

ダブルクラッド光ファイバ給電技術の高効率・高強度パワー伝送

代表研究者 松浦基晴 電気通信大学 情報理工学研究所 准教授

1 はじめに

スマートフォンを筆頭とするモバイル端末の発展に伴い、無線通信のトラフィック量は急速に増大している。CISCO による無線通信データトラフィック予想においては、今後、2020 年に至るまでにおよそ年率 50%程度の勢いで増加していくことが見込まれている [1]。このような状況下で、無線通信ネットワークにおいても大きな変革が必要されている。その一つが無線基地局の小セル化である。セルとは基地局が無線端末と通信可能なエリアのサイズを意味する。無線信号の高速化に伴い、無線信号の周波数が高くなると伝搬損失も増大するため、必然的にセルサイズが小さくなってしまふ。このため、将来の無線通信ネットワークでは、より多くの無線基地局が必要不可欠になってくる。また、実際の無線通信ネットワークでは複数の無線基地局とそれらを管理する中央局で構成されるが、基地局と中央局間を高速かつ簡易に接続するため、電波を光に変換し、光ファイバで伝送する光ファイバ無線 (RoF: Radio-over-Fiber) が主流となって来る [2], [3]。

数多く敷設される無線基地局で重要になるのが電源の問題である。現状は通信回線とその関連設備は通信会社が管理・運営し、電力に関しては近隣の送電線からの引込みによる商用電源を利用するのが一般的である。このため、どちらかに障害が生じると通信サービスは停止する。とりわけ、落雷、大地震、台風などの自然災害などによる停電はその大きな要因となっている。2011 年の東日本大震災においては、無線通信サービスの遮断要因の 85.3%が停電による無線基地局への電力供給停止との報告があり [4]、通信会社としては電源設備も含めた通信と送電の一括管理を行えるシステムの構築が望まれる。また、無線基地局あたりの通信トラフィックはユーザの移動や活動時間によって大きく変動するものの、実際のシステムでは通信トラフィックの変動を考慮せず、想定する最大トラフィック量に対応可能な電力を常に供給している。このため、非常に効率の悪い電力供給を行っている。これに対し、例えば、夜間にユーザがほとんど不在のオフィス街などではセルサイズの小さい無線基地局を全て停止し、セルサイズの大きい無線基地局で僅かな通信トラフィックを賄うことで最大 60%の電力削減を出来るとの報告もあり [5], [6]、より効率の良い電力供給を行う手段が求められている。このような電源の問題を解決する一手段として、著者らは RoF と電力供給システムが融合した無線基地局のための光ファイバ給電技術の研究開発を進めている。

光ファイバ給電は、レーザからの出力を給電光として光ファイバ伝送することで、末端の装置を給電光の光エネルギーで駆動する電力供給システムである。組成材料がガラスであることから、従来の電気ケーブルによる電力線と比較して軽量で耐腐食性に優れるなどの特長がある。また、無誘導媒質のため電気を通さない電力線になる。このため、無線基地局などの高所にアンテナを敷設する設備においては、雷害の際、光ファイバで接続された通信設備への逆電流の被害を阻止する役割を果たすことが可能である。また、光ファイバ給電は複数の無線基地局を管理する中央局から送電されるため、それぞれの無線基地局の通信トラフィックに応じた電力制御も容易に行うことが可能である。さらに、電源設備の一元化によって電力設備の管理が格段に容易になる特長がある。一方、標準的な光ファイバの外径は人間の髪の毛程度の太さ (125 μm) で、光の通り道であるコアはそのさらに 1/10 程度の太さであるため、あまり高出力の給電光を伝送することが困難である。このため、これまでにも光ファイバを用いた光給電システムがいくつか報告されているが供給可能な電気電力は 100 mW 以下であった。一方、著者らが提案している光ファイバ給電では無線基地局の駆動を目的としているため、最低でも数 W の電気電力を供給する必要がある。

本研究では、無線基地局の駆動を目的として、独自技術である [7]-[12]、2 重コア構造を有するダブルクラッド光ファイバ (DCF: Double-Clad Fiber) を用いた光ファイバ給電技術の高度化に関する研究を行った。

2 ダブルクラッド光ファイバと光電変換素子

2-1 ダブルクラッド光ファイバ (DCF)

ダブルクラッド光ファイバ (DCF) は通常の単一モード (SM: Single-Mode) コアの外側に内部クラッドと外部クラッドを有する 2 重コア構造の光ファイバである。これまでは、主に、光ファイバ増幅器や光ファイバレーザなどの利得媒質として利用されてきた。このため、通常は SM コアに希土類元素が添加されているが本研究で使用している DCF は信号伝送用として使用するために、希土類元素は添加されていない DCF にな

っている。また、従来の光ファイバと比較して、内部クラッドにおいては、外側のクラッドが薄いため、伝送路として使用した際の曲げ耐性を検証する必要があるとし、基本特性評価の一環として、著者らが使用している DCF の曲げ特性評価を行った。

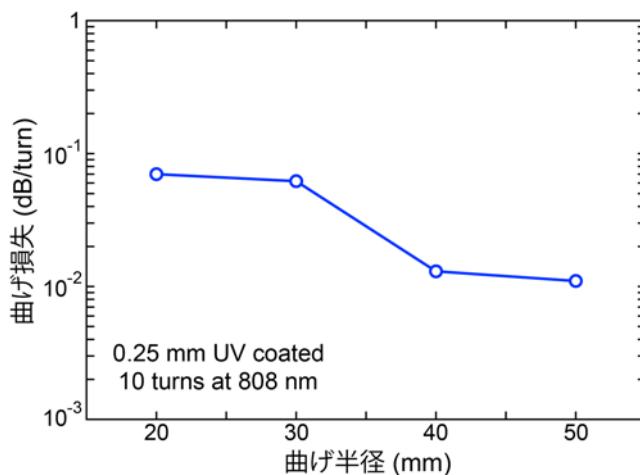


図 1: DCF の曲げ特性.

図 1 に測定した曲げ特性を示す。被測定光源としては、給電光と同じ波長 808 nm のレーザー光源を使用し、DCF は曲げ半径 20 mm～50 mm の範囲でそれぞれ 10 回巻き状態で曲げ損失の測定を行った。図より、曲げ半径 30 mm あたりから、わずかに損失は増大するものの、1 回巻あたりの曲げ損失は全てにおいて、0.1 dB 以下となることが確認された。これより、通常の通信インフラ線路として使用するには十分な曲げ耐性があることを明らかにした。

2-2 高強度光電変換素子

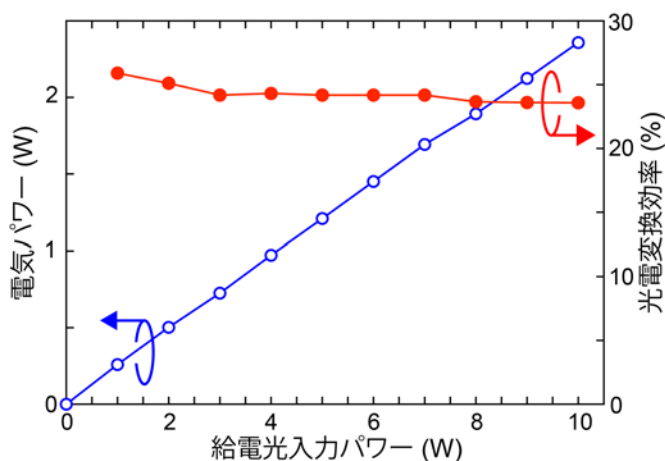


図 2: 光電変換素子の変換効率.

光ファイバ給電において、遠隔地の装置を駆動するためには、伝送した光エネルギーを電気エネルギーに変換する必要があるため、光電変換素子が必要不可欠となる。本研究では、最大光入力 10 W の光電変換素子を用いて、光ファイバ給電の実証実験を行っているが、実際に使用した光電変換素子の変換特性を測定した。その結果を図 2 に示す。給電光パワーを増大していくと、得られる電気パワーはほぼ線形に増大していくことがわかり、理想的な光電気変換が行われていることがわかる。また、変換効率においても同一の値が得られていることがわかる。給電光パワーの増大に際し、わずかに変換効率が低下しているが、これは、素子の温度上昇に伴い、変換効率の低下が原因と考えられる。

2 マルチチャンネル伝送実験

2-1 実験構成

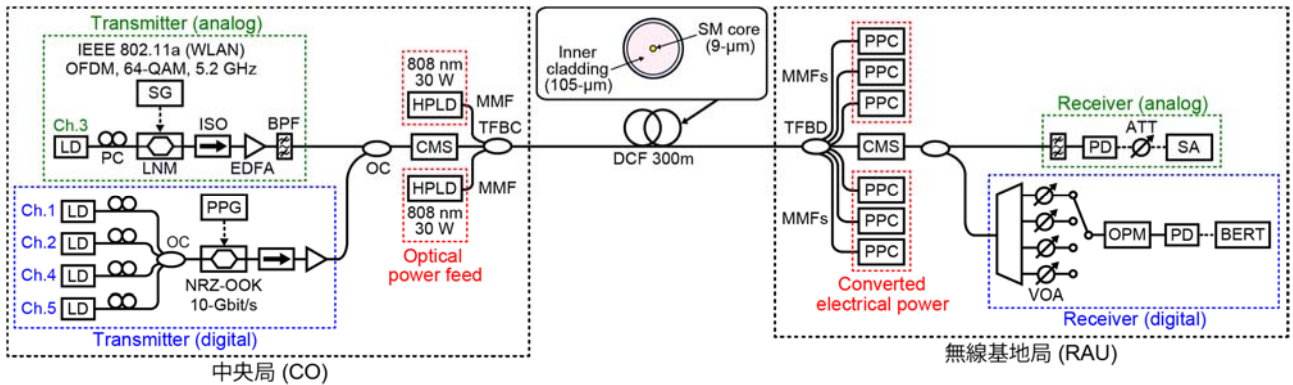


図 3: マルチチャンネル伝送実験の構成図.

図 3 に実験構成を示す。基本構成は中央局 (CO: Central Office) と無線基地局 (RAU: Remote Antenna Unit) 間を想定した下りの RoF 伝送になっている。信号光には単一チャンネルの光アナログ信号 (Ch. 3) と 4 チャンネルの光デジタル信号 (Ch. 1, 2, 4, 5) を用いており、それぞれのチャンネル間隔は一般的な波長多重伝送を想定した 100 GHz で配置されている。光アナログ信号は半導体レーザー (LD: Laser-Diode) からの出力を LiNbO_3 変調器 (LNM: LiNbO_3 Modulator) によるアナログ変調で生成している。データ信号には無線 LAN 規格に準拠したキャリア周波数 5.2 GHz の信号を使用している。光デジタル信号は波長の異なる 4 台の LD 出力を 1 台の LNM を用いて、4 チャンネルの伝送速度 10 Gbit/s の NRZ-OOK (Nonreturn-to-zero, On-off keying) 信号を生成している。これらの信号は増幅後、光カップラ (OC: Optical Coupler) を用いて合波され、クラッドモードストリッパー (CMS: Cladding Mode Stripper) に入力される。この CMS は給電光の反射成分が DCF 入力側の SMF (Single-Mode Fiber) に出射させないために用いている。給電光には、波長 808 nm の 2 台の高出力レーザー (HPLD: High-Power LD) を用いて、合計 60 W のパワーを DCF に入力している。信号光と給電光はテーパファイババンドル型の合波器 (TFBC: Tapered Fiber Bundle Combiner) で合波される。この際、信号光はそのまま SM コアを伝搬し、給電光はテーパファイバによって、DCF の内部クラッドに入射される構成となっている。実験に使用した DCF は伝送路長 300 m で、SM コア直径が $9 \mu\text{m}$ 、内部クラッド直径が $105 \mu\text{m}$ のものを使用した。伝送後、信号光と給電光はテーパファイババンドル型の分波器 (TFBD: Tapered Fiber Bundle Divider) で分波される。合波器同様、信号光はそのまま SM コアを伝搬するが、給電光は 6 本のテーパファイバによって、内部クラッドから給電光成分を取り出ししている。この構成でおよそ 70% の給電光を 6 本の MMF (Multi-Mode Fiber) で抽出している。残りの 30% は TFBD を透過し、後段の CMS で吸収されている。それぞれの MMF は 6 台の光電変換素子 (PPC: Photovoltaic Power Converter) に接続され、電気電力に変換している。CMS を通過した信号光は、それぞれの受信器に分波され、フォトダイオード (PD: Photo-Diode) で電気信号に変換された後、アナログ信号はシグナルアナライザ (SA: Signal Analyzer) を用いたエラーベクトル振幅 (EVM: Error Vector Magnitude) の評価、デジタル信号は符号誤り率検出器 (BERT: Bit-Error-Rate Tester) を用いた符号誤り率 (BER: Bit Error Rate) の評価によって、給電光パワーに対する伝送品質の測定を行っている。

2-2 パワー伝送効率

図 4 に給電光のパワー伝送特性を示す。(a) は HPLD の出力光から PPC 前段までの光パワー伝送効率、すなわち、伝送系全体の損失を示す。(b) は HPLD の出力光から PPC で変換された電気電力までの伝送効率を示す。伝送系においては、平均でおよそ 48.5% のパワーが伝送されていることになる。そのうち、およそ半分が 300 m DCF での伝送損失で、残りの半分が TFBD での分岐損失になる。電気電力の伝送効率については、実験に使用した PPC の光電変換効率がおおよそ 25% だったため、平均でおよそ 11.7% となった。これにより、60 W の給電光入力下で 7 W を超える電気電力を光ファイバ給電で送電することが可能であることがわかった。この値は従来技術の 100 倍に匹敵する給電能力を有しており、小型の無線基地局であれば、単独駆動も可能な電気電力を供給可能であることを示していると言える。

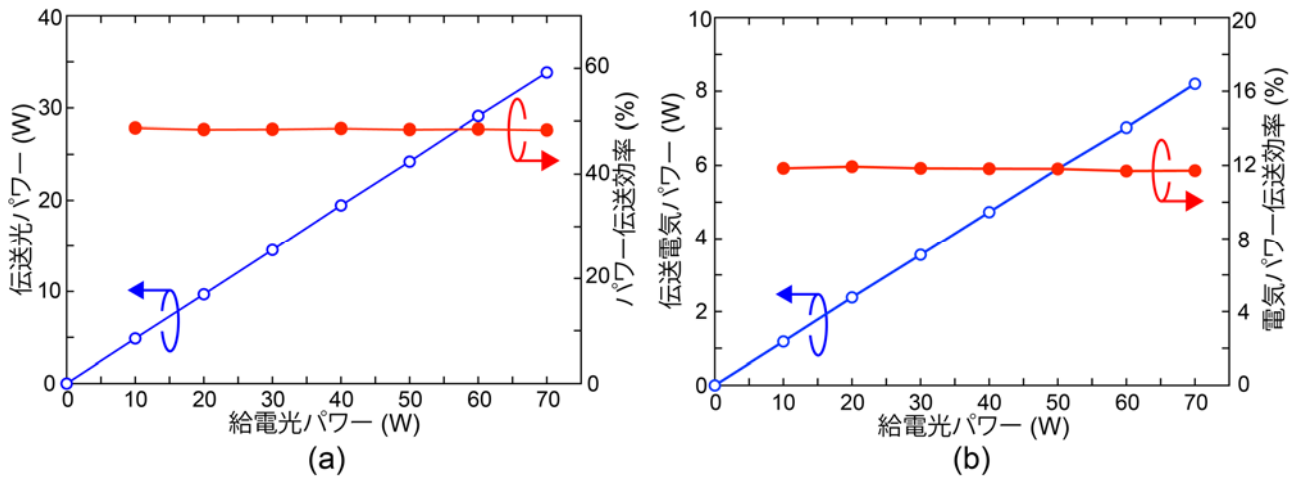


図 4: (a) 光および (b) の伝送パワーと伝送効率.

2-3 信号伝送特性

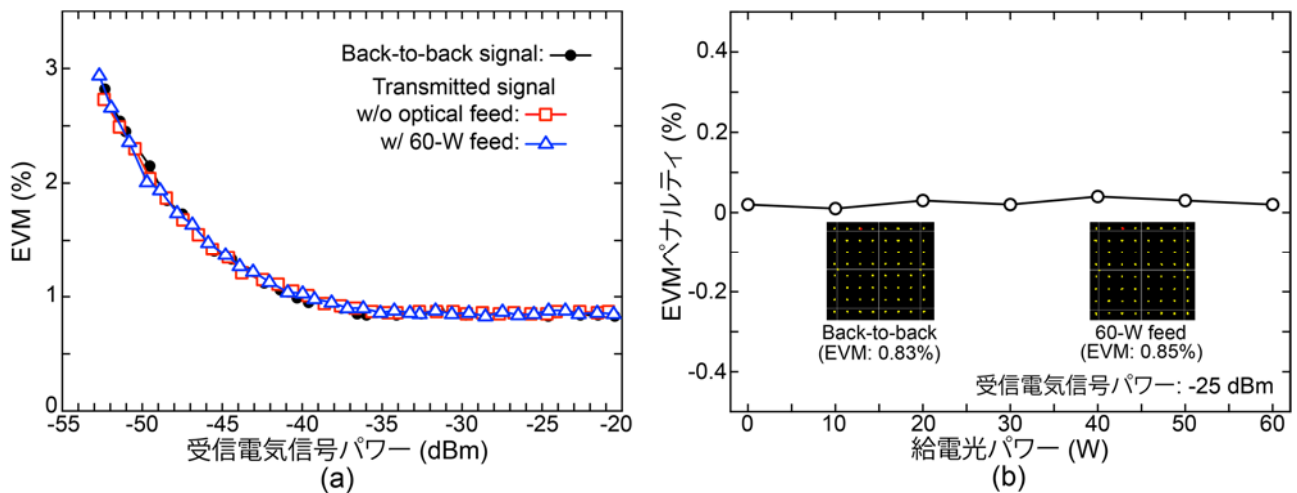


図 5: 光アナログ信号の伝送特性. (a) EVM 特性、(b) 給電光パワーを変化させた際の EVM ペナルティ.

前述したパワー伝送効率の条件下において、最大 60 W の給電光を入力した際の光アナログ信号と光デジタル信号の伝送品質評価を行った。図 5 (a) に受信電気信号パワーを変化させた際の EVM 特性を示す。Back-to-back は伝送路を介さず、送信器と受信器を直接接続した際の EVM 値を示している。図より、Back-to-back および給電光有り・無しの伝送信号に対して、EVM 値の差は殆ど見られなかった。これにより、給電光に依らず、DCF 伝送系では高い光アナログ信号の伝送特性が得られていることがわかる。また、給電光と同時に 100 GHz 間隔に配置された 4 チャンネルの光デジタル信号も同時に伝送しているが、その影響もないことが EVM 特性より確認出来た。全ての EVM 特性において、受信電気信号パワーが -35 dBm のあたりから EVM 値がほぼ一定になっていることが確認された。

図 5 (b) は、受信電気信号パワーを -25 dBm に固定し、給電光パワーを変化させた際の伝送信号の EVM ペナルティを示す。EVM ペナルティは Back-to-back 信号に対する余剰 EVM 値を意味している。図からもわかるように、全ての給電光パワーにおいて、EVM ペナルティは 0.04% 以下に抑えられていることがわかる。また、その増大は給電光パワーに依存していないことから、60 W 給電下での伝送信号品質への影響は見られないということが可能である。図中の挿入図は、Back-to-back 信号および 60 W 給電下での伝送信号のコンスタレーションを示している。両者のコンスタレーションからもその差異はほとんど見られず、給電光の影響がないことを見て取れる。

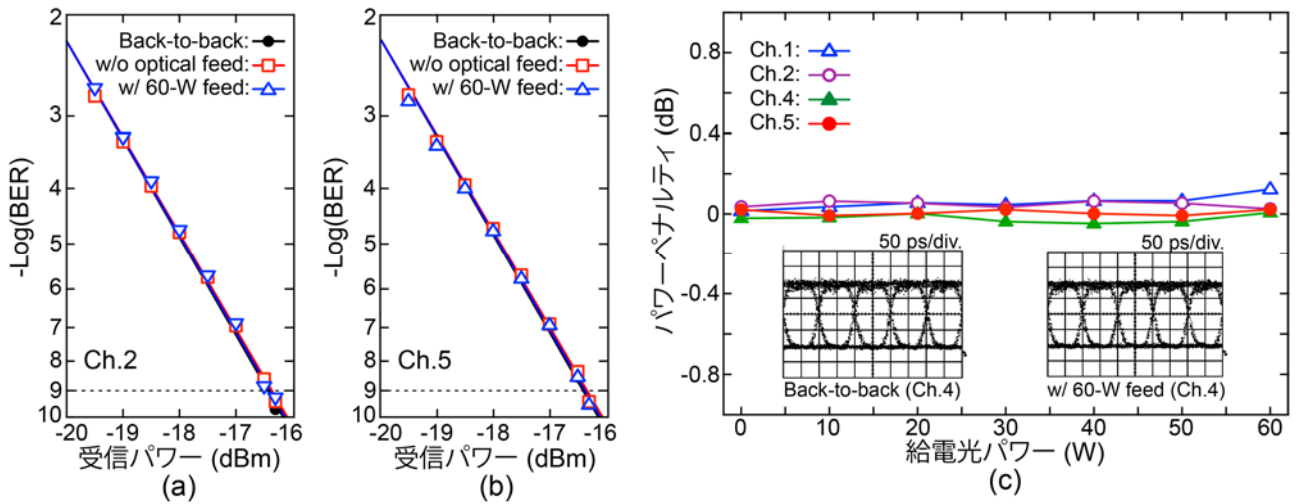


図 5: 光アナログ信号の伝送特性. (a) EVM 特性、(b) 給電光パワーを変化させた際の EVM ペナルティ.

光アナログ信号と同様の条件下で、光デジタル信号の伝送品質を BER 特性にて測定した。その結果を図 5 に示す。(a) はチャンネル 2 での BER 特性、(b) はチャンネル 5 での BER 特性を示している。これらの図より、Back-to-back 信号および給電光有り・無しの伝送信号において、パワーペナルティはほとんど発生していないことが確認できる。同様に、他の光デジタル信号のチャンネルにおいても BER 特性を測定し、これらの結果から $BER=10^{-9}$ でのパワーペナルティを導出した。その結果を図 5 (c) に示す。これより、全ての光デジタル信号チャンネルにおいて、そのパワーペナルティは 0.1 dB 以下になることが確認出来た。これにより、光デジタル信号においても給電光の影響はほとんど見られないことが明らかになった。また、図の挿入図は、Back-to-back 信号および 60 W 給電下での伝送信号のアイパタンを示している。双方を比較しても差異はなく、アイパタンからも高い伝送特性が得られていることがわかる。DCF においては、SM コアの信号光成分は内部クラッドに漏れ出することは構造上ないが、給電光成分は SM コアに漏れ込むことはあり得る。しかし、内部クラッドと比較して 100 分の 1 以下の面積であり、信号光と給電光の波長が大きく異なることから、信号光の伝送特性に給電光が与える影響は極めて小さかったことと思われる。より高いパワーの電気電力を供給手段としては、給電光の送電パワーを増大するか、DCF 伝送系の伝送損失を低減することで、パワー伝送効率を向上する手段が考えられる。前者については、SM コア対内部クラッドの面積比を考慮しても、100 W 以上の給電光入力十分可能と考えられるので高強度化に取り組んでいきたいと考えている。また、パワー伝送効率の向上については、光分波回路での損失低減が重要と考えている。現行の系では、内部クラッド内の給電光成分を取り出すために、複数のテーパファイバを用いているが、構造上、どうしても漏れ光が発生してしまう。これを改善するには新たな光分波回路が必要になると考えており、これらの課題にも取り組んでいきたいと思っている。

3 まとめ

ダブルクラッド光ファイバを用いた光ファイバ給電技術に関し、実利用を想定した高度化に向けた研究開発を行った。本研究を介し、世界で初めて、ワットオーダーの電気電力の送電と高速データの同時伝送に成功した。光アナログ信号および光デジタル信号においても給電光によるクロストークの影響はほとんど見られず、高い伝送特性を維持することが明らかとなった。このような光ファイバ給電技術は、将来の無線基地局の駆動にはもちろん、これまで駆動することが困難とされていた遠隔制御システムへの応用も十分期待できるものと考えており、さらなる高度化に向けた研究開発を進めていく予定である。

【参考文献】

- [1] Cisco System Inc., Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016-2021 White Paper, 2017.
- [2] M. Sauer, A. Kobayakov, and J. George, "Radio over fiber for picocellular network architectures," J. Lightwave Technol., Vol. 25, No. 11, pp. 3301-3320 (2007)
- [3] D. Wake, A. Nkansah, and N. J. Gomes, "Radio over fiber link design for next generation wireless systems," J. Lightwave Technol., Vol. 28, No. 16, pp. 2456-2464 (2010)
- [4] 例えば, 影井 敬義, "災害に強い情報通信技術(ICT) に関する総務省の取組," 東海防災情報通信セミナー資料 (2015)
- [5] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho, "SLEEP mode techniques for small cell deployments," IEEE Commun. Mag., Vol. 49, No. 8, pp. 72-79 (2011)
- [6] K. Sone, I. Kim, X. Wang, Y. Aoki, H. Seki, and J. C. Rasmussen, "Analysis of power consumption in mobile backhaul network with densely deployed small cells under dynamic traffic behavior," OECC/PS 2016, TuA4-2 (2016)
- [7] J. Sato and M. Matsuura: "Radio-over-fiber transmission with optical power supply using a double-clad fiber," CLEO-PR & OECC/PS 2013, Kyoto, Japan, TuPO-8 (2013)
- [8] M. Matsuura and J. Sato, "Bidirectional radio-over-fiber systems using double-clad fibers for optically powered remote antenna units," IEEE Photon. J., Vol. 7, No. 1, pp. 1-9 (2015)
- [9] J. Sato, H. Furugori, and M. Matsuura, "40-Watt power-over-fiber using a double-clad fiber for optically powered radio-over-fiber systems," OFC 2015, W3F.6 (2015).
- [10] 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)
- [11] M. Matsuura and Y. Minamoto, "Optically powered and controlled beam steering system for radio-over-fiber networks," J. Lightwave Technol., Vol. 35, No. 4, pp. 979-988 (2017)
- [12] N. Tajima, A. Yoneyama, D. Kamiyama, and M. Matsuura, "Over 1-km power-over-fiber using a double-clad fiber for bidirectional RoF systems," OECC 2018, 4A4-2, (2018)

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Multichannel analog and digital signal transmission with watt-class electrical power delivery by means of power-over-fiber using a double-clad fiber 【Top Scored Paper】	Proc. OFC 2018	2018年3月
Multichannel data signals and power transmission by power-over-fiber using a double-clad fiber	IEEE Photonics Technology Letters	2018年4月
Optically powered radio-over-fiber systems 【招待講演】	Proc. CLEO 2018	2018年5月
Power-over-fiber for radio-over-fiber-based distributed antenna systems 【招待講演】	Proc. CLEO-PR 2018	2018年7月
Power-over-fiber technologies for radio-over-fiber systems 【招待講演】	MWP Symposium	2018年8月