

# 100Gbps超級通信に向けた 低消費電力光通信網

亀谷聡一朗\*  
久保和夫\*\*  
石井健二\*\*

Energy Saving of Optical Networks Beyond 100Gbps

Soichiro Kametani, Kazuo Kubo, Kenji Ishii

## 要旨

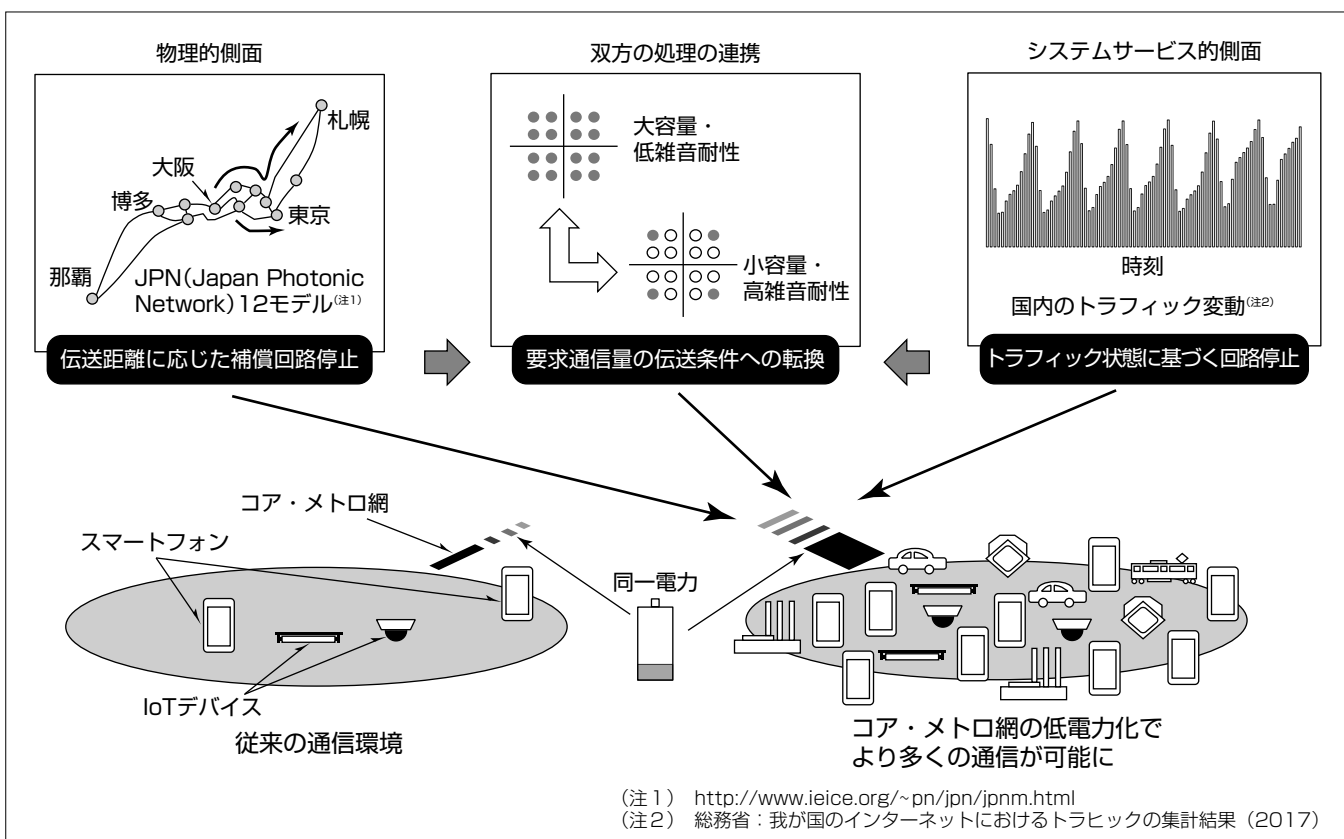
インターネットが広く認知されて以来、コンピュータ、移動端末、IoT(Internet of Things)デバイスと、通信端末の多様化と相まって様々な情報通信サービスが展開されている。サービス拡充の基盤となる通信インフラに求められる通信容量は指数関数的に増加する一方、これに伴う消費電力の増加が通信容量向上に対する課題となっている。

都市間を接続するコア・メトロ領域の光通信システムでも、これまで通信容量を拡大するたびに、利用する半導体デバイスのプロセスを刷新することで消費電力の抑制を行ってきた。しかしながら、近年ではデジタルコヒーレント技術に代表されるように、通信容量及び伝送距離の向上に係る実現技術が光学構成から電子回路上の信号処理へと

移行しており、消費電力の増加を半導体プロセスの刷新だけで抑止することが困難となりつつある。

三菱電機はデバイス特性だけでなく、伝送に係る信号処理からネットワーク運用にいたるまで光通信システムの多角的な側面を利用した低消費電力化に取り組んでいる。本稿では、誤り訂正処理の低電力化と通信容量に合わせた回路休止に加え、これらを連動させて更なる低電力化を実現する光通信システムの運用方式を提案する。

提案方式は現状の光通信システムの敷設・運用スキームを拡張する形で実現可能である。誤り訂正に注目した検討では通信網全体で消費電力の80%以上が削減されとの結果が得られた。



(注1) <http://www.ieice.org/~pn/jpn/jpnm.html>  
 (注2) 総務省：我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計結果 (2017)

## 多角的なアプローチによるコア・メトロ光通信システムの低消費電力化

物理的な側面からは伝送距離に応じて信号劣化の補償回路の一部を停止することで、システムサービスの側面では要求トラフィック状態に応じて必要なデータ分以外の回路を停止することでそれぞれ電力削減を行う。加えて、変調方式の設定を通じて通信要求の低減を伝送条件の軽減へと転換することで、双方の処理を連携させて80%の電力削減を実現する。すなわち同一消費電力では5倍の通信が可能になる。

### 1. ま え が き

広域通信インフラは地域内のトラフィックを集約するアクセス網と、集約されたトラフィックを各地域間で転送するコア・メトロ網とで構成される。コア・メトロ網の伝送システムでは再送要求がトラフィックや遅延時間の大幅な増大を招くため、信号損失のない信号転送が必要となる。したがって通信量がピークとなる時間帯での信号転送に堪えるだけの数の送受信器が必要とされる。また一対の送受信器が伝送可能な距離以上の接続を確立するには、中継となる送受信器設置が必要になる。これら送受信器設置コストに加え、メンテナンスコストがシステム導入の阻害要因であり、必要設置数を低減するための大容量・長距離化が送受信器開発の焦点となってきた。近年では受信波形処理を光学構成に代えて電子回路上で実装するデジタルコヒーレント技術によって100Gbps・3,000kmの大容量・長距離伝送をDP-QPSK(Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying)変調で実現している<sup>(1)</sup>。

一方で、大容量・長距離化に伴い、伝送路劣化は加速度的に大きくなり、劣化補償の波形処理を行う電子回路の規模も肥大化する。したがって、通信インフラの拡大に伴って今後も消費電力増加が見込まれるが、半導体プロセスの進展だけでこれを相殺することは困難であり、更に進んだ低消費電力化が求められる。

本稿では低消費電力化を実現する手段として、信号伝送品質に基づいて電力を削減するスケールフリー誤り訂正(Forward Error Correction : FEC)技術とトラフィック条件に基づく電力削減を提供する適応リンクレート技術の導入、及びその連携について述べる。

## 2. 大容量化に向けた低消費電力化方式

### 2.1 スケールフリー誤り訂正による距離依存の抑制

長距離光通信ではファイバ中の伝搬損失を補償する光増幅器の発する雑音が主要な信号劣化要因である。送受信器の開発はより多くの光増幅中継を可能にするため行われてきたが、通信網全体を俯瞰(ふかん)すれば最大の伝送性能を必要とする超長距離の接続はごく一部である。多くの通信接続では中・短距離の伝送を提供する性能で事足りるため、同一回路同一性能の送受信器を用いることは過剰な劣化補償による無駄な電力消費が発生

することになる。

高～低性能の劣化補償回路を持つ様々な送受信器をラインアップして伝送距離ごとに適切な送受信器を設置すれば電力削減を行うことは可能だが、システム管理や在庫管理に加えて生産ライン確保の観点から闇雲なラインアップ増加は回避すべきである。また、特定のファイバ区間での障害発生時に迂回(うかい)経路が限定されるため、ハードウェア上で伝送距離の制約を設けることは信頼性の観点から好ましくない。

これに対し当社は光通信用の誤り訂正が繰り返し復号によって性能を向上させている点に着目し、必要な劣化補償に応じて繰り返し数を設定可能にする構造を回路に持たせることで、無駄な消費電力を削減する“スケールフリー誤り訂正”の開発を行ってきた。図1にスケールフリー誤り訂正の概念を示す。一般的な復号回路同様、受信した符号語に対して順次繰り返し復号を施すことで訂正性能を向上させるが、伝送性能に対して過剰な繰り返しとなる分の復号回路は停止することで無駄な消費電力の発生を抑える。

誤り訂正回路のネット符号利得(Net Coding Gain : NCG)と消費電力の実装レベルでのシミュレーション結果を、復号繰り返し数に対する依存性として図2に示す。誤

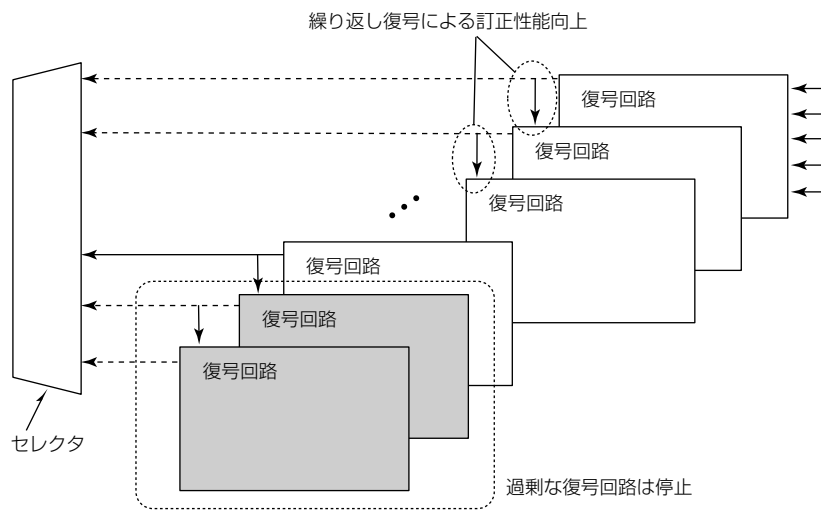


図1. スケールフリー誤り訂正の概念図

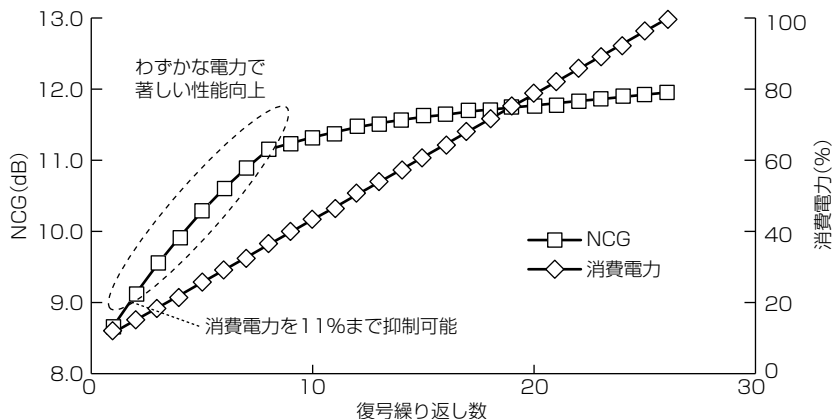


図2. NCGと消費電力の復号繰り返し数依存性

り訂正回路は24.5%の冗長さの低密度パリティ検査(Low Density Parity Check : LDPC)符号を内符号, 1%の冗長さのBCH(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem)符号を外符号とする接続符号で構成し<sup>(2)</sup>, 復号繰り返し数は現実的な回路規模となる26を最大値としている。各復号繰り返し数での消費電力は最大消費電力で規格化している。復号が1度だけである場合のNCGは8.7dBであり, 必要な訂正能力がこれ以下の伝送条件であれば消費電力は最大消費電力の11%に抑制可能である。また, 消費電力は繰り返し数に単純比例する一方, NCGは8.7dBから12.0dBまで漸進曲線を描いて増加する。必要なNCGの小さい短距離伝送に対しては, わずかな消費電力の増加で著しくNCGを向上させることができる。

2.2 コア・メトロ網運用向け適応リンクレート技術

最大伝送距離に合わせた劣化補償が無駄な消費電力を生む一方, ネットワーク運用ではピークトラフィックに合わせた送受信器の敷設が無駄な消費電力を発生させる。総務省統計によれば深夜から早朝でのトラフィック量はピーク時間帯の約30%まで落ち込む状態となっている<sup>(3)</sup>。すなわち, これらの時間帯では設備過剰となり, 無駄な消費電力を発生させていることになる。

このようなトラフィック変動によって生じる無駄な電力を削減する技術としては, 通信要求が小さい時間帯に通信容量を低減した信号伝送を行う“適応リンクレート処理”が知られている。域内のユーザートラフィックを集約して伝送するコア・メトロ網の性質上, 最大容量にいたらずとも常時通信要求は発生することから, 同技術を利用することで, 必要時以外は通信を遮断するといった制御を行わずとも十分に電力削減の効果が得られる。

大容量光通信では信号伝送が偏波・位相チャンネル(レーン)で並列伝送される。このことに着目して, 一部レーンに対する通信をほかのレーンに退避させ, 通信が不要となったレーンに対する信号処理を停止させることでトラフィック量に応じた消費電力にすることが可能になる<sup>(4)</sup>。

2.3 変調方式の設定を通じた相乗効果の創出

適応リンクレート処理によってオフピーク時間帯での消費電力の削減が可能になるものの, 得られる電力削減は線形的なものにとどまってしまう。当社は更に大きな電力削減効果を得るため, この技術を“変調型適応リンクレート処理”として, 通信要求の

低減を伝送条件の軽減へ転換してスケールフリー誤り訂正と連携させることにした。

100Gbpsを超える大容量化での懸念は振幅変調での信号劣化の肥大化にある。多値の振幅変調を利用した大容量化では, 下位ビットの識別に必要な受信分解能が指数関数的に増加するため, 信号劣化の影響も同様に肥大化してしまう。そこで, 適応リンクレート処理で停止するレーンを偶発的に選択するのではなく, 振幅変調の最下位ビットを優先して停止することで(図3), 誤り訂正回路に対する指数関数的な電力削減が可能になる。

図4に25Gbaud+25.5%の冗長さでDP-QPSK, DP-8QAM(Quadrature Amplitude Modulation), DP-16QAMで変調を行った際に雑音による劣化補償に必要な誤り訂正回路の消費電力を, 雑音源である光増幅段数の依存性として示す。消費電力は通信容量・復号繰り返し数を最大とした値で規格化している。各変調方式での最大消費電力は従来型の適応リンクレート処理で得られる容量に比例した値となる。これに加えて変調型適応リンクレート処理では, 光増幅段数に応じて必要な復号繰り返し数, ひいては消費電力

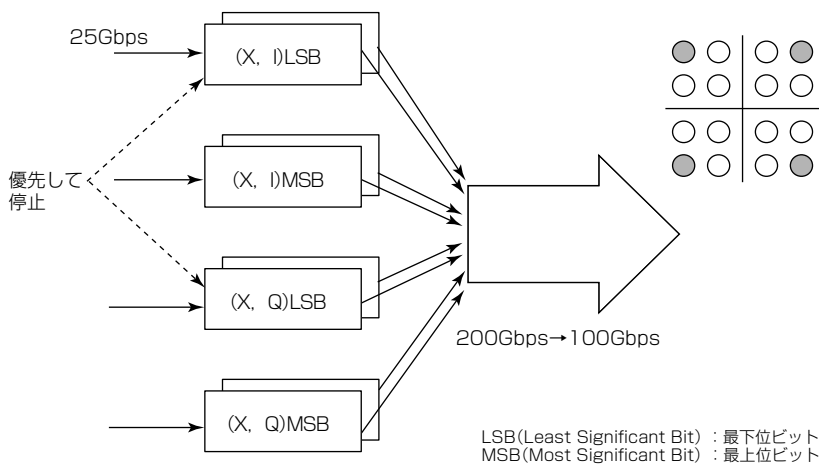


図3. 変調型適応リンクレート処理

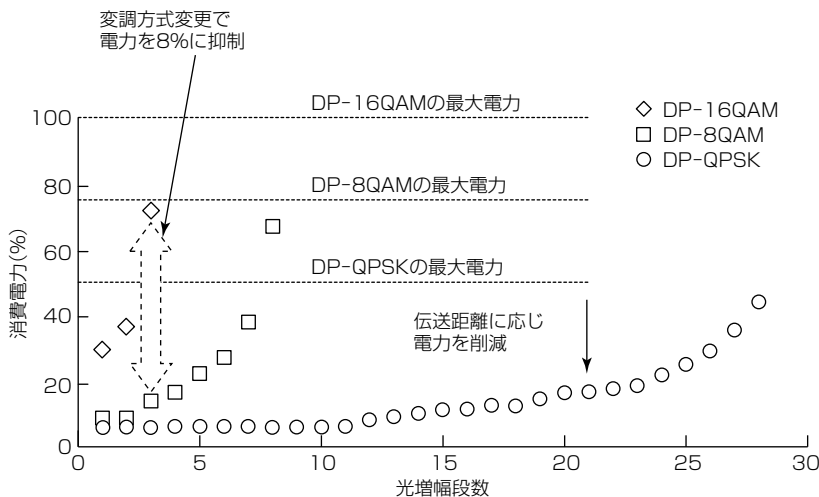


図4. 誤り訂正回路での消費電力の光増幅器段数依存

が軽減されることになる。同一の光増幅段数で比較した場合、変調多値度が少なければ復号繰り返し数はより軽減されるため、従来型の適応リンクレート処理よりも更に大きな電力削減効果が得られる。例えばスパン数3の場合、最大伝送容量(DP-16QAM伝送)に対して実際の伝送容量が1/2である時間帯ではDP-QPSK伝送によってDP-16QAM伝送時の8%の電力で信号伝送を行うことが可能である。

### 3. 通信網の構成と提案方式の効果

#### 3.1 低消費電力通信網の構成

当然ながら、変調多値度が高いほど最大の復号繰り返し数でも到達可能な伝送距離は短くなる。したがって、通信網を構成するうえでは、図5のように低い多値度しか許容されない長距離伝送では距離に応じて電力削減を行い、高い多値度で伝送可能な中・短距離伝送では変調型適応リンクレート処理によって電力削減を行うことになる。

これら通信網上の伝送構成が与える影響を国内のコア・メトロ網を模擬したJPN(Japan Photonic Network)モデルを用いて評価した<sup>6)</sup>。コア網としてJPN12モデル、メトロ網としてJPN25モデルから関東・関西圏を切り取ったトポロジを用いて距離に対する依存性として評価を行った。

#### 3.2 スケールフリー誤り訂正の効果

メンテナンスコストを抑制するというコア・メトロ通信

システムの至上命題に従い、網上の送受信器数が最小となる設置構成でスケールフリー誤り訂正による電力削減の効果を検証した。各ノード間には重力モデル分布に従い平均500Gbpsのトラフィックが発生していると仮定して必要な送受信器を設置する。この際、各送受信器は最大容量が得られるよう光増幅数が最小となる経路に対して最大復号繰り返し数を行う状態に変調方式を設定して配置数を決定した。

スケールフリー誤り訂正適用前後で通信網全体の消費電力を比較すると、コア網ではスケールフリー誤り訂正によって72%という電力削減が実現する。その一方でメトロ網での削減できる電力は65%にとどまる。全国網であるコア網では高い変調多値度での伝送が可能な中・短距離接続が40%程度なのに対し、地域網であるメトロ網では70%以上の送受信器が高い変調多値度で設置される。メトロ網では大容量化によって送受信器数低減には成功している(変調方式をDP-QPSKに限定した場合と比較して30%の送受信器削減)が、平均的な復号繰り返し数は高止まることになった結果、電力削減の効果は抑制されている。

#### 3.3 変調型適応リンクレート処理の効果

次に、配置した送受信器はそのままにトラフィック量が変化した場合での消費電力の変化を求めた。全ての接続でのトラフィック量を同一の比率(0.9倍から0.1倍まで)で変化させ、それに応じて各送受信器を必要な通信容量を確保

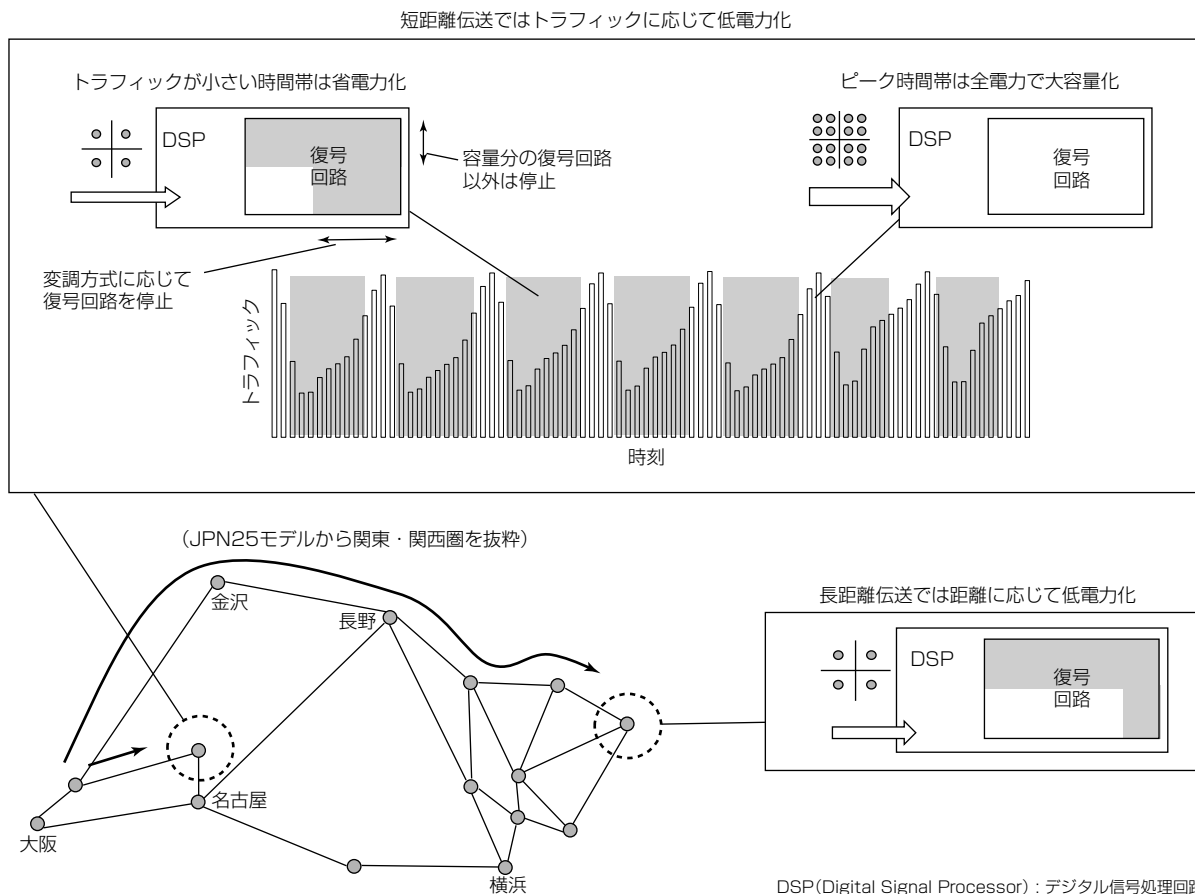


図5. 通信網の構成

できる最低限の変調多値度，すなわち最低限の電力で駆動するように再設定した。図6にトラフィック量の変化に応じた消費電力の変化を示す。トラフィック量が下がるにつれて利用レーン数・変調多値度が減少し，消費電力も低減していく。最終的にはDP-16QAMで信号伝送を行っていた全ての送受信器が低消費電力のDP-QPSK変調に必要な通信容量を賄うことが可能となる0.5倍のトラフィック量まで消費電力は低減される。特に高い多値度の変調方式が多くを占めるメトロ網では変調型適応リンクレート処理の影響を受けやすく，最大で80%近い電力を削減することが可能になる。

得られたトラフィック量依存性を，実際の国内トラフィック(1週間)に適用すると適応リンクレート処理によって削減される電力はコア網では平均37%であるのに対し，メトロ網では平均57%の電力を削減できる。

### 3.4 電力削減効果のまとめと通信網構成への依存性

スケールフリー誤り訂正と変調型適応リンクレート処理による電力削減効果を図7に示す。コア網では82%，メ

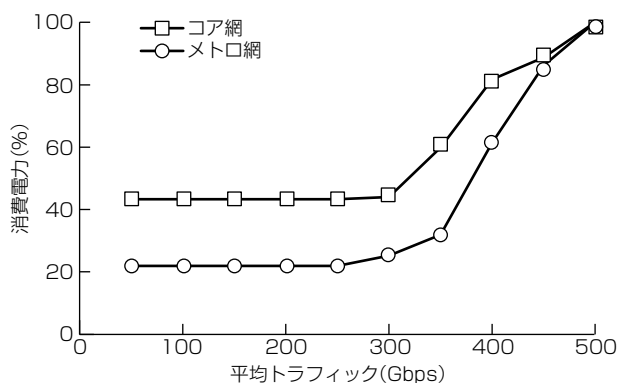


図6. 消費電力のトラフィック量依存性

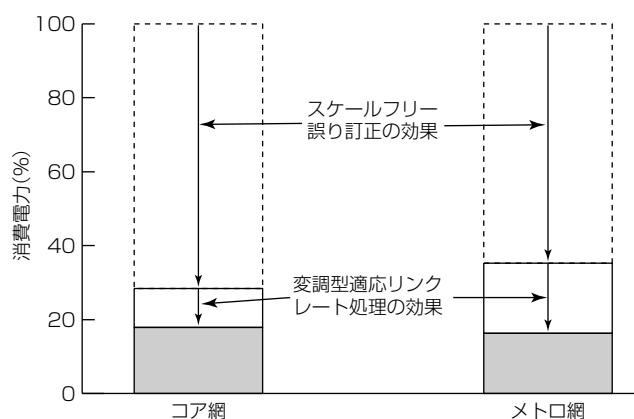


図7. 得られた電力削減効果

トロ網では84%と，高い電力削減を実現している。これらの領域では中・短距離伝送の発生比率に応じてスケールフリー誤り訂正と変調型適応リンクレート処理のどちらかの要素が強く効果を発揮するものの，結果的には両者の効果が相殺する形で一定の電力削減が可能である。一方でデータセンタ間通信といった短距離伝送の比率が非常に高いと想定される通信網に適用する場合には双方の恩恵が得られるため，更に大きな電力削減効果が得られると期待される。

今回の検討では変調方式を3種類としたが，多様な変調方式を取り入れ，変化可能な容量・消費電力の幅や粒度を高めることで更なる電力削減を行うことも可能である。

## 4. むすび

通信インフラの持続的な発展に資するため，コア・メトロ網の低消費電力化をスケールフリー誤り訂正・適応リンクレートによる電力削減の観点から検討した。単純にこれらの手法を併用するのではなく変調方式を通じた連動によってコア網で82%，メトロ網で84%の電力削減が可能になる。

動的な制御としては変調方式とそれに係る電気信号処理だけであり現状の光通信システムの管理スキームを拡張する形で十分に導入可能であると考えられ，100Gbps超時代の大容量通信システムの発展に資することが期待される。

この開発の一部は総務省委託研究“巨大データ流通を支える次世代光ネットワーク技術の研究開発”の成果である。

## 参考文献

- (1) 斧原聖史，ほか：CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバ，三菱電機技報，91，No.6，345～348 (2017)
- (2) Sugihara, K., et al.: A Spatially-coupled Type LDPC Code with an NCG of 12dB for Optical Transmission beyond 100 Gb/s, OFC/NFOEC2013, OM2B.4 (2013)
- (3) 総務省：我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計結果 (2017)
- (4) Miyazaki, T., et al.: High speed 100GE adaptive link rate switching for energy consumption reduction, ONDM2015, 227～232 (2015)
- (5) 坂野寿和，ほか：日本の地域特性を考慮したフォトリックネットワークモデルの検討，電子情報通信学会技術研究報告，PN2013-1，1～6 (2013)