

光アクセスのこれまでとこれから

Past and Future of Optical Access

三木哲也

Abstract

光アクセスは、1980年代後半にFTTH（Fiber to the Home）への研究が始まった。1990年からNTT研究所が主導した国際標準化に向けた活動も始まり、当時NTT研究所と英国のBTRL（British Telecom Research Laboratories）で研究していたPON（Passive Optical Network）を基本とした国際標準化がITU-T及びIEEE802委員会が進められた。日本では現在、1Gbit/sのアクセスサービスが提供されるまでに至っているが、今後は移動系通信の高速化に伴い光アクセスと無線アクセスが融合したネットワークへの発展が期待される。

キーワード：FTTH, ROF, 光通信, 光・無線融合, ブロードバンド

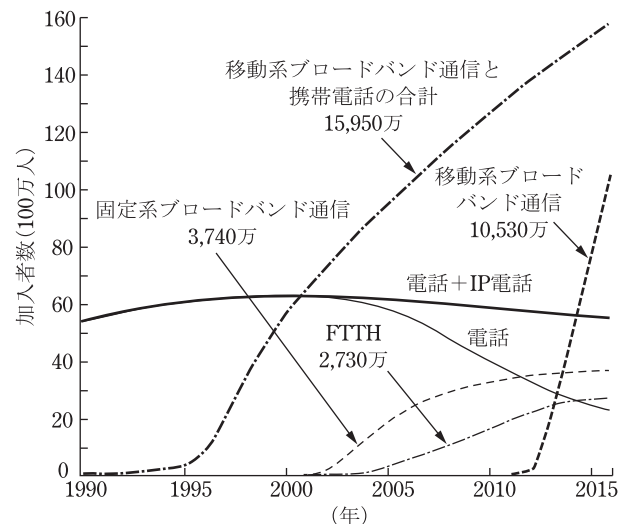
1. はじめに

光通信は、日本では1981年から幹線系への導入が始まり、通信ネットワークのデジタル化と経済化に大きく貢献してきた。一方、アクセス系では高速デジタル専用回線用に6.3Mbit/s光伝送方式が1984年から導入されたが、一般家庭向けは要素技術とシステムの両面から探索的な研究がしばらく続いた^{(1)~(3)}。1990年代に近づくにつれてマルチメディア通信に向けてB-ISDN（Broadband-Integrated Service Digital Network）の研究が進展し、1990年頃から光アクセスの研究が国内外で加速した。更に国際標準化活動も始まり、2000年代初頭にFTTH（Fiber to the Home）が実現した。

日本は、FTTHの実現に向け世界の先頭に立つ研究開発と国際標準化を先導し、2001年から本格的にFTTHを導入してブロードバンドサービスの提供を開始した。数Mbit/sを超えるブロードバンドの提供では、電話用ペアケーブルによるDSL（Digital Subscriber Line）やCATVによる高速モデムが当初は先行したが、現在ではFTTHの加入者数は約2,700万で世帯普及率が50%を超える状況にあり、移動系通信と合わせ

て世界トップレベルのブロードバンド環境が実現されている⁽⁴⁾。日本における移動系通信を含む主要な通信サービスの変遷を図1に示す。

本稿では、ここに至るまでの光アクセスの研究開発の歩みを振り返るとともに、今後の展望を述べる。



(注) 数値は2015年9月現在の加入者数を示す。
固定系ブロードバンド通信にはDSL, CATV, FTTHを含む。
移動系ブロードバンド通信にはBWA, LTEを含む。
BWA: Broadband Wireless Access (WiMAX等)
LTE: Long Term Evolution (第4世代移動通信)

図1 日本における近年の主要な通信サービスの変遷

三木哲也 名誉員：フェロー 電気通信大学企画調査室
E-mail miki@office.uec.ac.jp
Tetsuya MIKI, Fellow, Honorary Member (Research and Planning Office, The University of Electro-Communications, Chofu-shi, 182-8585 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.99 No.7 pp.638-643 2016年7月
©電子情報通信学会 2016

2. 光アクセスのこう矢

1980年代に日本、米国、欧州で研究開発が始まった光アクセスのアプローチは次の三つに大別される。

(1) 既存のペアケーブル多重伝送の光伝送への置換
電話加入エリアが広い国や地域では、局から遠距離の配線区域へペアケーブルによる多重伝送（1.5 Mbit/s または 2 Mbit/s）が導入されていたが、これを 6 Mbit/s、8 Mbit/s または 45 Mbit/s などの光伝送に置き換えて経済性と保守性を向上させるアプローチ。

(2) 加入者の直近までの光化：FTTC（Fiber to the Curb）

加入者宅まで光ファイバを敷設したときのコストが膨大になることを避け、近くのマンホールないし路側まで光ファイバを敷設して、そこから加入者宅までは既設の電話線を用いるアプローチ。ビルの入口まで光化する FTTB（Fiber to the Building）も同様のアプローチ。

(3) 加入者宅までの光化：FTTH

加入者宅までの完全な光化であり、既存のペアケーブル並みのコストが求められる難しいアプローチ。

一つ目のアプローチは、加入者系にデジタル多重伝送が既に導入されていた北米等でその光伝送への置換が進められた。FTTC は米国が先導し、FTTH は日本が

先導した。NTT 研究所では「アクセス系への光通信の導入は画期的な事業であるから、光ファイバの潜在力を最も発揮させる技術を追求すべき」という方針で、1990年頃から FTTH の実現に向け光システム、光ケーブル、光デバイスにわたる総合的な研究開発が進められた。

3. 光アクセス技術の研究開発と国際標準化

FTTH の最大の課題は低コスト化であった。通信網を構成するコストの大半はアクセス系であるため、加入者のコスト負担を考慮すると既存のペアケーブルによる電話回線と同等のコストでの光化が求められた。そのため、1心の光ファイバを光カップラで分岐して複数の加入者回線を多重化することで加入者当りコストを低廉化する技術が考案された。NTT 研究所ではこれを PDS（Passive Double Star）と名付けて研究していた⁵⁾が、同じ技術が英国の BTRL（British Telecom Research Laboratories）でも独立に研究されており PON（Passive Optical Network）と名付けていた。

光アクセス用のケーブルについては、長距離幹線用とは比較にならない多心化が必要なことから、4心とか8心の光ファイバを並列配置したテープ心線が考案され、3,000心もの光ファイバを収容する超多心光ケーブルや複数心ファイバを一括接続する技術などの研究開発が進んだ。また、光デバイスについては、広い温度範囲で性能と信頼性を保証できる半導体レーザや、送受のデジタル光信号と CATV アナログ光信号を WDM（Wave-

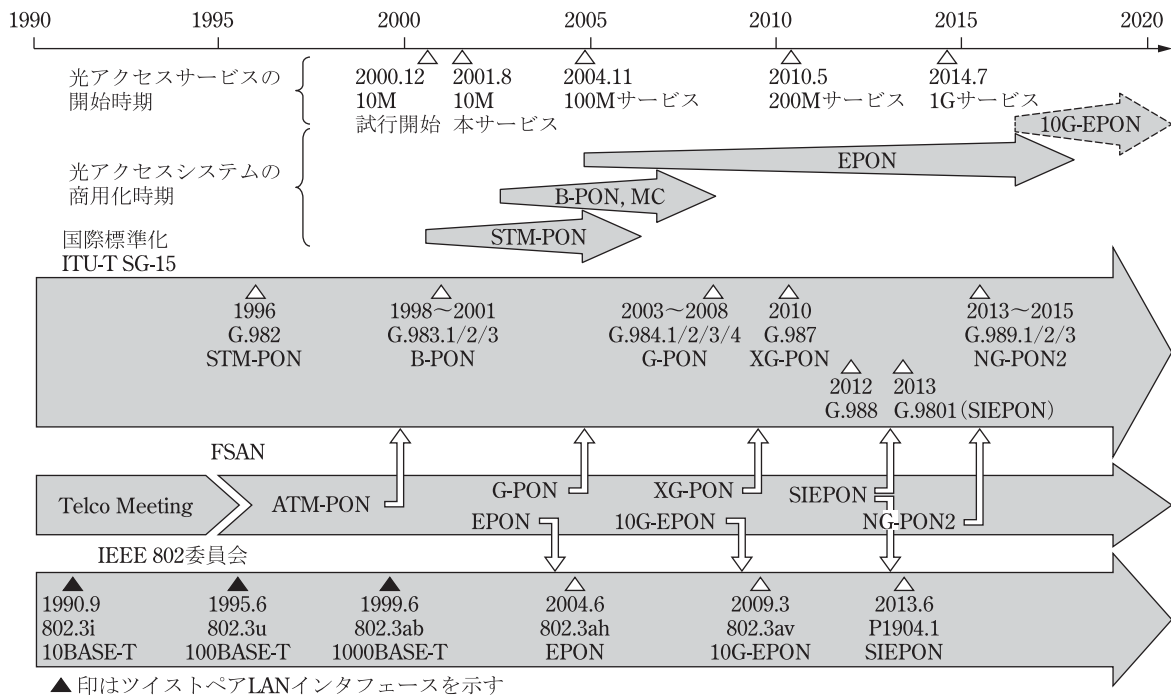


図2 光アクセスに関連する国際標準化と日本での商用化の経緯

length Division Multiplexing) 伝送するための合分波器, PDS 用光カップラなどを低コストに実現する研究開発が進められた。そして, NTT 研究所ではこの技術を用いて 2000 年に 10 Mbit/s サービスを月額 1 万円で実現という目標を 1996 年に設定し, その実用化を達成した。

光アクセスのコスト低減には, 新技術とともに量産効果が極めて重要であり, 国際標準化が不可欠であった。そこで, 光アクセスに携わっていた英米の研究者に働き掛け, 国際標準化のそ上に乗せるための活動が 1990 年に始まった。その頃からの光アクセスに関する国際標準化と日本での商用化の経緯を図 2 に示す。

国際標準化の機運を高めるため, 国際ワークショップを開催することになった。初回は 1990 年 5 月にロンドンで開催された IEEE Workshop on Passive Optical Networks for the Local Loop であった。それに続けて標準化に向けた議論をする場として, NTT 研究所, BTRL (英), Bellcore (米), Bell Canada, DBP Telekom (独), CNET (仏), CSELT (伊) からの研究者による Telco Meeting と称する会合が持たれた。そこで各国の光アクセスの検討状況, 導入シナリオ, システムコンセプトなどの情報交換が行われ, それに基づいて各国から ITU-T への提案が行われることになった。

この IEEE Workshop と Telco Meeting は, 引き続いてサンディエゴ, 横須賀, ベルサイユ, モントリオール, 京都の順に 1994 年まで開催された。図 3 は京都での会合模様である。1995 年には NTT 研究所の主導で FSAN (Full Service Access Network) と称する標準化フォーラムが設立され, Telco Meeting の活動が引き継がれた。設立時は同じ 7 組織であったが, 現在は 29 の通信事業者を含む 77 組織の標準化団体に発展している⁽⁶⁾。

同時期に NTT 研究所では, PDS 方式の開発が企業の

協力を得て進められ, その現場試験が 1993 年から京阪奈学園都市, 浦安, 立川, 横須賀で行われた。また, 横須賀では NTT 研究所の近くに建てられた実験ハウスを用いて, FTTH により可能となる電子新聞など将来のマルチメディアサービスの実験が行われた⁽⁵⁾。これにより, Telco Meeting で議論された PDS 方式の実用性が実証され, 光アクセスの国際標準化への道筋が整った。図 4 に実験ハウスと加入者宅に設置する光送受信端末である ONU (Optical Network Unit) を示す。

当時, NTT 研究所で開発していた PDS 方式は, 同期多重化技術である STM (Synchronous Transfer Mode) に基づく 16 Mbit/s の STM-PON 方式であり, 本方式をベースに, ITU-T における最初の光アクセスシステムの標準化勧告 G.982 が 1996 年に制定された。

この方式の導入を世界で最初に進めたのは, DBP Telekom であり, 西独に併合されて間もない東独の通信インフラ整備が目的であった⁽⁷⁾。Telco Meeting に参加していた DBP Telekom は NTT 研究所の研究開発状



左より日本 (岡田, 三木), 仏, 加, 独, 伊, 米, 英からの委員。

図 3 Telco Meeting 京都会合の様相



(a) 実験用ハウス



(b) PDS方式ONUの試作機

図 4 FTTH の現場実験 (提供: NTT 研究所)

況を知っていたので、日本の技術を用いてフィールドトライアルを進めた。その後毎年数十万加入へ導入する計画を作っていたが、本格導入には至らなかったようだ。一方日本では、 π システムと称する STM-PON 方式による FTTC が 1998 年から導入された⁽⁸⁾。

FSAN が発足後は、FSAN において寄書の原案が取りまとめられ ITU-T に提出された。更に、LAN (Local Access Network) の標準化組織である IEEE 802 委員会における光 LAN の標準化に対しても PON 方式が提案され、図 2 に示すように光アクセスと光 LAN の国際標準化が次々と制定された。

ブロードバンドアクセスに向けた最初の標準化は、B-ISDN のデータ転送技術である非同期多重の ATM (Asynchronous Transfer Mode) を適用した PON 方式であり、B-PON と呼ばれる勧告 G.983 シリーズが 1998 年 10 月から 2001 年 12 月に掛けて順次制定された⁽⁹⁾。

その後 100M イーサネットの普及に対応して 1 Gbit/s の PON 方式が IEEE802 委員会と ITU-T の両方で検討され、それぞれ 2004 年に EPON (802.3ah 規格) が、2008 年に G-PON (G.984 勧告) が制定された。EPON はイーサネットのパケット通信に特化されているが、G-PON は電話など既存サービスの収容を考慮し、監視制御系も充実している点が異なっている。更に 10 Gbit/s の PON 方式が IEEE802 委員会では 10G-EPON (802.3av 規格) として、ITU-T では XG-PON (勧告 G.987) としてそれぞれ 2009 年、2010 年に制定された⁽⁹⁾。

その後 ITU-T では、更に高速化を目指して WDM を用いて 40 Gbit/s 伝送を行う NG-PON2 と称する方式の標準化が進んでおり、現在に至っている⁽¹⁰⁾。

4. FTTH の商用化

日本における FTTH の本格的な商用化は、世界に先駆けて 2001 年 8 月から始まった。当初は、STM-PON 方式またはメディアコンバータ (MC) により 10 Mbit/s イーサネット (10BASE-T) をインタフェースとする帯域シェアサービスであった。2002 年からは ITU-T 勧告ができたばかりの B-PON が導入された。その後、現在最も一般的な 100 Mbit/s イーサネット (100BASE-T) をインタフェースとするサービスが 2005 年 11 月から提供されている。NTT は 100 Mbit/s サービスの提供に G-PON ではなく EPON を導入しているが、これは今後の通信網はパケット通信で統合されていく動向にあることを考慮してデータ通信に特化し、電話は VoIP (Voice over IP) によって提供していることによる。更に、2010 年 5 月からは NGN (Next Generation Network) の導入に伴って 200 Mbit/s のサービスも提供されている。

現在、最も高速のサービスは 1 Gbit/s であり 2014 年 7 月から EPON の帯域シェアにより提供されている。この 1 Gbit/s サービスの普及が進むと、10G-EPON 更に NG-PON2 が導入されていくものと思われる。

5. 光アクセスのこれから

5.1 光アクセスの国際標準化と FTTH の高速化

既に述べてきたように、PON 方式の国際標準化は ITU-T と IEEE 802 委員会の 2 系統が制定されてきたが、これらを統合する検討が進んでいる。これまでに 10G-EPON の制御系を強化して XG-PON と同等の規格とする SIEPON (Service Interoperability in EPON) と称する標準化ができており、システム開発が進んでいることから、近い将来に導入されていくものと思われる⁽¹⁰⁾。

FTTH のサービス速度に関しては、映像サービスやクラウドサービスの普及に伴い、継続的に高速化が進むであろう。当面は、既に提供されている 1 Gbit/s サービスの普及が進むであろう。

5.2 アクセスネットワークの向かう道

アクセスサービスの利用形態が、今大きく変わりつつある。すなわち、スマートホンやタブレット PC など携帯端末の著しい性能向上と移動系通信の高速化との相乗効果によって、ブロードバンドのけん引者が光アクセスから無線アクセスに取って変わろうとしていることである。この変化により、携帯端末の利便性はますます高まり、通信のみならず生活に必要な機能の集約化が進むものと思われる。そのため無線アクセスの高速化とトラヒックの増大が限りなく続き、それに対処するために高マイクロ波帯やミリ波の利用及びフェムトセル化が進み、行き着く先は無線アクセスと光アクセスの一体化が想定される⁽¹¹⁾。

そのような将来のアクセスネットワークのイメージを図 5 に示す。光アクセスは、無線信号の伝送媒体としての役割が増すことになろう。更に、公衆用無線通信と業務用無線通信の融合が進むであろう。既に業務用の典型であるタクシー無線では、通常のスマートホンによる IP 無線を利用することにより独自の設備を持たない事業者が増えている。今後は、利便性の観点からも防災行政無線、ITS (Intelligent Transport System)、更に家電の遠隔操作などの IoT (Internet of Things) 機能が携帯端末に統合化されていくものと思われる。

したがって、将来の光アクセスは、既設の光ケーブル網を有効に活用できるよう PON 方式に多波長 WDM を適用し、固定系・移動系を問わず各種の通信や放送に利用可能なプラットフォームになることが期待される。

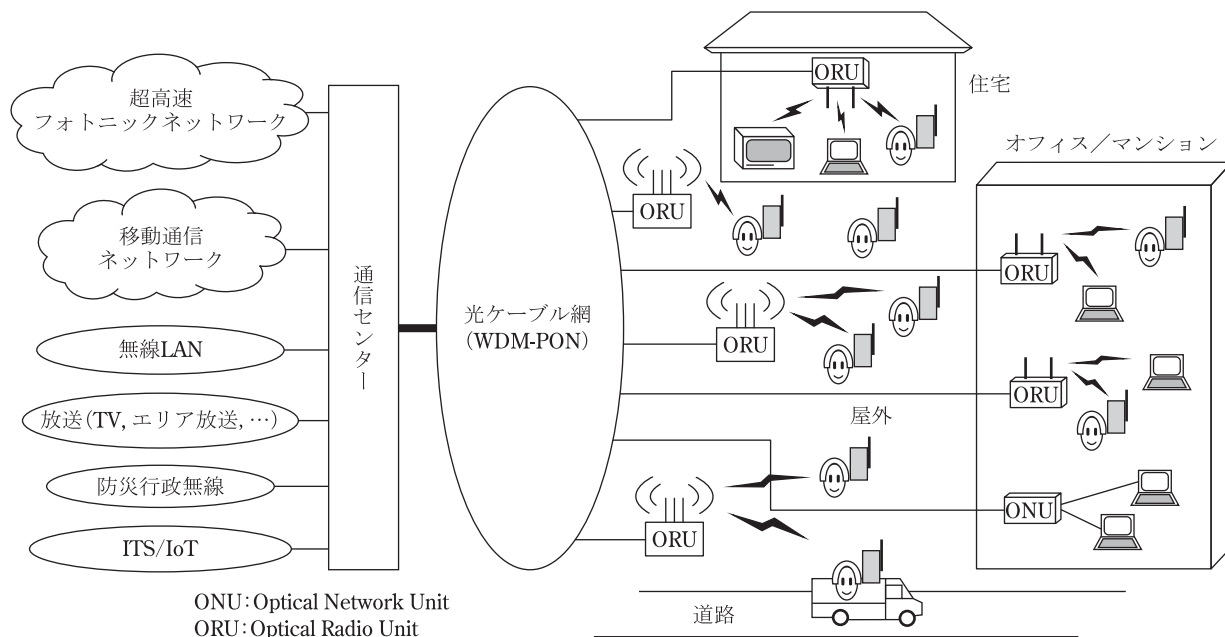


図5 光アクセスネットワークの将来イメージ

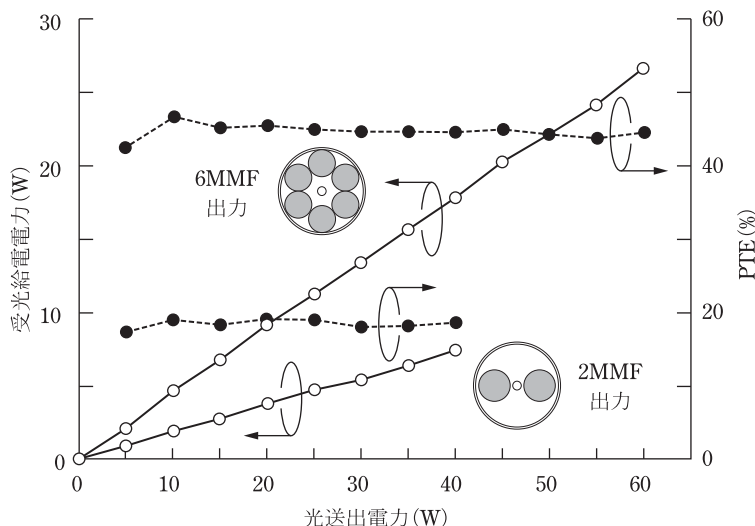


図6 ダブルクラッドファイバによる電力給電

5.3 光・無線融合技術

このようなアクセスネットワークの実現には、光と無線それぞれの特質を最大限に発揮させる光・無線融合技術の研究開発が重要となるが、その具体例はROF (Radio over Fiber) である。ROF には、無線信号をアナログ光伝送する“A-ROF”，無線信号を A-D 変換してデジタル光伝送した後 D-A 変換して元の無線信号を得る“D-ROF”及び光の周波数帯に変換された無線信号をコヒーレント光伝送する“C-ROF”がある。

A-ROF は、電波の届かない地下街などへの移動系通信の無線信号伝送、放送難視地域でのギャップファイラー (受信状態の良いアンテナで受けた信号を難視域に伝送)

あるいはエリア放送のセンターから送信アンテナへの放送波伝送などに使われている。D-ROF は、移動通信のトラフィック増への対処としてセルを複数の小セルに分割する際、元の基地局と小セルのアンテナ間の伝送路として近年広く使われている。C-ROF は、今後のミリ波帯やテラヘルツ帯を利用するシステムにおいて特徴が発揮できる。例えば、新幹線の車内で Gbit/s 級の無線 LAN サービスを実現する方法として、列車と軌道脇の基地局間を数十 Gbit/s のミリ波通信でつなぎ、そのミリ波信号を C-ROF で新幹線通信センターへつなぐようなシステムが検討されている⁽¹²⁾。

5.4 光ファイバ給電技術

移動系通信が従来の電話にとって代わりライフラインとなってきたこと、また小セル化が一層進むことを考えると、小セルの機器を動作させる電源の高信頼化と低コスト化が重要な課題となる。小セル化に伴い送信電力は小さくなることから、無線信号伝送用の光ファイバを用いて機器動作に必要な電源の電力を給電できることが望ましい。光ファイバによる給電は、他の用途にも求められる技術である。

中心部が信号伝送用の単一モードファイバで外周を電力伝送用の多モードファイバ (MMF) とするダブルクラッドファイバ (DCF) を用いると、10 W 程度の給電の実現可能性がある。図 6 は 300 m の DCF での実験例であるが 6 本の MMF で取り出した場合 40% を超える光電力伝送効率 (PTE) が得られている⁽¹³⁾。

6. む す び

光アクセスの研究が緒についてから 30 年を経て、当時の基幹伝送路並みの 1 Gbit/s という速度が家庭でも利用できるようになった。近年は移動系通信の目覚ましいブロードバンド化が著しく、今後は光・無線両技術の融合した新たなアクセスネットワークへの展開が望まれる。

文 献

- (1) 山縣 淳, 竹本憲治, 岡田賢治, “光ファイバ広帯域分配システムの構成法,” 信学論 (C), vol. J69-C, no. 3, pp. 262-272, March 1986.
- (2) T. Miki and J. Yamagata, “Fiber optic transport systems for present and future local networks,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. SAC-4, no.

9, pp. 1531-1537, 1986.

- (3) S. Shimada, K. Hashimoto, and K. Okada, “Fiber-optic subscriber loop systems for integrated services—The strategy for introducing fibers into the subscriber network,” J. Lightwave Technol., vol. 5, no. 12, pp. 1667-1675, 1987.
- (4) “電気通信サービスの提供状況・利用状況,” 平成 27 年度版情報通信白書, pp. 378-380, 2015.
- (5) 三木哲也, “高速広帯域通信網を目指して,” NTT R & D, vol. 44, no. 5, pp. 399-436, 1995.
- (6) FSAN, <https://www.fsan.org/>
- (7) W. Rosenau, “Optical fibre pilot projects,” Telecommunications Local Networks, W.K. Ritchie, and J.R. Stern, eds., CHAPMAN & HALL, pp. 19-42, 1993.
- (8) 三木哲也, 篠原弘道, “アクセスネットワークの現状と将来展望,” 信学誌, vol. 84, no. 2, pp. 77-83, Feb. 2001.
- (9) 葉玉寿弥, 吉本直人, 木村俊二, 可見淳一, “高速・低消費電力化を目指す次世代 PON 技術,” 信学誌, vol. 95, no. 1, pp. 62-67, Jan. 2012.
- (10) 浅香航太, 可見淳一, “次世代光アクセスシステム (NG-PON2) の標準化動向,” NTT 技術ジャーナル, vol. 27, no. 1, pp. 74-77, 2015.
- (11) 川西哲也, “[5G ネットワーク] を支える光ファイバ無線,” ITU ジャーナル, vol. 45, no. 11, pp. 36-39, 2015.
- (12) P.T. Dat, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, “WDM RoF-MMW and linearly located distributed antenna system for future high-speed railway communications,” IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 10, pp. 86-94, Oct. 2015.
- (13) M. Matsuura, H. Furugori, and J. Sato, “60 W power-over-fiber feed using double-clad fibers for radio-over-fiber systems with optically powered remote antenna units,” Opt. Lett., vol. 40, no. 23, pp. 5598-5601, 2015.

(平成 28 年 3 月 15 日受付 平成 28 年 4 月 4 日最終受付)



三木 哲也 (名誉員: フェロー)

昭 40 電通大・電気通信・電波卒。昭 45 東北大学院博士課程了。日本電信電話公社 (現 NTT) を経て、平 7 電通大教授。平 20 同大学名誉教授。光通信、ネットワーク分野の研究に従事。昭 53 本会業績賞、平 23 本会功績賞各受賞。