICセンターによる産学官連携の推進

(3) 量子ICTセンター

量子ネットワーク基盤技術、量子信号処理等、将来の革新的なネットワーク技術の開拓へ向けて、産学の多様な研究者・技術者が一箇所に集結し、基礎科学の創生から技術応用に至る研究開発を協調と競争のもとで継続的に実施し、得られた知や技術を長期的に継承できる中核拠点の形成が必要である。

本センターの設置により、光学実験に必要な最先端レーザー機器の開発と改良を着実に実施するとともに、実験系と理論系の研究者が協力することで、世界初の原理実証実験等を効果的に推進することが可能になる他、海外からの第一線研究者も参加し、ノーベル賞級の研究成果を輩出する知の拠点(COE)を形成する。

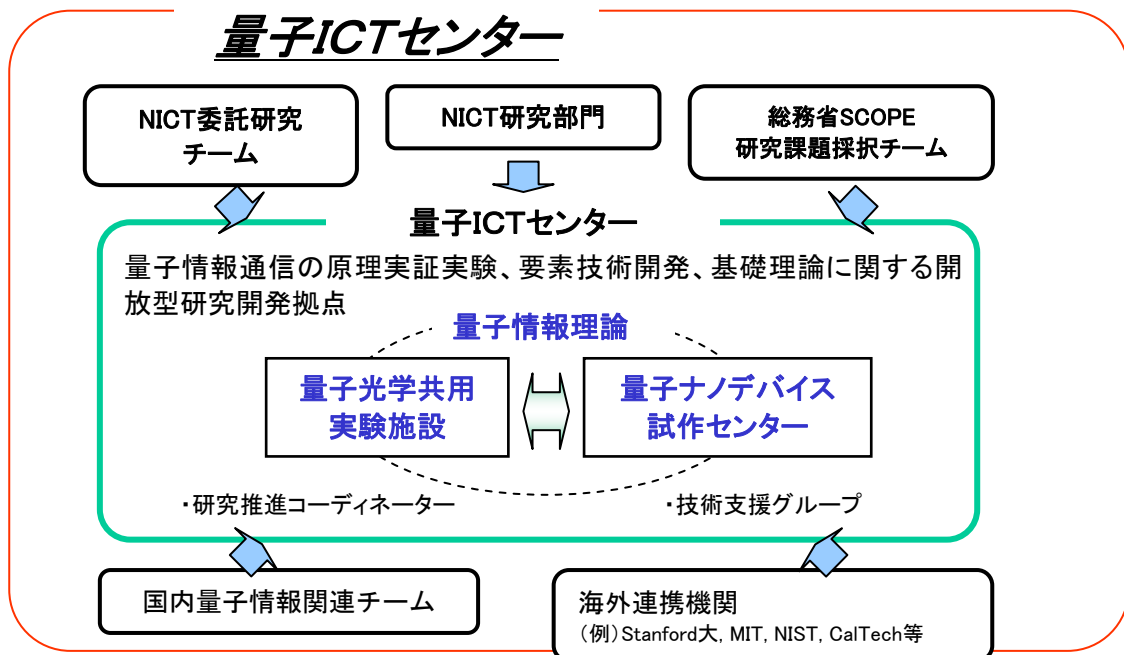


図5. 8 量子ICTセンターによる産学官連携の推進

5-2-2. 研究開発プロジェクト間の総合調整の強化

21世紀ネットワーク基盤技術の確立により新たなICTパラダイムを創造していくためには、様々な研究開発を総合的に推進する必要がある、重複排除の観点及び相互の情報交換を通じた新たな知見の獲得、研究協力の可能性の検討等の観点から、研究プロジェクト相互間の連絡調整を一層強化していくことが求められる。特に、デバイス研究者、システム研究者、ソフト開発者等の間での情報共有や協力を進めていく上では分野横断的な取組が重要である。

5-3. 総合的な研究開発戦略

以上で述べたように、21世紀のネットワークに求められる大容量・省電力・高機能等の基盤技術を世界に先駆けて確立していくためには、分野内での研究者間交流は当然として、分野間の連携を強化しつつ、総合的かつ戦略的に取り組む必要がある。具体的には以下により推進すべきである。

- (1) 競争的資金の活用による萌芽的研究開発の推進及び若手研究者への支援
競争的研究資金の活用により、萌芽的研究開発への支援、若手研究者への支援を行うとともに、その成果について次の重要研究開発プロジェクトへの展開を図る。
- (2) 重点研究開発課題への研究開発の積極的な推進
「フォトリックネットワークプラットフォーム」、「テラヘルツ技術」、「量子ICT・ネットワーク」及び「ナノICT」の研究開発を、産学官連携のもとで積極的に推進する。
- (3) 開放型研究拠点整備による産学官連携及び人材育成の推進
基礎・基盤技術分野における学際的交流、デバイスからシステムまで分野横断的な技術交流を図るとともに、広い視野を持った人材の育成を図る。また、研究拠点における研究員ポストの確保、研究コーディネーター及び専門技術者の活用が必要である。
- (4) 国際的協調及び連携による成果普及及び標準化の推進
欧米、アジア各国との研究開発・標準化における連携を推進する。このため、国際シンポジウムの開催等を通じた海外研究者との交流促進を行うとともに、ITU、IETF等における標準化活動に積極的に寄与していくべきである。
- (5) 一体的な推進体制の確立
以上を総合的に推進していくためには、これらの分野に携わる広範な研究者、技術者、事業者・利用者、標準化機関、政府機関等広範な関係者が参画する分野横断的な推進体制を速やかに確立することが必要である。

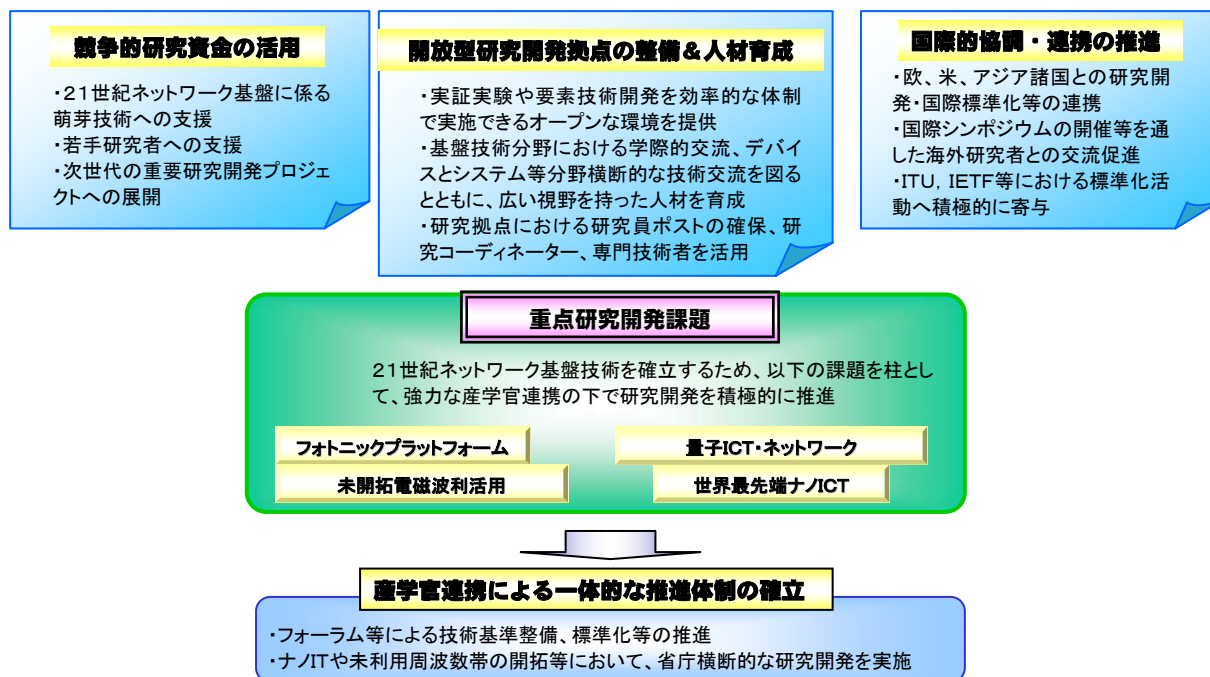


図5.9 総合的な研究開発戦略

産学官の一体的な推進体制を速やかに確立するためには、フォトニックネットワーク及びテラヘルツ技術に関しては、産学官のフォーラムが存在しそれぞれが活発な活動を実施していることから、これらのフォーラム及び量子・ナノICT関係の研究機関等が協力して、分野横断的な情報交換、標準化の推進等を図ることが効果的である。

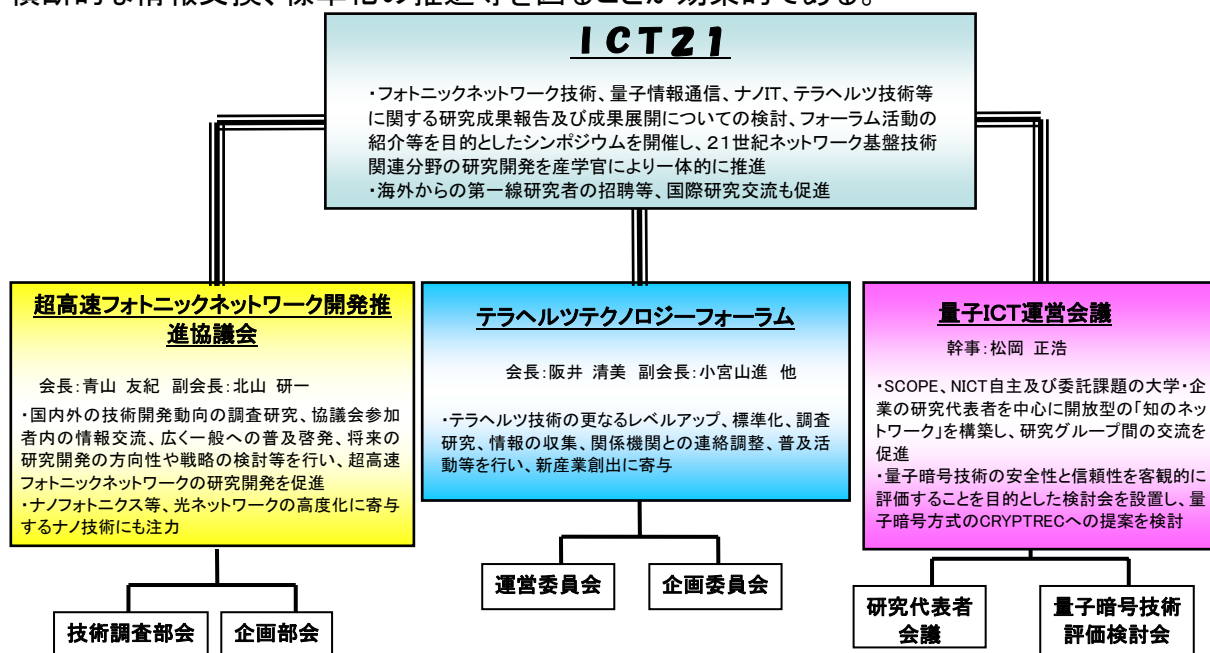


図5.10 一元的な推進体制のイメージ

むすび

今年是世界物理年。奇跡の年と言われる 1905 年から 100 年目の節目の年です。アインシュタインが素晴らしいのは、多くの人が周辺的問題を研究する中で、何が中核的問題かを知っていた点です。彼の特殊相対性理論提唱に次いで注目すべきは、光電効果の発見であり、それまで波として考えられていた光が、実は粒子でもあることがわかりました。その後、波動・粒子の二重性の理論が量子力学へと発展し、原子、分子をはじめ、我々のまわりにある物質への理解を格段に高め、半導体など、材料技術に革新をもたらしたことは周知のとおりです。

さて、21 世紀、量子暗号の実用化に向けた研究開発やナノデバイス技術が進展するなど、量子力学の利用が情報通信技術に革命的インパクトを与え始めようとしています。

アインシュタインについてもう一つ注目すべきことは、1905 年当時 26 歳の若者であったことです。人間の能力は「創造力」（想像の下、新しいアイデアを発案する力）と「分別力」（新しい知識を得て、解析し、理解し、判断し、選択する力）の二面があり、孔子は「論語」の中で、年齢とともに分別力が増すと説いています。20 歳の分別力を 0 とすると 70 歳で 100 になります。創造力はその全く逆で、年齢とともに衰退します。創造力と分別力が競争するのが 45 歳頃であり、人間として最も充実する時期です。事実、アインシュタインもニュートンも 45 歳までにほとんどの成果を出しています。

本推進会議では、フォトリック、テラヘルツ波、量子、ナノという基礎・基盤的な分野の日本の第一人者にお集まりいただき、当該分野の 20 年後を見据えた研究ロードマップ、推進戦略をまとめました。この分野は、大いなる創造力が必要であり、創造力豊かな若手の研究者・技術者と分別力のあるコーディネータの協力による、ICT の新パラダイム創生に期待がかかります。

本推進会議検討による方策の推進により、21 世紀のネットワーク基盤技術が早期に確立され、あらゆる制約が解消された究極のネットワーク社会がもたらされるとともに、研究開発の過程で新たな「知」が創出され、ノーベル賞受賞者が輩出されていくことを願ってやみません。

21 世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議

座長 江崎 玲於奈

用語解説

用語解説

ADC(analog-to-digital converter)

時間的に連続なアナログ量を離散値であるデジタル量に変換する素子や機器のこと。アナログ信号をある一定周期毎のパルス幅に区切り、その振幅を取り出し、単位振幅毎に分割された不連続な振幅値に一番近い値に割り当てることにより振幅値を量子化する。この量子化された信号は、2進コードやBCDコード等にコード化されたデジタル信号として出力される。電気回路のAD変換器はデジタルの録音・録画機器の入力回路をはじめ、幅広く用いられている。

APD(アバランシェ・フォトダイオード)

p-n接合において逆バイアスをかけて形成した高電場により高速に加速されたキャリア(電流担体)が原子と衝突して二次キャリアを生成する過程が次々起こり、なだれ状にキャリア増倍が誘起される現象を利用した半導体光検出器。単一光子の検出のためには、なだれ効果が発生可能な電圧値(但し、電流値は無視できる程度)にバイアスしておき、単一光子がトリガーとなって引き起こされるなだれ電流を電流パルスとして使用する(ガイガーモード)。なだれ電流の生成後に速やかに検出器を元の状態に戻すことが、単一光子を続けて検出する上で重要である。なだれ電流を検知し速やかにバイアス電圧値を下げることで、なだれ電流を消失させるための回路を備えたAPDをActive-quench方式といい、高速応答に適している。

AS(Autonomous System)

1つの管理ポリシー(方針)で統一されたルータやネットワークの集合(システム)のこと。インターネットでは、1つのISP(インターネットサービスプロバイダ)が1つのASを構成す

る。

ASK(Amplitude shift Keying)

搬送波の強度を符号に応じて変化させる変調方式。光通信では1と0に対応して搬送波(光)をオン、オフする方式が一般的。

BB84

無条件安全性の証明されている量子鍵配送プロトコル。BennettとBrassardにより1984年に提案された。偏光や位相の変調された単一光子を送る量子通信路と、量子通信路で送られた秘密鍵の確認と安全性を高めるために必要となる古典通信路から成る。

CMOS

(Complementary Metal-Oxide Semiconductor: 相補型金属-酸化膜半導体)

電子をキャリアとするn型MOSトランジスタと正孔をキャリアとするp型MOSTランジスタを集積化されているもの。特に、両者を直列に接続して、ゲート電極を共通にした場合をCMOSインバータと呼び、LSIの基本ゲートとなっている。低消費電力性に優れている。

CWDM

(Coarse Wavelength Division Multiplexing: 低密度波長分割多重)

波長間隔、又はチャネル間隔が広い、即ち低密度な波長多重のこと。通常、数十nm以上の広い波長間隔で多数の光信号を多重する。

DEMUX(demultiplexer)

エレクトロニクスではシリーズのデジタル信号を、順番に複数のチャネルに振り分ける分離回路を示す。光通信分野では、時間

領域(OTDM)や波長領域(WDM)で多重化した信号から、元の信号を分離して取り出すことを示す。demultiplexing あるいは demultiplexer の略。多重化は multiplexing で MUX と略される。

DFB レーザ(Distributed feedback laser:分布帰還型レーザ)

活性層近傍にグレーティングを有する半導体レーザ。グレーティングのピッチで決まるブラッグ波長近傍で強く共振するため単一波長で発振する。

DPSK 光信号(Differential Phase-shift Keying)

1 タイムスロット前の光信号との位相差(0 または π)により、デジタル情報(0 または 1)を送信する方式。

DQPSK

(Differential Quadrature Phase-Shift Keying)

DPSK を改良し、位相差を(0、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$ 、または π)とする事により、(0、1、2、3、または 4)のデジタル情報を伝送できる方式。一度に 2bit の情報を送ることが出来る。

DPSK 光信号を参照。

DWDM

(Dense Wavelength Division Multiplexing: 高密度波長多重伝送)

波長間隔、又はチャンネル間隔が狭い、即ち高密度な波長多重のこと。通常、1nm 以下の極めて狭い波長間隔で、多数の光信号を多重する。

EDC(Electronic Dispersion Compensator)

電気回路による波形歪の補償回路。

EIT

(Electromagnetically Induced Transparency: 電磁波誘起透明化)

光と物質の相互作用を用いて物質中の量

子力学的遷移を制限し、物質のエネルギー準位に相当する共鳴波長をもつ光の吸収を抑制(透明化)すること。屈折率にも大きな変化を及ぼし、その結果ある意味において、物質中に光を凍結することができるようになる。

EMC

電気機器などが備える、電磁的な不干渉性および耐性。電磁両立性とも言われる。電磁的な不干渉性とは、ある機器が動作することによって他の機器の動作を阻害したり、人体に影響を与える一定レベル以上の干渉源となる電磁妨害(EMI: Electro Magnetic Interference)を生じないこと。また、電磁的な耐性とは、付近にある電気機器などから発生する電磁波などによって、自身の動作が阻害されない電磁感受性(EMS: Electro Magnetic Susceptibility)を持つことである。

EPR ペア

ある種の量子もつれを持つ二粒子系のこと。二つの粒子が離れていても、一方の測定結果が即座に他方の量子情報を決定する性質を持つ。なお、EPR は、この現象をパラドックスとして提出した A.Einstein, B.Podolsky, 及び N.Rosen の名の頭文字に由来。量子もつれを参照。

E/O(Electronic/ Optical convertor)

電気信号から光信号への変換デバイスの総称。レーザーの直接変調や外部変調があり、10Gbps 以上では後者が使用されている。光変調器には EAM、Mach-Zehnder 干渉型変調器等が用いられる。EAM、EA 変調器を参照。

FEC(Forward Error Correction: 誤り訂正技術)

伝送したい情報ビットに送信側で付加情報を加えておき、伝送路でビット誤りが発生しても、付加した情報をもとに受信側でビット誤りを訂正する技術。

FEL(Free Electron Laser: 自由電子レーザー)

発振原理が一般的なレーザーと異なり、高速近くまで加速した電子をN極とS極が交互に組み込まれた磁場装置(アンジュレータ)の中を通し蛇行運動させたときに発生する光(シンクロトロン放射光)を増幅させることにより発振する。光としての性質は一般レーザーと基本的には同じだが、電子ビームのエネルギーとアンジュレータ磁場を変えることで発振波長が紫外域から遠赤外域(1 THz)までの光を連続的に発生させることができる波長可変性をもったレーザーである。

FSK(Frequency-Shift Keying)

符号に応じて搬送波の瞬時周波数を離散的に変化させる変調方式。

FTTH(Fiber-to-the-Home)

各家庭まで光ファイバを敷設することにより、ブロードバンドな通信環境を提供する方式またはサービス。

$g^{(2)}(\tau)$

光子流に対する2次の強度相関関数で、単一光子光源としての性能を評価する因子。ある時刻に光子が検出されてから、次の光子が検出されるまでの時間差 τ の関数として表される。 $\tau=0$ において、完全な単一光子源ならば $g^{(2)}(0)=0$ 、コヒーレント状態の光ならば $g^{(2)}(0)=1$ の値をとる。

GbE-PON(Gigabit Ethernet-Passive Optical Network)

LANで使われているGigabit Ethernet技術

をFTTH(fiber-to-the-home)に応用し、双方向1.25Gbpsでのサービス提供を可能とする技術。2004年6月に米国電気電子学会(IEEE)により、IEEE 802.3ahとして標準化が完了した。PONとは、電話局から加入者宅への光ファイバをスターカプラ(光スプリッタ)と呼ばれる光受動素子によって分岐させ、複数の加入者宅へ引き込む方式である。

GMPLS(Generalized MPLS)

IPの制御プロトコルを用いてレイヤ1/2スイッチであるOXC、ATMスイッチ、TDMスイッチ等の制御も可能とするように、既存のMPLSを拡張したもの。NWをデータプレーン、制御プレーン、管理プレーンと機能別に分けて、制御プレーン上では、拡張化されたシグナリング、ルーティング、リンク管理などのプロトコル群を規定する。MPLS、OXCを参照。

HBT

(Heterostructure Bipolar Transistor:ヘテロ構造バイポーラトランジスタ)

エミッタ、ベース、コレクタの各半導体層に、2種類以上の半導体材料が用いられているバイポーラトランジスタ。一般には、エミッタ層にベース層よりバンドギャップの大きな半導体材料を用い、電流利得の向上等が図られている。AlGaAs/GaAs接合、InP/InGaAs接合、InP/InGaAs/InP接合等が代表的。

HEMT(High Electron Mobility Transistor:高電子移動度トランジスタ)

電界効果型トランジスタの一種。半導体ヘテロ接合構造を利用しており、高速動作に適している。富士通研究所の三村高志博士によって発明された。

IETF(Internet Engineering Task Force)

インターネット上で使われる各種プロトコルなどを標準化したRFC(Request For Comments)を発行する標準化団体。

IP (Internet Protocol)

インターネットの標準的な通信プロトコル (米国防省が開発した LAN 上でのコンピュータ間ネットワークを構築するための国際標準プロトコルの1種)。

IPsec (IP Security Protocol)

IP パケットの暗号化と認証を行う、TCP/IP 環境で汎用的に用いることができるセキュリティー技術

ITU (International Telecommunication Union: 国際電気通信連合)

1865年に創設されたもっとも古い政府間機関。1947年に国際連合の専門機関になり、現在、加盟国数は189カ国。本部はジュネーブ。

ITU は、世界の電気通信計画・制度、通信機器、システム運用の標準化、電気通信サービスの運用・計画に必要な情報の収集調整周知および電気通信インフラストラクチャの開発の推進と貢献を目的として活動している。

Lambda (λ)

光の波長で識別される、ビットレートやフレームフォーマットに制約の無い(少ない)大容量でフレキシブルな情報転送能力(単位:ビット/秒/Hz)。

なお、情報転送能力の限界はシャノン限界となり、現状では 1.2-1.4 [bit/s/Hz]であり、多値変調や誤り訂正を用いることで、理論的には信号帯域 $\times (1 + \text{SN 比})$ に比例して上げることができる。

LMP (Link Management Protocol)

GMPLS ノード間において、コントロールプレーンのマネージメント、TE リンク属性の交

換、警報転送などを行うためのプロトコルである。GMPLS を参照。

MAC アドレス

Ethernet カードなどに固有に割り当てられた ID 番号。

MEMS

(Micro Electro Mechanical Systems: マイクロエレクトロ機械システム)

MEMS とは半導体微細加工技術を用いて、機械・電子・光・化学などに関するさまざまな機能(機械要素部品、センサー、アクチュエータ、電子回路等)を集積したデバイスで、一般にマイクロマシンとも呼ばれる。

MMIC

(Monolithic Microwave Integrated Circuits: モノリシックマイクロ波集積回路)

マイクロ波以上で用いられるトランジスタ、キャパシタ、抵抗、インダクタ、伝送線路等を半導体プロセスにより同一基板上に集積化された回路。

MPLS (Multi-Protocol Label Switch)

パケットの高速転送を可能にするレイヤ 3 スイッチングの技術。IETF で標準化が行われ、「ラベルスイッチング」とも呼ばれている。インターネットで用いられる IP 系パケットの中に宛先アドレス情報(宛先 IP アドレス)が含まれているが、その情報を元に新規のヘッダを定義し、そのヘッダのみを参照することでスイッチでの転送効率を高める。MAC ヘッダ・IP ヘッダ合計40バイトを取り込んでアドレス解析を行う手法を取らず、20 ビットのアドレスのみを参照することと、スイッチ間のパスをシグナリングであらかじめ設定する接続方式のため、スイッチの処理負荷を減らすことが可能である。

MUX (Multiplexer)

1つの通信路に複数の信号を乗せて伝送する際に、送信側において複数の信号を束ねるための回路。現在の光通信では、チャンネルあたりの伝送速度を高める際に、パルス状の強度変調信号を時間的にずらして並べる時分割多重が行う場合と、異なる波長の信号を複数束ねて伝送する波長分割多重とが利用されている。

NAT (Network Address Translation)

閉域網の中だけで通用するローカル IP アドレスと、Internet アクセスに利用できる本来のグローバル IP アドレスを相互に変換し、ローカルな IP アドレスしか割り当てられていないノードから、透過的に Internet をアクセスできるようにする技術。

NMS (Network Management System)

ネットワークを集中的に運用するための管理システム。管理対象項目として、NW 機器構成や設定状況を管理する「構成管理」、NW の不具合を監視して故障を切り分ける「故障管理」、NW 機器や回線の性能を把握する「性能管理」の他、「機密管理」やキャリア NW としての「課金管理」等が挙げられる。

OADM (Optical Add/Drop Multiplexer)

WDM ネットワークシステムにおいて、途中のノードで特定の波長の信号のみ取り出したり、挿入したりする技術を用いることにより、それ以外の波長の光信号を電気信号に変換するなど手を加えることなく中継する波長のカットスルーを実現するための装置。

OCDM (Optical Code Division Multiplexing: 符号分割多重)

光を用いた多重通信方式の一種。送信側では光符号を用いて通信したい信号を符号

化し、受信側では送信側と同じ光符号を鍵として信号を復号化するという仕組みを用いている。復号時には、符号が合う信号のみが処理されるため、同じ波長の信号をノイズを気にせずに複数のチャンネルに割り当てることが可能になる。結果、大容量の通信を行うことができるようになる。

OEO 変換

(Optical/Electrical/Optical Converter: 光－電気－光変換)

光信号を処理する際、光信号を電気信号に変換した後に、電気領域において処理を施したのち再び光信号に変換する過程またはデバイスの総称。

O/E (Optical/Electronic convertor)

光信号を電気信号に変換するデバイスの総称。通常 pin- フォトダイオード (PD) や APD (Avalanche PD) が用いられる。電界の自乗に比例 (自乗検波特性) した電気信号が得られるのが特徴。

OPS (Optical Packet Switching)

光パケットスイッチを参照。

OTDM (Optical Time-Domain Multiplexing: 時間分割多重)

複数の光信号を時間領域で多重化すること。電子回路では応答できない超高速光信号を生成するのに使われる。

OXC (Optical Cross-connect System: 光クロスコネクトシステム)

光回線の相互切り替え、光の波長単位でルーティングする波長スイッチ。

PCF (Photonic Crystal Fiber: フォトニック結晶ファイバ)

フォトニック結晶構造 (誘電率の異なる複数の媒質を組み合わせた周期構造) を取り

入れた光ファイバー。通常の光ファイバーでは不可能な特性(分散特性増大や、単一モード波長の拡大等)を実現する。空気孔で実現したものをホーリーファイバともいう。

PMD(Polarization Mode Dispersion:偏波モード分散)

偏波状態により伝播時間が異なる光学特性。または、偏波による最大遅延時間差により定義される物理量。超高速かつ超長距離伝送においてファイバの PMD による信号劣化が問題となっている。

PSK(Phase-Shift Keying)

符号に応じて搬送波の位相を離散的に変化させる変調方式。

p 型ゲルマニウムレーザ

ゲルマニウムの価電子帯間遷移(軽い正孔→重い正孔)を利用したテラヘルツ帯の波長可変レーザ。波長範囲は 70~300 ミクロンである。動作には 0.5~3 テスラ程度の磁場中、20K 以下の極低温環境にゲルマニウム結晶を置く必要がある。

QoS(Quality of Service)

伝送システムのパフォーマンス測定における品質。伝送の品質、サービスの利用性など。

RSVP(Resource reSerVation Protocol)

IP ネットワーク上で、MPLS パスにより帯域などのネットワークリソースを確保して品質を維持するためのネットワーク資源(帯域)予約プロトコル。GMPLS では、ファイバ、波長、タイムスロットなどのリソースが確保される。GMPLS を参照。

SAN(Storage Area Network)

サーバとストレージ装置間を専用のネットワークで結合したシステム。OS からはストレージが内蔵ディスクと同等に見えるため、アプリケーションを選ばない。SAN は、基幹業務システムの LAN トラフィックへの影響を最小限にして、大規模データベースの高速処理ができるという利点がある。

SCM(Sub-Carrier Multiplexing:サブキャリア分割多重)

チャンネルごとに AM 変調された無線のキャリア(搬送波)を周波数多重し、そのまま LD をアナログ強度変調する方式。サブキャリアと呼ばれるのは、光伝送で用いられる光の周波数が主キャリアになり、伝送される各チャンネルの電気周波数が副(サブ)キャリアとなるから。CATV などの映像伝送システムに多く用いられるが、アナログ伝送のため、高性能な光送受信機が必要となる。

SDH(Synchronous Digital Hierarchy:同期デジタルハイアラキー)

ITU-T (ITU 電気通信標準化部門) が制定した国際標準の高速中継速度体系。広帯域 ISDN に代表される広帯域通信技術で用いられるため、各国の電気通信事業者が基幹伝送網の通信速度として採用されている。

SHD(Super High Definition)

約 800 万画素(走査線 2048)の超高精細画質で 35 ミリフィルムの画質に迫ることが可能。将来のデジタルシネマ画質として期待されている。

SONET(Synchronous Optical Network)

Bellcore 社の提唱する光ファイバーを用いた高速デジタル通信方式の一つ。これを国際電気通信連合・電気通信標準化セクタ (ITU-TS) で標準化したものを SDH と呼ぶ。

TDS(Time Domain Spectroscopy:時間領域分光)

電磁波の時間(時間領域)波形を観測し、それをフーリエ変換することでスペクトル領域の情報を得る方法。フェムト秒レーザを用いたテラヘルツ波の発生と検出においては、テラヘルツ波の発生に使われるフェムト秒レーザパルスから分岐したプローブ用フェムト秒レーザパルスの光路を掃引することによって、テラヘルツ波検出部におけるプローブパルス到着時間を調整して、サンプリング手法によりテラヘルツ波の時間波形を得ることができる。この時間波形をフーリエ変換するとテラヘルツ波のスペクトルが得られる

TE(Traffic Engineering)

「トラフィックエンジニアリング」に同じ。ネットワーク内を流れるトラフィックの経路を分散させ、ネットワークを効率的に利用する機能。

TeraGrid

全米科学財団(NSF)が推進する、大容量ネットワークを利用した Grid のプロジェクト名。

TOS(Type of Service)

サービスのタイプによりパケットの通過経路を選択できる機能。IPv4プロトコルのオプションとして定められていたが、実際にはあまり利用されていなかった。

VPN(Virtual Private Network)

公衆ネットワークを使いながら、あたかも専用回線を使っているように利用できるサービスのこと。実際に専用回線を導入するよりコストを抑えられることから、企業網を構築する上でメリットが大きい。ただし、公衆ネットワークを利用するが故、認証技術や暗号化を用いて保護する必要がある。

WDM(Wavelength-Division Multiplexing:波長分割多重)

複数の光信号の波長を異なる波長にすることによって、一本のファイバに複数の光信号を伝送させる技術。N 個の光信号を多重化すると、全伝送容量は N 倍になる。WDM 技術は光ファイバ通信システムの大容量化に大きく貢献した。

アフターパルス

光子検出器において生じる雑音の一つで、動作速度の制限要因となる。光子検出器は、アバランシェフォトダイオード(APD)をガイガーモードで駆動させることにより光子の検出をおこなう(用語解説:APDを参照)。この時、このなだれ電流で生じた電子の一部が受光素子中にトラップされ、次のパルス電圧印加の時間間隔が短いと、光子が来ていないのにも関わらず、このトラップされた電子によってなだれ電流が生じ、光子を誤検出してしまう。この雑音をアフターパルスと呼ぶ。アフターパルスは動作周波数1MHz付近で急激に増加するため、1MHzを超えるような動作速度の制限要因となっている。

暗計数(暗電流)

光子検出器やフォトダイオード、光電子増倍管を光の照射が全くない暗黒の中に置いても、いくらかの電子の計数や電流が発生し、信号対雑音比(SN比)を低下させる原因になる。これを暗計数あるいは暗電流という。原因は、絶縁材料を通しての漏れ電流、熱的励起されて電子、基板の捕獲準位からの電子放出、電極の端部からの電界放出などが考えられている。

イーサネット FDF

IEEE 802.3 委員会で定められる物理伝送フ

フォーマット。コンピュータ間の伝送で広く用いられている。

イオントラップ

コイルなどによって適切に磁場、電場を設定すると、電荷を持つ一個または複数のイオンを直線状に空中に捕獲することが可能になる。捕獲されたイオンひとつひとつにレーザーを照射することで、量子計算を行う方法。

位相緩和時間

固体中のフォノン散乱等、エネルギーの散逸過程により量子ビットのコヒーレンス(可干渉性)が劣化し、消失してしまうまでの時間。

エネルギー緩和時間

エネルギーの高い状態が、エネルギーの低い基底状態あるいは熱平衡状態へと不可逆的に変化するまでの時間。

カーボンナノチューブ

「カーボン(炭素)」でできた、直径が「ナノ」メートル(1ナノメートルは、10億分の1メートル、人間の髪の毛の1万分の1くらい)の「チューブ(筒)」状の物質。網目が六角形の金網を丸めたように、六角形の頂点に炭素原子が位置したグラファイト層が、継目なく繋がり、その六角形がらせん状に並ぶ場合もある。カーボンナノチューブには、長さ、太さ、らせんの状態、層の数などによって、多様な構造が存在し、同じグラファイトシートからできていても、これらのバリエーションに応じて、電気的性質が金属にも、また、半導体にもなる。特徴として強靱でありながら柔軟性に富み、化学的に安定している。また、許容電流密度が大きく、ダイヤモンドと同等以上の熱伝導性を持っており、超高速素子など高周波応用が期待される。

核スピン

原子核が持つ磁氣的性質(核磁気モーメント)を量子化したもの。上向き、下向きの核スピンで量子ビットを構成する。固体中であっても量子ビットの緩和時間が長いため、量子情報の保存にとっては有利な系と期待される。電磁場のパルスによって制御を行う。NMR(核磁気共鳴)量子計算機は、小規模の量子計算アルゴリズムの実証に使われている。

カットスルー

もともとは Ethernet において受信パケットのアドレス部分の検査が完了した時点で、選択された転送経路へパケットの転送を開始する方式を指しているが、ここでは光の情報をノードにおいて電気に変換することなく転送することを意味している。

過飽和吸収素子

光強度の増大に対して光吸収係数が減少する効果。

グリッド(grid)

グリッド・コンピューティング (grid computing)の略。

グリッド・コンピューティング

ネットワークを介して複数のコンピュータを結ぶことで仮想的に高性能コンピュータをつくり、利用者はそこから必要なだけ処理能力や記憶容量を取り出して使うというシステム。ネットワークに接続された複数のコンピュータに並列処理を行わせることで、一台一台の性能は低くとも高速に大量の処理を実行できるようになる。

擬似位相整合光導波路

2次の強誘電体係数の極性が周期的に反転するように非線形光学結晶を交互に配列することによって、入射光と発生光との擬似的な位相整合をとると共に、導波路構造による光の閉じ込めによって変換効率を増大させたパラメトリック下方変換器。

近接場光

光の波長よりもずっと小さい直径の粒子に光を当てた場合、その粒子の周辺で、局在した電磁場が発生し、それを近接場光と呼ぶ。入射光が球に当たったときに、球内部に誘起される電気双極子が源となって発生する電磁場である。近接場光のエネルギーは球面状に沿うようにして集中し、球から離れた位置では観測することはできない。しかも、近接場光が分布しているのは、粒子からその粒子の直径程度の距離である。近接場光を観察するには、近接場光を発している粒子1のそばに、別の粒子2を置き近接場光を散乱させてやればよい。散乱された近接場光は、遠方にまで伝搬することが可能となり、その一部が光検出器で観測される。

コヒーレント光

純粋な正弦波電場が作る輻射場において、振幅と位相の揺らぎ方がほぼ同じ状態の光を指す。これは、振幅と位相が定まった古典的振動状態に最も近い状態で、理想的なレーザー光がこれに当たる。コヒーレント状態の光子数ゆらぎはポアソン分布に従う。

コヒーレント光通信

光搬送波の位相情報を利用した光通信。

差動位相シフト型量子暗号

隣合う光パルス間の位相差に情報を載せる量子暗号鍵配送システム。送信者側はパルスに成形したコヒーレント光源の位相を0、

π にランダムに変調する。1パルスあたり1光子未満までに減衰させて送信する。受信側では1パルス遅延のMach-Zehnder干渉計と2つの単一光子検出器を用いる。2連続パルスの位相差が0の場合と π の場合で異なる光子検出器で検出がされるため、0、1と符号を定め光子検出した時刻を送信者に古典通信路を用いて知らせる。それにより送受信者で同じビット列を作成することが可能となる。

シームレス(seamless)

境目や境界の無いこと。多様な情報を自由に利用できること。

シグナリング

広義には回線交換方式のノード間のパスを確立するために、主データとは別に送信される信号を指す。本文では光バーストスイッチのパス確立のために用いられる信号を指している。

遮断周波数

通過帯域と減衰帯域との境界の周波数で、デバイスの動作帯域を表す性能指標の一つ。利得に着目した場合は、利得が1となる周波数を遮断周波数と呼ぶ。最大利用電力利得、電流利得など、利得の定義によっても最大利用電力利得遮断周波数、電流利得遮断周波数等が定義される。

シャノン限界

古典通信路において誤りなしに送信できる通信路容量の限界。通信路の周波数帯域幅が2倍になると、通信路容量も2倍になる。

周波数利用効率

単位周波数(1Hz)当たりで伝送できる情報量(bit/s)。

焦点面検出器アレー

光学系が像を結ぶ焦点面に検出器を多数並べたもの。焦点面上の像を電気信号に一括変換する素子。デジタルカメラなどでは数百万画素の焦点面検出器アレーが用いられている。

シリアル伝送

複数のデータを、時分割多重して、1本の伝送路によって伝送を行う方式。

スーパーコンピュータ

大規模な科学技術計算に用いられる超高性能コンピュータ。その時点での最先端の技術を結集して開発され、価格も性能も他のコンピュータとは比べ物にならないほど高い。

スクイーズド光

振幅と位相のゆらぎのどちらかを、他方のゆらぎを増大させることにより、非常に小さくした光の量子状態をいう。不確定性原理により二つのゆらぎの積はある一定の値を下回ることはないが、この方法により例えば振幅のゆらぎを標準量子限界よりも小さくすることができる。コヒーレント光の項も参照のこと。

ストリーム伝送

映像や音声のような連続した伝送のこと。

双安定素子

同じ条件下で二つの安定な状態を示す素子のこと。光双安定とは、光の強度、周波数あるいは位相などが、同じ条件下で二つの安定な状態を示すこと。外部からの駆動信号(光信号など)によって、それまでのある安定な状態からもう一つの安定な状態に不連続的に移行する。この種の素子は、光情報の記憶や光による論理演算への応用が期待

されている。

測定誘起型非線形過程

光を用いた多くの量子ゲート操作には単一光子レベルでの強い非線形過程が要求されるが、そのような非線形性を直接実現することは現在の材料、デバイス技術では困難である。そこで、光子数測定などの量子測定が持っている非線形性を利用する概念が測定誘起型非線形過程である。処理したい信号量子状態を直接測定しては状態が壊れてしまうので、それを補うために補助的な状態を準備して信号状態と干渉させ、その一部だけに測定を行う。測定される系は残りの信号系と量子相関を持つため、測定結果に応じて残った状態に非線形なゲート操作を施すことができる。ただし、測定誘起型非線形過程によるゲート操作は常に確率的にしか成功しない。

ソリトン通信

ファイバの Kerr 非線形性と異常分散性のバランスによって形成される光ソリトンパルスを用いる伝送方式。

多値変復調

1シンボルあたり2ビット以上の情報量を有する符号を用いた変復調技術。1シンボルあたり2ビットの情報を持つ QPSK、QAM 方式などでは理想的には 2bit/s/Hz の周波数利用効率を実現できる。

単一磁束量子回路

超伝導体でループを形成すると、そのループに交わる磁束の総量が磁束量子の整数倍に量子化される。この磁束量子の有無をデジタル2値信号の"1" "0"を対応させ、磁束量子と磁束量子の相互作用を利用して演算を進める論理回路を単一磁束量子(SFQ)回路

と呼ぶ。

超伝導エッジセンサー

超伝導体を用いた光検出器。光入射により発する熱により超伝導—常伝導転移を起こし、超伝導体は高い抵抗を示す。その抵抗を測定し入射光量を見積もることができる。NISTで開発された超伝導エッジセンサーは、タングステンを受光(熱)センサーに使用している。素子温度をタングステンの超伝導転移温度以下の 100 mK にまで冷却して用いる。通信波長体での光子数識別に成功している。

超伝導ジョセフソン接合

二つの超伝導体が微小な絶縁体等により弱く結合された超伝導デバイス。ジョセフソン効果に現れる巨視的量子効果は、その基底状態が摂動や散逸に対し孤立されているため、量子ビットを構成する上で適している。

デュオバイナリ光信号

1 と 0 の 2 値のデジタル信号を 1、0、-1 の 3 値の信号となるように符号化し、3 値を光強度に加えて光位相も用いて伝送する方式。

テレポーテーションフィデリティ

量子状態がどの程度確実に転送されたか、ふたつの状態が見分けられない度合いを示す忠実度のこと。最大の伝送忠実度に対して1になる。

トラフィックエンジニアリング (Traffic Engineering)

トラフィック(通信量)のバランスをとり、ある特定の通信回線にだけ負荷がかからないようにする技術。MPLS 技術を用いて、トラフィックの偏りを小さくする、あるいは特定ユー

ザに対する専用経路を提供するなど、ネットワークにおける柔軟性の高い交通整理(トラフィックエンジニアリング)環境を提供する。MPLS を参照。

ナノボロメータ

入射した電磁波のエネルギーを温度変化に換え、その温度変化を抵抗値の変化として電氣的に読み出す赤外線検知素子。感度を上げるために冷却して用いられることが多い。電磁波吸収体と抵抗体に異なった物質を使うコンポジットボロメータなども開発されている。ナノボロメータは、非冷却で高感度化を図るために、電磁波吸収体や抵抗体を微細加工によって小さくしたもの。

バースト信号(Burst signal)

連続的に発生するのではなく、間欠的に発生する信号。特に画像等のデータ信号が備えている特長として、このバースト性があげられる。

ハイゼンベルグ限界

物理量計測で信号対雑音比を増強するために同一の物理系を N 個用意して計測を行う際、 N 個の系が無相関であればハイゼンベルグの不確定性原理により信号対雑音比は N の平方根に比例してしか増加しない。この信号対雑音比を量子標準限界と呼ぶ。これに対して、量子もつれ合いを持った N 個の物理系で計測を行うと、信号対雑音比は N に比例して増加する。これをハイゼンベルグ限界と呼び、この測定をハイゼンベルグ限界測定と呼ぶ。

ハイブリッド集積

石英系光導波路の一部に溝などを設け、半導体光素子を実装することにより一体型の機能素子を形成する集積化技術。

波形整形技術

受信した信号パルス波形を整形する技術。伝送路と逆特性の周波数レスポンスを電子回路または光回路によって実現することで伝送路で生じた波形歪を補正する。

波形整形素子

受信した信号パルス波形を整形する素子。伝送路と逆特性の周波数レスポンスを電子回路または光回路によって実現することで伝送路で生じた波形歪を補正する。

パケット

ある一定の情報量に分割された情報の単位。パケット信号はアドレスを示す情報と実際に運ぶべき情報とで構成される。

波長分散

光信号がファイバ伝送路等を伝搬する際に、波長によって群遅延差を生じる現象。光信号はスペクトル幅を持つため、特に高ビットレート伝送において、波長分散による波形劣化が問題になる。

波長変換器

ルーティングにおける光信号間のブロッキング回避等の目的で、外部制御信号に基づいて、入力光信号の波長を所望の波長に変換する装置。

パラメトリック下方変換

(parametric down-conversion:パラメトリックダウンコンバージョン)

ポンプ光が二次非線形光学結晶に入射し、ポンプ光の光子一個に対し、シグナル光、アイドラー光の光子が各一個ずつ生成される変換。ポンプ光、シグナル光、アイドラー光の三者はエネルギー保存則、運動量保存則を

満たさなければならず、この変換の効率を上げるには入射光と発生光が位相整合をする必要がある。発生光が2つとも同一偏光である場合をタイプ I、一方が常光線、他方が異常光線である場合をタイプ II と呼ぶ。

バリスティック輸送現象

導体中の伝導電子は結晶中の不純物などに散乱されながら進み、巨視的にはオームの法則で表される伝導現象として表される。半導体などの微細加工が進み、素子サイズが小さくなると電子の平均自由行程よりも素子サイズが小さくなり、散乱される前に結晶中を通り過ぎる。このような現象をバリスティック(弾道)輸送現象と言う。バリスティック輸送現象でのコンダクタンスはランダウアーの公式で表される。

半導体量子井戸、量子ドット

膜厚数 nm 程度のバンドギャップの小さい半導体をよりバンドギャップの大きな半導体で挟むことで、周囲よりポテンシャルエネルギーが低い井戸状となる構造を形成したものを半導体量子井戸という。このような構造に対して電子は閉じ込められ、その取りうるエネルギーは離散的になる。三次元的に電子が閉じ込められた量子井戸構造を量子ドットという。最近のナノテクノロジーの進展により、10~20nm オーダーの量子ドットが形成可能となっている。

光 2R/3R

光 2R は、伝送により劣化した光信号パルス列の信号レベル、光波形を、光のまま再生(Re-amplification, Re-shaping)して送出する技術。光 3R は、光 2R に加えて、時間方向タイミングジッタの再生(Re-timing)も行う技術。

光 3R

光領域における再生中継回路。3R は、信号再生(Regenerate)、波形整形(Reshape)、タイミング再生(Retiming)のこと。

光 PLL

PLL とは Phase-locked Loop の略語。電子回路では伝送信号の基本クロック成分を抽出するために、電圧制御により周波数を変化させることができる局部発振器と位相比較器、フィードバック・ループを構成している。この電子回路ベースの PLL の入出力インターフェースに OE・EO 変換器を加えたものを光 PLL と言ったり、光信号パルスから基本周波数で短パルス光を発生する半導体レーザー(モード同期レーザー)を用いた構成を光 PLL と呼んだりする。

光クロック抽出

光信号を搬送する光のパルス列から、光の状態でクロック信号を抽出すること。従来技術では、OE を用いて光信号を電気信号に変換したのち、電子回路にてクロックを抽出しているが、超高速信号処理においては、光クロック抽出が必要となる。

光多値変調信号

1 シンボルで 2 ビット以上の情報を伝送可能な光信号。

光バーストスイッチ

光のパスを切り替えるパススイッチと、ヘッダ情報をスイッチごとに解析するパケットスイッチの中間的なスイッチの方式。スイッチ間の接続はシグナリングによってパケット転送前に設定する回線交換方式をとり、パスが確立された後にまとめてパケットを送信するためバッファが不要である特徴がある。

光バースト伝送

連続的ではなく間欠的に伝送される光バースト信号に対して、高速光スイッチを用い、外部制御信号によってバースト毎に伝送経路を切り替えることで、ネットワーク利用効率を高める次世代伝送方式。

光パケットスイッチ

光パケットを従来の電子回路ベースでのヘッダ解析とパケットバッファリングを介さず、光信号処理技術によって高速なパケット転送を行うスイッチ。ヘッダはスイッチごとに解析を行うためバーストスイッチのようなパス設定を行わない。そのためパケット衝突回避のためにバッファを要するが、統計多重効果による高効率な回線利用効率が期待できる。

光パケット伝送

光信号のパケット毎にヘッダ識別を行い、高速光スイッチを用い、パケット毎に高速に伝送経路を切り替えることで、ネットワーク利用効率を高める次世代伝送方式。

光パス(Optical Path)

個々の波長に相当し、エンド・ツー・エンドのコネクションを提供する。ITU では Optical Channel (Och)と定義されている。広義では GMPLS のパスを意味する。GMPLS を参照。

光量子ゲート

光の量子計算を行う際の基本ゲート。量子ゲートは通常、2つの量子ビット間の相互作用を行うデバイスであり、一方の量子ビットの状態に依存してもう片方の量子ビットの位相を変調するものが一般的であるが、より広義には量子情報処理に役立つ量子状態間の相互作用デバイス、例えば連続量の光量子状態間の相互作用なども全て含まれる。光に対するゲート、つまり光量子ゲートを実現するためには、単一光子レベルの微弱な

信号に対しても十分有効な非常に強い非線形光学過程を何らかの方法で実現しなければならない。

非古典的ガウス状態・光子数状態

巨視的コヒーレンスを伴った光の量子状態。コヒーレント状態のような多光子状態を論理ビットとしたものは、厳密には直交状態にならない。

ビジビリティ

量子情報分野においては、量子もつれ合いの純粋度を示す実験値。例えば、偏光がもつれ合った光子対の量子相関測定は、一方の光子の光路に置かれた偏光子を固定し、もう一方の光路の偏光子を回転させながら光子対を検出し、2光子同時検出イベントのみを積算していくことで行われる。最終的に、偏光子の回転によって光子検出頻度の最大値・最小値が交互に繰り返す正弦波的な実験結果が得られる。この最大値・最小値はこの最大値・最小値からビジビリティ＝(最大値－最小値)/(最大値＋最小値)が求められる。量子もつれ合いが純粋状態ならば反相関の値、つまり、最小値が0になるためビジビリティは1となる。他の状態との混合状態となると、最小値が0ではなくなるため、ビジビリティも低下する。最大値と最小値が等しくなるとき、つまり、相関・反相関がみられなくなるときにビジビリティは0となる。

秘密鍵

暗号通信を行う送信者、受信者のみの間で共有されているランダムビット列。送信者は、送りたいメッセージと同じ長さの秘密鍵を足し合わせて暗号化する。同じ秘密鍵の使用を一度きりとすれば、鍵の情報を知る受信者以外の他者が暗号を解読することは不可能になる。現在主流である公開鍵暗号方式

に対して、このような暗号化は秘密鍵暗号方式と呼ばれる。

ファイアウォール(fire wall)

外部網からの閉域内部網への不正アクセスを阻止するため作られたシステム。

フォトニック結晶

屈折率の異なる物質を光の波長以下（サブマイクロメートルオーダー）のサイズで規則正しく周期的に配列させた構造体である。フォトニック結晶中では、結晶の周期に応じて特定の波長領域の光が透過できないため、光の閉じ込めや急峻な曲げなどが可能であり、微小光回路などとしての応用が期待されている。

ブロードバンド

ADSL、CATV、FTTH 等の広帯域通信技術を用いた大容量コンテンツを伝送するサービスのこと。

プロテクション(Protection)

故障時に予め決められた経路（プロテクションパス）上にトラフィックを流して、故障回復を行う技術。プロテクションを用いた場合、適切なプロテクションパスを用意しておけば、100%の故障回復が可能である。リストラクションを参照。

プロトコル

ネットワークを介してコンピュータ同士が通信を行う上で、相互に決められた約束事の集合。

分散スロープ

波長による波長分散の差。波長分散(単位 ps/nm)の波長微分した値を指標として用いる(単位 ps/nm²)。伝送路ファイバの分散スロ

ープにより、波長多重伝送においてはチャンネル間の残留分散差が伝送特性上の課題となる。40Gbit/s 以上の高ビットレート伝送においては、チャンネルスペクトル内の残留分散傾きも課題となる。

分散補償

ファイバ伝送において、波長分散によって劣化した光信号波形を復元する技術。偏波モード分散による波形劣化の復元も含める場合もある。

分散マネージメント

伝送用光ファイバや DCF の組合せにより長手方向の累積分散を制御すること。異なる分散を有するファイバを接続して構成した伝送路を分散マネージメント伝送路という。

分散マネージメント伝送路

異なる分散を有するファイバを接続して構成した伝送路

ヘテロダイン検波

受信光信号と僅かに周波数が異なる局発光(受信機に用意する)を混合して、ビート周波数成分を検出する方法。

偏波多重／分離

互いに直交する2つの偏波を用いて多重して送信した光信号を、受信側で分離受信する多重通信方式。

ボーダーレスネットワーク (Borderless Network)

外部網にあるルータ間にまで光パスを直接張ることにより、光カットスルーによる高速大容量を実現しようとするネットワーク。

補償ノード

長距離ファイバ伝送において、複数のインライン中継区間毎に配置し(例えば、5～6 中継区間に1箇所)、光パワーレベルや波長分散等のチャンネル間偏差を補償するための中継ノード。

ホモダイン限界

コヒーレント光通信は光信号の位相・振幅変調とホモダイン検波から成るが、その性能は、最終的には量子揺らぎによる雑音、いわゆるショット雑音により制限される。これによる受信性能の限界がホモダイン限界であり、現在の光通信技術の性能限界を与える。

ホモダイン検波

受信光信号と周波数が同じ光を混合して、ビート成分を検出する方法。高感度な位相検波に用いられる。

ムーアの法則

Intel の共同創始者である Gordon Moore 氏が唱えた電子回路技術の進展の度合いを示す指針。最近は「18ヶ月で速度2倍」というのが通説となっている。

モノリシック集積

半導体上に導波路やレーザ、ディテクタ、変調器、増幅器、分岐回路などを集積する技術。

予等化

伝送路で生じる信号への影響の、一部、もしくは全部を送信器側で補償すること。これに対し、単に「等化」という場合、多くは受信機側で補償をおこなうことをさす。

リストラクション(restoration)

故障時に経路を再計算することによって故障回復を行う技術。故障が発生した場所で

局所的に故障回復を高速に行える可能性があるが、波長が余っている場合でなければ、光レイヤでの故障回復は行えない。プロテクションを参照。

量子誤り訂正

雑音やデコヒーレンス(可干渉性の消失)による量子情報の確率的変形を元に戻す手法。

量子一括測定

信号のパルスを各々個別に測定するのではなく、複数のパルスの系列全体を一つの量子状態とみなし、量子干渉を制御して行う測定法。具体的には、光パルスの系列に量子計算処理を施してから、個々のパルスを測定することで実現できる。特にシャノン限界を凌駕する量子通信路符号化を行う際の復号過程において決定的な役割を果たす。

量子カスケードレーザ (Quantum Cascade Laser)

量子カスケードレーザは量子構造のサブバンド間光学遷移を用いた半導体レーザであり、活性領域に複数の発光層を含む構造から構成されているため、1つのキャリアから発光層の層数に比例した数のフォトンを放出することが可能である。

量子効率

光が物質にあたって電子を出したり、粒子が物質中でエネルギーを一部失う際に発生する光などの放出効率をいう。特に光子検出器や光電子増倍管では、入射光子数に対する発生電子数の%で定義される変換効率になる。

量子通信路符号化

符号化—復号化処理に量子計算の原理

を応用することで、従来の情報理論の限界を超える通信路容量を実現可能とする技術。特に、符号語を表す量子状態の列を一つの量子状態として扱うことで一括して測定する復号において量子特有の効果が顕著に現れる。

量子時計

1秒の定義はセシウム原子の基底状態の遷移周波数の9,192,631,770分の1と定義され、これを実現する時計が原子時計と呼ばれている。これを発展させた時計として、原子の内部量子状態の重ね合わせ状態の位相の時間発展を基準として時間を定義する時計が量子時計として提案されている。量子時計間では量子もつれ合いを用いた高度な量子時刻同期が可能だと考えられている。

量子ドット励起子

量子ドット中に光励起等によって生じる一対の電子・正孔ペア。

(量子)ビットコミットメント

(量子)マルチパーティプロトコル(後述)の最も基本的なもののひとつで、ビット値を伏せて時間差で開示するもの。

(量子)マルチパーティプロトコル

複数の参加するシステムにおいて、各参加者が出力する情報を秘密にしたまま、お互いに何らかの通信を行い、最終的に全員が結果を正しく知ることが出来るようなプロトコル。

電子投票は代表的なマルチパーティプロトコルの形態である。

量子メモリ

量子通信や量子計算では、複数の量子ビット間での量子ゲート操作を行うために量子

もつれ合いや量子重ね合わせなどを持った量子状態を一定の時間保持しておく必要がある。このような機能を持つ量子素子は量子メモリと呼ばれる。量子メモリには量子状態のコヒーレンス時間が長いという性質のみならず、読み書き動作を観測を伴わずに実行できる性質が必要とされる。

量子もつれ

空間的に分離された幾つかの部分系に対し、それぞれで局所的な測定を独立に行ったにもかかわらず、その測定値の間に互いの影響が見られる場合がある。この量子系に特有な現象を、量子もつれ(量子エンタングルメント)という。このとき、全系の量子状態を各部分系の状態の直積で表現することはできない。量子もつれを持つ二粒子系は特にEPRペアと呼ばれる。EPRペアを参照。

リンクアグリゲーション

複数の Ethernet 物理リンクを結合し論理的に一つのリンクとみなす技術。仮想的な大容量なリンクが形成できるだけでなく、リンク冗長化されるため信頼性の向上を図ることが可能である。

ルータ(Router)

ネットワーク層のプロトコル定義に基づいてパケット中継、交換を行う装置(LAN の相互接続機器には、リピータ、ブリッジ、ルータ、ブルータ、ゲートウェイ等がある)。

参考資料

- ・ 21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議 要綱
- ・ 21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議 構成員
- ・ 21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議 開催スケジュール
- ・ 21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議 ワーキンググループ
開催について

21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議 要綱

1. 目 的

将来のユビキタスネットワーク社会の通信量の急増等にも対応し、ユーザが簡単・自由・便利かついつでもどこでも安心して利用できる高機能ネットワークの実現に必要な基盤技術を可能な限り早期に確立するため、「量子情報通信技術」、「ナノITネットワーク技術」、「次世代フォトニックネットワーク技術」、「テラヘルツ技術」及びこれら4分野相互の境界・融合領域の情報通信技術を「21世紀ネットワーク基盤技術」と位置づけ、研究開発の現状及び動向を調査し、今後の研究開発の方向性及び全体の推進方策を検討し、研究開発の円滑かつ効果的な推進に資する。

2. 名 称

本会議は、「21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議」（以下「推進会議」という。）と称する。

3. 検討事項

- (1) 21世紀ネットワーク基盤技術に関する国内外の研究開発動向の調査
- (2) 21世紀ネットワーク基盤技術に関する研究開発課題の分析
- (3) 21世紀ネットワーク基盤技術に関する推進方策の検討
- (4) その他必要な事項

4. 構成及び運営

- (1) 本会議は、大臣官房技術総括審議官の調査研究会として開催する。
- (2) 本会議は、別紙1に掲げる有識者（以下「構成員」という。）で構成する。
- (3) 本会議には、座長及び座長代理を置く。
- (4) 座長は、構成員の互選により定める。座長代理は、本会議の構成員の中から座長が指名する。
- (5) 座長は、本会議を召集し、主宰する。また、座長代理は座長を補佐し、座長が不在のときはその職務を代行する。
- (6) 座長は、本会議の検討を促進するため、ワーキンググループを開催することができる。
- (7) その他推進会議の運営に関し必要な事項は、座長が定める。

5. 開催期間

平成16年6月から平成17年7月までを開催期間とする。

6. 庶務

推進会議の庶務は、総務省情報通信政策局技術政策課研究推進室が行う。

21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議 構成員

(五十音順、敬称略)

	青山 友紀	東京大学 教授
	有信 睦弘	株式会社東芝 執行役常務 研究開発センター 所長
	市川 晴久	日本電信電話株式会社 先端技術総合研究所 所長 (平成17年7月から)
	今井 秀樹	東京大学 生産技術研究所 教授
座 長	江崎玲於奈	財団法人 茨城県科学技術振興財団 理事長
	河内 正夫	日本電信電話株式会社 先端技術総合研究所 所長 (平成17年6月まで)
	肥塚 裕至	三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 所長
	小宮山 進	東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 関連基礎科学系 教授 (平成17年5月から)
座長代理	榊 裕之	東京大学 生産技術研究所 教授
	塩見 正	独立行政法人 情報通信研究機構 理事
	曾根 純一	日本電気株式会社 基礎・環境研究所 所長
	西浦 廉政	北海道大学 電子科学研究所 所長
	西野 壽一	株式会社日立製作所 中央研究所 所長 (平成17年4月まで)
	福永 泰	株式会社日立製作所 中央研究所 所長 (平成17年5月から)
	松岡 正浩	東京大学 名誉教授
	横山 直樹	株式会社富士通研究所 フェロー、 ナノテクノロジー研究センター センター長

21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議

開催スケジュール

第1回 平成16年6月15日（火）

- 推進会議の進め方について
- 検討の視点について
- 量子情報通信技術、ナノITネットワーク技術、フォトニックネットワーク技術に関する取組状況と今後の展開について

第2回 平成17年3月25日（金）

- ワーキンググループ報告について
 - ・ ワーキンググループによる検討の経緯
 - ・ 量子情報通信、ナノITネットワーク、次世代フォトニックネットワーク、テラヘルツICT分野の短中期的な研究開発戦略
 - ・ 分野間の連携効果が期待される領域について

第3回 平成17年5月24日（火）

- 合同ワーキンググループ検討結果報告について
- 報告書骨子（案）について

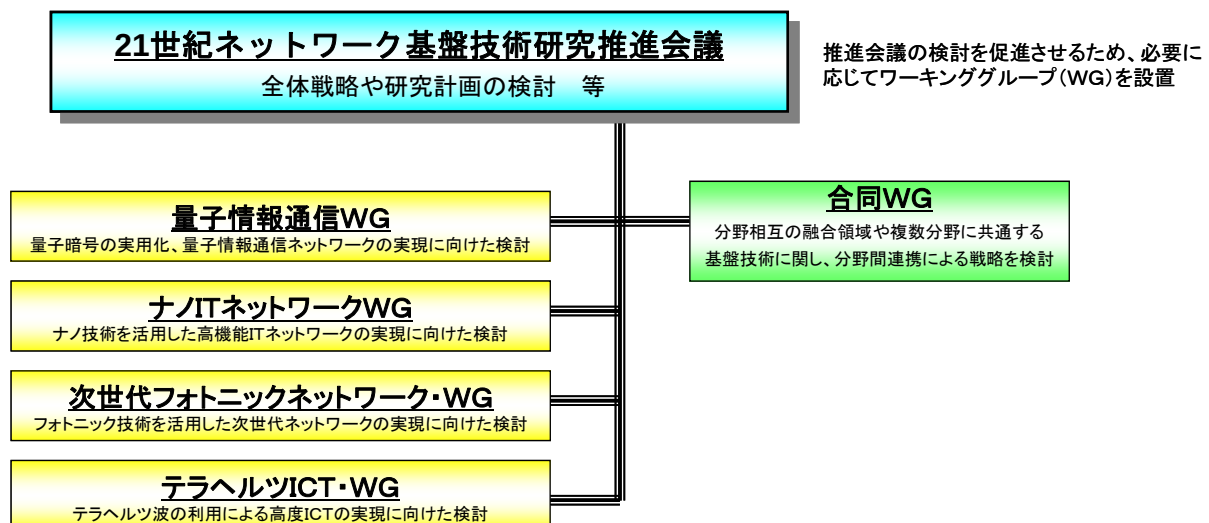
第4回 平成17年7月28日（木）

- 報告書（案）について

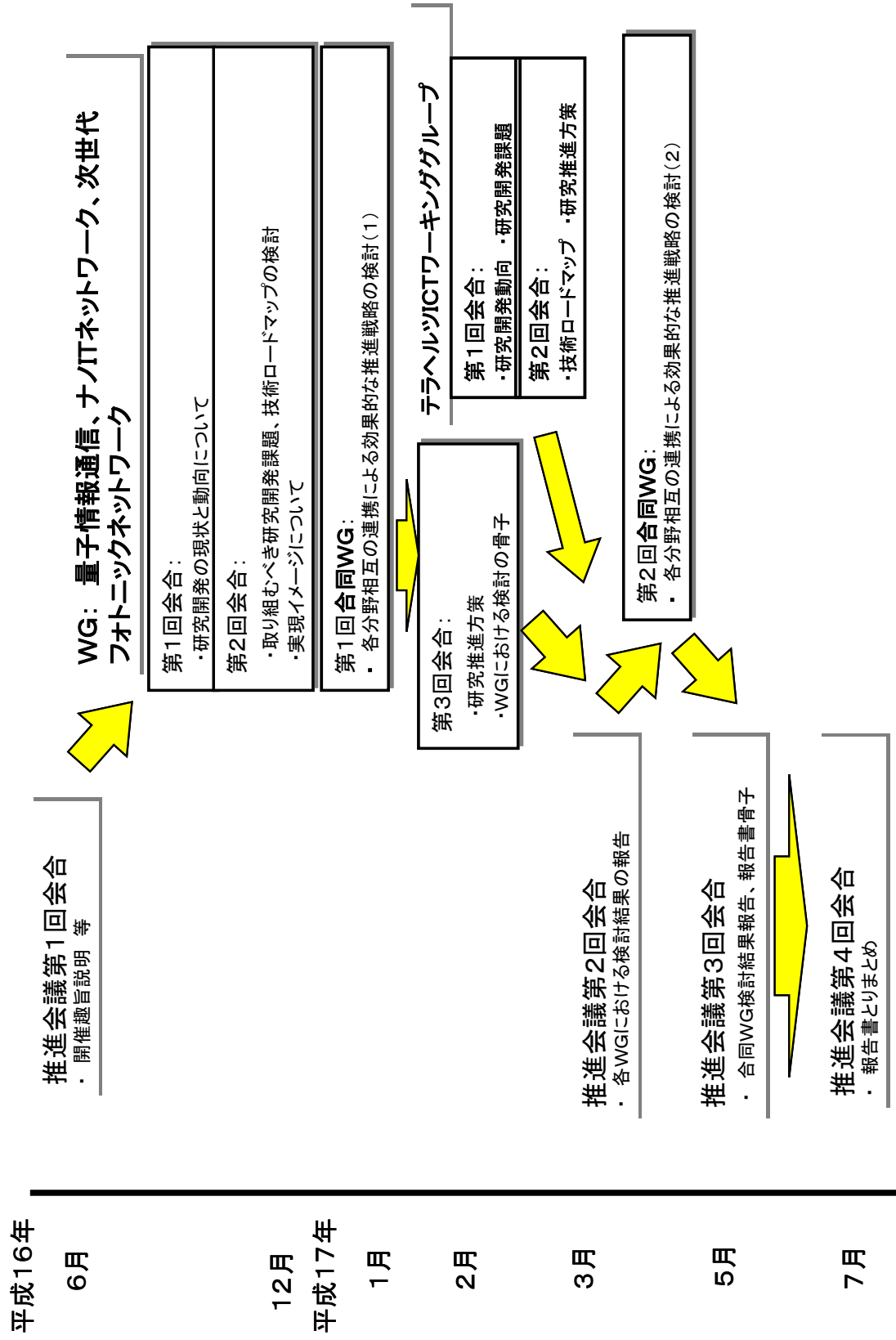
21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議 ワーキンググループ開催について

将来のユビキタスネットワーク社会の通信量の急増等にも対応し、ユーザが簡単・自由・便利かついつでもどこでも安心して利用できる高機能ネットワークの実現に必要な基盤技術を可能な限り早期に確立するため、「量子情報通信技術」、「ナノITネットワーク技術」、「次世代フォトニックネットワーク技術」、「テラヘルツ技術」及びこれら4分野相互の境界・融合領域の情報通信技術を「21世紀ネットワーク基盤技術」と位置づけ、研究開発の現状及び動向を調査し、今後の研究開発の方向性及び全体の推進方策を検討し、研究開発の円滑かつ効果的な推進に資することを「21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議」の目的とする。

また、ワーキンググループにおいては、これまでの各技術の取組、技術動向等を踏まえ、今後5年間に重点的に取り組むべき研究開発課題、実用化のための研究推進戦略等の検討を行い、「21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議」へ報告を行うことを目的とする。



21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議 ワーキンググループ開催経緯



合同ワーキンググループ構成員

(五十音順、敬称略)

GL代理	青山 友紀	東京大学大学院 教授
	荒川 泰彦	東京大学 先端科学技術研究センター 教授、 ナノエレクトロニクス連携研究センター長
	井筒 雅之	独立行政法人情報通信研究機構 上席研究員
GL代理	今井 秀樹	東京大学 生産技術研究所 教授
	尾中 寛	株式会社富士通研究所 ネットワークシステム研究所 フォトニクスシステム部長
	菊池 和朗	東京大学 先端科学技術研究センター 教授
	北山 研一	大阪大学大学院 教授
GL	小宮山 進	東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 関連基礎科学系 教授
	榊 裕之	東京大学 生産技術研究所 教授
	佐々木 雅英	独立行政法人 情報通信研究機構 基礎先端部門 量子情報技術グループリーダー
	高柳 英明	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所 所長、 NTT R&D フェロー
	斗内 政吉	大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター 教授
	並木 周	独立行政法人産業技術総合研究所 光技術部門情報通信フォトニクスグループ(平成17年5月から)
	中村 和夫	日本電気株式会社 基礎・環境研究所 研究部長
	野田 進	京都大学 工学研究科 教授
	萩本 和男	NTT 未来ねっと研究所 フォトニックトランスポート研究部長
	藤巻 朗	名古屋大学大学院 工学研究科 量子工学専攻 教授
	松岡 聡	東京工業大学 学術国際情報センター 教授
	松島 裕一	独立行政法人情報通信研究機構 情報通信部門長
	三村 高志	株式会社富士通研究所 フェロー

(注)GL : グループ長

次世代フォトニックネットワークWG 構成員

(五十音順 敬称略)

GL	青山 友紀	東京大学大学院教授
	岩田 淳	日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所 高速プラットフォーム TG 研究部長
	冲中 秀夫	KDDI 株式会社 執行役員 技術企画本部長
	尾中 寛	株式会社富士通研究所 ネットワークシステム研究所 フォトニックシステム部長
	川原 正人	沖電気工業株式会社 研究開発本部 戦略企画チーム 主幹 技術者
GL代理	北山 研一	大阪大学大学院 教授
	西郷 英敏	エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社 ブロードバンドIP 事業部長
	佐藤 健一	名古屋大学大学院 教授
	鈴木 正敏	株式会社 KDDI 研究所 執行役員
	高瀬 晶彦	株式会社日立製作所 ネットワークソリューション事業部 IPソリューションセンタ センタ長
	中野 豊	日本テレコム株式会社 常務執行役研究開発本部長 (平成17年3月まで)
	弓削 哲也	日本テレコム株式会社 専務執行役CTO・研究所長 (平成17年4月から)
	並木 周	独立行政法人 産業技術総合研究所 光技術部門情報通信フォトンクスグループ
	萩本 和男	NTT 未来ねっと研究所 フォトニックトランスポート研究部長
	松岡 聡	東京工業大学 学術国際情報センター 教授
	松島 裕一	独立行政法人 情報通信研究機構 情報通信部門長
	本島 邦明	三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 光通信技術部 部長
	森 隆	株式会社日立コミュニケーションテクノロジー キャリアネットワーク事業部 光ネットワーク部長
	山中 直明	慶應義塾大学大学院 教授

テラヘルツICT技術WG 構成員

(五十音順 敬称略)

	石田 英之	株式会社東レリサーチセンター 取締役副社長
	井筒 雅之	独立行政法人情報通信研究機構 上席研究員
	伊藤 弘昌	東北大学 電気通信研究所 所長
	岩崎 純	株式会社栃木ニコン 取締役社長
	木村 彰男	アイシン精機株式会社 新規事業企画室 室長
GL	小宮山 進	東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 相関基礎科学系 教授
	瀬恒 謙太郎	松下電器産業株式会社 先端技術研究所 グループマネージャー
	田中 耕一郎	京都大学大学院 理学研究科 教授
GL代理	斗内 政吉	大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター 教授
	西田 安秀	日本電信電話株式会社 マイクロシステムインテグレーション研究所 所長
	藤巻 朗	名古屋大学大学院 工学研究科 量子光学専攻 教授
	松岡 秀行	株式会社日立製作所 中央研究所 ソリューション LSI 研究センタ ULSI研究部 部長
	三村 高志	株式会社富士通研究所 フェロー
	吉田 多見男	株式会社島津製作所 基盤技術研究所 所長

量子情報通信WG 構成員

(五十音順 敬称略)

	市村 厚一	株式会社東芝 研究開発センター フロンティアリサーチラボラトリー 主任研究員
GL	今井 秀樹	東京大学 生産技術研究所 教授
	井元 信之	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授
	臼杵 達哉	株式会社富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター 主任研究員
	小澤 正直	東北大学大学院 教授
	笹木 敬司	北海道大学 電子科学研究所 教授
	佐々木 雅英	独立行政法人情報通信研究機構 基礎先端部門 量子情報技術グループリーダー
GL代理	高柳 英明	日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所 所長 NTT R&D フェロー
	中村 和夫	日本電気株式会社 基礎技術研究所 研究部長
	番 雅司	株式会社日立製作所 基礎研究所 主任研究員
	広田 修	玉川大学 学術研究所 教授
	古澤 明	東京大学大学院 助教授
	松井 充	三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 情報セキュリティ 技術部 次長

ナノITネットワークWG 構成員

(五十音順 敬称略)

	荒川 泰彦	東京大学 先端科学技術研究センター 教授 ナノエレクトロニクス連携研究センター長
	板部 敏和	独立行政法人情報通信研究機構 基礎先端部門 部門長
	板屋 義夫	日本電信電話株式会社 フォトニクス研究所 所長
	大津 元一	東京大学大学院 工学系研究科 教授 東京工業大学大学院 教授(併任)
GL代理	菊池 和朗	東京大学 先端科学技術研究センター 教授
	北山 研一	大阪大学大学院 工学研究科 教授
G L	榊 裕之	東京大学 生産技術研究所 教授
	野田 進	京都大学 工学研究科 教授
	馬場 寿夫	日本電気株式会社 基礎・環境研究所 ナノテクノロジーTG 研究部長
	三村 高志	株式会社富士通研究所 フェロー