

## 高速・低消費電力化を目指す 次世代 PON 技術

PON Technologies for Energy Efficient Broadband Network Infrastructure

葉玉寿弥 吉本直人 木村俊二 可児淳一

### Abstract

ブロードバンドサービスの普及が進んでいる。日本では一般家庭向けに既に 1 Gbit/s クラスのブロードバンドネットワークアクセスサービスが提供されている。多チャネル映像サービスやデジタルデータの高速転送を実現できる更なる高速大容量ネットワークアクセスシステムとして、10 Gbit/s 級の Passive Optical Network (PON) が実用化されようとしている。本稿では、PON の標準化動向を概説し、次世代の 40 G・100 Gbit/s 級光アクセスシステム技術を展望する。更に、通信ネットワークの低消費電力化の社会的要請に応える PON の低消費電力化技術に関する研究成果を紹介する。  
キーワード：ブロードバンド、光アクセスシステム、低消費電力化、国際標準化、PON

#### 1. はじめに

FTTH (Fiber To The Home) と呼ばれる、光ファイバによるブロードバンドネットワークアクセスサービスの日本全国の契約者数が 2010 年度末時点で 2,024 万契約に達した<sup>(1)</sup>。日本の世帯数は約 5,000 万なので、4 割の世帯が既に光ファイバのネットワークによって結ばれたことになる。1990 年代後半からインターネットの利用は拡大を続けてきた。現在では、Web ページを介したニュースの閲覧やコミュニティ情報の共有、オンラインショッピングや飲食店情報の検索、ネット配信の動画視聴、ソーシャルメディア上でのコミュニケーションなど、日常生活に欠かせないアプリケーション利用がますます広がりつつある。現在、FTTH はこのような多彩なアプリケーション利用を支える社会基盤を形成する主

要な技術となっている。

FTTH は道路や水道と同じような社会的重要性を持つ社会基盤であるが、道路や水道とは大きく異なる側面を持つ。それは、ユーザ当りの通信トラフィックの急拡大が現時点で継続していることであり、それに代る新たな技術の導入が今後も不可欠であることである。2000 年にスタートした NTT のフレッツ ISDN の通信容量は 144 kbit/s であった。2000 年以後、利用が拡大した ADSL サービスはユーザ要望に応えるべくその後の技術開発を重ね、近距離区間において 50 Mbit/s (通信事業者ビル→ユーザ方向) を実現したものもある。FTTH の先駆けとして 2001 年に登場した NTT 東日本・NTT 西日本の B フレッツサービスでは 10 Mbit/s、その後 2004 年に登場したフレッツ光サービスでは 100 Mbit/s のサービスが、更に、現在では 1 Gbit/s クラスの高速広帯域サービスが提供されている。これらのサービスでは、後に説明する GE-PON と呼ばれるシステムを主に利用している。大容量のネットワークアクセスサービスの普及は、宅内ネットワークを構成する LAN の標準規格であるイーサネットの大容量化の進展を追うように進んできた。今後も LAN の大容量化に応じ FTTH の大容量化が求められることには疑問の余地がない。

FTTH を介した動画コンテンツの配信サービスが拡大している。例えば、2008 年にサービスを開始したひかり TV は、IP (Internet Protocol) を利用した映像伝送サービスであり、2011 年 3 月末には日本全国で 150 万契約を超えた。地上デジタル放送や Video on De-

葉玉寿弥 正員：シニア会員 日本電信電話株式会社 NTT 未来ねつと研究所  
E-mail hadama.hisaya@lab.ntt.co.jp  
吉本直人 正員：シニア会員 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所  
E-mail yoshimoto.naoto@lab.ntt.co.jp  
木村俊二 正員：シニア会員 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所  
E-mail kimura.shunji@lab.ntt.co.jp  
可児淳一 正員：シニア会員 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所  
E-mail kani.junichi@lab.ntt.co.jp  
Hisaya HADAMA, Senior Member (NTT Network Innovation Laboratories, NIPPON TELGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan), Naoto YOSHIMOTO, Shunji KIMURA, and Jun-ichi KANI, Senior Members (NTT Access Network Service Systems Laboratories, NIPPON TELGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.95 No.1 pp.62-67 2012 年 1 月  
©電子情報通信学会 2012

mand 型の動画コンテンツを通信ネットワークを介して視聴する場合、HD (High Definition) クラスの映像であれば約 20 Mbit/s の通信トラフィックを生む。複数チャネルの同時利用や高精細なクラスの映像利用が拡大すれば、更なる FTTH の大容量化が求められる。

FTTH の低消費電力化も重要な社会的要請である。NGN (Next Generation Network) において、ONU の消費電力量はネットワーク全体の 60% を占めるとの試算がある<sup>(2)</sup>。ONU に対しては、1 台当たりの電力消費量の削減が僅かであっても総数としての電力量の削減効果は大きいと見られるため、徹底的な低消費電力化が求められている。

本稿では、FTTH を実現する PON (Passive Optical Network) の国際標準化の動向を概説し、PON の更なる大容量化を実現する技術について述べる。また、低エネルギー社会の実現に向けた社会的要請に応える、ONU の低消費電力化技術に関する我々の研究成果を示す。

## 2. 10 Gbit/s 級 PON 技術の進展

FTTH として、PON (Passive Optical Network) と呼ばれる低コスト化を追求して開発された光アクセスシステム技術が広く用いられている<sup>(3)</sup>。PON では、通信事業者ビルとユーザ宅をつなぐ光ファイバ線路を、受動的な光部品により分岐させて利用する。この分岐した線路を ODN (Optical Distribution Network) と呼んでおり、分岐したファイバの先に各ユーザ宅内装置 (ONU: Optical Network Unit) が接続される。分岐点よりも通信事業者ビル側の光ファイバ、及び、通信事業者ビルに設置されている通信装置 (OLT: Optical Line Termi-

nal) のインタフェースを複数のユーザで共用できるので低コストである。このように低コスト化を追求した PON システムは電力消費の少なさにおいても他のアクセス伝送方式と比し優位性が高い。

PON 技術の標準化は ITU-T Study Group 15 (SG15)、及び IEEE において進められてきた。PON 技術の標準化の歴史を図 1 に示す。ITU-T においては、SG15 を中心として議論され 2004 年に G. 984 シリーズが勧告化 (2003 年改訂) された<sup>(4)</sup>。これは、上り・下り、それぞれ、622 Mbit/s・1.25 Gbit/s までのギガビット PON を GTC (G-PON Transmission Convergence) フレームベースで実現するものであり G-PON と呼ばれている。その後、更なる高速化の仕様として 10G-PON の検討が進められ<sup>(5)</sup>、2010 年に XGPON (X はローマ数字の 10 の意) として、上り・下り、それぞれ、2.5 Gbit/s・10 Gbit/s の PON システムが標準化された<sup>(6)</sup>。

一方、IEEE においては、2001 年にイーサネットの標準仕様を扱う 802.3 委員会に Ethernet in the First Mile と称するタスクフォースが作られ、イーサネットをベースとした通信速度 1 Gbit/s の PON システム (GE-PON) の標準化検討が開始された。2004 年に IEEE Standard 802.3ah として標準化された。その後、2006 年に通信速度 10 Gbit/s の PON (10G-EPON) の技術仕様制定を目指し 10G PHY タスクフォースが結成された。2009 年には 10G-EPON の物理層規定として IEEE Std 802.3av が標準化されるに至った。2009 年からは IEEE 1904.1 (SIEPON: Service Interoperability in Ethernet Passive Optical Networks) と名付けられた活動が IEEE Communications Society のもとに開始され、システムレベルで相互接続性のある規格を目指して活動が進められている。SIEPON の標準化のターゲットを

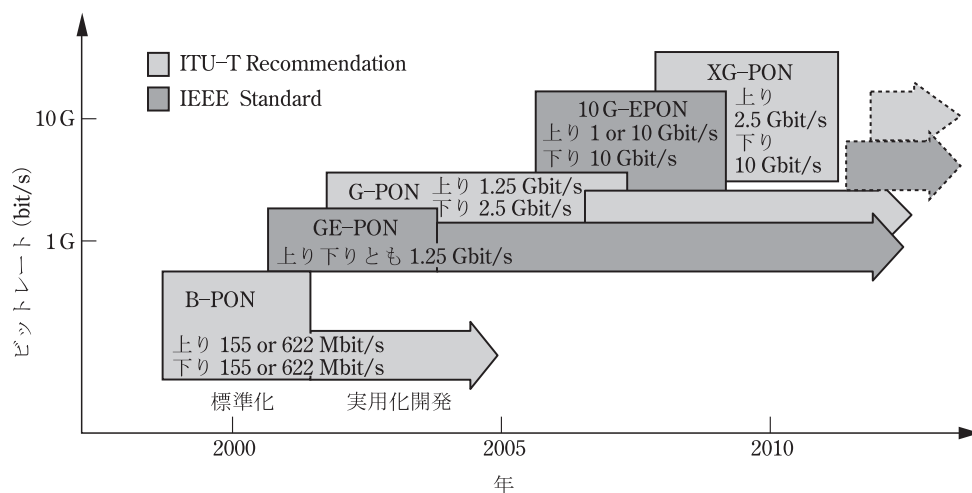


図1 PON 技術の標準化の歴史 PON 技術の標準化は ITU-T、及び IEEE において進められてきた。ITU-T において B-PON、G-PON、XG-PON が、IEEE において GE-PON、10G-EPON が標準化されてきた。

SIEPON 標準化対象

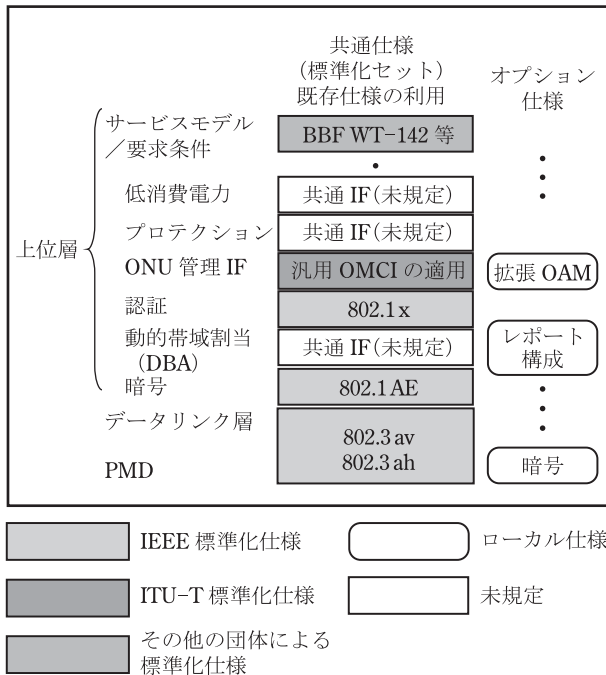


図 2 SIEPON の標準化のターゲット IEEE 1904.1 (SIE-PON) と名付けられた活動が IEEE Com. Soc. のもとに開始され、システムレベルで相互接続性のある規格を目指して活動が進められている。

図 2 に示す。

FSAN (Full Services Access Networks) という業界団体においては、10 Gbit/s 級の PON の更に次世代の PON システムの標準化に向けた議論が開催されている。FSAN は、光アクセスシステムの規格の標準作成を目的として活動を行っており、ITU-T の標準仕様を目指して、将来標準化するべき光アクセスネットワーク技術

の明確化を行っている。FSAN において、NG-PON2 と名付けた将来の PON システムの議論が開始され、要求仕様をまとめた White Paper の作成が行われている<sup>(7)</sup>。10 G 級 PON 及び NG-PON2 の要点を表 1 にまとめる。

フレッツ光サービス等に広く用いられている GE-PON システムの後継である 10G-EPON については、MAC 機能を実現したチップセットの開発が報告されている<sup>(8)</sup>。10G-EPON 規格には、伝送容量が双方向共に 10 Gbit/s である対称型、下りは 10 Gbit/s・上り 1 Gbit/s である非対称型が定義されている。GE-PON からのスムーズなサービスアップグレードを実現するために、10G-EPON の OLT は、E-PON の ONU・10G-EPON 非対称型の ONU・10G-EPON 対称型の ONU のうちのいずれでも共存しつつ接続可能な仕様となっている<sup>(5)</sup>。

### 3. 次世代の光アクセスシステム技術

FSAN において 10 Gbit/s を超えて更なる高速広帯域光アクセスを実現する技術の標準化に向けた検討が始まっている<sup>(7)</sup>。アクセスネットワークを構成するためには、低コストでのシステム化が必須条件であり、この観点からの技術の選択が重要である。図 3 に、我々が考える PON 技術の発展の方向性を示す。10G-EPON においては既に波長多重技術が用いられている<sup>(9)</sup>。我々は、波長多重数を増加させることによって、システムコストの大幅な増大を招くことなく高速広帯域化を実現できるのではないかと予想し、WDM/TDM-PON の検討を進めている<sup>(9)</sup>。FTTH のみならず、急速に増大している携帯電話基地局への適用を想定すれば、更なる利用波長数の拡大や光 CDMA のような多重化技術の導入が求められる<sup>(10)</sup>。

表 1 10G 級 PON 及び NG-PON2 の要点 IEEE は 10G-EPON の物理層規定として 802.3 av を定めた。ITU-T においては 10 Gbit/s 級 PON として NG-PON1 が標準化された。また、FSAN では次世代 PON システム (NG-PON2) の議論が開始されている。

| システム名    | 10G-EPON   | NG-PON1 (XG-PON1)                          | NG-PON2         |
|----------|--|--|-----------------|
| 標準化規格名   | IEEE 802.3 av  | ITU-T 勧告 G. 987 シリーズ                       | FSAN で議論        |
| 標準化完了時期  | 2009 年 10 月  | 2010 年 6 月                                 | 2015 年頃         |
| 伝送速度     |  |  |                 |
| 下り       | 10.3125 Gbit/s                                       | 9.95328 Gbit/s                             | 未定 (>40 Gbit/s) |
| 上り       | 10.3125 Gbit/s                                       | 2.48832 Gbit/s                             | 未定 (>10 Gbit/s) |
| 使用波長     |  |  |                 |
| 下り       | 1,575~1,580 nm                                       | 1,575~1,580 nm                             | 未定              |
| 上り       | 1,260~1,280 nm                                       | 1,260~1,280 nm                             | 未定              |
| 伝送距離     | 10 km/20 km  | 20 km (最大 60 km)                           | 未定 (>40 km)     |
| 光線路損     | 5~20 dB (PR10)<br>10~24 dB (PR20)<br>15~29 dB (PR30) | 14~29 dB (Nominal1)<br>16~31 dB (Nominal2) | 未定              |
| 収容 ONU 数 | 32 台以上   | 64 台以上                                     | 未定              |
| 伝送フレーム   | Ethernet   | GTC  | 未定              |

文献(9)において我々が提案している WDM/TDM-PON の構成を図4に示す。10G-EPON 技術をベースとし、複数の波長を利用することによってトータルスループット 40 Gbit/s 級の通信を実現する。OLT のラインカード (LC) は複数の波長を瞬時に切り換えて通信できる機能を備える。各 ONU はあらかじめ割り当てられた特定波長を用いて通信を行う。LC は、特定波長を用いる各 ONU に対して動的にタイムスロットを割り当てる機能により、各 ONU に対する最適帯域割当てを実現する。また、OLT において各 LC が通信を行う波長を

動的に変更する機能により、波長ごとに生じ得るトラヒックの片寄りを解消し OLT 配下の全ての ONU に対する公平な帯域割当てを実現する。

このような構成のメリットとして、既存の光ファイバ網をそのまま利用できることに加え、LC を増設していくことによってスループットの拡大が比較的容易に実現できることが挙げられる。図4の構成において、LC が1枚だけ設置されているものとする、全ての ONU がその LC との通信を行う形となり、10G-EPON と同様の性能が実現される。LC を4台に増やし、LC 当りの

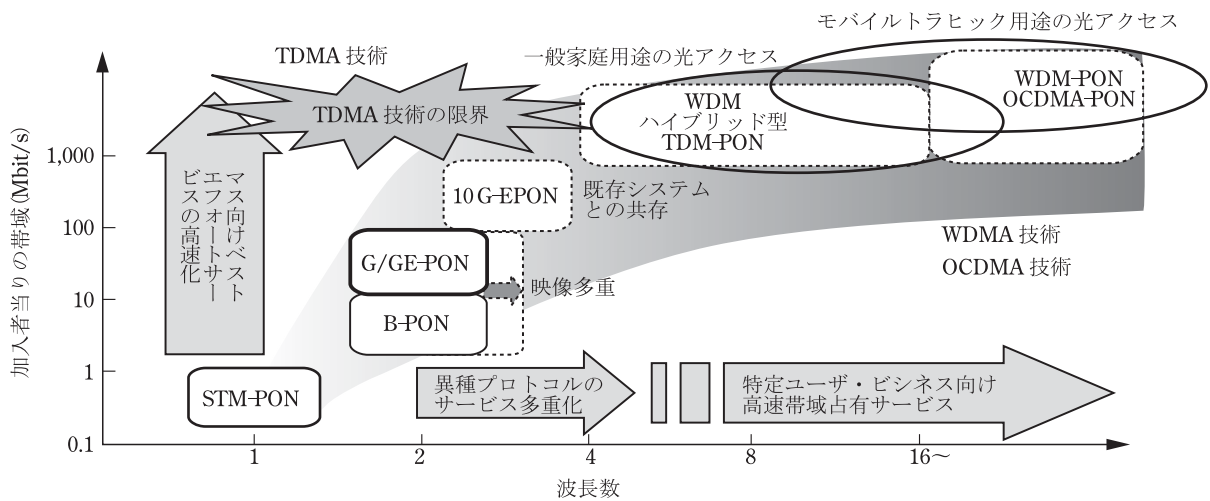


図3 PON 技術の発展の方向性 光アクセスシステムの高速度帯域化のためには、WDM での利用波長数拡大や光 CDMA のような多重化技術の導入が求められる。

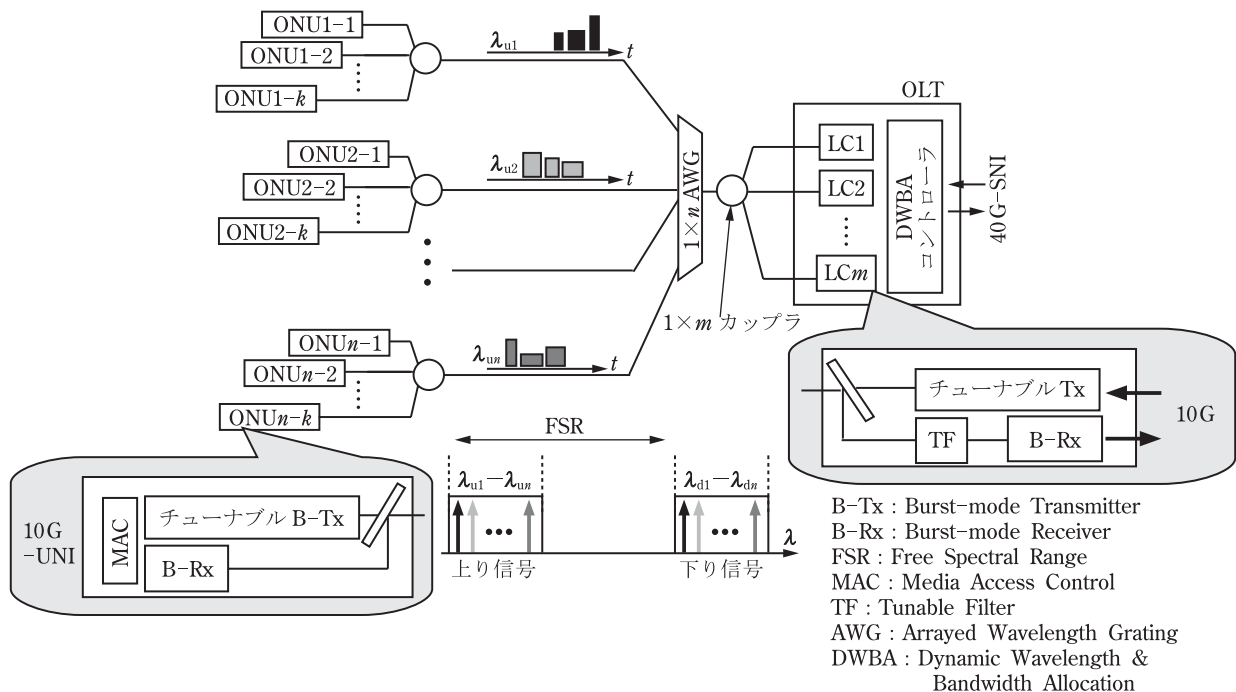


図4 WDM/TDM-PON の構成 10G-EPON 技術をベースとし、複数の波長を利用することによってトータルスループット 40 Gbit/s 級の拡張性の高いシステムを実現できる。



ONU 数を 1/4 にすることによって ONU 1 台当りの帯域割当てを 4 倍に拡張することができる。

#### 4. ONU の低消費電力化技術

GE-PON の ONU 1 台当りの消費電力を図 5 に示す。2004 年に初めて導入された時点で消費電力は 10 W を超えていたが、FPGA で実現していた機能の ASIC 化、ASIC のプロセス微細化、省電力型の光部品の採用等による継続的な改善の結果、現在では 4 W を下回るレベルとなっている。

更なる低消費電力化を進めるためには、通信を行っていないときに ONU の一部の機能を停止させるスリープモードを導入することが有効である。

ITU-T では 4 種類の ONU スリープを定義している<sup>(11)</sup>。① Power Shedding は ONU の宅内向きインタ

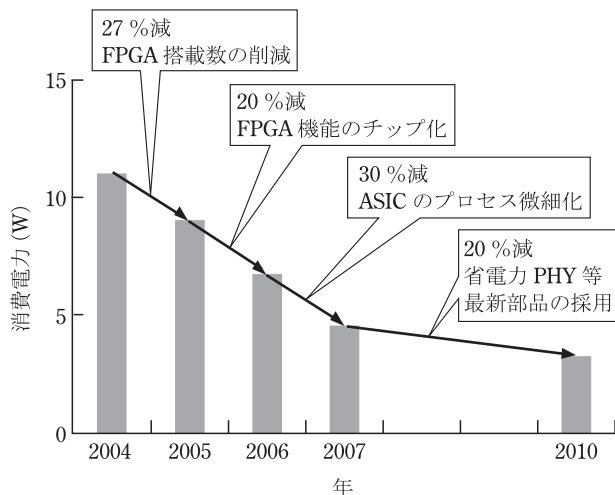


図 5 GE-PON の ONU 1 台当りの消費電力 ASIC 化、ASIC のプロセス微細化、省電力型の光部品の採用等、継続的な改善により、ONU の低消費電力化を進めてきた。

フェースのうち通信を行っていないものについて電源をオフとする。② Dozing は上り信号が存在しないとき、ONU の宅外向き送信機の電源をオフとする。③ Deep Sleep は上り信号と下り信号とが共に存在しないとき、宅外向きインタフェースの送受信機の電源をオフとする。ONU は OLT からの制御信号を受け取れなくなるため、OLT からの指示で起動することは不可能となる。④ Cyclic Sleep は上り・下り信号共存しないとき、宅外向きインタフェースの送信機と受信機の電源を間欠的にオンオフする。周期的に短時間だけオン状態とし、OLT からの制御信号を受け取って下りトラフィックの存在確認を行う。下りトラフィックが存在する場合、Cyclic Sleep を終了する。なお、ITU-T では当初、Cyclic Sleep を“Fast Sleep”と称しており、結果として、文献(11)では“Fast Sleep”，文献(6)では“Cyclic Sleep”の名称が使われているが、本稿では Cyclic Sleep とする。

我々は 10G-EPON を想定し、トラフィックが少ないときには電力消費の比較的少ない 1 Gbit/s の通信を行い、トラフィックが多いときには 10 Gbit/s の通信を行う仕組み (ALR: Alternative Link Rate) を、Cyclic Sleep と組み合わせたハイブリッドパワーセービングの仕組みを提案した<sup>(12)</sup>。以下、下り信号の増減に応じた本制御の動作を示す。

- (1) Cyclic Sleep モード ( $i_1 < i_2$ ,  $T_1 < T_2$  と想定)
- フレームの到着間隔が  $i_1$  を超えたときにはスリープ時間幅  $T_1$ 、アクティブ時間幅  $T_a$  の Cyclic Sleep モード 1 に入る。
  - フレームの到着間隔が  $i_2$  を超えたときにはスリープ時間幅  $T_2$ 、アクティブ時間幅  $T_a$  の Cyclic Sleep モード 2 に入る。
  - フレームの到着間隔が  $i_1$  以下のときにはスリープしない。

A: リンクレート固定 (10 Gbit/s), スリープ時間幅 2 値 ( $T_s=10$  ms, 100 ms) の場合  
 B: リンクレート 2 値 (1 Gbit/s, 10 Gbit/s), スリープ時間幅固定 ( $T_s=10$  ms) の場合  
 C: リンクレート 2 値 (1 Gbit/s, 10 Gbit/s), スリープ時間幅 2 値 ( $T_s=10$  ms, 100 ms) の場合

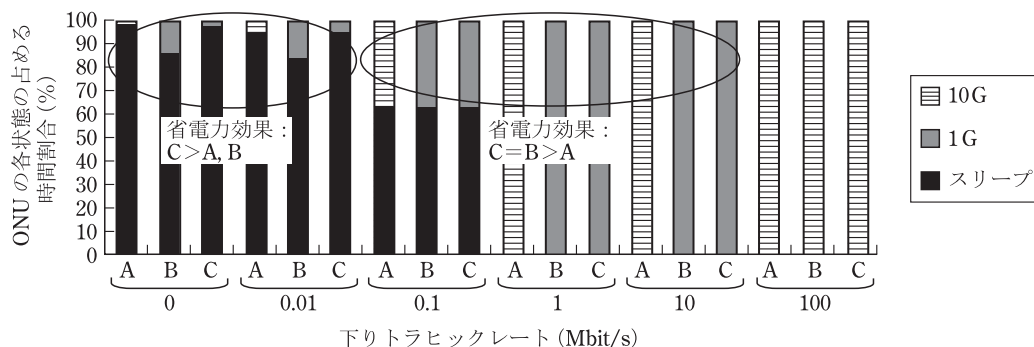


図 6 ONU の各状態の割合 提案方法 (C) は常に (B) よりもスリープ時間の割合が大きい。下りのレートが 0.1~10 Mbit/s の場合、(C) では、比較的消費電力の小さい 1 Gbit/s を用いて通信が行われている。

(2) ALR: Alternative Link Rate ( $r_1 < r_2$  と想定)

- ・ 信号のレートが  $r_2$  を超えたら 10 Gbit/s で通信する。
- ・ 信号のレートが  $r_1$  未満となったら 1 Gbit/s で通信する。

Cyclic Sleep と ALR を実現できるように物理構成とプロトコルを拡張した 10G-EPON ONU を用いて、実験を行った。対象 ONU への下りトラフィックを 0.01 Mbit/s から 2 秒ごとに 10 倍ずつ 100 Mbit/s まで増加させ、計 10 秒間における各状態 (Sleep, 1G アクティブ, 10 アクティブ) の時間占有比率を測定した。各パラメータ値は、 $i_1=20$  ms,  $i_2=200$  ms,  $T_1=10$  ms,  $T_2=100$  ms,  $T_a=1.6$  ms,  $r_1=20$  Mbit/s,  $r_2=50$  Mbit/s とした。イーサフレームのサイズは 64~1,518 Byte のランダム値とした。結果を図 6 に示す。(C) が提案方法である。比較評価のため、ALR を用いずリンクレートを 10 Gbit/s に固定した場合 (A)、及び、スリープ時間幅として  $T_2$  を用いず一つの値 ( $T_1$ ) だけを用いた場合 (B) の結果を合わせて示す。下りのレートが 0.1 Mbit/s より小さい場合、ONU は多くの時間割合でスリープしている。提案方法 (C) では常に (B) よりもスリープ時間の割合が大きいことが分かる。下りのレートが 0.1 Mbit/s より大きく 10 Mbit/s より小さい場合、提案方法 (C) では、10 Gbit/s の通信を行っている (A) の場合に比し消費電力の小さい 1 Gbit/s での通信が行われていることが分かる。

実際のより複雑なトラフィック状況下でのスリープ制御による ONU 省電力化の効果の解明は今後の重要な課題である。

## 5. おわりに

FTTH を支える光アクセスシステムとして、PON 技術の今後の技術開発の方向性を述べた。ユーザーズに応じた高速化と、社会的要請に応えるための省電力化が重要な課題であることを説明し、標準化と研究開発の進展を紹介した。

## 文 献

- (1) 総務省統計局総合統計データ月報。  
<http://www.stat.go.jp/data/getujidb/index.htm> (2011 年 7 月確認)。
- (2) A. Otaka, "Power saving ad-hoc report," IEEE 802.3av, Sept. 2008.  
[http://www.ieee802.org/3/av/public/2008\\_09/3av\\_0809\\_otaka\\_1.pdf](http://www.ieee802.org/3/av/public/2008_09/3av_0809_otaka_1.pdf) (2011 年 7 月確認)。
- (3) "技術基礎講座 GE-PON 技術," NTT 技術ジャーナル, vol. 17, no. 8, pp. 71-74, 2005.
- (4) ITU-T 勧告 G. 984 シリーズ, "Gigabit-capable passive optical net-

works (GPON)," 2004.

- (5) 可児淳一, 鈴木謙一, "次世代 10 G 級 PON の標準化動向," NTT 技術ジャーナル, vol. 21, no. 9, pp. 90-93, 2009.
- (6) ITU-T 勧告 G. 987 シリーズ, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON)," 2010.
- (7) 矢島祐輔, 柄川 淳, "ITU-T/FSAN における光アクセス標準化動向—NG-PON—," 信学技報, CS2011-3, CQ2011-8, pp. 11-16, April 2011.
- (8) M. Nakanishi, K. Kawai, J. Kato, N. Miura, A. Miyazaki, H. Kamitsuna, H. Katsurai, N. Tanaka, Y. Ohtomo, M. Urano, and T. Shibata, "An SoC demonstration of ONU discovery and dynamic bandwidth allocation for 10G/1G dual-rate 10G-EPON," OSA/OFC/NFOEC2011, pp. 1-3, March 2011.
- (9) H. Nakamura, S. Tamaki, K. Hara, S. Kimura, and H. Hadama, "40 Gbit/s  $\lambda$ -tunable stacked-WDM/TDM-PON using dynamic wavelength and bandwidth allocation," OSA/OFC/NFOEC2011, pp. 1-3, March 2011.
- (10) S. Kaneko, K.S. -Yuep, N. Miki, H. Kimura, H. Hadama, K. Takiguchi, H. Yamazaki, T. Yamada, and Y.T. Doi, "Spectral multi-level ASK BPSK OCDM based on electrical-domain spatial code spreading and self-homodyne detection," ECOC2010, pp. 1-3, Sept. 2010.
- (11) ITU-T 補足文書 G. Sup45, "GPON power conservation," 2009.
- (12) R. Kubo, J. Kani, H. Ujikawa, T. Sakamoto, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Hybrid power-saving mechanism with cyclic sleep and adaptive link rate functions for 10G-EPON systems," Electron. Lett. vol. 46, no. 13, pp. 934-936, June 2010.

(平成 23 年 5 月 11 日受付 平成 23 年 10 月 3 日最終受付)



葉玉 寿弥 (正員: シニア会員)

昭 60 九大・理・物理卒。昭 62 同大学院修士課程了。同年 NTT 入社。以来、ATM バス網構成技術、広域ユビキタス網、新世代ネットワーク、光アクセス網の研究開発に従事。平 11 米国コロンビア大客員研究員。現在、NTT 未来ねっと研究所主席研究員。工博。



吉本 直人 (正員: シニア会員)

昭 61 北大・工・電子卒。昭 63 同大学院修士課程了。同年 NTT 入社。以来、青色レーザ、半導体光集積回路の研究、通信用高速光モジュールの開発と商用化、経済化 WDM システムの開発と商用化、次世代 PON システムの研究開発に従事。現在、NTT アクセスサービスシステム研究所主幹研究員、光アクセスシステムプロジェクトマネージャ。北大客員教授。工博。



木村 俊二 (正員: シニア会員)

平元早大・理工・電気卒。平 3 同大学院修士課程了。同年 NTT 入社。以来、40G 級伝送用集積回路設計技術、同実装技術、10G 級バースト伝送用光トランシーバ設計技術、100G 級 WDM/TDM-PON システム構成技術に従事。現在、NTT アクセスサービスシステム研究所主幹研究員。博士 (工学)。



可児 淳一 (正員: シニア会員)

平 6 早大・理工・応用物理卒。平 8 同大学院修士課程了。同年 NTT 入社。以来、光伝送方式、光アクセス方式の研究開発に従事。現在、NTT アクセスサービスシステム研究所主任研究員。博士 (工学)。