

# 光と電波の融合技術と情報化社会

小牧 省三・塚本 勝俊

## Ubiquitous Networks and Microwave Photonics Technologies

Shozo KOMAKI and Katsutoshi TSUKAMOTO

Radio on fiber (RoF) system is the synergetic use of emerging wireless and photonic technologies and has the both advantage of wide area access capability of radio and the low-loss long hop transmission capability of optical fibers simultaneously. They give universal network solutions that is independent from frequency bands and air interface types, and can support ubiquitous network infrastructures that is indispensable for the IT society. In this paper, the research activities, technologies and application examples of RoF technologies are described.

**Key words:** microwave photonics, radio on fiber, RoF

電波を利用する無線技術は、携帯電話、無線 LAN などに応用され、世の中への急速な技術浸透と同時に高速伝送に向けた数々の新規技術の開発が続けられている。また、光技術も同様に、高速ディジタル伝送技術、波長多重技術などの先端的な技術開発が行われ、現在のブロードバンド通信基盤技術として必要不可欠な存在になってきている。これらの、電波の特徴と光の特徴を融合させ有効に利用する RoF 技術に関する現状を述べ、各種通信方式への応用例を述べ、最後に今後の動向と解決すべき課題を述べる。

### 1. ユビキタスネットワークと RoF 技術

インターネットプロトコルを用いた通信基盤（インフラ）の安価・定額かつ広域的な利用可能性が開かれ、電子メールや Web 検索による情報の交換が盛んになってきている。この IP ネットワークインフラは、教育・商取引・医療・行政等の各種の分野で今後の社会活動のすべてに利用されるようになるものと想定されている。これを、ユビキタスネットワーク（図 1）とよんでいる。

このネットワーク内では、人が移動してもすべてのサービスを同様な条件で提供できることが必要であり、移動通信によるワイヤレス接続機能もまた必須になるものと考え

られている。

ワイヤレス機器の発展は非常に速く、いつでもどこでも同様の環境を実現するには、その発展に応じて無線基地局や端末の更改が必要になってくる。また、大容量通信を行うワイヤレス機器では、信号伝送速度とともにそのサービスエリアが縮小し、基地局を多数構築する必要が生じる。

RoF (radio on fiber) 技術は、電波をそのままの形式で光ファイバー内に閉じこめて伝送することが可能であるため、携帯電話、PHS、無線 LAN 等の各種の電波形式に適用可能な汎用的なワイヤレスネットワークインフラとして動作させることができ、ユビキタスネットワークにおいて重要な位置づけを有している。RoF 技術を図 2 に示すように使用することにより、汎用基地局が実現できる。また、RoF 技術を適用した場合は複数基地局を一体的に束ねたものとして運用することが可能となり、高速移動時においても集中基地局のみでの制御で対処可能となり、基地局間でのハンドオーバー制御が不要となる。今後、構内ネットワークやホームネットワーク内にも適用されるものと考えている。

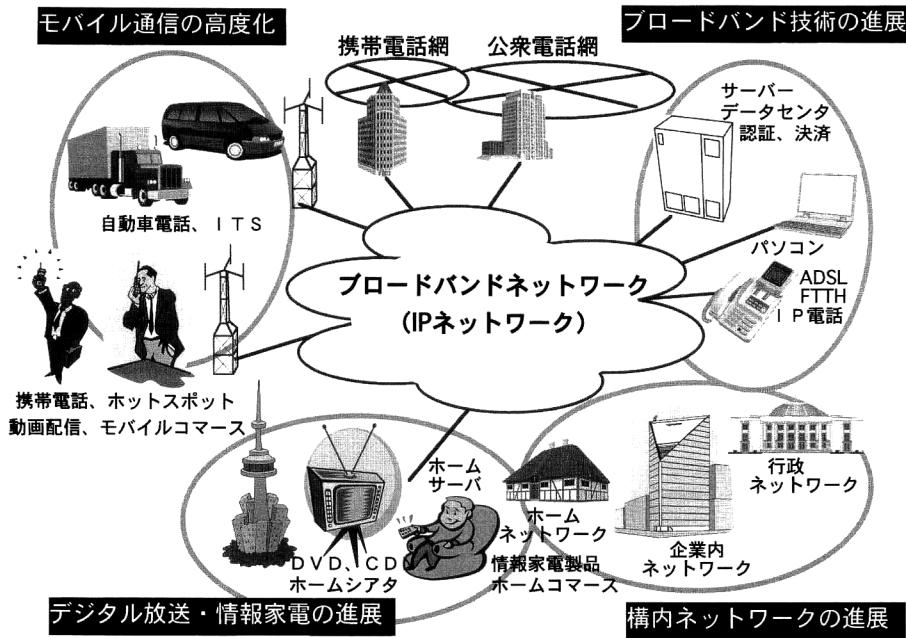


図1 ユビキタスネットワークの概念図。

## 2. RoF 技術の基本構成と概要

RoF 技術を使用した通信リンクの基本構成は図 3 のようになる。基地局で受信された各種の電波は、そのままの形式で光信号に変換される。この際に、最も構成が簡単になる方式は図に示すように、レーザーダイオードの直流に電波を重畠し、電波で光強度を変調する方法で直接変調とよばれている。この方式では、取り扱いが可能な電波の周波数範囲が 10 GHz 程度であり、かつ変調時の電波と光強度の非線形性が生じやすくなるという欠点がある。今後必要となる 60 GHz 帯等のミリ波帯域では、レーザーとは別に変調器を用いる外部変調が使用される。外部変調器も各種の形式が存在しており、現在主として使用されるものとして、ニオブ酸リチウム基板を用いたマッハ・ツェンダー干渉計型光変調器、ならびに図 4 に示す電界吸収型光変調器 EAM (electro absorption modulator) がある。後者はダイオードへの直流バイアスにより通過する光の吸収率を制御するものであり、電波を直流バイアスに重畠し強度変調が行われる。光波長、バイアス信号により光検波ダイオードとしても利用可能であるという特徴をあわせもっている。以上に述べた光強度変調を行う直接変調器、外部変調器は、ともに電波と光強度変換の非線形性を伴うため、後述するような電波信号間の混変調が発生し相互干渉信号となり、電波信号品質劣化となる。これを防止する方法として、電波を光強度ではなく光周波数に変換する方法もあり、この手法を用いれば、非線形性の改善のみならず周波数変調による雑音抑圧が可能となる。

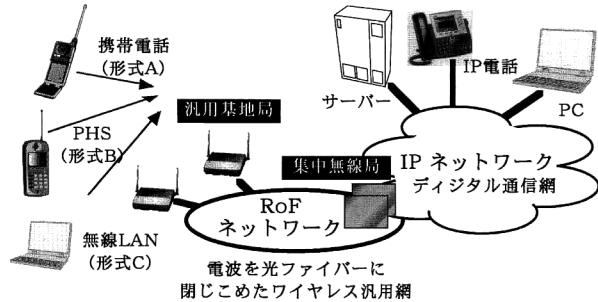


図2 RoF を用いたユビキタスネットワーク。

光検波器に関しては、変換後の電波出力レベルが大きいこと、雑音が小さいことが要求され、ミリ波帯域では、キャリヤー蓄積が小さく高出力化が可能な单一走行キャリヤーダイオードが有利であると考えられる。

## 3. リンク特性と劣化要因

RoF リンクの特性は、電波部分に関しては線形でなければならないため、電波部分と光リンク部分に分けて考えることができる。このため、RoF リンクの設計には光リンク部分を分けて設計すればよい。ただし、複数の携帯端末から受信した電波は基地局間との距離が異なっていたり、伝搬路で生じるマルチパスフェージングがあるため、相互にレベル差があり、かつ時間的にも大きく変動している。これらをまとめて光強度に変換するが、その際に非線形性により電波の間の混変調が生じる。無線帯域が広帯域に及ぶ場合は 2 倍波の問題が発生するが、無線通信の場合

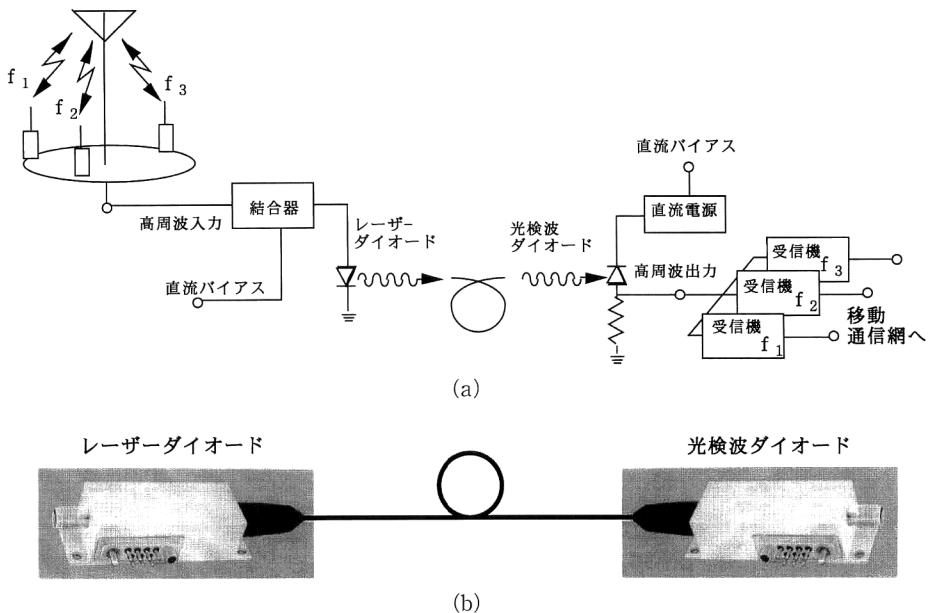


図3 RoFリンクの基本構成。(a) RoFリンクの構成, (b) RoFリンクの写真。

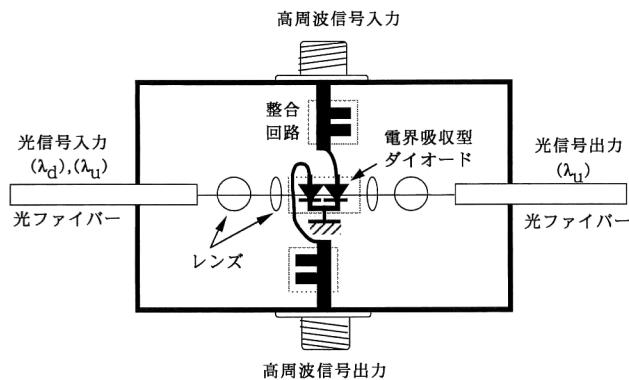


図4 電界吸収型光変調器(EAM)の構成例。

は搬送波に対し狭帯域のものが多く、一般には3倍波と2倍波のミキシングで生じる三次混変調歪み電力IM3(3rd inter modulation)を対象に設計が行われている。図5には、非線形歪みによる劣化の様子を示している。受信レベルの大きい他の電波による混変調歪み成分が受信電力の低い電波に干渉を与える場合、最も影響が大きくなるため、このレベル変動(ダイナミックレンジ)に対応可能なように非線形レベルの抑圧が必要になる。SFDR (spurious free dynamic range) は、これを規定する指標として使用されている。

現在、世の中で使用されているCDMA (code division multiple access) 方式を使用した携帯電話では、受信局で送信電力が一定になるよう各携帯端末の出力電力を制御している。このため、この問題は、基地局から光リンクを経由して携帯端末に送信する方向(下りリンク)に対して考慮する必要が生じてきている。

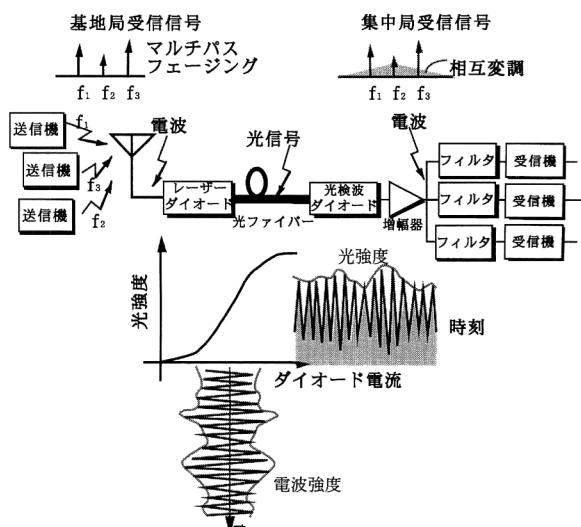


図5 フェージングならびに非線形性による劣化。

#### 4. 応用例

RoFリンクを具体的に応用した例を以下に紹介する。これまでの応用例をまとめると、

- (1) 放送映像配信系：FTTH (fiber to the home) 加入者系を用いた波長多重テレビ放送配信に関し、1970年代からマルチモードファイバーを使用した波長多重映像配信が検討されてきた。また、同軸を主体とするCATV配信網の幹線部分を光ファイバー化したHFC (hybrid fiber & coaxial) に使用される技術としても古くから利用されている。また、特殊な例として、放送波再中継用の送受アンテナ分離用としても適用されている。この例では、リモートアンテナへの給電を不

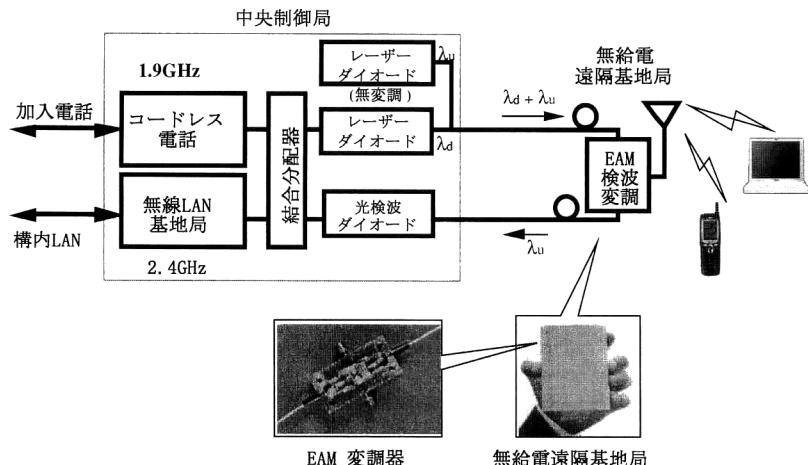


図6 構内コードレス通信への応用例。

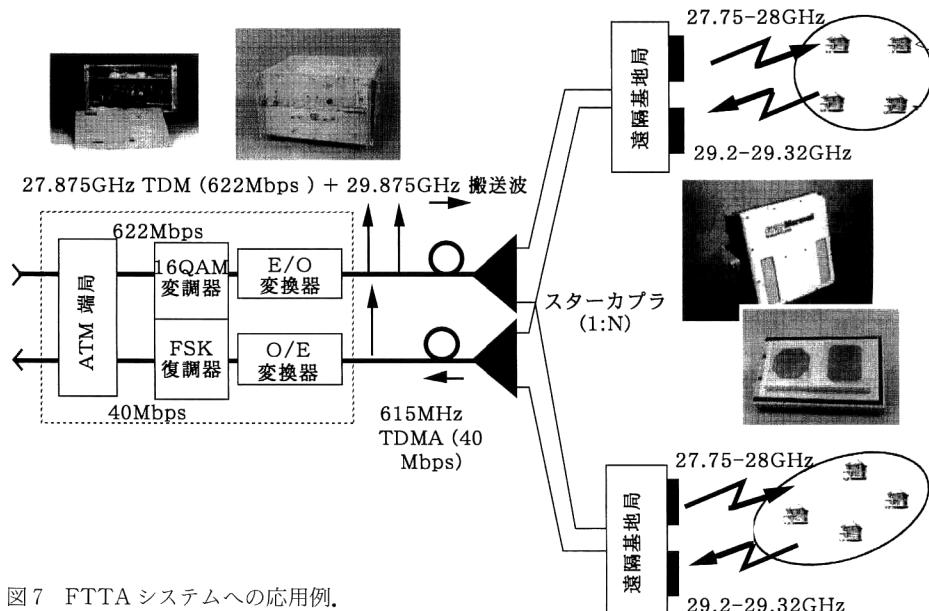


図7 FTTA システムへの応用例。

要とするような工夫もなされている。今後、デジタルテレビ放送の単一周波中継用としても利用の可能性が高い。

(2) 宇宙応用： 1980年代には、衛星用地球局アンテナを郊外あるいは過疎地に設置し電波干渉を避ける目的に利用してきた。近年では、ALMA (Atacama large millimeter array) プロジェクトとよばれるサブミリ波電波天文に対し、アレイアンテナ間の信号損失低減や位相同期の高精度化を目的に導入されている。また、衛星搭載用アレイアンテナについても、配線重量低減やアレイ制御の高機能化高精度化を目的に研究が進められている。

(3) 移動通信・固定無線： 1990年代はじめから、移動

通信のビル陰やトンネル対策として導入と検討が進められてきた。地下街やトンネル等の不感地対策、ビル内等構内系移動通信基地局として適用例は多い。この例では、基地局の簡易化と同時に電波形式変更への柔軟な対応、トラフィック集中時の無線装置の有効利用という観点での効果もある。また、マイクロ波やミリ波帯域を使用する広帯域加入者無線アクセスFTTA (fiber to the air)への適用検討例も多い。路側に光ファイバーケーブル設備を有している高度道路交通システムITS (intelligent transport system)においては、路車間通信への適用も検討されている。

これらのうち、主要なものについて以下に概要を述べる。

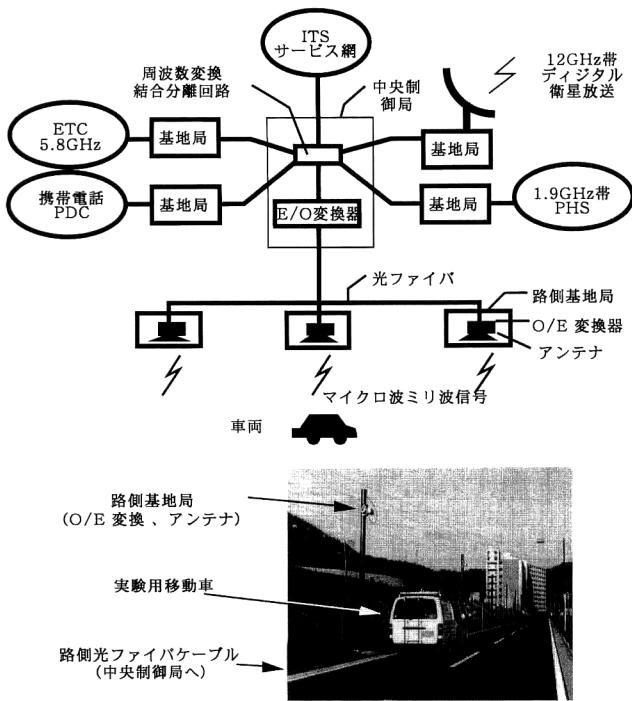


図8 ITSへの応用例。

#### 4.1 構内コードレス通信への応用例

イギリスにおける構内無線通信への応用例を図6に示す。この例では、1.9 GHz 帯ディジタルコードレス電話の電波と2.4 GHz 帯の無線 LAN の電波を光ファイバーでリモートアンテナに伝送している。リモートアンテナ点での電源供給を省略するため、上り信号をのせるレーザー光は中央制御局から異なった波長で供給している。また、リモートアンテナ局で検波された下り信号に関しては、構内コードレス電話や無線 LAN の出力が最大でも10 mW

に制限されているため、送信電力増幅器なしで運用できるような構成になっており、こちらについても電力供給なしを実現している。この構成では、リモートアンテナ用の装置としては図4に示すEAMが用いられており、上り用の波長 $\lambda_u$ と下り用の波長 $\lambda_d$ を異ならせ、検波と変調を使い分けている。

#### 4.2 FTTAへの応用例

ADSL, FTTH等のブロードバンドネットワークが、各家庭へ急速に浸透してきている。これに対し、電柱までの配線を光ファイバーで行い、これから先を電波で配信するFTTAが検討されている。図7に、フランスでの適用例を示す。この例では、30 GHz 帯を使用し、家庭に向けて最大622 Mbps の配信を行い、各家庭からは最大40 Mbps の伝送を可能とするものである。この方式は、可搬性をもっており半固定として使用可能であり、周波数によっては、移動性をもたせることが可能となるという特徴がある。新しい無線通信方式が導入され、新しい機器が家庭に設置された場合でも、中央制御局装置の増設あるいは共用により対応可能となる。今後、無線 LAN の公衆網利用が進むが、このような場合にも効果が高い。

#### 4.3 ITSへの応用例

通信総合研究所でのITSへの応用に対する検討例を図8に示す。高速道路の路側には光ファイバーの敷設が容易であり、各種表示や道路状況の監視用として光ファイバーコンセントの設置が行われている。また、5.8 GHz 帯を使用した料金収受システムETC (electronic toll collection systems) や、60 GHz を用いた自動車用レーダーなどの車載機器が自動車にのせられつつある。これらの基盤

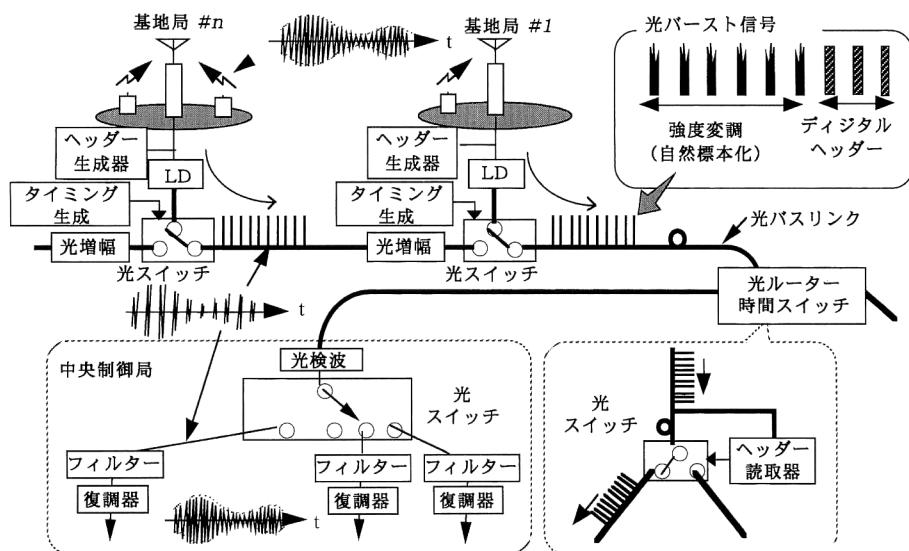


図9 自然標本化を用いたRoFネットワーク。

をそのまま利用した高度道路交通システムへの適用が検討されている。図においては、5.8 GHz 帯を用いた ITS サービスのみならず、ディジタル放送、コードレス電話、携帯電話等の共通汎用基盤としての路側アンテナと単一の車載アンテナで複数のサービスを可能にするものであり、車両への複数アンテナの設置や追加を不要としている。

## 5. ネットワーク化に向けた検討

上記の応用例は、いずれも RoF リンクを対象にしたものである。光ファイバー通信の分野では、ディジタル信号を光に変換し、光信号を電気信号に落とさずそのままでスイッチしたりルーティングする技術が検討されている。波長の異なる光信号を、波長スイッチや波長変換を行って目的の場所まで光信号のままで運ぶものである。この技術により、ディジタル信号のみならず、中にせられた電波も同様にネットワーク内を目的の場所まで到達させることができあり、RoF についても波長スイッチを用いたネットワーク化の検討が進められている。図 9 は、大阪大学で検討されている自然標本化を用いたバス型 RoF ネットワークの例である。基地局で発生した電波を帯域の 2 倍以上の周期でサンプリングし、光強度変調した後にバスネットワークに送出し、途中の時間スイッチで目的の方向にルーティングするものである。時間的なスイッチのみならず、符号スイッチを用いた符号分割多重方式によっても同様なルーティングが可能となる。

## 6. 今後の課題

現在、RoF リンクは各種のアプリケーションを見いだしつつあるが、実導入に至るためには、今後の課題も大きい。

(1) クリティカルマスの関係： 現在導入されている部分は、それがなければシステムを構築できないような分野である。たとえば、宇宙応用をはじめとする、高価であっても導入可能な部分のみに限定される。このため、一般応用になかなか結びつかず、量産による価格低下が期待できない状況にある。

(2) ムービングターゲットの問題： ワイヤレス技術、光技術ともに急速に進歩している技術であり、ともに最新の技術が次々に生み出されている。研究者がそれらの技術を適用しようとするため、いつまでたっても試作品レベルにあり、実用的な製品が出てこない。研究レベルでの関心は非常に高いが、産業レベルでの立

ち上がりが遅い。

(3) 運用事業者の分離： 光ファイバーを有している事業者と電波を用いて事業を行っている事業者が別々になっており、お互いに統合して利用しようとするインセンティブがわかない。光ファイバー事業者はダークファイバーを事業品目とするのではなく、ディジタル信号を事業項目とし保守分界点を明確化したいという意志が強く、電波を事業の目的にあげる事業者は自前回線の保有をめざしており、光ファイバーのかわりに無線リンクを使用し、光ファイバーをバイパスしたいという意識が高い。

(4) 電波法規制上の問題点： 電波を取り扱う官庁は、RoF システムが周波数利用効率向上に資する技術であることは認めているが、これを扱うフレームワークが確立されていない。たとえば、電波はサービスを供給する各事業者に割り当てられており、それ以外の者が基地局を設置できない。また、多数のサービスを汎用的にサポートする基地局は競争事業者間での調整が必要となり、できるだけ避けたいという意識が強く、なかなか導入につながらない。

しかしながら、現在、RoF を使用した基地局装置の地下街やトンネル内への設置が進んでいる。また、今後、ブロードバンドワイヤレスサービスを実現する必要があり、基地局-端末間距離の短縮化が進んでおり、屋内への基地局の設置が必要になってきている。建物内に関しては、各事業者に共通した汎用的な基地局の設置が必要であり、RoF 技術はこのような応用面に関しても導入が急速に進むと考えられる。今後、電波法上におけるフレームワークを早急に確立してゆく必要がある。

本報告では概要のみを述べたが、文献 1 に RoF 技術の物理レイヤー、リンクレイヤー、ネットワークレイヤー、ならびに各種アプリケーションの現状を詳しく分類整理している。詳細内容を調査したいと思われる方におすすめしたい。また、文献 2 には RoF 技術の概略を記述しているので、初心者の方はこれを参照されたい。

## 文 献

- 1) H. Al-Raweshidy and S. Komaki: *Radio over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks* (Artech House Publishers, Boston, MA, 2002).
- 2) 小牧省三：“これからの無線通信と光技術”，エレクトロニクス，45, No. 9 (2000) 20-24.

(2003 年 12 月 29 日受理)