

## 2 IoTを支えるネットワークの実現に向けて — Deterministic と Cognitive が鍵 —

### 2 *Optical-5G Network Perspective for IoT Services* — *Deterministic and Cognitive are the Enablers* —

北山研一

Ken-ichi KITAYAMA

IoTを支える有無線ネットワークの現状と今後を俯瞰して、研究開発の方向と取り組むべき技術課題について考察する。まずIoTサービスのためのフォグコンピューティングを紹介する。次にIoTサービスを支えるネットワークを特徴付ける“Deterministic”と“Cognitive”に焦点を当て、次世代(5G)モバイル通信における超信頼・極低遅延通信のDeterminismとCognitive光ネットワークのシナリオを述べ、実現のための課題を挙げる。最後に、関連分野の委託研究の現状を紹介する。

Issues and directions of R&D for wired and wireless networks are reviewed, which enable supporting IoT services. First, a focus is on fog or edge computing, which is distinct from existing cloud computing. Fog/edge computing, an essential enabler for time-critical IoT services, requires joint optimization of resource allocations for networking and computing. Next, it is stressed that key requirements are “deterministic” characteristic for low-latency 5G and beyond mobile networks, while “cognitive” capability would be a requisite for optical networks in foreseeable future. Finally, current R&D programs funded by the Ministry of Internal Affairs and Communications (MIC) and the NICT relevant to wired and wireless networks are briefly introduced.

#### 1 まえがき

Internet of things (IoT)はモノがインターネットにつながり、モノとクラウドが情報を交換するプラットフォームである。IoTの発端は、デジタル化によるCPS<sup>\*1</sup>に代表される製造技術のイノベーションであり、「第4次産業革命」<sup>\*2</sup>と呼ばれている。1780～1830年代の「第1次産業革命」における紡織機等の軽工業化、続いて20世紀初頭の電気・石油による重化学工業化、オートメーション、ベルトコンベア方式に象徴される「第2次産業革命」、さらには1970年代のエレクトロニクス、ITによる生産ライン自動化を実現した「第3次産業革命」に続く位置付けである。アクセンチュアの白書[1]によれば、産業用IoTがもたらすGDPの増分は2030年までに主要20か国G20だけで累積\$10.6兆と見積もられており、米国のGDP約\$18.6兆と比較してもそのインパクトの大きさが推し量れる。IoTの価値はこれまで人間の理解が及ばなかった複雑系の事象の解明が可能になったことにある[2]。大辞

林によれば、「複雑系とは多くの要素からなり、部分が全体に、全体が部分に影響しあって複雑に振る舞う系のことであり、従来の要素還元による分析では捉えることが困難な生命・気象・経済などの現象に見られる」とある。

IoTを支える基本的な技術は、観る(センシング)、繋ぐ(通信)、価値を創る(ビッグデータ解析)の3つである[3]。モバイル端末数は指数関数的に増加し続け、既に2008年には世界の人口を越え、202x年には500億台に達し一人当たり7台になると予測されている[4]。J. Bryzekはこの状況を“Trillion sensor universe (1兆個センサーユニバース)”と名付けている

\*1 CPS (Cyber physical system) : サイバー空間で設計と検証の最適化を行うシステム開発手法。例えば、工作機の動作をサイバー空間でシミュレーションし、製品モデルの最適化を行う開発方法。

\*2 独政府のイニシアティブ” Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0” (2013.4)が発端。マスカスタマゼーションと生産性向上である。マスカスタマゼーションとは、小口の顧客からの様々な仕様変更の要求に即応できる能力を備えた製造設備。

[5]。日々生成されるデータは 2.5 Exabyte (10<sup>18</sup>) と言われており、これは文明の黎明期から 2003 年までに生成されたデータの約 1/2 に相当すると言われている。なかでも注目すべきは、センサーやモバイルデバイスからのトラフィックが 2021 年までに IP トラフィック全体の 63 % を超えると予測されていることである [4]。

IoT サービスは多種多様でネットワークに対する要求条件も千差万別であり、センサーデータの質・量もまちまちである。環境汚染の監視、スマート農業、ライフログ用スマートウォッチなどでは、多ノード、データは時間的にスパースで少量といった特徴があり、自動運転や工場の作業ロボットなどではデータ転送時間に対する要求が厳しい。図 1 の下段の左側は低遅延時間が必要な自動運転、作業ロボット制御、拡張現実 (AR:Augmented reality) などの IoT サービスを示しており、1 ms を境として右側には工場の製造設備監視や製品検査、スマートグッド、大気汚染監視、スマートアグリなどの遅延時間に対する要求が緩いサービスが並んでいる。遅延時間とは、あるイベントの発生した地点でセンシングされたデータがデータ処理を実行する地点に到達するまでに要する時間と定義される。データの分析はデータセンターのクラウドコンピューティングを利用するが、低遅延時間の要求を満たすためには、なるべくデータが生成されるネットワークのエッジでデータ処理を実行したい。これらのことから IoT を支えるネットワークは有無線を問わず一体としてとらえ、IoT データ処理に供されるネッ

トワーク域内のクラウドの計算リソースの配置も考慮に入れなければならない。

本稿では、IoT を支える有無線ネットワークの現状と今後を俯瞰して、研究開発の方向と取り組むべき技術課題について考察する。まず IoT サービスのためのフォグコンピューティングを紹介する。次に IoT サービスを支えるネットワークを特徴付ける “Deterministic” と “Cognitive” に焦点を当て、次世代 (5 G) モバイル通信における超信頼・極低遅延通信の Determinism と Cognitive 光ネットワークのシナリオを述べ、実現のための課題を挙げる。最後に、関連分野の委託研究の現状を紹介する。

## 2 クラウドからフォグへ

コンピュータなどのハードウェアとそれを動かす OS とアプリケーションプログラムを持たなくても、インターネットで接続できる環境さえあればクラウドが全てを提供してくれる。クラウドコンピューティングのサービスを提供するのは、通常コアネットワーク内に設置され大規模データセンターである。センサーデータが生成される地点からデータセンターまでデータ転送には 150 ~ 200 ms 程度かかるといわれている。図 1 の下段の IoT アプリケーションの中でも左側の工場ロボット、自動運転、仮想現実では遅延時間を 1 ms まで低減することが求められている。次章で説明する超信頼・極低遅延通信 (URLLC) を実現するためには、IoT デバイスとクラウド間の伝播遅延を短

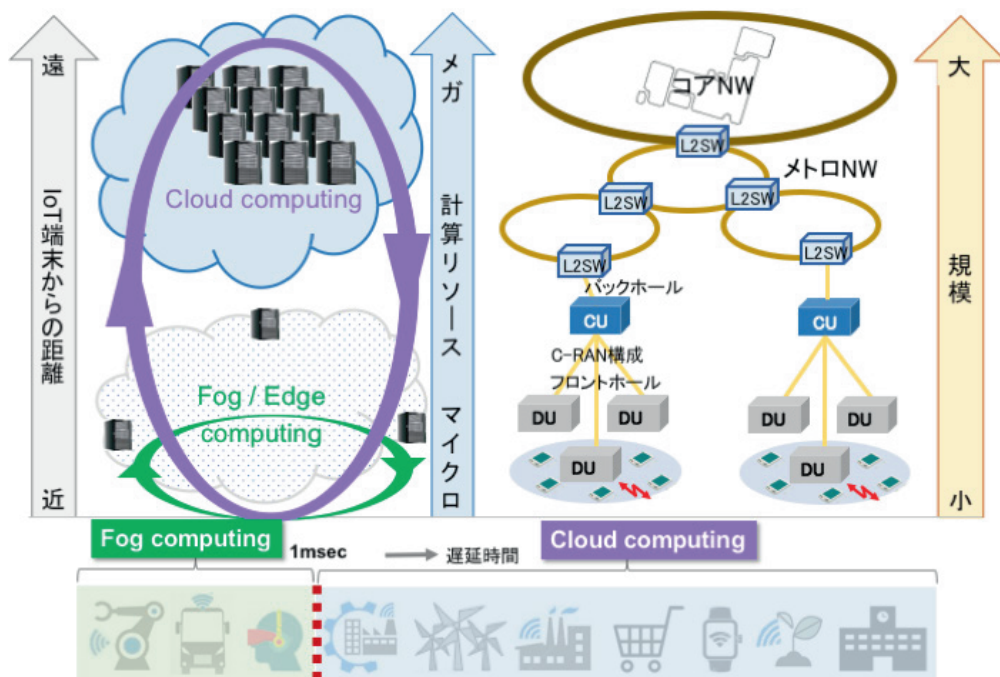


図 1 IoTを支えるネットワークとクラウド&フォグコンピューティング

縮するためにできるだけ発生するイベントに近い場所、すなわち大量のIoTデバイスが点在するネットワークのエッジでコンピューティングを実行したい。フォグコンピューティングあるいはエッジコンピューティングは、ネットワークのエッジに分散配置された小規模なコンピューティングリソースを備えた多数のマイクロデータセンターにおいてリアルタイムのデータ処理を行うため、軽い計算であれば従来のクラウドより素早く実行できる。フォグの由来は“Fog is a cloud close to the ground”にある[6]。図1の左側の縦軸はデータ生成の地点とコンピューティングリソースの距離を高度に例えて、クラウドよりも低い高度に位置することを表している。フォグがクラウドに取って代わるのではなく、センサーからの大量のデータはまずフィルタされ、フォグで処理すべきデータ以外はクラウドへ送られるといったように協調的に働く。

マイクロデータセンターを可搬型のPOD<sup>\*3</sup>で構成し、電話局に間借りして設置するCORD<sup>\*4</sup>の検討が進んでいる。テレコムキャリアの最大の課題は収益の向上のためTCO<sup>\*5</sup>を最適化しビット単価を下げることであり、CORDのような電話局を再編・統合は設備コスト(CAPEX)と設備の保守の省力化による管理運営コスト(OPEX)削減の流れと相まって今後加速するであろう。

### 3 ネットワークの展望：Deterministic と Cognitive が鍵

#### 3.1 更なる通話路容量の拡大に向けて

有無線通信を問わず通信路容量の拡大は終わりのない挑戦であり、両者の目指すべき技術の方向は一致している[7]。図2には光ファイバ通信と次世代5Gモバイル通信に関して、スペクトル幅、スペクトル効率、空間密度の3つの方向の性能向上の目標を示しており、総伝送容量  $C = M \times B \times \log_2(1 + SNR)$  の拡大を3軸上で目指すことになる。5Gサービスの開始は2019年以降と見込まれるので、これらの目標は202x年の近未来の実用化を見据えた数値と考えるとよい。5Gでは高周波数帯の利用により周波数帯域を30倍、massiveMIMO<sup>\*7</sup>により5倍、スモールセル化により1,000倍の増加が見込まれている[8]。サービスはデータ転送速度を高速化するeMBB(Enhanced mobile broadband)、超高信頼・極低遅延を保証するURLLC(Ultra-reliable and -low latency)、大量のセンサー群を収容するmMTC(Massive machine type communication)に分けられる。

一方、光ファイバ伝送技術では、図2に示すように光増幅器の利得幅の拡大により  $B=30$  倍、非線形シャ

ノン限界<sup>\*8</sup>の克服、さらに空間分割多重方式[9][10]<sup>\*9</sup>により  $M=10 \sim 50$  倍の拡大が見込まれている。した

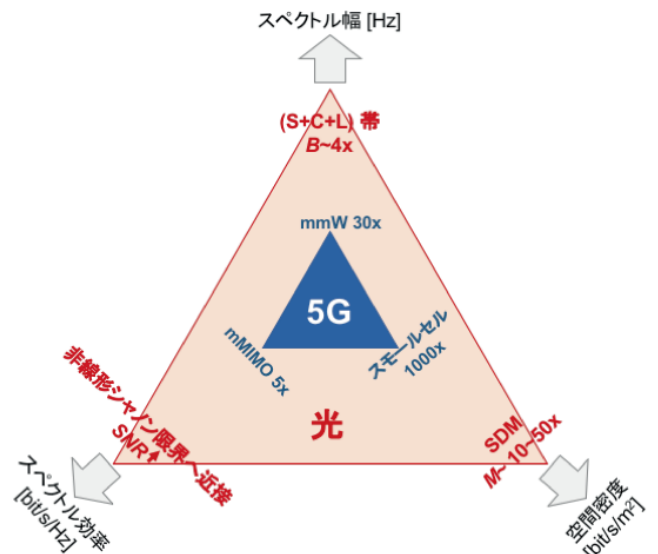


図2 光ファイバ通信と第5世代(5G)モバイル通信の到達目標：スペクトル、スペクトル効率、空間密度における拡張性[6]に基づき改変。C-RAN<sup>6</sup>、CU: Central unit, DU: Distribution unit

\*3 POD: Performance Optimized Data Center、プレハブ住宅的な発想でスピーディーにデータセンターを建設・増設するための可搬型モジュール。コンピューティングやストレージリソースプール、電力、ネットワーク・インフラ、電源、冷却装置などデータセンター運用に必要な機器も搭載。

\*4 CORD (Central office re-architected as a DC)：設備コストを削減と電力節減のために電話局を再編・統合し、モジュラー型データセンター(POD)、同一局舎内にモバイル無線基地局、光アクセスの終端装置、光ネットワークのクロスコネクタなどを併設する取り組み。

\*5 TCO (Total cost of ownership)：設備の経費(CAPEX: Capital expenditure)と事業維持費(OPEX: Operating expenditure)の合計額。

\*6 C-RAN (Centralized radio access network)：1つの集約ノード(CU)から複数の分散ノード(DU)を張り出し、ユーザの移動に伴うCNシグナリングの抑制や、セル間連携によるパフォーマンス向上などを実現。

\*7 Massive MIMO：送受信機に複数のアンテナを設置するマルチアンテナ技術であり、スペクトル幅を増加させることなく伝送速度を高め誤りの少ない通信を実現できる。通信路容量はアンテナ数に比例するという情報理論上の証明が拠り所とされている。5Gでは高い周波数帯ではアンテナのサイズ(～半波長)を小さくできるため超多数のアンテナを利用し、アンテナの指向性を上げるビームフォーミング技術によってミリ波帯でも電波伝播損失を補償できる。例えば、20 GHzでは半波長(7.5 mm)角のアンテナを12 cm四方に256素子搭載でき、数100 m程度は到達可能。各ユーザに異なるビームを向けることで多数ユーザを同時接続するユーザ多重と、各ユーザに対して複数のストリームを空間多重によってシステム容量と通信速度の向上が図れる。

\*8 非線形シャノン限界：信号対雑音比の劣化によって通信路容量が制限される「シャノン限界」に加えて、非線形光学効果も加味した通信路容量を与えるのが「非線形シャノン限界」であり、信号強度を上げて信号対雑音比を上げて通信路容量が頭打ちになる。

\*9 空間多重伝送(SDM: Space division multiplexing)：現在普及している1コア、1導波モードの単一モードファイバとは異なり、1心の光ファイバに複数のコアを有するマルチコアファイバ、さらには1コアに複数のモードが伝播でき、個々のモードに異なる信号を伝送できるマルチモードファイバを用いる多重方式。光ファイバの取り回しが可能な太さを考慮すると17コアが限界とみられ、これに3モード多重を用いれば  $M \sim 50$  が現実的な到達目標と考えられる。

がって総伝送容量は1,000倍程度増大する余地が残されており、光ファイバ1本当たりPbit/s級の伝送が射程に入ってくる。とりわけデジタルコヒーレント(DC)技術が受信感度と周波数利用効率が向上と光ファイバの線形・歪特性補償性能による伝送距離の延伸に貢献している[11]。我が国では2013年に東名阪幹線系にチャンネル当たりの伝送速度100Gbit/s、WDM80波、総伝送容量8Tbit/sのDCシステムが商用導入されたのを皮切りに、チャンネル当たりの伝送速度は400Gbit/sへとアップグレードが進み、さらに1~5Tbit/sも数年内に実用レベルに達するであろう。今後は光パスの距離やトラフィックの変動に応じて、1つのシンボルが担うビット数を変化させる適応変復調が可能な帯域可変トランシーバの導入が進むであろう。例えば、シンボルレート50GbaudでQAM変調<sup>\*10</sup>、偏波多重を仮定すると、(ビットレート, bit/symbol, 距離)は大陸横断では(200Gbit/s, 2<sup>4</sup>, 4,000km)、長距離幹線系では(400Gbit/s, 2<sup>4</sup>, 600km)、データセンター間は(600Gbit/s, 2<sup>6</sup>, 100km)と距離に応じて適応的に変調多値数が異なるシステムへ適用できる。

### 3.2 Deterministic 超高信頼・極低遅延通信

URLLCはいわば「時間指定速配便」である。ユーザ端末から宛先ノードまで信号伝達に要する遅延時間が確定できるという意味でdeterministicである。図1のユーザ端末-DUの無線区間とDU-CUのフロントホールにおける光ファイバ伝送が混在するため、極遅延時間の実現はまさに光無線ネットワーク全体の課題である。例えば、IEEE802.1のイーサネットのTSN(Time-sensitive networking)規格では、フレーム損失がほぼゼロ(送達率>99.999%)、ユーザ端末から宛先ノード間の遅延時間は通常の1/10の1ms以下、ジッタ<1μsと定められている。そのために正確な時刻同期(<1μs)、優先割り込み(preemption)、常時帯域確保(dedicated resource)、フレーム複製(replication)、入力データ量統制(ingress policing)等のフレーム転送のメカニズムが工夫されている。フロントホールの光伝送では、低コストの非コヒーレント多値変調を使用し、限られた光ファイバの帯域の有効利用を図ることが求められる[12]。

### 3.3 Cognitive 光ネットワーク

「自分で考え自分で行動する」のがコグニティブのゆえんである。光ネットワークがコグニティブ化に向かうモチベーションは多々あり必然の流れと考える[13]。迅速なサービス提供、さらにNFV<sup>\*11</sup>の導入によるネットワーク装置のコストダウンと保守・運用の

自動化によるOPEXの削減等がモチベーションとして挙げられる。そこで参考にすべきは無線ネットワークにおけるソフトウェア・コグニティブ無線技術[14]ではないだろうか。複数の無線方式が選択できるエリア内で、通信の混雑状況を把握し、干渉を避けるために無線方式などを選択することが可能になる。ここには認知・判断学習・行動(機能変更)のサイクルが自律的に働いている。

ソフトウェアという文脈では、既にSDN(Software defined network)の検討が進んでいる。ビットを転送するハードウェアから制御機能を切り離し、コントローラと呼ばれるソフトウェアでネットワークを制御する手法である。SDNによって1つの物理ネットワークのリソースを仮想化しスライスして、スライスごとにQoSが異なるサービスを提供することが可能となる。一方、コグニティブの視点からは、例えば以下のような適応的な運用をモニター(認知)・判断学習・アクションのサイクルを通して全て自律的に行うことが可能になるであろう。

- コグニティブ帯域可変トランシーバ：光パスの距離やトラフィックの変動のモニターに基づく、変調多値数の変更と、それに適応した誤り訂正符号・復号化アルゴリズムの変更
- コグニティブなサブキャリア割り当て：エラスティックWDMネットワークにおいて波長の使用状況のモニターに基づくグリッドの変更やスペクトルデフラグメンテーション<sup>\*12</sup>

## 4 おわりに

本分野の委託研究の状況にも簡単に触れておきたい。平成30年度の総務省委託研究では、「新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術」と「革新的AIネットワーク統合基盤運技術」が開始された。この中には5Tbit/s級光伝送、マルチコア伝送システム、光アクセスメトロ、AIによるネットワーク運用技術などの課題が含まれる。またNICT委託研究では、今年度に「マルチコアファイバの実用化加速に向けた研

\*10 QAM (Quadrature amplitude modulation) : シンボル当たりのビット数を増やす(≧2)ために、信号の電界の振幅と位相を複数のレベルで変調する多値変調方式。

\*11 NFV (Network function virtualization) : ネットワーク装置類のハードウェアとソフトウェアを分離し、フリーのOSなどのソフトウェアによって機能を変更できるWhite boxと言われるハードウェアを用いて実現するアプローチ。これによって機能ごとに異なる装置を設備する必要がなくなり、CAPEXが低減できるというシナリオ。

\*12 デフラグメンテーション : 元々はハードディスクの断片化解消を意味するが、エラスティックWDMの文脈では虫食い状態になった光周波数スペクトルを解消すること。

究開発]、「高スループット・高稼働な通信を提供する順応型光ネットワーク技術の研究開発」、「マルチコアファイバの実用化加速に向けた研究開発」などが開始された。これら委託研究と自ら研究が互いに有機的にリンクして、実用化が直近に迫る研究開発から萌芽的な課題への挑戦までバランスのとれたポートフォリオの下に世界トップレベルの研究を先導することが求められていることを肝に銘じたい。

最後に、気の早い話しではあるが、5Gの実用化の前にして既に“Year 2030 and Beyond”の検討がITUで今年7月に開始された[15]。ホログラムを用いたテラビット級の5感通信やBest effortからQoSの完全な確保などの目標が掲げられているが、議論の端緒が付いたばかりであり今後の動向を注視したい。

## 謝辞

有益なご意見、ご助言をいただきましたネットワークシステム研究所・和田研究所長、足立企画室長、吉田主任研究員に感謝いたします。

### 【参考文献】

- 1 Accenture “Winning with the industrial Internet of Things” ([https://www.accenture.com/ng-en/~/\\_media/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Digital\\_1/Accenture-Industrial-Internet-of-Things-Positioning-Paper-Report-2015.pdf](https://www.accenture.com/ng-en/~/_media/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Digital_1/Accenture-Industrial-Internet-of-Things-Positioning-Paper-Report-2015.pdf))
- 2 稲田修一, “知識ゼロからのビッグデータ入門,” 2016 (幻冬舎).
- 3 総務省諮問第22号「新たな情報通信技術戦略の在り方」の検討状況について (2015.7).
- 4 Cisco Visual Networking Index: 予測と方法論, 2016 ~ 2021年 ([https://www.cisco.com/c/ja\\_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.pdf](https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.pdf))
- 5 [https://cseweb.ucsd.edu/classes/sp14/cse291-b/notes/Janusz\\_Bryzek\\_SensorsCon2014.pdf](https://cseweb.ucsd.edu/classes/sp14/cse291-b/notes/Janusz_Bryzek_SensorsCon2014.pdf).
- 6 F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli, “Fog Computing and Its Role in the Internet of Things,” MCC2012 workshop on Mobile cloud computing (Helsinki, Finland, Aug. 2012).
- 7 M. Weldon, “The Future of Deterministic Dynamic Networking (and new value equation),” Plenary talk, OFC2018 (San Diego, CA, March 11-15, 2018).
- 8 3GPP, TR38, 913: study on scenarios and requirements for next generation access technologies (version 14.2.0 release 14).
- 9 宮本, 川村, “大容量光ネットワークの進化を支える空間多重光通信技術,” NTT技術ジャーナル, pp.8-12, 2017.3.
- 10 T. Morioka, Y. Awaji, R. Ryf, P. Winzer, D. Richardson, and F. Poletti, “Enhancing Optical Communications with Brand New Fibers,” IEEE Commun. Magazine, pp.531-542, Feb. 2012.
- 11 K. Kitayama and N. P. Diamantopoulos, “Few-Mode Optical Fibers: Original Motivation and Recent Progress,” IEEE Commun. Magazine, pp.163-169, Aug. 2017.
- 12 例えば, P. Zhu, Y. Yoshida, and K. Kitayama, “256-antenna massive MIMO fronthaul uplink with 10 GBd PAM4 optical interface enabled by adaptive space-time compression,” ECOC2018, Tu3B.6.
- 13 K. Kitayama, A. Hiramatsu, M. Fukui, N. Yamanaka, S. Okamoto, M. Jinno, and M. Koga, “Photonic Network Vision 2020 - Toward smart photonic cloud - (Invited tutorial),” J. Lightw. Technol., vol.32, pp.2760-2770, 2014.
- 14 上原一浩, “ソフトウェア無線・コグニティブ無線技術の研究開発 (招待論文),” 電子情報通信学会 B, Vol.J100-B, no.9, pp.693-704, 2017.
- 15 R. Li, “Towards a New Internet for the Year 2030 and Beyond,” ([https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201807/Documents/3\\_Richard%20Li.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201807/Documents/3_Richard%20Li.pdf)).

[www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201807/Documents/3\\_Richard%20Li.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201807/Documents/3_Richard%20Li.pdf)).



北山研一 (きたやま けんいち)

大阪大学 名誉教授 /  
 情報通信研究機構 ネットワークシステム研究所 R&D アドバイザー /  
 光産業創成大学院大学 特任教授  
 JST CREST プログラム「次世代フォトニクスの基盤技術 (2015~2022年)」研究総括  
 博士 (工学)  
 光通信・ネットワーク、RoF 伝送、光情報回路  
<http://www.kitayama.tech>