

編集チームリーダー 山口実靖
Saneyasu Yamaguchi

社会の礎とけん引役としてのネットワーク

ネットワークは広く社会で活用されるようになり、技術者のような限られた人が使うものではなく、社会生活を営むほぼ全ての人を使うものになっています。日常生活に密接に関わり、あると便利なものではなく、ないと平穏な日常生活を送れないものになっています。例えば、一たびネットワークインフラに障害が発生すると、社会は混乱し、連日ニュースで取り上げられ、緊急通報の数が減少する事態にまでなってしまいます。ネットワーク技術は安全な社会の運営に重大な使命を担っていることが分かります。一方でリモートワークやメタバースなどの普及と発展により、ネットワークにはますます高い性能とそれを支える技術革新が期待されています。聞き慣れた言葉では5G（第5世代移動通信）やBeyond 5Gがあり、これら以外にもこれらを発展させる多くの技術が世間から要求されています。この相反する二つの要求、すなわち「強じんであれ」との守りの要求と、「進化せよ」との攻めの要求を同時に社会から受けているこのし烈な状況は、ネットワーク技術を発展させることに情熱を注ぐ技術者たちにとってはこの上ない幸せな状況と言えるでしょう。

本号では、社会インフラ・ネットワーク技術の小特集を組ませて頂きました。日頃ユーザとしてネットワーク技術に関わっている方は、少しでもネットワークの仕組みを楽しんで頂けたら幸いです。ネットワーク技術を専門となさっている方は、ネットワークの各方面の最先端技術の解説を心行くまで御堪能下さい。本小特集では、現行の5Gを超える技術であるBeyond 5G技術、それを支える有線や無線のネットワーク、その構築や解析、そして国の保安を守る技術など、ネットワークの重要分野を切り取り、それに深く立ち入って解説しています。またコラボレーション企画として、ネットワーク分野の伝統的基礎技術である誤り検出と訂正の子供向け記事も用意しています。大人から子供まで、初心者から専門家まで、伝統芸能から最先端技術までを楽しんで頂ければ幸甚です。

小特集編集チーム

山口実靖, 磯崎裕臣, 金友 大, 中村光貴, 和田友孝

新しい電波伝搬研究が支える 第6世代移動通信システム

6th Generation Mobile Communication System Supported by New Radio Wave Propagation Research

中村光貴 Mitsuki Nakamura† 須山 聡 Satoshi Suyama†
北尾光司郎 Koshiro Kitao† 富永貴大 Takahiro Tomie†

Summary

重要な社会インフラの一つである携帯電話などの移動通信システムは、第5世代移動通信システム(5G)が商用サービスをスタートし、世界各国では、5Gの高度化(5G Evolution)だけでなく、次世代の第6世代移動通信システム(6G)についても検討が進められている。本稿では、移動通信システムとして6Gの背景、要求条件の一例、今後のスケジュールを説明し、移動通信システムにおける電波伝搬研究の重要性について述べる。また、5G Evolution及び6GについてのNTTドコモの電波伝搬特性解明に向けた取組みの一部である、カラーイメージを用いた電波伝搬特性の推定手法や、点群データによるエリア評価、サブテラヘルツ帯の検討を紹介する。

Key Words

電波伝搬, 5G Evolution, 6G, 移動通信システム

1 はじめに

今日、我々の生活を見ると、無線通信はなくてはならないものとなっている。中でも、スマートフォンをはじめとする移動通信端末は爆発的に普及しており、2021年の総務省による調査では、スマートフォンの世帯保有率は88.6%という結果が得られている⁽¹⁾。スマートフォンは、移動通信システムと呼ばれるシステムを利用して通信を行っている。この移動通信システムは、1979年に第1世代移動通信システムがスタートしてから、ほぼ10年ごとに新しい世代の移動通信システムが登場しており、現在の日本では2020年に第5世代移動通信システム(5G)の商用サービスがスタートしている⁽²⁾。

5Gでは、高速大容量、低遅延、多接続という技術的特徴により、第4世代移動通信システムまでのマルチメディア通信サービスの高度化に限らず、人工知能(AI)やIoTとともに、これからの産業や社会を支える基盤技術として新たな価値を提供することが期待されている。先に述べたとおり、移動通信システムの技術方式は、約10年単位で進化しているが、移動通信システムのサービスは、約20年単位で大きな変化をしている。図1に、移動通信システムにおける技術とサービスの進化を示す。図1に示すとおり、1980年頃に携帯電話の商用

サービスがスタートし、1980年頃～2000年頃、2000年頃～2020年頃で大きな区切りとなっている。そのため、2020年から始まった5Gだけでなく、5Gの高度化(5G Evolution)及び次世代の第6世代移動通信システム(6G)の技術により、2030年代の産業や社会を支えていくことが期待される⁽²⁾。

5G Evolution及び6Gについて、国内に限らず世界各国の様々な組織で検討が進められており、その技術コンセプトやホワイトペーパーが公開されている^{(2)～(12)}。

NTTドコモでも、5G Evolution及び6Gの技術的な展望をホワイトペーパーで述べるとともに、様々な取組みを行っている^{(2), (13)～(20)}。移動通信システムは、端末から基地局までの無線アクセス、基地局間の通信であるコアネットワークといった

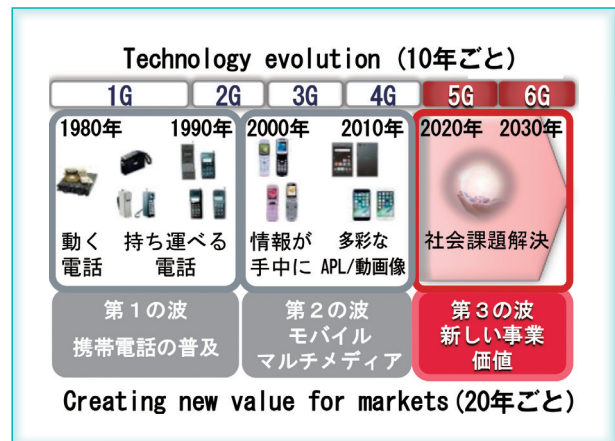


図1 移動通信における技術とサービスの進化⁽²⁾

† (株)NTTドコモ, 東京都
NTT DOCOMO, INC., Tokyo, 100-6150 Japan

様々な要素技術で構成されている。その中で、電波伝搬に関する要素技術は、スマートフォンなどの移動通信端末が、基地局と通信を行う上で、円滑な通信の実現を支える基礎的な技術となっている。

本稿では、6Gの全体像を述べるとともに、6G実現の根幹を担う電波伝搬に関する研究の一部を紹介する。

2 5G Evolution 及び 6G

無線トラフィックは年々増加しており、移動通信システムに求められる通信容量も大きくなっている。そのため、移動通信システムで使用する周波数帯は、広帯域が使用可能な高周波数帯の開拓が進んでいる。日本において、2020年に商用サービスを開始した5Gでは、ミリ波帯の28 GHz帯まで使用している。しかし、高い周波数帯ほど距離による電波の減衰が大きいことが知られており、遮蔽などによる減衰が大きいことも報告されている⁽²¹⁾。そのため、5Gについて、ミリ波帯のカバレッジの改善といった課題や実現が期待されるものも見いだされており、2020年代中に5G Evolutionの技術開発が求められている⁽²⁾。

次世代の6Gについても、導入時期である2030年代の社会や世界観の考察を基に、要求条件やユースケースが検討されている。図2に、NTTドコモが、5G Evolutionを経て、6Gで実現を目指す無線ネットワーク技術への要求条件を示す⁽²⁾。図2では、6Gの要求条件が5Gの要求条件を高めたものに加えて、新しいユースケースによる組合せについても検討が必要なることを示している。要素条件は、「超高速・大容量通信」、「超カバレッジ拡張」、「超低消費電力・低コスト化」、「超低遅延」、「超高信頼通信」、「超多接続&センシング」の六つで構成されている。

6Gに関する標準化スケジュールについては、2022年6月にITU-RのWP5Dにて合意された⁽²²⁾。そこでは、要求条件策定完了が2026年、提案受付締切が2028年頃、ITU-R勧告完成が2030年中頃とされている。3GPPで策定された技術仕様がITU-Rに提案されるため、3GPPは2024年頃から本格的な標準化議論が開始されると想定している。

3 移動通信システムと電波伝搬研究

移動通信システムでは、移動通信端末から基地局までは無線で通信を行っているが、基地局間である

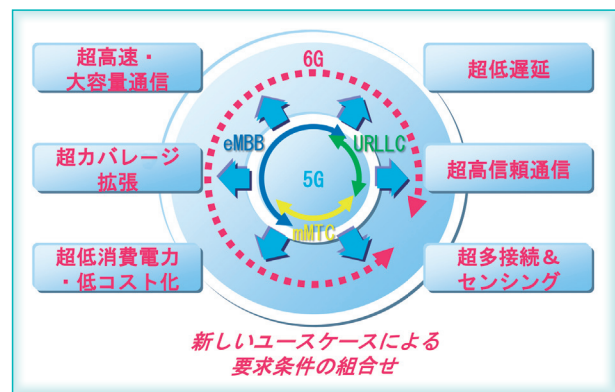


図2 6Gでの無線ネットワーク技術の要求条件⁽²⁾

コアネットワークは有線で通信を行っている場合が多い。これは、無線通信に比べて有線通信の方が、ケーブル等を介するため、安定かつ大容量の通信が行える等の理由による。一方で、無線通信は、有線通信と比べてケーブル等で接続する必要がないため、通信端末を持ち運びやすいなど利便性が高いという利点がある。

移動通信システムの無線通信は電波により通信を行っている。そのため、効率的に無線通信を行うには、電波がどのように伝搬するかについて理解が必要である。これは移動通信システムの世代によらず、次世代の6Gにおいても言えることである。

図3に近年、サイバー空間とフィジカル空間を融合したインフラ基盤として検討が進められているサイバーフィジカルシステム(CPS)と無線通信の関係を示す⁽²⁾。CPSでは、フィジカル空間の映像やセンシング情報などのサイバー空間への大容量かつ低遅延な伝送、並びに高信頼かつ低遅延な制御信号伝送によるフィジカル空間へのフィードバックが想定され、5Gの特徴を生かした高速通信への期待が高まっている。そこで、無線通信でこれらを安定して運用するために、対象の周波数帯及び環境における電波伝搬特性の検討が求められている。

図4に、NTTドコモが行っている5G Evolution及び6Gにおける電波伝搬特性の検討の一例を示す。5G Evolutionにおけるミリ波帯のカバレッジ改善だけでなく、6Gにおけるサイバー・フィジカル融合を見据えた幅広いユースケースに対応するため、5Gより高い周波数帯であるサブテラヘルツ帯(100 GHz~300 GHz)を含めた様々な周波数を含めて検討する必要がある。端末と通信を行う基地局は、実測やシミュレーションにより構築したモデルを基に決定している。そのため、ミリ波やサブテラヘルツ波でも実験やシミュレーションによるモデル構築が必要となる。しかし、高周波数帯のエリア評

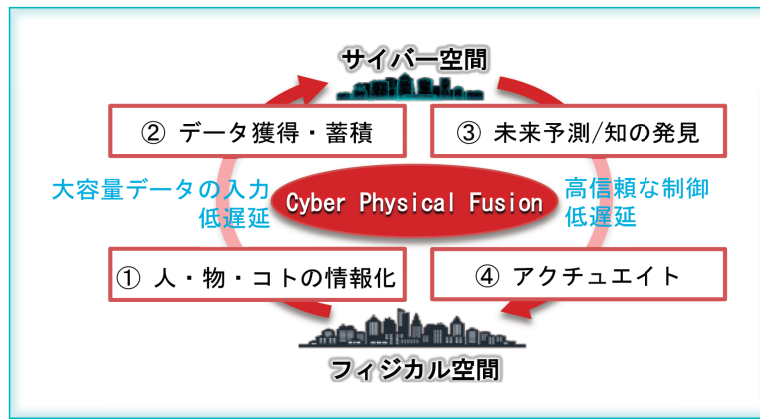


図3 CPSと無線通信⁽²⁾


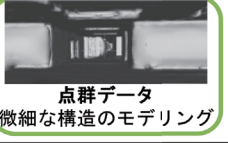
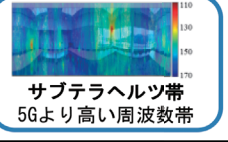
シミュレーション	 <p>カラーイメージ 高速なエリア評価</p>  <p>点群データ 微細な構造のモデリング</p>
実測	 <p>サブテラヘルツ帯 5Gより高い周波数帯</p>

図4 5G Evolution 及び6Gにおける電波伝搬特性の検討の一例

価には、シミュレーションに時間が掛かるなどの課題がある。そこで、NTTドコモでは、カラーイメージを用いた電波伝搬特性の推定手法や、点群データによるエリア評価について検討している。

4 新しい電波伝搬研究

電波伝搬研究の目的の一つに、エリア評価用のモデル構築がある。これは、基地局などを設置してから、その基地局がカバーしているエリアを測定するのではなく、モデルにより所定の位置にある基地局がカバーできるエリアを評価することで、効率的な基地局の設計を可能にするものである。

エリア評価用のモデル構築手法には、レイトレーシング (RT) 法などのシミュレーションによる方法や、実測による方法がある。シミュレーションによる方法は、測定機器は不要なものの、推定精度について検証が必要で、RT法などは計算時間が掛かるという特徴がある。一方、実測による方法は、測

定機器が必要で測定に時間が掛かるものの、所定の環境における精度の高いデータを取得できるという特徴がある。そのため、どちらか片方だけでなく、シミュレーションと実測両方で検討を進めることが重要である。

本稿では、シミュレーションによる検討として、カラーイメージによるエリア評価手法と、点群データを用いたエリア評価手法を紹介し、実測による検討として、サブテラヘルツ帯の電波伝搬特性の検討を紹介する。

カラーイメージによるエリア評価手法は、RT法と比べて短時間で計算できるため、大規模なエリアでの高速計算への適用が期待されている一方で、高周波数帯などで影響が大きくなるとされる微細構造を反映しづらいという特徴がある。

点群データを用いたエリア評価手法は、点群データにより高精度なシミュレーションモデルを少ない労力で構築できる一方で、大規模なエリアではモデルの精度が落ちるといった特徴がある。

サブテラヘルツ帯の電波伝搬特性の検討は、サブテラヘルツ帯で課題とされる散乱や遮蔽などの要素についてシミュレーションと実測を行っており、エリア評価へ適用可能なモデル構築に向けて研究開発を進めている。

いずれもユースケースや適用可能な領域と現在の検討状況が異なるため、様々な利用が想定される6Gに向けて、並行した検討が必要である。

4.1 カラーイメージ法

5G Evolution 及び6Gにおけるリアルタイムかつ高精度な電波伝搬特性のエミュレート技術の需要に伴い、NTTドコモでは、カラーイメージを用いた電波伝搬特性推定手法 (カラーイメージ法) の研究開発に取り組んでいる^{(15), (16)}。

カラーイメージ法は、RT法のように電波を光線

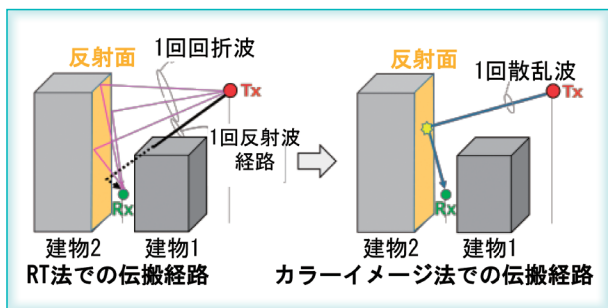


図5 RT法とカラーイメージ法での1回散乱波

に見立てて模擬するのではなく、計算対象となるエリアの全ての散乱面に対して、異なる色を割り当てて、送信点 (Tx) 及び受信点 (Rx) から同一の色を検出することにより散乱点を特定し、伝搬特性を推定する手法である。

図5に、カラーイメージ法とRT法による考え方の違いを示す。図5左側がRT法、図5右側がカラーイメージ法による散乱波の考え方である。図5は、Txから発射した電波が、ビル壁面の黄色い面で散乱してRxへ到来する様子を示している。図5左側のRT法では、電波を光線に見立て、各光線に対して回折や散乱のシミュレーションを行うため、同じ壁面での1回散乱でも複数の光線が散乱してTxからRxへ到来している。一方、図5右側のカラーイメージ法では、壁面の1か所で散乱し、TxからRxへ到来していることが分かる。

結果として、カラーイメージを用いることでRT法と比べて計算時間を約100分の1まで短縮できるため、大規模なエリアでの高速計算への適用が期待されている⁽¹⁶⁾。

例として、シミュレーション対象にエリアで、散乱面にカラーイメージを割り当て、図6上側にTxから見た各散乱面のカラーイメージ、下側にRxから見た各散乱面のカラーイメージを示す。図6に示すとおり、カラーイメージ法では、計算対象となるエリアの全ての散乱面に対して、異なる色を割り当てるため、一つの図中に同じ色は存在しない。そのため、Tx及びRxから同一色が確認できた場合、そこで1回散乱するとTxからRxへ電波が到来すると分かる。

カラーイメージ法によるシミュレーション結果と、実測結果を比較することで、性能評価を行った結果についても紹介する。使用した実測結果は、AP研伝搬データベースで公開されている福岡県北九州市小倉地区の伝搬損データである⁽²³⁾。表1が実測の測定諸元、図7が比較評価に使用した測定コースを示す。Txは地上高12.5mの建物の屋上、

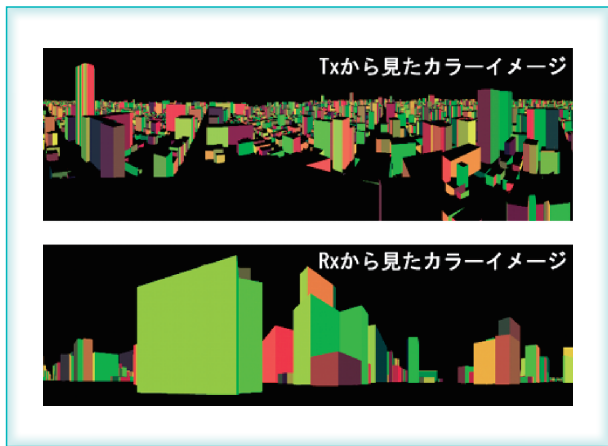


図6 Tx及びRxから見たカラーイメージ

表1 測定諸元

測定エリア	北九州市小倉北区 送受信間距離1 km 以内
周波数	1298 MHz
アンテナ	送受信ともに標準ダイポール 2 dBi
出力	39.5 dBm
基地局 (送信点)	アンテナ高: 12.5 m
基地局 (受信点)	アンテナ高: 1.5 m
短区間長	10 m
コース数	12
合計ポイント数	486

Rxは地上高1.5mの測定車屋根に設置されていた。測定車が図7の測定ルートを移動し、受信レベルを取得した。カラーイメージ法を適用するためには、Tx及びRxから同一色を確認する必要がある。今回使用した測定データでは、同一色が確認できた右上のエリアが細かくルート設定されている。精度評価では受信レベルから算出した伝搬損の10m区間中央値を使用した。なお、区間中央値のデータ点数は計486点である。

図8にカラーイメージ法による推定結果と実測結果の比較を示す。精度評価には、誤差平均値 (μ) と二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いた。RMSEは、推定結果と実測結果の比較に使用される指標の一つで、RMSEが0に近いほど推定結果の精度が良いことを意味する。推定結果と実測結果の誤差平均値は約-1.0 dB、RMSEは約7.9 dBであり、推定結果と実測結果は近い値であることが確認できる。ここでRMSEが約7.9 dBとなった理由として、同一色のカラーイメージを対象に計算時間を大幅に短縮できるものの、1回散乱波以外の到来波が支配的なルートではかい離ができたため少し差が出

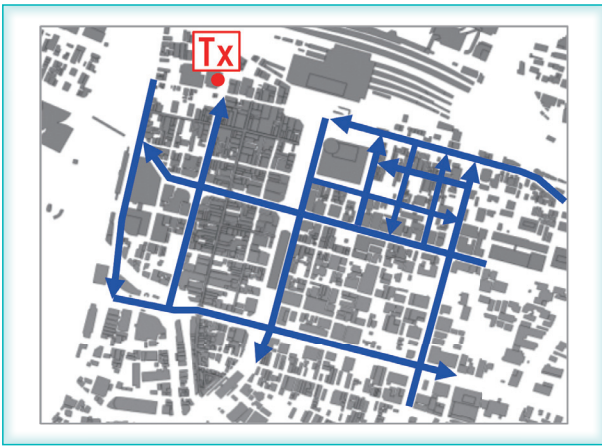


図7 比較評価に使用した測定コース

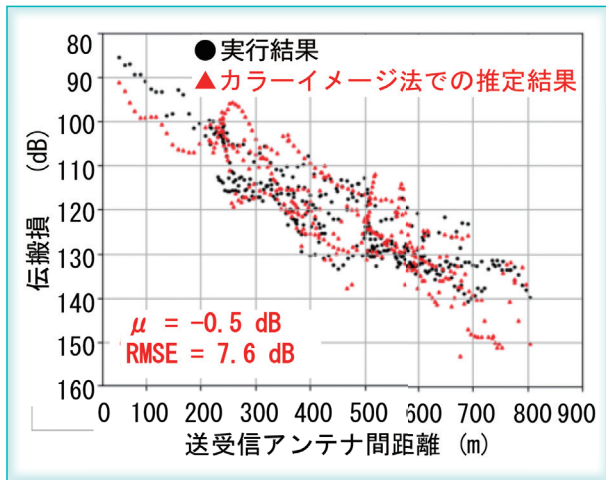


図8 カラーイメージ法による推定結果と実測結果

たとえられる。

4.2 点群データを用いたエリア評価手法

モデルを使用したRT法によるシミュレーションでは、計算対象とするエリアのモデルを作成する必要がある。NTTドコモでは、この計算モデルを点群データにより構築し、伝搬特性を推定する手法を検討している⁽¹⁷⁾。

図9に点群データによるシミュレーションモデル構築からシミュレーションまでの流れを示す。まず、点群データを取得可能な装置で、計算対象とするエリアで点群データを測定する。次に、取得した点群データからシミュレーション用のポリゴンデータを生成する。最後に、ポリゴンデータを対象に伝搬シミュレーションを行う。従来は複雑なシミュレーションモデル構築に多大な手間が掛かってきたが、点群データの活用により、作業の大幅な削減が可能となった。

点群データで作成したシミュレーションモデルによるシミュレーション結果と、実測結果を比較することで、性能評価を行った結果についても紹介す

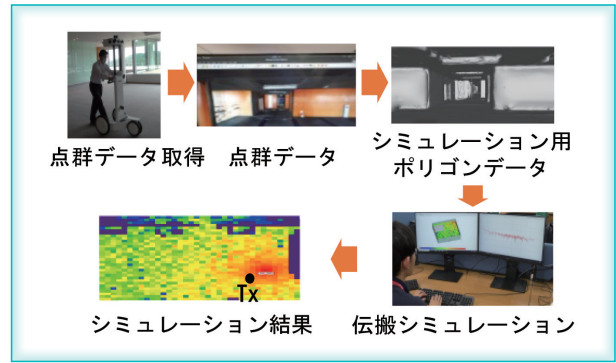


図9 点群データを用いたシミュレーションの流れ

表2 シミュレーション諸元

レイトレースツール	Wireless Insight
アルゴリズム	レイローチング法
反射回数	5回
回折回数	1回
レイ射出間隔	0.25 deg.
偏波	垂直
材質	金属

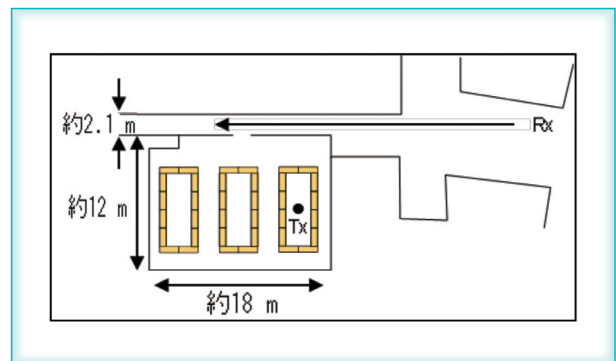


図10 シミュレーション対象の環境

る。表2がシミュレーション諸元、図10がシミュレーション対象の環境、図11が実測とシミュレーション結果の比較を示す。

図10に示すとおり、屋内の部屋にTxを設置し、隣接する廊下に沿ってRxを移動させて測定を行った。Txを設置した部屋は幅約12 m、奥行き約18 m、天井高約3.6 mの会議室で、机が方形に三つ並べられている。図10の黄色の四角一つ一つが机を示す。方形に机が並べられている中でRx移動開始地点に近いものの、中心にTxを設置した。Rxが移動した廊下は、移動開始地点は幅が広いものの、Txが設置されている付近では幅約2.1 m、天井高約2.7 mの廊下が続いている。TxとRxの高さは1.5 mで、周波数が19.85 GHzのCW信号により測定した結果から、1 m 区間中央値を算出

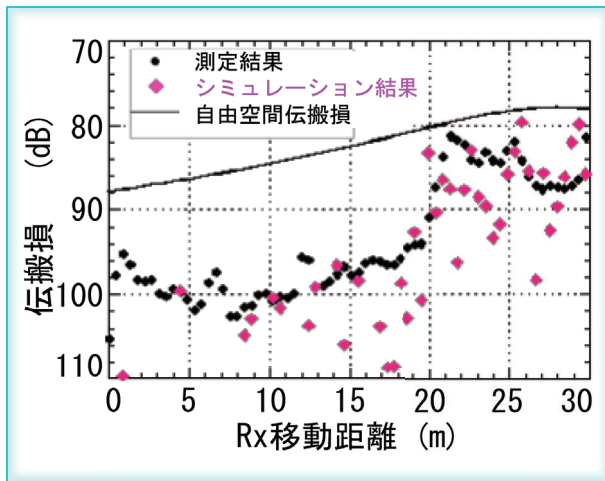


図 11 シミュレーション結果と実測結果

した。

図 11 のうち、移動距離が 20 m から 30 m 付近が見通し環境、それ以外が見通し外環境である。図 11 に示すとおり、点群データを用いたシミュレーション結果は、実測結果に比べて伝搬損が大きくなる傾向があるものの、よく一致していることが分かる。

4.3 サブテラヘルツ帯の電波伝搬特性

6G では、100 Gbit/s を超える超高速・大容量通信の実現に向けて検討が進められている。100 Gbit/s 超の通信速度を実現するため、広い周波数帯域幅が利用可能な 100 GHz~300 GHz のサブテラヘルツ帯の活用が検討されている⁽²⁾。サブテラヘルツ帯は、5G 商用サービスで使用されている 28 GHz 帯などと比べて周波数が高く、人体等の遮蔽により大きな損失が発生することが報告されている⁽²¹⁾。そのため、遮蔽物が多い環境でサブテラヘルツ帯の電波を使用すると、遮蔽により大きく減衰することが予想される。

NTT ドコモでは、サブテラヘルツ帯のマルチパスについてシミュレーションや測定を行い、サブテラヘルツ帯における直接波や反射波の活用について検討を進めている^{(18)~(20)}。

最初に、サブテラヘルツ帯である 300 GHz で直接波と直接波遮蔽時の反射波についてシミュレーションした結果を紹介する。図 12 がシミュレーション環境、表 1 がシミュレーション諸元、図 13 がシミュレーション条件と結果、図 14 がシミュレーション結果を伝搬損の距離特性としたものである。

図 12 に示すとおり、シミュレーション対象は、幅 120 m、奥行き 50 m、高さ 3 m のコンクリー

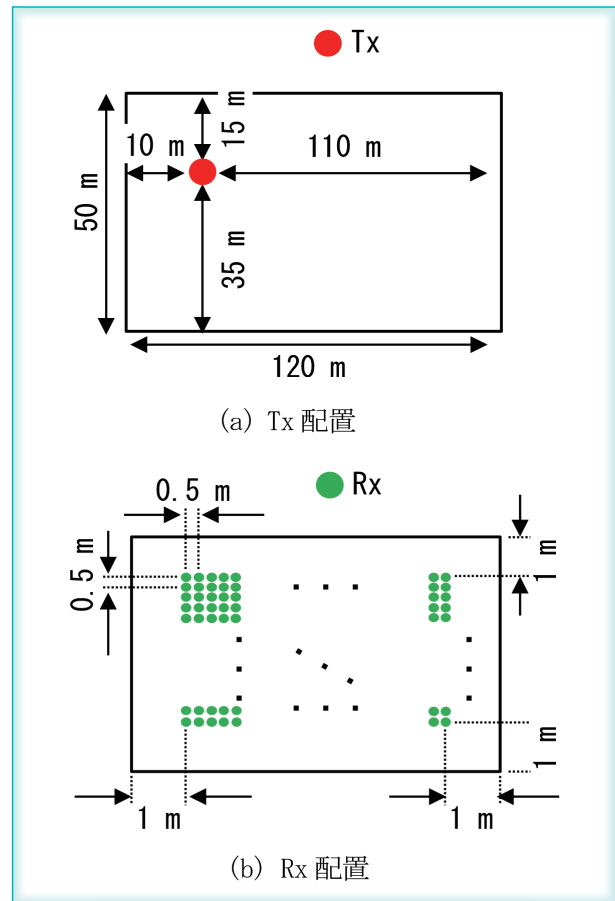


図 12 シミュレーション環境 Tx と Rx 配置

トに囲まれた空間である。Tx は天井と同じ高さ 3 m、各壁面からそれぞれ 10 m かつ 110 m、15 m かつ 35 m の地点に配置した。Rx は、最も近い壁面から 1 m 離れた地点を基準に、0.5 m 間隔で配置した。図 13 に示すとおり、直接波の遮蔽と反射波の効果を評価するため、異なる条件でシミュレーションを行った。図 14 に示すとおり、距離が 20 m 以上では、遮蔽されていない直接波と遮蔽され回折して到来した直接波で、遮蔽による損失と見られる約 40 dB 以上の差が確認できる。一方で、距離が 60 m 以上では、遮蔽されていない直接波と遮蔽されていない反射波で、最大でも 10 dB 程度しか差がないことが分かる。

次に、サブテラヘルツ帯である 160 GHz と 300 GHz の 2 周波数を用いて、屋内環境でマルチパスの伝搬損と到来波を測定した結果を紹介する。図 15 が測定環境の模式図、表 3 が測定諸元、図 16 が測定結果と測定地点でのパノラマ写真を透過合成したものである。

図 15 に示すとおり、測定環境は四方を壁とガラス窓に囲まれた空間である。部屋の大きさは約 12 m 四方で、天井の高さは約 3.6 m、部屋の中心を囲むように机と椅子が配置されている。机の高さは

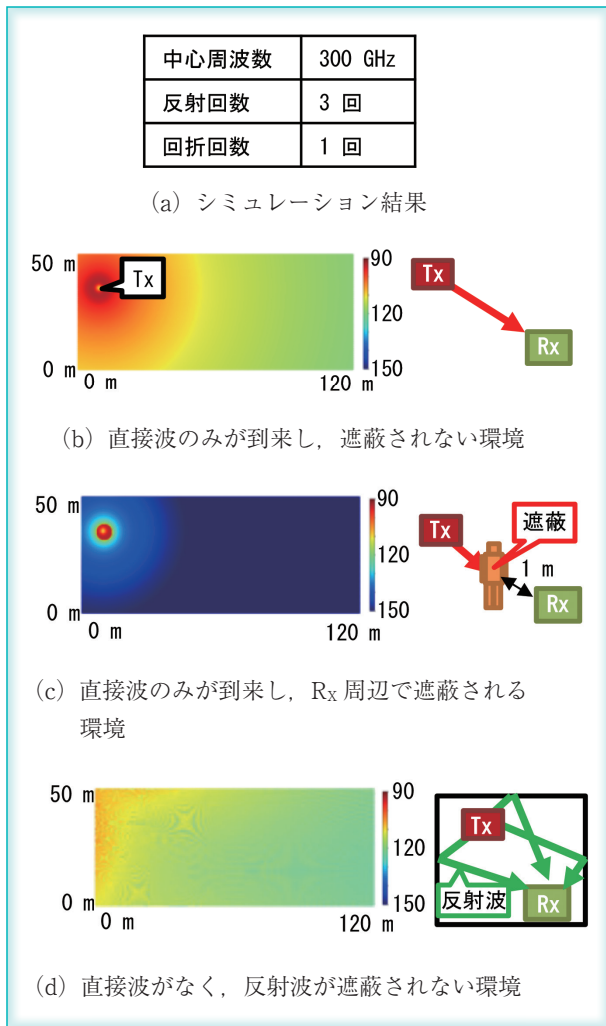


図 13 シミュレーション条件と結果

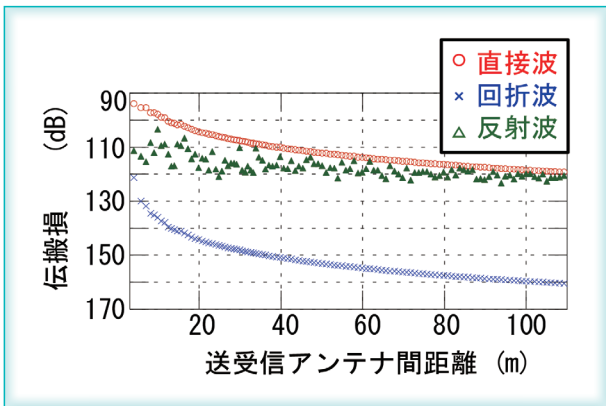


図 14 シミュレーション結果 伝搬距離特性

約 70 cm, 椅子の高さは約 83 cm である。測定は、中心周波数が 160 GHz と 300 GHz の CW 信号を使用した。Tx アンテナとして半値角約 10° のホーンアンテナ, Rx アンテナとして半値角約 1° のカセグレンアンテナでダブルディレクショナルな測定をした。Tx を壁から 1 m, 高さ 3 m の地点に配置し, Rx を部屋の中央かつ, 高さ 1 m の地点に配置し測定した。Tx アンテナの指向性方向は、水平角度を

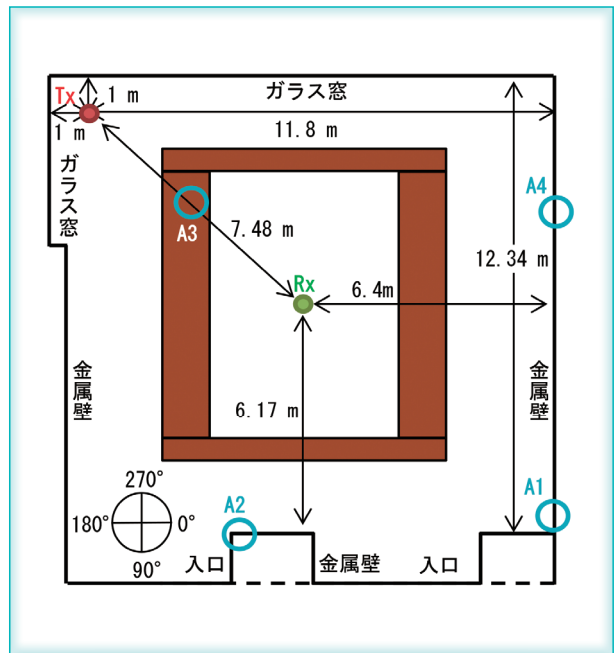


図 15 測定環境の模式図

表 3 測定諸元

項目	諸元
中心周波数	160 GHz, 300 GHz
送信信号	CW
送信アンテナ	ホーンアンテナ
受信アンテナ	カセグレンアンテナ
送信アンテナ利得	23 dBi (160 GHz) 25.4 dBi (300 GHz)
受信アンテナ利得	44.2 dBi (160 GHz) 43.3 dBi (300 GHz)
送信アンテナ高	3 m
受信アンテナ高	1 m

図 15 の 0° から 90° まで 10° ごとに変え, 各水平角度で仰角方向を -30° から 30° まで 10° ごとに変え測定した。Rx アンテナは, 各 Tx アンテナ方向で, 水平方向に 360° 回転させ, 仰角方向を -12° から 30° まで 3° ごとに変えて測定した。測定により取得した受信レベルから, 測定に使用した送信機器と送受信アンテナ利得により伝搬損を算出した。図 16 に示すとおり, 160 GHz と 300 GHz それぞれで, Tx アンテナ方向以外である A1~A4 方向から反射波が確認できる。図 16 の透過合成したパノラマ写真から, A1 は壁面にある金具での 1 回反射, A2 は壁面の縁での 1 回反射, A3 は天井での 1 回反射, A4 は壁面での 1 回反射をしたため強い到来波が確認できたと考えられる。反射点を図 15 水色の丸印で示す。正規反射である A3 及び A4 については, 反射面がきれいに確認できる。A4 と反射面

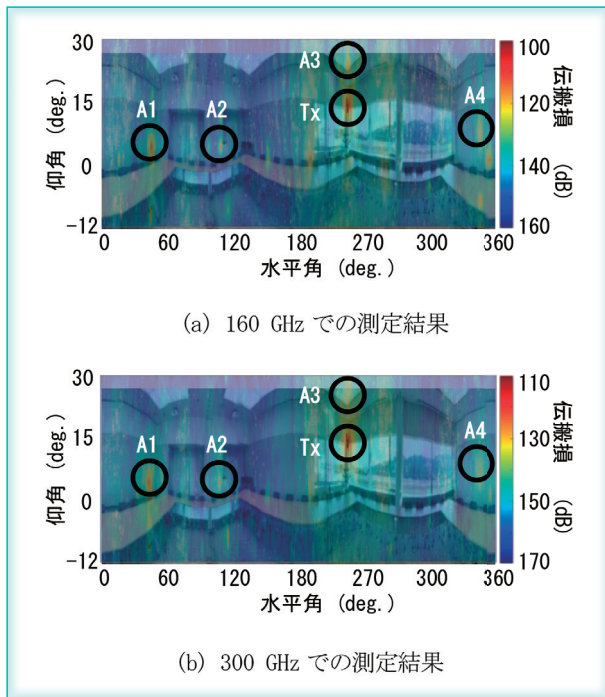


図 16 測定結果とパノラマ写真の透過合成図

が同じ材質であるものの、縁で反射している A2 は反射面が狭いため A3 や A4 と比べて伝搬損が大きく見える。また、金属性の金具で反射したと考えられる A1 は、反射面が金属のため、160 GHz では 120 dB 以下、300 GHz では 130 dB 以下の A2 から A4 より伝搬損が小さい到来波が確認できる。

5 まとめ

今日、我々の生活を支える重要な社会インフラの一つである移動通信システムは、現在の日本では 2020 年 5G の商用サービスがスタートしており、世界各国では次世代である 6G の検討が行われている。本稿では、移動通信システムとして 6G の背景、要求条件の一例、今後のスケジュールを説明し、移動通信システムにおける電波伝搬研究の重要性について述べた。また、5G Evolution 及び 6G 実現に向けた NTT ドコモの電波伝搬特性解明の取組みの一部として、カラーイメージを用いた電波伝搬特性の推定手法や、点群データによるエリア評価、サブテラヘルツ帯の検討を紹介した。

6G 実現に向けて、引き続き世界各国で様々な検討が進められることが予想される。その中でも移動通信システムの根幹を担う電波伝搬の研究は非常に重要であると考えられる。本稿で紹介した検討についても、シミュレーションの推定精度向上や適用範囲の拡大、測定結果を基にした伝搬特性の推定モデル構築について取り組んでいく。

文献

- (1) 総務省, “通信利用動向調査・令和 3 年調査 (4 年 5 月 27 日公表),” https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/220527_1.pdf (2023/3/8 閲覧)
- (2) NTT DOCOMO, INC., “DOCOMO 6G White Paper, 5G Evolution and 6G (Jan. 2022),” https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporcor/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperEN_v4.0.pdf (2023/3/8 閲覧)
- (3) UNIVERSITY OF OULU, “Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence (Sept. 2019),” <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526223544.pdf> (2023/3/8 閲覧)
- (4) Samsung, “The next hyper-connected experience for all (July 2020),” https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/20201201_6G_Vision_web.pdf (2023/3/8 閲覧)
- (5) NOKIA Bell Labs, “Communications in the 6G Era (Sept. 2020),” https://d1p0gxnqcu0lvz.cloudfront.net/documents/Asset_20200909220306.pdf (2023/3/8 閲覧)
- (6) Hexa-X, “6G Vision, use cases and key societal values (Feb. 2021),” https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2021/02/Hexa-X_D1.1.pdf (2023/3/8 閲覧)
- (7) SoftBank Corp., “SoftBank Corp. Unveils 6G concept (July 2021),” https://www.softbank.jp/en/corp/news/press/sbkk/2021/20210714_01/ (2023/3/8 閲覧)
- (8) KDDI Corporation, KDDI Research, Inc., “Beyond 5G/6G white paper (Oct. 2021),” https://www.kddi-research.jp/sites/default/files/kddi_whitepaper_en/pdf/KDDI_B5G6G_WhitePaperEN_2.0.1.pdf (2023/3/8 閲覧)
- (9) Huawei, “6G: The next horizon (Jan. 2022),” (Online), <https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/tech-insights/1/6g-white-paper-en.pdf?la=en> (2023/3/8 閲覧)
- (10) Ericsson, “6G – Connecting a cyber-physical world (Feb. 2022),” <https://www.ericsson.com/4927de/assets/local/reports-papers/white-papers/6g--connecting-a-cyber-physical-world.pdf> (2023/3/8 閲覧)
- (11) NICT, “Beyond 5G/6G white paper (June 2022),” https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaperEN_v2_0.pdf (2023/3/8 閲覧)
- (12) Beyond 5G Promotion Consortium white paper Subcommittee, “Beyond 5G white paper~ message to the 2030s~ (Oct. 2022),” https://b5g.jp/w/wp-content/uploads/pdf/whitepaper_jp_1-5r1.pdf (2023/3/8 閲覧)
- (13) D. Kitayama, Y. Hama, K. Goto, K. Miyachi, T. Motegi, and O. Kagaya, “Transparent dynamic metasurface for a visually impaired reconfigurable intelligent surface: controlling transmission/reflection and making a window into an RF lens,” *Opt. Express* vol. 29, no. 18, pp. 29292-29307, Aug. 2021.
- (14) 後藤健太, 山田貴之, 須山 聡, 伊藤昌嗣, 野中信秀, “屋外環境下における 28 GHz 帯及び 39 GHz

- 帯カバレッジ測定実験,” 2022 信学ソ大, B-5-48, Sept. 2022.
- (15) 富永貴大, 須山 聡, 北尾光司郎, 中村光貴, “カラーイメージを用いた電波伝搬特性の新推定法,” 信学技報, AP2022-67, pp. 17-22, Aug. 2022.
- (16) 富永貴大, 須山 聡, 北尾光司郎, 中村光貴, “カラーイメージ法のパスロス推定に関する性能評価,” 信学技報, AP2022-191, pp. 80-85, Jan. 2023.
- (17) K. Kitao, M. Nakamura, T. Tomie, and S. Suyama, “Study of raytracing using point cloud data for indoor area evaluation,” ICETC 2022 S1-6, Nov. 2022.
- (18) 中村光貴, 須山 聡, 北尾光司郎, 富永貴大, 小田恭弘, “屋内環境シミュレーションによる 300 GHz 帯反射波の効果,” 2022 信学総大, B-1-23, March 2022.
- (19) 中村光貴, 須山 聡, 北尾光司郎, 富永貴大, 猪又稔, 山田 渉, 久野伸晃, 佐々木元晴, “屋内環境における 160 GHz 帯および 300 GHz 帯マルチパス波の測定,” 信学技報, AP2022-62, pp. 156-161, July 2022.
- (20) 中村光貴, 須山 聡, 北尾光司郎, 富永貴大, 猪又稔, 山田 渉, 久野伸晃, 佐々木元晴, “オフィス環境における 28 GHz 帯から 300 GHz 帯までのマルチパス波の測定,” 信学技報, AP2022-188, pp. 62-67, Jan. 2023.
- (21) M. Inomata, W. Yamada, N. Kuno, M. Sasaki, K. Kitao, M. Nakamura, H. Ishikawa, and Y. Oda, “Terahertz propagation characteristics for 6G mobile communication systems,” 15th European Conf. Ant. Prop. (EuCAP2021), Dusseldorf, Germany, pp. 1-5, March 2021.
- (22) ITU-R WP5D, “Attachment 2.12 to chapter 2 of document 5D/1361 (Meeting report WP 5D #41, June 2022),” 2022.
- (23) 今井哲朗, 岩井誠人, 市坪信一, “電波伝搬モデリングコンペティションの取組について,” 信学技報, AP2019-2, pp. 7-12, May 2019.

(2023年3月8日受付, 5月26日再受付)

中村光貴 (正員)

平 24 慶大・理工・電子工学卒。平 26 同大学院博士前期課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、無線アクセスシステムにおける電波伝搬特性と電波伝搬モデルの研究開発に従事。令 2 (株) NTT ドコモに転籍。現在、6G-IOWN 推進部に勤務。平 28 年度本会学術奨励賞、令元年度本会論文賞各受賞。



須山 聡 (正員：シニア会員)

平 13 東工大大学院修士課程了。同年同大学院・助手。以来、移動通信における無線伝送技術の研究に従事。平 19 同大学院・助教。平 22 東工大・博士 (工学)。平 25 (株) NTT ドコモ入社。現在、5G の高度化と 6G に向けて無線アクセス方式・技術及び電波伝搬の研究・実証実験を推進中。同社 6G-IOWN 推進部担当部長。平 16 年度本会学術奨励賞、平 23 年度本会論文賞、令 3 年度本会通信ソサイエティ論文賞各受賞。



北尾光司郎 (正員)

平 6 鳥取大・工・電気電子卒。平 8 同大学院工学研究科博士前期課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、移動伝搬に関する研究開発及び ITU-R において IMT 方式評価用チャネルモデルの標準化に従事。平 11 (株) NTT ドコモに転籍。平 21 鳥取大大学院工学研究科情報生産工学専攻博士後期課程了。平 27 本会通信ソサイエティ英文論文誌 Best Paper Award, 令 3 本会通信ソサイエティ論文賞各受賞。現在、NTT ドコモ 6G-IOWN 推進部に勤務。博士 (工学)。



富永貴大 (正員)

平 22 東北大大学院博士課程了, 博士 (工学)。同年 (株) NTT ドコモ入社。以来、次世代無線通信システムにおける電波伝搬技術の研究開発に従事。現在、同社 6G-IOWN 推進部社員。5G の高度化と 6G に向けて、電波伝搬のシミュレーション及び測定・解析技術を推進中。



Beyond 5G 時代の産業を支える ネットワーク分析・制御技術

高橋英士	Eiji Takahashi	NEC	沢辺亜南	Anan Sawabe	NEC
西川由明	Yoshiaki Nishikawa	NEC	篠原悠介	Yusuke Shinohara	NEC
大西健夫	Takeo Onishi	NEC	岩井孝法	Takanori Iwai	NEC

1 はじめに

少子高齢化による労働人口の減少、技術継承問題、インフラ老朽化等を背景として、人間にしかできなかった多くのことを機械で代替し、産業の現場を効率化していく必要性が高まっている。その実現手段として、Beyond 5G（第5世代移動通信）、Internet of Things (IoT)、Artificial Intelligence (AI) を活用した遠隔監視・制御による自動化・省人化といった Digital Transformation (DX) の推進が期待されている。遠隔監視・制御の現場では機器の移動性や設置容易性を求められる場合が多く、無線通信が必須となる。また、高いアプリケーション性能（例えば、監視カメラの映像分析精度、無人搬送車の運搬スループット等）が求められ、それに伴い通信品質に対する要求条件も厳しくなる。本稿では、5G や Beyond 5G の機能・能力を最大限に活用し、アプリケーションを安定して高い性能で利用可能とする、ネットワーク分析・制御技術を紹介する。

2 要求条件と技術アプローチ

Beyond 5G, IoT, AI を活用した遠隔監視・制御により DX を推進していく上での要求条件を考察する。

遠隔監視・制御による DX 推進の対象領域（例えば、工場、建設現場等）の拡大により、多種多様なアプリケーションとその通信要件に柔軟に対応することが求められる。そのためには、AI でネットワークや通信の状況をリアルタイムで分析し自動最適化することで、下記(1)、(2)の課題を解決し、システム全体でアプリケーション性能を最大限に高める技術が必要となる。

(1) 厳しい通信要件に上下方向で対応

DX を推進していく上では、アプリケーションの性能が現場の生産性に直接影響することが多いため、アプリケーションを安定して高い性能で利用可能とすることが

強く求められる。そのためには、厳しい通信要件を達成する必要がある。更に、例えば工場自動化やロボット制御などの遠隔制御では、機器やロボットの状態監視と制御指示から成る双方向のやり取りを一定時間の中で完了させる必要があるため、「上り」「下り」の双方向で厳しい通信要件（高信頼・低遅延など）を維持することが求められる。

(2) 複数アプリケーションの混在に対応

DX を推進していく上では、アプリケーションやその通信要件は多種多様であり、また同じアプリケーションでも通信要件が異なる複数種別のトラヒックを生成する場合がある。例えば、高速・大容量通信を必要とする映像配信と、高信頼・低遅延を必要とする遠隔制御などのトラヒックが混在する場合は、大容量通信を維持しながら高信頼・低遅延を実現するなど、幅広い通信要件に同時に対応する必要がある。

次に技術アプローチについて考察する。

遠隔監視・制御の現場では、レイアウト変更やロボットの移動等により電波環境が変動し通信品質が低下することがある。このため、無線レイヤを分析・制御しアプリケーション通信要件の達成率を高める必要がある。無線レベルの解決アプローチとして、**3.**ではAIを用いた無線品質分析技術、**4.**ではアプリケーション QoS アウェア分散アンテナ選択技術を紹介する。

エンドツーエンドで高信頼な通信を提供するためには、無線レベルの解決アプローチに加え、より上位レイヤでネットワークや通信を分析・制御し通信要件達成率を高める必要がある。アプリケーションレベルの解決アプローチとして、**5.**、**6.**ではアプリケーションレベルの通信遅延要因推定技術、**7.**ではアプリケーションレベルの通信遅延安定化技術を紹介する。

既存システムとの互換性などシステム上の制約や、アプリケーション通信要件に応じてこれらの技術を使い分けることで、多種多様なアプリケーションとその通信要

件に対応し、システム全体でアプリケーション性能を最大限に高めることを目指している。

3 AIを用いた無線品質分析技術

本章では、AIで無線品質を可視化・分析し、通信品質が低下した原因を即座に特定して迅速な対処を可能とする、無線品質分析技術を紹介する。

3.1 課題

Beyond 5G, IoT, AIを活用した遠隔監視・制御の現場では、作業の生産性を左右するアプリケーション性能を高めるため、安定して厳しい通信要件を守ることが求められる。しかし、現場ではレイアウト変更やロボットの移動などにより、電波環境が変動し通信品質が低下することがある。電波は目に見えないため低下の原因を特定することが難しく、分析に膨大な時間と労力を要する。このため通信品質低下の原因を自動特定し、対処までの時間を短縮する必要がある。

3.2 技術

筆者らは、AIで無線品質の変動特性を分析し、通信品質の低下原因を通信セッション単位でリアルタイム、かつ自動的に特定する技術を研究開発している。ここでは、現場の無線品質を空間的に把握する無線品質可視化技術、通信品質の低下原因を特定する通信品質低下原因特定技術、及び原因ごとの通信品質低下への影響度合いを推定する影響度推定技術を紹介する。

3.2.1 無線品質可視化技術

現場では、レイアウト変更や機器移動及び作業進捗により、電波の遮蔽や反射等で無線品質が変動し通信品質が低下することがある。無線品質の変動を把握する上では、電波の受信電力分布を時系列で空間的に可視化することが有効である。しかし、そのために現場に受信電力測定センサを大量に設置するとコストが増大する。そこで筆者らは、初回だけ網羅的に測定して詳細な受信電力マップを作成し、運用中は限られた数のセンサ情報から他地点の受信電力を推定することで、エリア全体の受信電力マップを低コストかつリアルタイムで更新する技術を開発した。フロア特有の反射、回折、及び基地局との関係性等で決まる受信電力分布の特徴をモデル化することで、限られたセンサ情報から現場全体の受信電力分布を推定し、また遮蔽物等が出現した場合は電波伝搬シミュレーションを併用し遮蔽物の影響を受信電力分布に反映する。

3.2.2 通信品質低下原因特定技術

無線品質変動により通信品質が低下すると、ロボット等の無線機器がフェイルセーフ等で動作を一時停止し現場作業の生産性が低下する。このため、通信品質低下原因を即座に特定し、迅速に対処可能とする必要がある。ここでは、無線通信における主要な通信品質低下原因として、距離減衰、遮蔽、フェージング等を想定している。筆者らは、上記原因ごとに Reference Signal Received Power (RSRP) 等の電波指標値の時系列特性が異なることに着目し、機械学習による時系列分析で原因をリアルタイム推定する技術を開発した^{(1), (2)}。本技術について、ローカル 5G を導入した工場等で実証実験を行い、原因を高精度で特定することに成功している。

3.2.3 影響度推定技術

現場では複数の原因で無線品質が変動することが多く、原因ごとの通信品質（スループット等）への影響度を考慮した対処が必要である。このため、通信品質を効果的に改善するためには、単に通信品質低下原因を特定するだけでは不十分である。そこで筆者らは、機械学習と電波伝搬シミュレーションを併用して RSRP 等の電波指標の時系列データを分析し、通信品質低下原因ごとのスループットへの影響度を推定する技術を開発した。

3.2.4 無線品質分析の GUI 表示イメージ

本節で紹介した無線品質分析技術の GUI 表示イメージを図 1 に示す。ここでは、フロア全体の受信電力分布、通信品質低下原因の推定結果（図 1 左側）、無線品質、通信品質、ネットワーク負荷（図 1 右側）を表示している。これにより通信品質低下を即座に検出しその原因を把握することで、迅速な対処が可能となる。

4 アプリケーション QoS アウェア分散アンテナ選択

本章では、アプリケーションの通信遅延要件に応じて無線通信を最適化する、アプリケーション QoS アウェア分散アンテナ選択技術を紹介する。

4.1 課題

アプリケーションの遅延要件を高信頼で達成するため、空間ダイバーシティで無線通信を安定化させる手段として分散アンテナシステム (DAS: Distributed Antenna System) が注目されている。DAS では、基地局アンテナと端末の組合せにより無線品質が大きく変化するため、端末ごとの遅延要件を満たす最適な組合せ

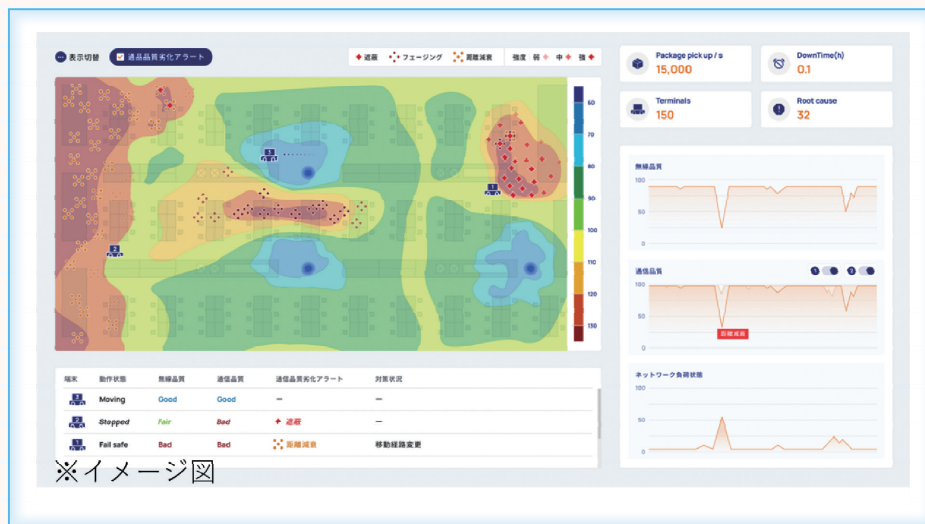


図1 無線品質分析のGUI表示イメージ

を導出する必要がある。しかしながら、遠隔監視・制御の現場では同一エリアに多数の端末が存在することが多く、最適な組合せを探索するための計算量が膨大となる。

4.2 技術

筆者らは、Deep Neural Network (DNN) を活用した分散アンテナ選択技術を開発した⁽³⁾。DNN は膨大な組合せから解を発見する手段として有効だが、リアルタイムで分散アンテナ選択を実行するためには計算量の削減が必要である。筆者らは、「粗い UE 選択」と「細かい UE 選択」から成る 2 段階のスキームで解空間を圧縮し、計算量を削減する技術を開発した。提案方式では秒間約 4,000 通りの組合せを計算できリアルタイムで分散アンテナ選択を実行可能である。シミュレーションで、アプリケーション通信要件達成率が、従来方式の約 50 % に対し提案方式で約 90 % に改善されることを確認した (図 2)。従来方式の Greedy Algorithm では各選択ステップで最も性能が向上するアンテナと端末を選択するが、提案方式では DNN で近似した行動価値 (Q 値) に基づき選択するため、最終的な効果につながる選択が可能となる。

5 アプリケーションレベルの通信遅延要因推定

エンドツーエンドで高信頼な通信を提供するためには、前章までで紹介した無線層の技術に加えて、上位層からのアプローチも不可欠である。本章では、アプリケーションレベルで実現可能な通信遅延要因を推定する技術を紹介する。

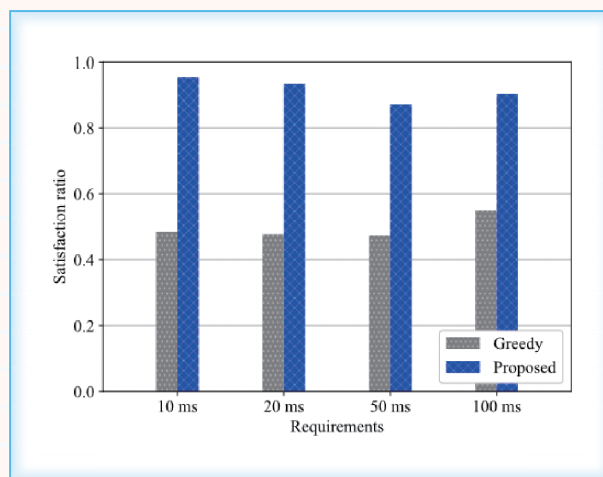


図2 アプリケーション遅延要件達成率の比較

5.1 課題

工場 DX で実装が期待されているロボットの遠隔制御では、比較的小さなサイズ (例えば、数十 Byte) のパケットを高頻度 (10 ms から 100 ms 間隔) で通信するため、動画像や音声通話のような人間が知覚する遅延のオーダ (100 ms から 1 s 相当) を超える安定した低遅延通信が必要となる。従来は安定したスループットを提供する目的でキューイング遅延が注目されていた一方で、従来以上に厳しい遅延要求に対処するためには、ロボット制御が対象とする ms オーダの世界で生じる遅延の要因を、アプリケーションが自動推定する技術が必要となる。

5.2 技術

筆者らは、ms オーダの遅延を、時間的ネットワーク挙動、空間的端末挙動、確定的システム挙動の三つの観点から分析している。

5.2.1 時間的ネットワーク挙動に起因する遅延

時間的に変動する遅延として、通信リンクを共有する他端末のトラヒックに依存して増減するキューイング遅延がある。この遅延は、従来広く研究されており、例えば動画配信のような帯域消費型のアプリケーションでは、キューイング遅延が広く注目されてきた。無線ネットワークでは、ふくそうしていても、空間的端末挙動と確定的システム挙動による遅延変動により遅延が増加するため、ふくそう判定が困難になる課題が発生する。

そこで筆者らは、Round Trip Time (RTT) を分析してロバストにふくそう状態を推定する技術を開発した⁽⁴⁾。提案技術では RTT を二段階で平滑化する。一段階目の平滑化 RTT を用いてふくそう判定用のしきい値を更新し、二段階目の平滑化 RTT を用いてふくそうを判定する。商用 5G ネットワークでの評価では、従来方式と比べてふくそう状態の推定精度を 70 % 程度改善した。

5.2.2 空間的端末挙動による遅延

次に、端末と基地局の見通し環境に依存して変動する実空間コンテキストに起因する遅延がある。無線通信では無線品質に応じて符号化率が変化する。符号化率やロスに応じて無線フレームの送信完了時間が変化するため、アプリケーション性能は通信端末の見通し状態による遅延変動に大きく関係している。

筆者らは、この特性を踏まえて、観測した IP パケットの受信間隔（ジッタ）から見通し状態に応じた確率密度関数を推定し、通信端末の見通し状態をアプリケーションレイヤで推定する技術を開発した⁽⁵⁾。図 3 に動作例を示している。移動端末からクラウドサーバに一定間隔で位置情報を含んだパケットを送信したときのジッタ

タを分析する。ジッタの確率密度関数を最尤う推定により算出し、移動経路をゆう度に基づいて階層的にクラスタリングする。このようにジッタを分析することで、UE の位置に応じた見通し (LoS: Line of Sight) 区間と見通し外 (NLoS: Non Line of Sight) 区間を推定可能となる。6. で、本技術の実証実験の結果を示す。

5.2.3 確定的システム挙動に起因する遅延

三つ目は、エンドツーエンドの通信システムのスケジューリングに起因する遅延である。例えば、モバイルネットワークのアップリンクの送信機会を得るためには、基地局に送信データの存在を通知し送信機会が割り当てられるのを待つ必要がある。また、無線フレームがロスしたときは数 ms の RTT を要する再送が発生する。ms オーダの頻度で通信が発生するアプリケーションでは、このようにシステムに内在する遅延の影響を受ける。

そこで筆者らは、ジッタを分析して通信経路上の複数のスケジューラの遅延種別を特定する技術を開発した⁽⁶⁾。提案技術では、固定間隔スケジューラと確率的に一定時間遅延するスケジューラの遅延パターン（遅延縞）を事前定義し、観測値の遅延縞を最も良く再現可能なスケジューラの組合せを推定する。この技術により、筆者らは、商用 5G ネットワークの遅延を 80 % 以上の精度で再現可能なスケジューラの組合せを特定できることを検証した。

6 空間的端末挙動による遅延分析の実証実験

本章では、筆者らが実施した、ローカル 5G を介して通信する車両における、5.2.2 で紹介した空間的端

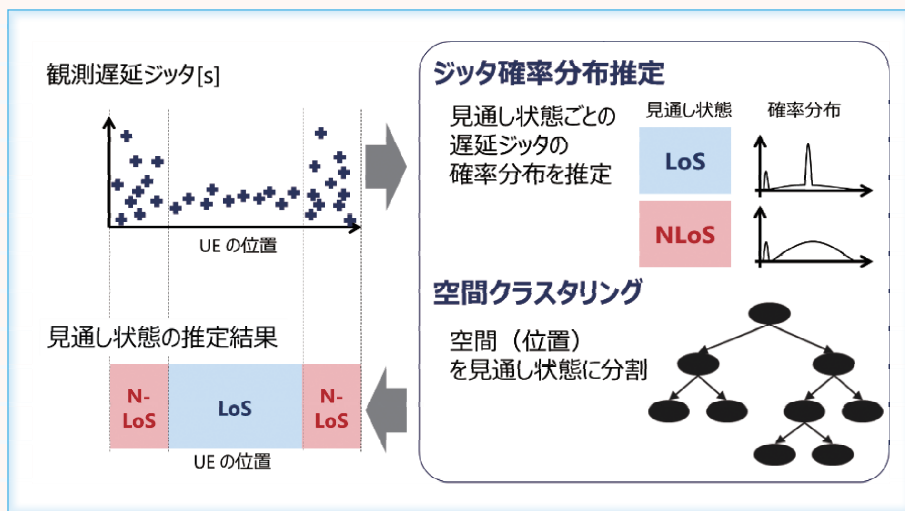


図 3 空間的端末挙動による遅延分析

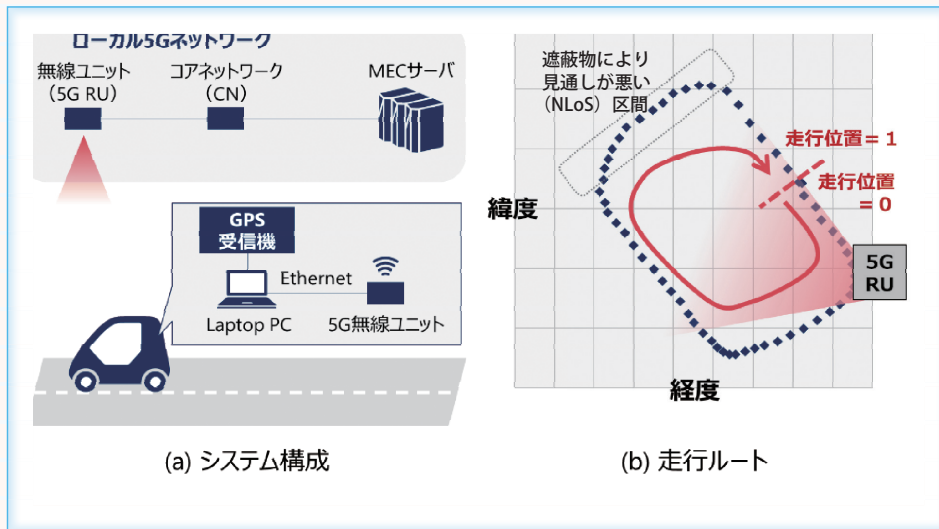


図 4 実験環境

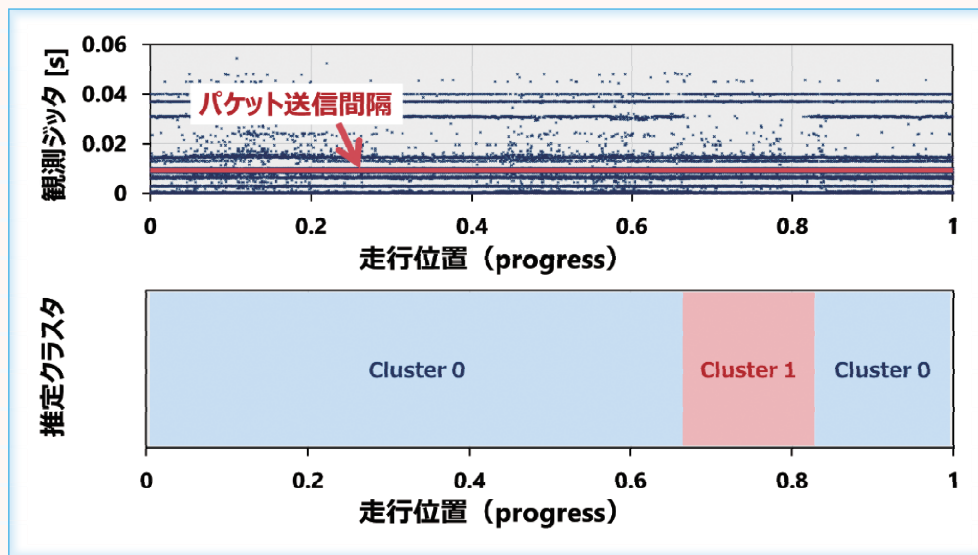


図 5 走行位置に対する観測ジッタとクラスタ分類

末挙動による遅延分析技術の実証実験を紹介する。

6.1 実験概要

道路交通において、交通事故を低減するために、無線通信技術を活用した自動車間や路車間での情報共有・制御による安全運転支援の実現が期待されている。そのためには、自動車間や路車間の通信遅延を常に一定以下に抑える必要がある。しかし、車両の移動に伴って電波状況が変動するため、リアルタイムな情報共有・制御が困難である。情報共有や制御が有効に働くためには、遅延の変動を予測した上で制御する必要がある。そこで我々は、車両と路上インフラ間の遅延を可視化することを目指した実証実験を行った。

6.2 実験結果

実験環境を図 4 に示す。本実証実験ではローカル 5G

システムを構築し、バス車両に設置した端末とサーバ間でのジッタを観測した (図 4 (a))。バス車両に設置した端末で位置情報を観測し、走行位置ごとのジッタを観測した (図 4 (b))。ここで、車両内の端末からサーバへのパケット送信間隔は 0.01 秒である。

走行位置に対する観測ジッタ、及び、推定したクラスタ分類 (見通し状態) の結果を図 5 に示している。図 5 の走行位置はコース 1 周における進捗を示しており、走行開始時点 zeroes、1 周走行終了時点を 1 としている。図 5 から、走行位置 0.7 から 0.82 の区間 (Cluster 1) とそれ以外の区間 (Cluster 0) で観測ジッタが異なっている。この走行区間 (Cluster 1) は 5G Radio Unit (RU) / 5G アンテナからの位置が遠く、また、障害物によって NLoS 区間になっている (図 4 (b))。このように提案方式では、観測した遅延ジッタから空間的端末挙動による電波強度の変動 (見通し状態) を推定

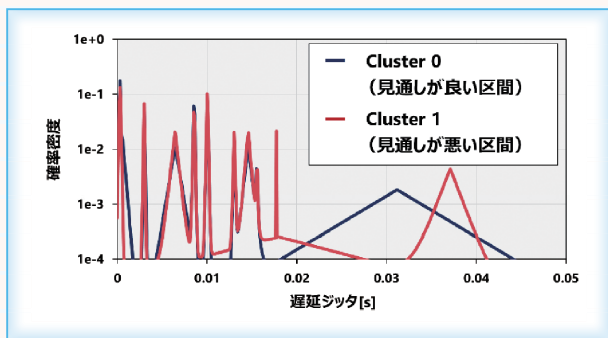


図6 各クラスタの推定ジッタ分布

できている。

更に、各クラスタのジッタの確率分布を図6に示している。この結果から、ジッタが低い場合 (<0.02 秒)、Cluster 0 と Cluster 1 は同様の分布を示している一方で、ジッタが高い場合 (0.02 秒から 0.05 秒) は異なった分布を示している。特に、見通しが悪い Cluster 1 の区間では大きな遅延ジッタが生じやすいことが分かる。

7 アプリケーションレベルの通信遅延安定化

前章に続いて、本章では上位層からのアプローチとして、アプリケーションレベルで実現可能な通信遅延を安定化するための制御技術を紹介する。

7.1 課題

工場内のロボット制御が対象とする ms オーダの遅延要因を回避する技術が必要となる。無線層では無線品質向上のための施策が有効である一方で、アプリケーションレベルではエンドツーエンド観点で通信品質を向上する施策が求められる。言い換えると、各通信端末が生成しているトラフィック量はシステム全体として適切なものか、今の通信経路は適切なものか、という観点が重要となる。そこで本章では、通信品質の焦点を遅延に絞りつつ、アプリケーションレベルで実施可能な通信遅延を安定化する技術を紹介する。

7.2 技術

本章では、遅延を回避するための二つの技術を紹介する。一つ目は、ふくそうに起因するキューイング遅延を回避するトラフィック制御、二つ目は、空間やシステム挙動に起因する遅延を回避するネットワーク切替制御である。

7.2.1 ふくそうによるキューイング遅延の回避

動画ストリーミングが登場以来、動画トラフィック

は依然として主要なインターネットアプリケーションの一つであり、近年では、ロボット制御におけるリアルタイムな監視用途等で用いられている。近年の動画配信プロトコルでは、通信帯域の空きに対して適応的に動画品質 (ビットレートや解像度) を調整するアダプティブビットレートが主流となっているため、必要以上の動画品質を提供して通信資源を消費し、動画以外のアプリケーションのトラフィックのキューイング遅延を増加する懸念がある。そのため、適度に動画品質を抑制しつつネットワークが安定動作するようにトラフィックを制御し、他端末の通信品質を確保することが重要である。

そこで筆者らは、中継地点の Multi-access Edge Computing (MEC) サーバにおいてトラフィックをシェーピングすることでスループットを抑制し、動画品質を適切なレベルに調整する技術を開発している⁽⁷⁾。機械学習を用いて通信開始直後のトラフィックパターンから動画品質を推定し、解像度を下げするために適切なレートにトラフィックシェーピングする。これにより、動画品質を適正化することに成功している。

7.2.2 遅延原因の無線ネットワーク回避

前章で議論したとおり、キューイング遅延以外にも空間やシステム挙動に起因する遅延を回避することも重要である。このような遅延を回避するためには、接続する無線ネットワークを変更するハンドオーバーが有用である。ハンドオーバーは、同一システム間 (例えば、3GPP 準拠のシステム) の水平ハンドオーバーと、異種システム間 (Wi-Fi とローカル 5G など) の垂直ハンドオーバーがある。近年では、複数の無線通信システムを備えた端末が増えており、垂直ハンドオーバーが注目されている。

そこで筆者らは、前章で議論した遅延分析に基づいて垂直ハンドオーバー先を決定する Radio Access Technology (RAT) 選択技術を開発している⁽⁸⁾。開発技術では、リアルタイムに RTT を計測し、200 ms 後の遅延変動傾向 (安定・増加・減少) の予測に基づいて RAT の切替を実施するか否かを決定している。

8 まとめ

本稿では、Beyond 5G, IoT, AI を活用した DX の推進による産業現場の生産性向上を目指し、アプリケーションを安定して高い性能で利用可能とするネットワーク分析・制御技術に関する筆者らの取組みを紹介した。その具体例として、AI を用いた無線品質分析技術、アプリケーション QoS アウェア分散アンテナ選択技術、アプリケーションレベルの通信遅延要因推定技術、アプ

リケーションレベルの通信遅延安定化技術を紹介した。ICTシステム要件やアプリケーション通信要件に応じてこれらの技術を使い分け、ネットワークを効果的に活用することでBeyond 5G時代の多種多様なアプリケーションを高性能化していく。

■ 文献

- (1) Y. Nishikawa, S. Maruyama, E. Takahashi, and T. Onishi, "Deep-learning-based estimation of radio-quality deterioration causes for 5G industrial applications," IEEE CCNC 2023, Jan. 2023.
- (2) S. Maruyama, Y. Nishikawa, T. Onishi, and E. Takahashi, "Identifying root cause of 5G radio quality deterioration using machine learning," APNOMS 2022, Sept. 2022.
- (3) T. Onishi, E. Takahashi, Y. Nishikawa, and S. Maruyama, "AppDAS: An application QoS-Aware distributed antenna selection for 5G industrial applications," IEEE CCNC 2023, Jan. 2023.
- (4) 篠原悠介, 沢辺亜南, 岩井孝法, "Beyond 5G ネットワークにおける輻輳状態推定手法の提案," 2023 信学総大, March 2023.
- (5) A. Sawabe, Y. Shinohara, and T. Iwai, "Delay jitter modeling for low-latency wireless communications in mobility scenarios," IEEE GLOBECOM 2022, Dec. 2022.
- (6) A. Sawabe, S. Yasuda, Y. Shinohara, T. Iwai, and A. Nakao, "DCM: Delay as component model based on hidden striping structure in mobile networks," IEEE GLOBECOM 2021, Dec. 2021.
- (7) A. Sawabe, T. Iwai, and A. Nakao, "Data diet pills: in-network video quality control system for traffic usage reduction," ACM NOSSDAV 2021, Sept. 2021.
- (8) 篠原悠介, 沢辺亜南, 岩井孝法, "Beyond 5G で実現する同期型 CPS コンピューティング基盤 (4) E2E QoE コントローラの提案," 2022 信学総大, March 2022.

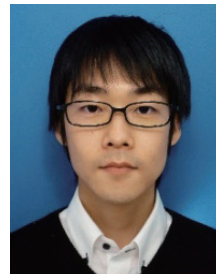
高橋英士 (正員: シニア会員)

2003 早大大学院博士後期課程了, 2000~2004 早大国際情報通信研究センター助手. 2004 NEC 入社. 現在, NEC セキュアシステムプラットフォーム研究所シニアリサーチアーキテクト. 通信ネットワークの研究に従事.



沢辺亜南 (正員)

2015 九工大大学院修士課程了. 同年 NEC 入社. 2021 東大大学院博士課程了. 現在, NEC セキュアシステムプラットフォーム研究所主任. 通信ネットワークの研究に従事.



西川由明

2010 阪大大学院修士課程了. 同年 NEC 入社. 現在, NEC セキュアシステムプラットフォーム研究所主任. 通信ネットワークの研究に従事.



篠原悠介 (正員)

2009 阪大大学院博士課程了. 同年 NEC 入社. 現在, NEC セキュアシステムプラットフォーム研究所リードリサーチエンジニア. 通信ネットワークの研究に従事.



大西健夫 (正員)

2008 東大大学院博士課程了. 同年 NEC 入社. 現在, NEC セキュアシステムプラットフォーム研究所主任. 通信ネットワークの研究に従事.



岩井孝法 (正員)

2004 信州大大学院工学研究科博士前期課程了. 同年 NEC 入社. 現在, NEC セキュアシステムプラットフォーム研究所部長. IoT やモビリティ向けのモバイル通信制御技術の研究に従事.



海上保安業務を支える通信システムについて

Communication Systems that Support Coast Guard Operations

奥田一彰 Kazuaki Okuda†

Summary

本論文では、海上保安庁の業務を支える通信システムについて解説している。海上保安庁は海難発生時の被救助船舶との通信のみならず、船舶が海上を安全に航行するために必要な海上安全情報の提供に関する通信や海上保安業務を円滑に遂行するため、海上保安庁の部内相互間の通信を実施している。その際、衛星通信並びに中波、短波及び超短波無線電話通信などの通信システムを使用して各種情報の受信、提供、伝達などを実施している。また、東京湾や名古屋港など特に船舶交通がふくそうする海域や港において、こうした通信システムを使用して巨大船舶などからの航行に関する情報や船舶の入港に関する情報を取り扱っている。更に、「海の『もしも』は118番」で知られる海での事件、事故の際の海上保安機関への緊急通報特番についても、オンラインチャットを通して聴覚障がい者の方からの通報を可能とした「NET118」のサービスも開始し、海難救助に貢献するシステムの運用を拡充している。更に、海上無線通信の高度化に向けた海上保安庁の将来的な通信システムについても解説する。

Key Words

海上保安庁, GMDSS, SOLAS 条約, 118 番

1 はじめに

海上保安庁は、24時間365日、日本の海の安全・安心を守る国の行政機関（国土交通省の外局）として、1948年5月1日に設置された。東京に本庁を、更に全国を11の管区に分け、それぞれに管区海上保安本部を置いている。船艇474隻、航空機90機（令和4年4月1日現在）を有している⁽¹⁾。

海上保安庁の任務は、①治安の確保、②海洋権益の保全、③海難救助、④海洋情報の提供、⑤航行安全の確保などであり、「海の警察・消防」と言えば分かりやすいのではないだろうか。

「治安の確保」は、海上での犯罪の取締り、外国漁船による違法操業、密輸・密航対策、海賊対策、テロ対策、不審船・工作船対策などがある。最近では、2020東京オリンピック・パラリンピック競技大会のセーリング競技会場で周辺の海上警備などを実施した。

「海洋権益の確保」は、尖閣諸島周辺海域などの領海警備や航空機や測量船による海底地形の観測といった海洋調査などがある。

「救難業務」は、遭難や事故船舶からの乗員救助、離島や船舶から傷病者の搬送、火災船舶への消防機

能を有する巡視船艇による消火などがある。

「海洋情報の提供」は、海図や水路書誌の作成及び提供、水路通報・航行警報、防災のための海底火山・海底断層の調査などがある。最近では、海洋情報を集約・共有するためのWebサービス「海しる」にて、海洋情報を提供している。

「航行安全の確保」は、灯台や灯浮標などの航路標識の設置・管理、船舶がふくそうする東京湾、伊勢湾などに特別な交通ルールなどを定め、また、七つの海上交通センターなどにより船舶の安全な航行に必要な情報を提供、船舶自動識別装置（AIS）*1を活用した航行支援システムの運用などがある。最近では、AIS情報を活用した船舶動静予測技術の開発、走錨早期検知システムの開発が行われている。

こうした任務の遂行には通信システムによる支援が不可欠である。図1に海上保安通信の概要を示す。海上保安庁の通信に関する所掌事務は海上保安庁法（昭和23年法律第28号）に規定され、「所掌事務を遂行するために使用する通信施設の建設、保守及び運用に関すること」と明記され、巡視船艇・航空機や陸上の情報通信システムの整備、管理及び運用といった業務を実施している。海上保安庁

† 海上保安大学校，呉市
Japan Coast Guard Academy, Kure-shi, 737-8512
Japan

*1 船舶自動識別装置（AIS: Automatic Identification System）。船舶の識別符号、種類、位置、針路、速力、航行状態及びそのほかの安全に関する情報を自動的にVHF電波で送受信し、船舶局相互間及び船舶局と陸上局の航行援助施設などとの間で情報の交換を行うシステム。

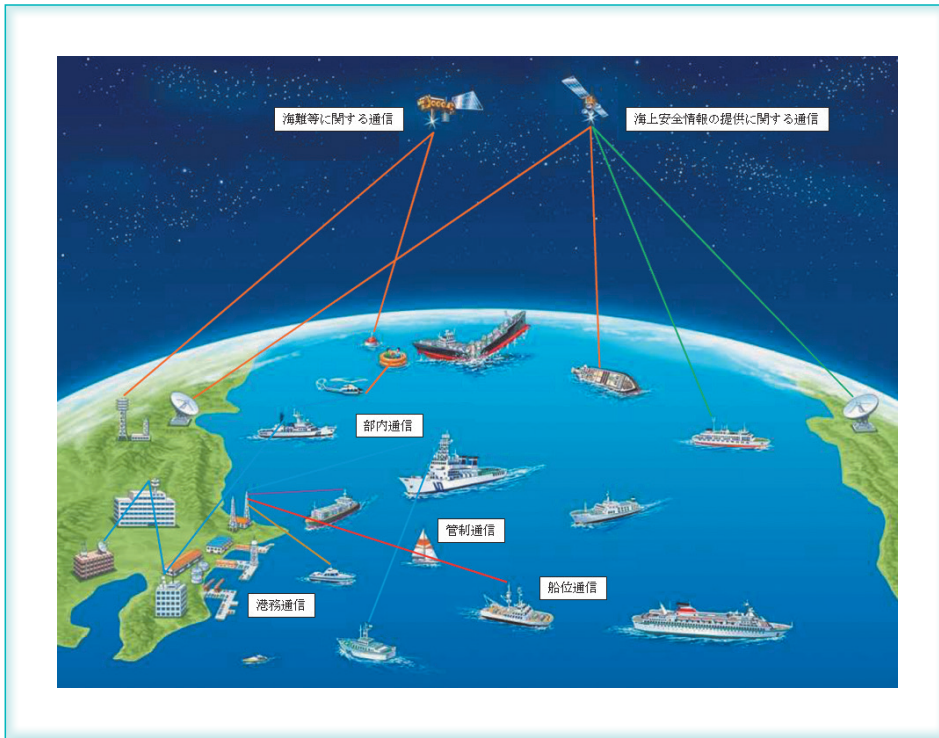


図1 海上保安通信

表1 海上保安庁の短波海岸局

海岸局名	所在地
とうきょうほあん	海上保安庁警備救難部管理課運用司令センター

表2 海上保安庁の中波・超短波海岸局

海岸局名	所在地
ほっかいどうほあん	第一管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
しおがまほあん	第二管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
よこはまほあん	第三管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
なごやほあん	第四管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
こうべほあん	第五管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
ひろしまほあん	第六管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
もじほあん	第七管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
まいづるほあん	第八管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
いいたほあん	第九管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
かごしまほあん	第十管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター
おきなわほあん	第十一管区海上保安本部警備救難部救難課運用司令センター

は領土の約12倍にも上る広大な海域を管轄しているため、前述のとおり全国を11の管区に分けて管理しており、表1及び表2に示すように、本庁及び11か所の管区海上保安本部に通信の司令塔となる運用司令センターを置く⁽²⁾。また、航行する船舶の管制通信などを行う七つの海上交通センターを各地に置く。更に、巡視船艇・航空機にもそれぞれ通信所を配置し各種の通信を行っている。

海上で利用する通信システムとして、「海上における遭難及び安全に関する世界的な制度」(GMDSS: Global Maritime Distress and Safety System)が

国際的なルールとして平成4年(1992年)2月1日から適用が始まり、平成11年(1999年)2月1日から完全導入されている。GMDSSは「1974年の海上における人命の安全のための国際条約」(SOLAS条約: International Convention for the Safety Of Life At Sea)^{*2}の改正により平成4年2月1日から導入された制度で、海上安全情報を自動受信・可視化することができ、緊急時には、定められた救助機関が自動的に遭難通報を受信し、救助船舶と通信を行えるグローバルな海上安全制度であり、最新のデジタル通信技術や衛星通信技術による次のような特徴を持つシステムである。

- ①遠距離通信が可能
 - ②無線電話や無線テレタイプを主体とするため高度に専門的な技術が不要
 - ③機械による自動聴守のため信頼性が高い
- 海上保安庁では、船舶が世界中のどの海域を航行

*2 SOLAS条約. 1912年の英豪華客船タイタニック号海難事故を契機に、1914年に無線・救命など船舶航行の安全を担保する条約が締結された(最初のSOLAS条約: 1914年の海上における人命の安全のための国際条約)。最初のSOLAS条約の発効は昭和8年(1933年)、その後数度の改正がなされてきた。1974年の条約(74SOLAS条約)が採択された段階で、現行の条約体系(本文及び12の附属書)となっている。日本は、これを昭和55年(1980年)5月15日に加入者寄託した。更に、安全性向上のため昭和63年(1988年)に附属書が改正され、最新のデジタル通信技術と衛星通信技術を導入した新たなGMDSSの構築が始まった。この体制は平成11年(1999年)2月1日に完全実施され現体制がスタートしている。

表3 GMDSS における搭載要件

無線設備／航行水域		A1	A2	A3	A4	備考
ナビテックス受信機		○	○	○	○	
インマルサット高機能グループ呼出し		○	○	○	○	ナビテックス水域（沿岸から約 300 海里以内）のみを航行する船舶には不要。
VHF無線設備	DSC	○	○	○	○	
	DSC 聴守装置	○	○	○	○	
	無線電話	○	○	○	○	A1 海域のみを航行する船舶であって、常に陸上との間で通信ができない場合は一般通信用無線電信などを備えなければならない。
MF無線設備	DSC	○	○	○	○	
	DSC 聴守装置	○	○	○	○	
	無線電話	○	○	○	○	A2 海域のみを航行する船舶であって、常に陸上との間で通信ができない場合は条約船一般通信用無線電信などを備えなければならない。
	NBDP			○	○	インマルサット C を備えていれば不要。
HF無線設備	DSC			○	○	A3 水域を航行する船舶であって、インマルサット C を備えていれば不要。
	DSC 聴守装置			○	○	
	無線電話			○	○	インマルサット C を備えていれば不要。
	NBDP			○	○	
インマルサット C				○		MF帯のNBDP, HF帯の無線電話及びNBDPを備えていれば不要。
浮揚型EPIRB		○	○	○	○	
非浮揚型EPIRB		○	○	○	○	浮揚型 EPIRB を船橋に積みつける場合または船橋から遠隔操作できる場合は省略可。
レーダトランスポンダ		左右舷に 1 個（総トン数 300 t 以上 500 t 未満の非旅客船は 1 個で可）。				
持ち運び式双方向無線電話装置		旅客船及び総トン数 500 t 以上の非旅客船は 3 個，総トン数 500 t 未満の旅客船は 2 個。				
AIS		旅客船及び国際航海に従事する総トン数 300 t 以上の非旅客船，並びに国際航海に従事しない総トン数 500 t 以上の非旅客船。				
船舶保安警報装置(SSAS)		国際航海に従事する旅客船，国際航海に従事する総トン数 500 t 以上の非旅客船。				

していても、遭難・安全通信をより迅速かつ的確に行うことができるシステムとして、GMDSS に基づく情報通信システムを運用し、任務を遂行している。

(1) 対象船舶

GMDSS では、船舶の種類、総トン数、航行海域により、搭載機器、搭載数などの義務付け、基準がそれぞれ異なる。

SOLAS 条約では、

- ・国際航海に従事する全ての旅客船
- ・総トン数 300 t 以上の貨物船

が装備対象船となるが、日本は上記の対象以外にも、船舶の航行の安全性を一層高めるため、国内法により沿岸を航行する船舶の一部を除き、総トン数 20 t 以上の船舶も基本的に GMDSS 無線設備を設置する対象としている⁽³⁾。

(2) 海域（航行区域）及び船舶の通信機能の搭載要件

次の (a) から (d) の航行する海域区分（4 海域）に応じた通信機器、機能などの搭載要件が定められている。

(a) A1 海域

国際 VHF^{*3} 海岸局と通信が行える海域（沿岸から 20～30 海里、（1 海里は約 1,852 m.）

(b) A2 海域

MF^{*4} 海岸局と通信が行える海域、（沿岸から 150 海里程度、A1 海域を除く。）

* 3 VHF (Very High Frequency, 超短波) 30～300 MHz の周波数の電波。船舶において全世界的に使用されている周波数であり、ほかにも FM 放送、防災行政無線や航空無線などで利用される周波数。

* 4 MF (Middle Frequency, 中波) 300 kHz～3 MHz の周波数の電波。電波の伝わり方が安定しており、海上保安庁の海岸局での無線電話や AM 放送などで利用されている周波数。

(c) A3 海域

インマルサット静止通信衛星を利用して通信が行える海域。(北緯 70 度から南緯 70 度の海域、ただし、A1 及び A2 海域を除く。)

(d) A4 海域

A1, A2 及び A3 海域以外の海域。(緯度 70 度以上の極地域。)

基本的な搭載要件については、表 3 に示す⁽⁴⁾。なお、表 3 中の「一般通信用無線電信など」とは、次のア～エのいずれかの設備を言う。

ア ① HF^{*5} 帯の NBDP^{*6}、② HF 帯の無線電話、③ インマルサット C^{*7}、④ インマルサット無線電話、⑤ MF 帯の NBDP、⑥ 次の a から c に挙げる無線電話などであって、常に陸上との連絡可能な NBDP または無線電話を言う。

a 次に掲げる周波数帯で運用する船舶局の NBDP または無線電話

MHF^{*8} 帯、HF 帯

b 次に掲げる周波数帯で運用する船舶局の無線電話

27 MHz 帯、40 MHz 帯、150 MHz 帯、400 MHz 帯

c 次に掲げる周波数帯で運用する船舶局の無線電話

250 MHz 帯、800 MHz 帯

イ 「条約船一般通信用無線電信など」とは、HF 帯の NBDP、HF 無線電話、インマルサット C、インマルサット無線電話または DSC^{*9} を言う。

ウ 「DSC 聴守装置」とは、DSC 信号を聴守す

る装置を言う。

エ EPIRB^{*10} 及び SSAS^{*11}

2 海難などに関する通信

海上保安庁では、海難救助を迅速かつ的確に行うため、陸上通信所や行動中の巡視船艇などにより、GMDSS に対応した遭難周波数を 24 時間聴守し、遭難情報に即応する体制を整えている。

また、コスパス・サーサットシステムの地上施設の運用や船舶電話、携帯電話などによる遭難情報の入手体制も確保している。

更に、船舶がテロ攻撃などを受けた場合に陸上の保安機関に通報を送る SSAS の受信体制も確保している。

2.1 衛星通信システム

衛星通信を利用し、船舶と陸上との間で直接遭難通信などが行えるシステムである。遭難警報は、捜索救助機関(日本では海上保安庁)に直接接続される。

2.2 コスパス・サーサットシステム

非常用位置指示無線標識(EPIRB)から発信された遭難警報を自動的に陸上に伝えるシステムである。陸上の捜索救助機関では、遭難した時間や船舶の位置などが特定できる。

モールス電信 SOS による遭難通信が、平成 11 年(1999 年)1 月 31 日をもって廃止され、同年 2 月 1 日から完全実施された GMDSS の中核を成すものが、この通信システムである。

海上保安庁は、遭難者からの遭難信号の電波をキャッチし、その位置を検出するコスパス・サーサットシステムの地上設備の提供国として、平成 5 年(1993 年)からシステムの運用に参加している

*5 HF (High Frequency, 短波) 3~30 MHz の周波数の電波。遠距離通信に使用でき、無線電話や狭帯域直接印刷電信や気象天気図の受信用などとして利用されている周波数。

*6 NBDP (Narrow Band Direct Printing, 狭帯域直接印刷電信) キーボード操作で会話をを行うことができる通信システムである。アルファベットと数字、記号の文字をキーボードなどの鍵盤を使用してタイピング形式で通信を行う。送信側がタイプライターに似た鍵盤を押すと鍵盤に対応した文字が電気信号化され、受信者側の印字機にその文字が印字されたことから、直接印刷電信と言われている。

*7 インマルサット C 国際海事衛星機構 (INMARSAT: International MARitime SATellite organization, インマルサット) が提供する人工衛星を使用した衛星通信サービス。NBDP 通信を利用でき、外洋を航行する船舶において利用されている無線通信装置。

*8 MHF (中短波) 1606.5~4,000 kHz の周波数の電波。無線局運用規則(昭和 25 年電波監理委員会規則第 17 号)第 2 条第 1 項第 4 号に定義される。MF と HF の周波数にまたがり、中距離通信として国内法に定義されるもの。

*9 DSC (Digital Selective Calling, デジタル選択呼出し) ボタン操作により遭難警報の発信などが行えるシステムである。ボタン一つで遭難呼出しや、呼び出した理由(火災、乗揚げ、沈没など)、遭難位置などの情報を救助機関や他船に送信することができる。受信側ではアラームで遭難信号の受信を知らせ、自動的に受信情報のディスプレイへの表示やプリンタへの印字を行う。

*10 EPIRB (Emergency Position Indicating Radio Beacon, 極軌道衛星利用非常用位置指示無線標識) 遭難警報を発信するブイ方式の無線装置。船舶の固有 ID などの情報を、人工衛星を介して捜索救助機関に通報される。

*11 SSAS (Ship Security Alert System, 船舶保安警報装置) 船舶がテロ攻撃などを受けた場合に陸上の保安機関に船舶の位置や通報日時などを送る。

(「国際的なコスパス・サーサット計画との地上部分提供国としての提携に関する通告の書簡(平成5年条約第4号)」)。

海上保安庁では、この地上設備(LUT^{*12}及びMCC^{*13})を維持管理し、海上保安部署、ほかの近隣諸国などに遭難警報のデータを配信している。また、海上保安庁は、日本の地上設備運用機関として、政府間機関であるコスパス・サーサットが開催する国際会議に積極的に参加し、制度の維持及び管理を実施している。

2.3 中波・短波・超短波システム

DSCやNBDPによる遭難船舶からの呼出し(遭難警報の送信)を行い、海岸局などの捜索救助機関が応答の後、無線電話により遭難通信や緊急通信などを行う通信システムである。

2.4 緊急通報用電話番号「118」

「海の『もしも』は118番」や「海での『事件・事故』は118番」(「118」は「ひやくじゅうはち」と呼ぶ)と描かれた海上保安庁のポスターを見たことがあるという方は認知しているかもしれない⁽⁵⁾。導入前は、管区海上保安本部や保安部署などに「局番+4999」の番号をもって海の事件・事故に関わる緊急通報用電話番号として運用し、また、船舶電話についても「海の110番」を導入していた。しかしながら、この番号は、局番を知らない人は利用できず、また、「海の110番」は警察機関の電話番号との混同を避けるため、船舶電話からの通報に限定されていた。

こうした経緯を踏まえ、緊急通報用電話番号の118番は、警察機関の110番や消防機関の119番と同じく、海の事件・事故に関する海上保安機関の緊急通報番号として、平成12年(2000年)5月1日から運用が開始された。また、118番の正しい利用方法と重要性をより一層多くの方に知ってもらうため、平成22年度(2010年度)に1月18日

*12 LUT: Local User Terminal (地上受信局) コスパス・サーサット衛星からの電波を受信する海上保安庁所属の設備である。

*13 MCC: Mission Control Center (業務管理センター) 遭難警報の位置情報などのデータを関係機関に配信する機関であり、海上保安庁(本庁)が24時間体制で運用している。海上保安庁は、平成9年9月から北太平洋地区における基幹MCCとしての業務を開始し、地区内のMCC(韓国、香港、台湾、中国)へ遭難警報データの収集や配信、運用調整などを行うとともに、ほかの基幹MCC(アメリカ、オーストラリア、ロシア及びフランス)との情報交換などを行っている。

を「118番の日」とし、全国で周知活動を行っている。「118番」を通報すると本庁または管区海上保安本部が受信する。プレジャーボートなどからの救助要請が容易となり、全国の海上保安部署、航空基地などの巡視船艇・航空機に対し直ちに救助活動を指示することができ、海難救助が一層迅速かつ的確に行うことができるばかりでなく、悪質・巧妙化する密航・密輸事件、不審船事案などについても、広く一般国民からの迅速な情報提供が期待できる体制となった。

通報事項としては

- ・海難や人身事故に遭遇した場合、または目撃した場合
 - ・海上において流出油を発見した場合
 - ・密漁事犯を認知した場合
 - ・不審な船舶を発見した場合
 - ・密航・密輸事犯などの情報を得た場合
 - ・漂流・漂着木造船を発見した場合
- などがある。

更に、平成19年(2007年)4月1日からは、「緊急通報位置情報通知システム」の運用が開始され、118番にダイヤルした通報者の「発信者番号」及び「位置情報」が管区海上保安本部の運用司令センターに通知されることとなり、通報位置をより迅速に入手することができるようになった。

3 海上安全情報に関する通信

海上保安庁では、船舶が海上を安全に航行するために必要な、強風警報などの気象に関する情報、漂流物などの安全な航海に関する緊急の情報や航行障害物に関する情報、遭難船舶などの捜索救助に関する情報などをナブテックス放送や国際セーフティーネット放送などにより提供している。

3.1 ナブテックス放送

全国5か所の海上保安庁の海岸局は、船舶の安全運航に欠かせない気象警報や航行警報、海難情報などの海上安全情報を、受信エリア内を航行する船舶が自動で受信できる方式により放送している。沿岸から約300海里までは良好に受信できる。そのほかの海域を通航する船舶は、次の3.2の放送によって海上安全情報を受信する。

3.2 国際セーフティーネット放送

海岸地球局から静止衛星を経由して、気象警報や航行警報、海難情報などの海上安全情報をナブテッ

クス放送と同じく自動受信方式により放送している。主に、沿岸から 300 海里以遠を航行する船舶を対象としており、3.1 の装置と合わせて、世界中のほとんどの海域において、海上安全情報を受信することができる。

3.3 無線電話による放送

全国 11 か所の管区海上保安本部の運用司令センターにある海岸局は、船舶の安全航行に欠かせない海上の気象、高潮、波浪などの情報のうち、災害が発生するおそれのあるものを警報として放送している。また、水路、航路標識の異常などに関する情報を管区・部署航行警報として放送している。必要な場合、巡視船から放送することもある。

4 船位通信

船位通信は、船舶が港間を航行するとき、どの航路を通るのか、航海中の一定時間ごとに船舶の位置を海岸局に通報するために行う通信である。海上保安庁では、船舶から提供される航海計画や航行中の船舶の位置などの情報を情報システムで管理し、船舶の動静を見守ることにより、通報が途絶えた場合、このシステムを利用して遭難位置を把握することができ、海難発生時の迅速かつ的確な捜索救助活動を可能にするシステムである。現在、多くの地域でこの仕組みは運用されている。

日本では、海上保安庁が運営している JASREP (Japanese Ship REPorting System, ジャスレップ) と呼ばれる船位通報制度がある。昭和 60 年 (1985 年) 10 月から運用を開始しており、これまで多くの船舶の参加を得て、遭難船舶の捜索救助活動に貢献してきた。

また、海上保安庁では全国 12 か所の陸上通信所との間で無線電話や NBDP を使用して一般船舶からの通報を受け付けている。そのほか、最寄りの海上保安部署への書面の提出、電報、電話による通報の受付も実施している⁽³⁾。

4.1 対象海域

おおむね北緯 17 度の緯度線以北、東経 165 度の経度線以西の海域。なお、海域の概略図を図 2 に示す。

4.2 対象船舶

対象海域を航行する船舶。

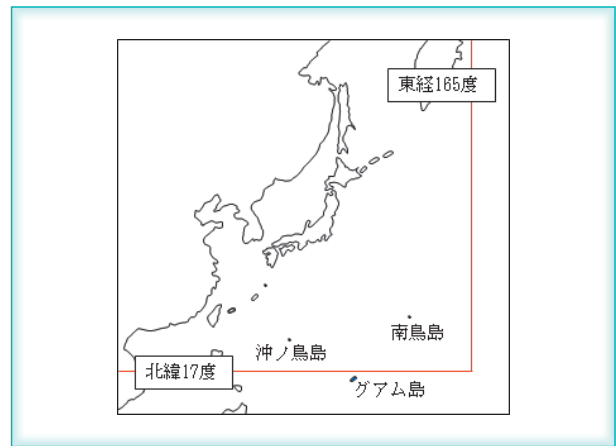


図2 JASREPの対象海域

4.3 JASREPの通報

「航海計画：SP」「位置通報：PR」「変更通報：DR」「最終通報：FR」があり、以下の順で送られる。

ア 航海計画：SP (Sailing Plan)

出港または対象海域に入域した際に通報するもので、経路や到着予定などを通報する。

イ 位置通報：PR (Position Report)

航海計画入力後、24 時間以内の間隔で通報するもので、現在位置などを通報する。

ウ 変更通報：DR (Deviation Report)

変更があったときのみ、航海計画に変更が生じた際、修正した内容を通報する。

エ 最終通報：FR (Final Report)

入港または対象海域を出域する際に通報するもので、現在位置などを通報する。

4.4 データの連携

4.4.1 AMVERとの連携

米国が運用している船位通報制度として AMVER (Automated Mutual assistance Vessel Rescue System) がある。その対象海域は全世界の海であり、JASREP の対象海域と重複していることから、海上保安庁では、アメリカ側とデータの連携を実施し、両制度間での情報の交換及び共有を行っている。JASREP に通報を送る際に、船舶から希望があれば、JASREP から AMVER に対して情報を送信することにより、両制度へ参加し、船舶の位置を通報することができる。

4.4.2 気象通報との連携

気象業務法 (昭和 27 年法律第 165 号) 第 7 条に基づき、船舶は定期的に観測した気温、風、天気などの報告を実施しており、JASREP は気象通報を

取り扱う気象庁と連携を行うことで、JASREPのSPで連携の希望のあった船舶については、気象通報を行う際の船舶の位置を気象庁から海上保安庁に自動的に転送し、通報することができるシステムとなっている。

5 管制通信

船舶交通がふくそうする海域には海上交通センターを設置している。現在、海上交通センターは表4のとおり、東京湾、名古屋港、伊勢湾、大阪湾、備讃瀬戸、来島海峡及び関門海峡の7か所に設置し、レーダ及びAISなどからのデータ並びに船舶との無線電話による通信により船舶交通に関する情報を収集、把握、監視業務を行っている。また、航行する船舶に対し船舶交通の安全のために気象・海象や船舶の動向などの情報を提供し、他船との衝突や乗揚げの危険防止など、必要な場合には船舶に対し勧告も実施している。

なお、大阪湾海上交通センターは船舶交通の安全性の更なる向上を目的に、大阪湾北部海域の監視・情報提供体制の強化を進めており、より広いエリアをカバーするため所在地を神戸市ポートアイランドへ機能移転させる予定である⁽⁶⁾。

6 港務通信

海上保安庁の海岸局は、京浜港や名古屋港など特に船舶交通がふくそうする港において、船舶の安全な運航を確保するため、船舶の入港や検疫に関する通報などの航行情報の提供や港内管制を実施している。

港則法（昭和23年法律第74号）に基づき、対象船舶が港に入港する際は、管制信号に従うほか、無線電話などによる海岸局への事前通報を義務付けている。

また、海上保安庁が開設する海岸局のほか、港を管理する港湾管理者（地方自治体など）による港湾管理事務と、船舶が安全かつ効率的に港に出入りできるように、港務通信を行うことを目的とした「ポートラジオ」と呼ばれる海岸局も全国各地にあり、港務通信を実施するためのシステムが構築されている。

取扱い業務としては

- ・入港予定時刻の通報
- ・出港の通知
- ・入港するバースの指定、問合せ

表4 海上交通センター

海上交通センター	所在地
東京湾海上交通センター	神奈川県横浜市
名古屋港海上交通センター	愛知県名古屋市
伊勢湾海上交通センター	愛知県田原市
大阪湾海上交通センター	兵庫県姫路市
備讃瀬戸海上交通センター	香川県綾歌郡多津町
来島海峡海上交通センター	愛媛県今治市
関門海峡海上交通センター	福岡県北九州市

- ・ 錨泊位置の通報
- ・ 港外から港内への船舶の移動の調整
- ・ 水先人の手配、問合せ
- ・ 検疫、入管、税関に関する通報
- ・ 曳船の問合せ
- ・ 綱取り船の問合せ
- ・ 清水の補給
- ・ 気象状況の問合せ
- ・ 医者、救急車の手配

などとなり、船舶が安全に港を利用することができる通信システムが全国に整備されている。

7 部内通信

全国の海上保安庁の陸上通信所、巡視船艇、航空機などは、海上保安業務を円滑に遂行するため、巡視船相互間、あるいは管区海上保安本部と巡視船との間など、海上保安庁の部内相互間における司令、報告、情報の伝達などの通信を実施している。

また、海上保安庁では、地震災害や大規模海難などの発生時において、現場映像の情報伝達や非常用の通信回線設定などにより、早期の状況把握及び適切な対策の実施を可能とするため、臨時の情報通信回線の確保を図っている。

更に、海上保安庁では、災害時の通信の確保のため、ソフトバンクモバイル株式会社、KDDI株式会社及び（株）NTTドコモの3社との間で「災害時における通信の確保のための相互協力に関する協定」を締結している。（ソフトバンクモバイル株式会社とは平成26年（2014年）12月25日、KDDI株式会社及び（株）NTTドコモとは平成27年（2015年）3月6日にそれぞれ締結⁽⁷⁾。）災害が発生し、陸上からの物資輸送が困難となり、通信が途絶えた沿岸地域や離島における応急通信を確保するため、巡視船艇などによる通信事業者の応急通信資機材（臨時の可搬型携帯基地局など）を輸送するこ

とで通信システムの維持及び確保につなげている。また、海上保安庁の災害時における人命救助活動などに必要な通信手段として、衛星携帯電話や携帯電話などの通信機器の提供も本協定に含まれている。

8 新たな海難救助システムの運用開始

8.1 NET118

海上保安庁では、聴覚や発話に障がいを持つ方を対象に、スマートフォンなどを使用した入力操作により、海での事件や事故に関する海上保安庁への緊急時の通報を可能とする「NET118」（「118」は「いちいちち」と呼ぶ）というサービスを令和元年11月1日から運用を開始し⁽⁸⁾、緊急時に活用できるようになっている。（同サービスの費用は無料だが、インターネット接続の通信料は利用者負担となる。）

このシステムは、インターネットを使用した緊急時の通報サービスで、利用するためには、事前に利用者情報を登録し、通信端末に通報用のURLを登録しておくことが必要になる。

緊急時には専用のサイトに表示される通報ボタンを選択することで、海上保安庁運用司令センターに接続され、チャット形式により通話が開始される。接続時にはGPSの位置情報を取得することでそのエリアを管轄する管区海上保安本部に速やかに情報共有され、迅速な救助につながる。

8.2 電話リレーサービス

電話リレーサービスとは、聴覚障がい者、難聴者、発話困難者が聴者との間の会話を、通訳オペレータがその間に入り、「手話」または「文字」と「音声」を使用することにより、電話で即時双方向につながるができるサービスである。令和2年6月、聴覚障害者等による電話の利用の円滑化に関する法律（令和2年法律第53号）が制定（同年12月1日施行）され、公共インフラとしての電話リレーサービスが制度化された。同法第7条第4項に基づく基本方針（令和2年総務省告示第370号）にて、電話リレーサービス提供機関は緊急通報受理機関（警察、海上保安庁及び消防）に対する緊急通報については、電話リレーサービスに対応することが必要とされ、令和3年1月、総務大臣は電話リレーサービス提供機関として「一般財団法人日本財団電話リレーサービス」を指定し、同年7月1日、公共インフラとして一般加入電話と同様に、聴覚障がい者などからも一般財団法人日本財団電話リ

レーサービスを通じた海上保安庁などの緊急通報受理機関への電話をつなぐ、電話リレーサービスの運用が開始された⁽⁹⁾。

前述したが、既存の緊急通報用電話番号としての118番は、海上における事件・事故を最寄りの管区海上保安本部などへ通報するために運用されている。電話リレーサービスも、これまでの海上保安機関への緊急通報の118番と同様、通報者（聴覚障がい者）の位置情報は、その地域を管轄する管区海上保安本部に共有され、緊急通報のやり取りができる。

9 最近の情報通信技術の動向

9.1 次世代 GMDSS

現行のGMDSSは、それまで行われてきたモジュール信号などによる通信を、衛星通信技術やデジタル通信技術などを利用した通信に置き換えた遭難・安全システムである。平成4年（1992年）2月1日から導入が開始され、平成11年（1999年）2月1日から完全実施されている。一方で、その通信技術は1980年代の30年以上前の技術を前提に構築され、これまで大きな見直しがなされていなかった。そこで、GMDSSの見直し、近代化を進めるべく、平成21年（2009年）5月の国際海事機関（IMO^{*14}）の委員会の一つである海上安全委員会（MSC: Maritime Safety Committee）の第86回委員会（MSC 86）においてシステム全体の維持・向上を目的として、その見直しの検討開始が合意され、これまでIMOではGMDSSの近代化のための条約や関連機器の性能基準などの改正について検討が行われてきた⁽¹⁰⁾、⁽¹¹⁾。

令和4年4月にMSCの小委員会の一つである航行安全・無線通信・捜索救助小委員会（NCSR: Sub-Committee on Navigation, Communications and Search and Rescue）第8回において、

*14 IMO (International Maritime organization, 国際海事機関) 海上の安全、船舶からの海洋汚染防止など、海事分野の諸問題についての政府間の協力を推進するために昭和33年（1958年）に設立された国連の専門機関である。船舶は、国際的な人の移動や貨物の輸送に使用されるものであるため、船舶の自由な航行を損なうことなく、その安全性を確保し、海洋環境の保全を図るためには、国際条約により、全世界で画一的な原則及び規則を設定することが必要であり、IMOにおいて、SOLAS条約などに規定されている海上安全及び海洋環境保護に関する技術基準を見直している。日本は、世界有数の造船・海運国として、技術的検証に基づき様々な提案を行うなど、国際的な議論に積極的に参加している。

表5 LEOSAR と MEOSAR システムの比較

システム	LEOSAR (低軌道衛星)	MEOSAR (中軌道衛星)
衛星高度	800 ~ 1,000km	約20,000km
衛星数	4 機運用中 (気象衛星に搭載)	42機 (測位衛星に搭載) 将来的に70機以上
測位方法	周波数変位 (ドップラー測位)	周波数変位と時間差 (GPSと同原理)
衛星飛来間隔	平均 1 時間	常時複数の衛星が利用可能

GMDSS の要件を近代化するため、SOLAS 条約の改正案が最終的にまとめられ、その承認のため上部委員会の MSC に送付されることになった。あわせて、GMDSS 関連機器の性能基準の改正も合意され、その後 MSC での承認・採択を経て、改正後の SOLAS 条約は令和 6 年 1 月 1 日から発効することとなり、近代化された GMDSS による運用が開始される予定である。より安全な船舶の運航に貢献することとなるだろう。

9.2 次世代コスパス・サーサット

海上保安庁は、平成 5 年 (1993 年) から衛星通信を利用した遭難警報を全世界に中継・配信するコスパス・サーサットシステムに参加・運用を実施している。

コスパス・サーサットシステムでは、従来、低軌道衛星を利用した LEOSAR システム^{*15} が運用されてきたが、平成 21 年 (2009 年) から 9.1 の GMDSS の近代化を検討する中で、より早期に遭難船舶などの位置を特定できる中軌道衛星を利用した MEOSAR システム^{*16} が開発され、各国でも整備が進められている。表 5 にそれぞれの衛星通信システムの機能の概要を示す。

海上保安庁では、衛星を中継して遭難警報を受信

するための LUT (地上受信局) や MCC (業務管理センター) をはじめとした MEOSAR システムに必要な設備を整備し、令和 2 年 12 月 8 日から運用を開始していたが⁽¹²⁾、令和 3 年 3 月 17~26 日に開催されたコスパス・サーサット理事会において、日本の MEOSAR システムが正式に承認された⁽¹³⁾。

今後、世界的な MEOSAR システムの構築に向け、海上保安庁は北太平洋地区における基幹 MCC として、同地区内の MCC に対する MEOSAR システムの運用審査を実施し、より迅速で確実な海上における捜索・救助システムの構築に寄与することとなるだろう。

9.3 次世代 AIS (VDES)

AIS は、SOLAS 条約に基づき、平成 20 年 (2008 年) 7 月までに対象となる船舶への搭載が完了した。AIS の利用は、AIS 航路標識、捜索救助用位置指示送信装置 (AIS-SART) など、その用途の多様化が図られ、船舶の安全航行へ寄与するほか、物流の効率化、船舶の捜索救助活動などの分野でもその有用性が世界的に認識されるようになった。

今後更に AIS の利用が拡大すると、通信量の増大による通信網の圧迫が見込まれる状況が想定されることから、通信の更なる高速化・効率化・多機能化を可能とする新たな海上デジタル通信方式 (次世代 AIS) として、VHF データ交換システム (VDES)^{*17} が検討されており、その国際標準化に向けて海上保安庁では、技術的な検討を行う国際海事機関 (IMO) や国際航路標識協会 (IALA)^{*18} 及び国内関係学会などへ積極的に情報発信している^{(14), (15)}。

VDES は VHF 帯の周波数帯域を使用する⁽¹⁶⁾。これまでテキストを主とした情報交換から、画像やアプリケーションによるグラフィックな情報交換が可

* 15 LEOSAR システム (Low-altitude Earth Orbit Search and Rescue, 低軌道衛星を利用した捜索・救助システム) 船舶・航空機などからの遭難警報を低軌道周回衛星 (令和 3 年 3 月時点 4 機) により受信して遭難位置を特定するシステムである。同システムでは、衛星が全世界を周回 (一つの軌道につき約 100 分で 1 周) しているが、遭難警報が発信された際に、衛星が上空を通過しなければ受信できないため、遭難警報の受信と位置の特定に時間を要する。

* 16 MEOSAR システム (Medium-altitude Earth Orbit Search and Rescue, 中軌道衛星を利用した捜索・救助システム) 船舶・航空機などからの遭難警報を中軌道衛星 (令和 3 年 3 月時点 42 機) により受信して遭難位置を特定するシステムである。同システムでは、複数の衛星が常に上空にあるため、短時間で遭難警報の検知が可能となる。

* 17 VDES: VHF Data Exchange System 地上で用いる VHF データ交換 (地上 VDE, 船舶間で双方向通信を行うもの)、低軌道周回衛星による VHF データ交換 (衛星 VDE)、AIS 及び ASM (Application Specific Message, AIS を応用したメッセージ交換) をまとめて扱うシステム。現在の船舶自動識別装置は AIS と ASM の機能のみ装備されている。

* 18 IALA (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities) 航路標識システムの設置または維持、並びにその関連事業に関する機関などによって構成される国際機関。国際海事機関 (IMO) などの国際機関と密接に連携しながら、安全で効率的な船舶運航の増進、航路標識のデジタル化など能力向上を行っている。海上保安庁は、1959 年に国家会員として加入し、長きにわたり同機関の理事を務めているほか、IALA 最大の技術委員会の議長を海上保安庁職員が務め、活動に貢献している。

能となるほか、通信範囲については衛星 VDE を使用することで、VHF 帯の伝搬距離の 20~30 海里までであったものが全地球規模にまで範囲が広がり、より多くの情報交換が可能となる。

VDES 衛星は、船舶における双方向通信を可能とすることで、海上安全情報の迅速な入手、船舶通航の動向の迅速な把握ができるなど、海上交通の安全・安心につながる様々な用途が想定されている。また、前述の 9.1 の GMDSS 近代化においても全地球をカバーすることができるシステムであるため、VDES 衛星の導入を目標としている。

10 総括

本稿は、海上保安庁が業務を円滑に実施するために行う通信とそのシステムについて筆者が持つ知見に基づき解説した。

海上保安庁は、北太平洋地区における基幹 MCC として国際的な無線通信に関する条約や制度を遵守し、ほかの MCC と国際連携を図っている。今後、SOLAS 条約の改正により、次世代 GMDSS が導入され、海上無線通信のデジタル化・高度化が進められるだろう。

更に、NET118 などの新たなシステムを導入し、より多くの国民が必要なときに、必要な情報を伝えることができる体制作りを行い普及に努めているところである。より高度な無線通信システムの構築により、より迅速な海難救助や船舶の航行安全につながることを期待する。

■ 文献

- (1) 海上保安庁, 海上保安レポート 2022, p. 150, 海上保安庁, 2022.
- (2) 一般財団法人情報通信振興会, 2020 年版無線便覧, p. 25, 一般財団法人情報通信振興会, 2020.
- (3) 鈴木 治, 船舶通信の基礎知識, pp. 66-74, 123-127, 成山堂書店, 東京, 2017.
- (4) 総務省東海総合通信局, “海上で利用する無線システム 海上における遭難及び安全の世界的制度 (GMDSS),” <https://www.soumu.go.jp/soutsu/tokai/musen/kaijou/index.html>
- (5) 海上保安庁, “海の「もしも」は 118 番,” <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/joho/tel118.html>
- (6) 第五管区海上保安本部, “大阪湾海上交通センター引越に伴う愛称募集について,” <https://www.kaiho.mlit.go.jp/05kanku/contents/news/archives/2022-07-01-0000-post-2891.html>

- (7) 海上保安庁, “報道発表 災害時の通信の確保のための相互協力協定を締結 (2015 年 3 月 6 日),” <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h27/k20150306/k150306-1.pdf>
- (8) 海上保安庁, “報道発表 広がる安全・安心! 「NET118」運用開始! ~聴覚や発話に障がいを持つ方のための, 海上保安庁への緊急時の通報~ (2019 年 10 月 5 日),” <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r1/k20191015/k191015-4.pdf>
- (9) 一般財団法人全日本ろうあ連盟, “海上保安庁の緊急通報「NET118」の運用開始について (2019 年 10 月 23 日),” <https://www.jfd.or.jp/2019/10/23/pid19816>
- (10) 国土交通省, “国際海事機関 (IMO) における船舶の国際基準の動向,” https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk7_000006.html
- (11) “Sub-Committee on navigation, communications and search and rescue (NCSR), 8th session, 19-23 April 2021,” Meeting Summaries and Schedule, April 2021. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/NCSR-8th-session.aspx>
- (12) 海上保安庁, “報道発表 中軌道衛星を利用した新たな捜索・救助システムの運用開始~より迅速な遭難船舶の救助に向けて~ (2020 年 12 月 10 日),” <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r2/k201210/k201210.pdf>
- (13) 海上保安庁, “報道発表 中軌道衛星を利用した捜索・救助システムの正式承認 (2021 年 3 月 29 日),” <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r3/k210329/k210329.pdf>
- (14) 海上保安庁, “報道発表 「VDES 開発のための IALA ワークショップ」の開催結果について~次世代海上通信の実現に向けて~ (2016 年 2 月 16 日),” <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h28/k20160226/k160226-2.pdf>
- (15) IALA, “G1117 VHF DATA EXCHANGE SYSTEM (VDES) OVERVIEW,” <https://www.iala-aism.org/product/g1117>
- (16) 宮寺好男, “海上無線通信の最新動向,” 日本航海学会 2019 年春季航法システム研究会研究報告, May 2019. <https://j-nav.org/navsys/workshopreport/report/r2019s/report.html>

(2023 年 1 月 27 日受付, 3 月 27 日再受付)

奥田一彰

平 23 海上保安庁入庁 (海上保安大学校入学), 平 27 同校卒。巡視船で一般船舶や他の巡視船艇との通信や通信機器の整備等を担当。令 2 第四管区海上保安本部情報通信課にて本部の使用する情報通信システムの整備及び管理業務に従事。令 4-04 から海上保安大学校講師。



組合せ最適化問題に基づくネットワーク設計

Network Design Based on Combinatorial Optimization Problems

平田孝志 Kouji Hirata†

Summary

組合せ最適化問題は、ある条件を満たす組合せの中で最も良い組合せを見つける問題である。有名な問題としては、ナップサック問題、巡回セールスマン問題、施設配置問題等が存在し、これら組合せ最適化問題は様々な分野のシステム設計に応用される。本稿では情報通信ネットワーク設計に焦点を当て、幾つかの適用例を基に、組合せ最適化問題に基づくネットワーク設計方法について説明する。具体的には、本稿では初めに、整数線形計画による組合せ最適化問題の表現方法について、サーバ配置問題を例に説明する。次に、メタヒューリスティックによる近似解法についての説明を、コンテンツ配信設計問題を対象として行う。更に本稿では、ネットワーク状態の動的な変動に対応するオンラインの近似解法として、マルコフ近似の紹介も併せて行う。

Key Words

ネットワーク設計, 組合せ最適化, 整数線形計画, メタヒューリスティック, 近似解法

1 はじめに

最適化問題は与えられた制約の下で対象とする関数を最小化（若しくは最大化）するための解を求める問題であり、様々な分野においてシステム設計に応用される。これは、サーバ配置、コンテンツ配信、ルーチングといった情報通信ネットワーク設計においてもよく用いられる。一般的に、最適化問題の式は

最小化

$$f(x)$$

制約条件

$$x \in \mathcal{F}$$

のように与えられる。ここで、 $f(x)$ を目的関数と呼び、最小化したい関数を表し、実数値若しくは整数値を取る。また、 \mathcal{F} を実行可能領域と呼び、これは制約を満たす解全体の集合、つまり、この問題において x が取り得る値の集合を示す。 x が \mathcal{F} に含まれる場合($x \in \mathcal{F}$)に x を実行可能解と呼び、 x が \mathcal{F} に含まれない場合($x \notin \mathcal{F}$)に x を実行不可能解と呼ぶ。最適化問題では、最適解と呼ばれる、目的関数 $f(x)$ を最小にする実行可能解を求めることが目的となる。

最適化問題の中でも、取り得る解 x が離散的な

ものは「組合せ最適化問題」と呼ばれる。有名な組合せ最適化問題としては、巡回セールスマン問題、ナップサック問題等がある。巡回セールスマン問題は、図1に示すように、セールスマンが各都市を丁度一度だけ巡って出発地まで戻る巡回路のうち、長さが最も短い巡回路を見つけるという問題である。ナップサック問題は、図2に示すように、ある容量のナップサックと、異なる価値と大きさを持つ複数の品物が与えられたときに、大きさの合計がナップサックの容量を超えないという条件の下で、価値が最大となる品物の組合せを見つけるという問題である。

これらの組合せ最適化問題は一般に、後述する整数線形計画 (ILP: Integer Linear Programming) で数学的に表現することが可能である。また、ILPで表現された問題に対して、CPLEX⁽¹⁾やSCIP⁽²⁾といった商用や非商用のソルバーを用いることで、最適解を求めることができる。

組合せ最適化問題に対する厳密的な最適解を求める方法として、分枝限定法や動的計画法等の厳密解法が存在する。しかし多くの組合せ最適化問題では、厳密的な最適解を求めるための計算時間が、対象とする問題のサイズに対して指数関数的に増加する。そのため、問題のサイズが大きくなった場合に、実用的な時間で解を求めることが非常に困難となる。そこで、厳密的な最適解を求めるのではなく、厳密解法に比べて短時間で近似的な解を求めるための近似解法が存在する。そのような近似解法と

† 関西大学, 吹田市
Kansai University, suita-shi, 564-8680 Japan

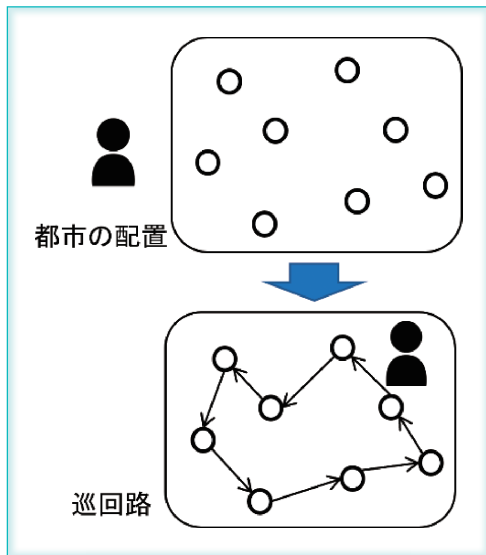


図1 巡回セールスマン問題

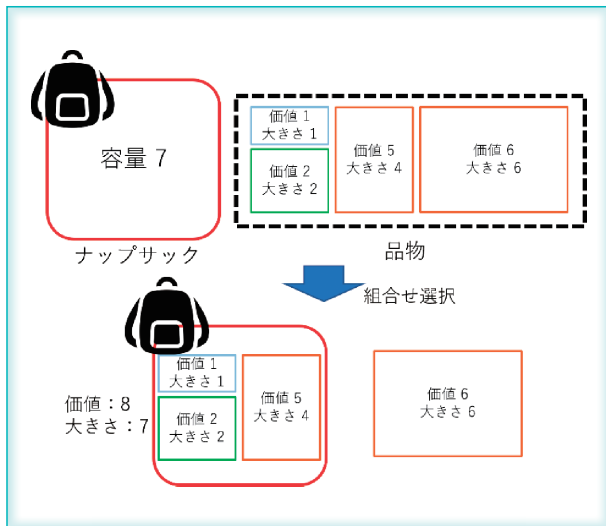


図2 ナップサック問題

しては、局所探索法や、それをベースとしたメタヒューリスティックと呼ばれる様々な手法がこれまでに提案されている。メタヒューリスティックとは特定の問題に依存しない発見的な手法であり、代表的なものには焼きなまし法、遺伝的アルゴリズム、タブーサーチ等がある。

本稿では、これら最適化問題を応用した情報通信ネットワーク設計に焦点を当て、幾つかの例を交えて、ILPによる表現方法や、メタヒューリスティックによる近似解法についての説明を行う。また、一般的には、ネットワーク設計に対する最適化問題は、ネットワーク内の情報が与えられた上で、ネットワーク管理者等によりオフラインで計算され、設計の最適化が行われる。このような方法は、ネットワークの状態が動的に変化するような場合に適していない。そこで本稿では、ネットワーク状態の動的な変動に対応するオンラインの近似解法として、マ

ルコフ近似の紹介も併せて行う。

本稿の構成は以下のとおりである。2. において、サーバ配置問題を基に、ILPによる数理最適化の表現方法についての説明を行う。3. においては、メタヒューリスティックの概要について述べ、メタヒューリスティックの一つである焼きなまし法について、コンテンツ配信設計問題を例に説明する。4. においては、オンライン近似解法であるマルコフ近似の概要を述べる。5. において本稿をまとめる。

2 数理計画法による表現

2.1 整数線形計画法

ILPは、解となる全ての変数が整数であり、かつ、目的関数が線形関数で、制約条件が線形関数の等式、または不等式で表現できる最適化問題である。これは一般的に以下の形として表現できる。

最小化

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j$$

制約条件

$$\sum_{j=1}^n a_{i,j} x_j \geq b_i, \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

ただし、 x_j ($j = 1, \dots, n$) は整数変数、 $a_{i,j}$ 、 b_i 、 c_j ($i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$) は実定数である。

ここで、ILPの応用例として施設配置問題⁽³⁾を考える。施設配置問題とは、顧客(ユーザ)の集合及び施設の配置可能地点が与えられているときに、顧客の需要が最も満たされるように施設の配置場所を決定する問題である。施設の例としては、工場、病院、スーパーマーケット等がある。情報通信ネットワーク設計における応用例としては、無線サービスの基地局配置や、エッジコンピューティング環境におけるエッジサーバ配置⁽⁴⁾等が考えられる。本稿ではエッジサーバ配置を例として以下に説明する。

2.2 エッジサーバ配置問題への応用

近年、‘もの’のインターネット(IoT: Internet of Things)技術が急速に発展しており、今後ますます多くのIoTサービスがユーザに提供されていくと予想される。一般にIoTサービスでは、IoTデバイスから収集されたデータを、クラウドデータセンターにおいて処理することでユーザにサービスを提供するが、エッジコンピューティングでは図3に示すように、従来のクラウドデータセンターに加

えて、ユーザやIoTデバイスに近いネットワークエッジ（ネットワークの端）にデータを処理するエッジサーバを配置する。これにより、IoTデバイスが生み出すデータをエッジ側で分散処理した上で、それらをクラウドデータセンターにおける処理と連携させることで、ユーザに高品質・低遅延なサービスを提供することが可能となる。しかし、コストの観点から全てのノードにエッジサーバを配置することは好ましくなく、IoTデバイスの接続状態や、それらとエッジサーバ間のトラフィック量を考慮して、適切な数だけ配置することが望ましい。

そこで、このようなエッジサーバ配置への適用例として、施設配置問題の一つである P -メディアン問題⁽⁵⁾の適用を考える。 P -メディアン問題とは、配置する施設数を P 個とした上で、重み付距離（つまり「顧客の需要量×そのユーザから最も近い施設までの距離」）の総和を最小化する施設配置場所を求める問題である。これをエッジサーバ配置に置き換える場合、顧客はIoTデバイス、施設はエッジサーバであり、 P 個のエッジサーバをネットワーク（グラフ）上の、どのノードに配置するかを決定する問題が考えられる。このとき、各IoTデバイスはいずれかのノードに接続されており、需要量はIoTデバイスが生み出すデータ量であると想定できる。つまり、この問題はIoTデバイスが生み出すデータ量で重み付けされた距離の総和（ネットワークにかかる負荷として置き換え可能）を最小化するようなエッジサーバの最適な配置場所を求めることが目的となる。

図4に配置するエッジサーバ数を $P = 2$ としたときの、エッジサーバ配置例を示す。この例では、各IoTデバイスが生み出すデータ量は同じものと

図4に配置するエッジサーバ数を $P = 2$ としたときの、エッジサーバ配置例を示す。この例では、各IoTデバイスが生み出すデータ量は同じものと

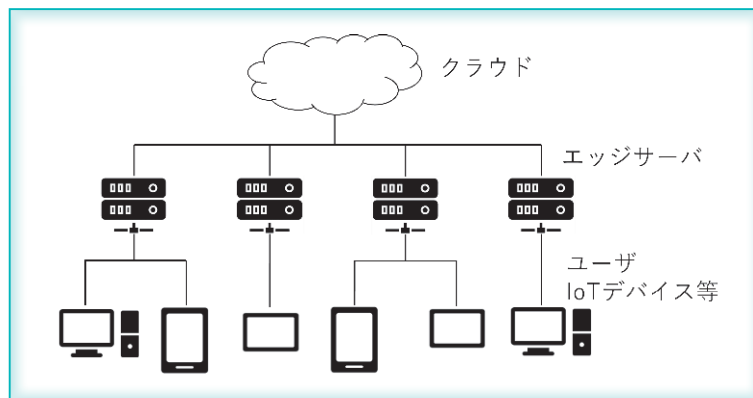


図3 エッジコンピューティング

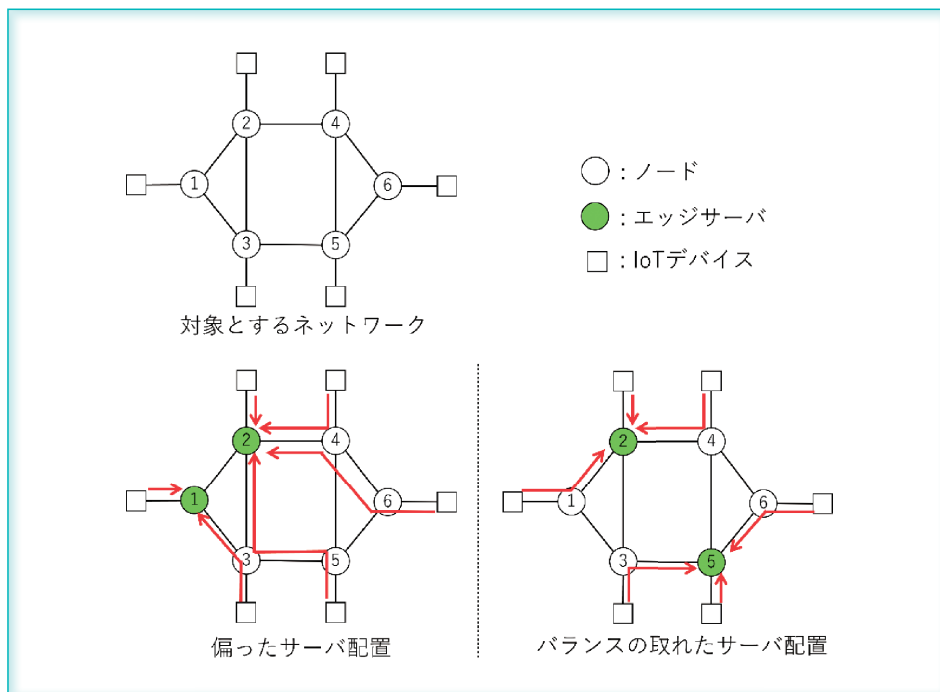


図4 エッジサーバ配置

し、それぞれがいずれかのエッジサーバと通信するものとする（図の赤矢印）。図4に示すように、エッジサーバを互いに近くに配置した場合（偏ったサーバ配置）、IoTデバイスからの距離が平均的に遠くなり、ネットワーク負荷が増加することが分かる。一方、適切にエッジサーバを配置すること（バランスの取れたサーバ配置）により、効果的に負荷の分散を行うことが可能である。

このエッジサーバ配置問題は、以下に示すILPによって定式化可能である。

最小化

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{V}} \lambda_i d_{i,j} y_{i,j} \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{j \in \mathcal{V}} y_{i,j} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}} x_j = P \quad (3)$$

$$y_{i,j} \leq x_j, \quad \forall i, j \in \mathcal{V} \quad (4)$$

ここで、 \mathcal{V} は対象とするネットワークのノードの集合、 λ_i はノード i に接続されたIoTデバイスが生み出すデータ量を表す実定数（同じノードに接続されたIoTデバイスは単一のものとして扱う）、 $d_{i,j}$ はノード i からノード j までの最短経路上の距離（最小ホップ数等）を表す実定数である。本最適化問題における決定変数（求めたい解）は $y_{i,j}$ 及び x_j である。 $y_{i,j}$ はノード i に接続されるIoTデバイスのデータがノード j に配置されるエッジサーバによって処理をされる場合1、そうでない場合0を取るバイナリー変数である。同様に、 x_j はノード j にエッジサーバが配置される場合1、そうでない場合0を取るバイナリー変数である。この問題では、制約条件を満たしつつ、エッジサーバの配置場所である x_j と、各IoTデバイスが処理されるエッジサーバを決定する $y_{i,j}$ の2種類の変数を解として求めることとなる。図4においては、例えば、ノード1から6までの最小ホップ数は3であるため、 $d_{1,6} = 3$ となる。また、図4右下の例にあるように、ノード2及び5に対しては $x_2 = x_5 = 1$ となる。このとき、ノード2と通信を行うのは、ノード1, 2, 4に接続されたIoTデバイスであるため、 $y_{1,2} = y_{2,2} = y_{4,2} = 1$ となる。（同様に、 $y_{3,5} = y_{5,5} = y_{6,5} = 1$ ）

式(1)は目的関数であり、上述のようにネットワークにかかる負荷の最小化を行うものとして考えることができる。式(2)は、各IoTデバイスは一つのエッジサーバのみによって処理されることを示す制約式である。式(3)は、配置できるエッジ

サーバの数が P 個であることを示す制約式である。式(4)は、ノード j にエッジサーバが配置されている場合のみ、IoTデバイスがそのエッジサーバによって処理可能であることを示す制約式である。上述のように、CPLEX等のソルバーに、このILPを入力として与えることで、制約条件を満たしながら、目的関数を最小化することが可能な最適解 x_j と $y_{i,j}$ の組合せを求めることができる。本稿では簡単なモデルとして P -メディアン問題を適用したが、目的関数や制約式の変更、追加によって、より複雑なモデルも考えることが可能である。

3

メタヒューリスティックによる近似解法

3.1 局所探索法

ソルバーはILPを入力とすることで、分枝限定法等の厳密解法を用いて最適解を求めることが可能である。しかし、 P -メディアン問題を含む多くの組合せ最適化問題はNP困難であると言われ（紙幅の都合上、計算量に関する説明は本稿では割愛する）、それらに対する実用的な時間内で最適解を求めるアルゴリズム（多項式時間アルゴリズム）は見つかっていない。そのため、問題のサイズが大きくなった場合に、厳密解法により最適解を求めることは非常に難しい。そこで、最適解ではないが、実用的な時間内で近似解を求めることが可能な様々な近似解法がこれまでに提案されている。その中でも、メタヒューリスティック⁽⁶⁾と呼ばれる、特定の問題に依存しない発見的手法が広く用いられている。（なお、ソルバーを用いて近似解を出力することも可能であるが、本稿では対象としない。）本節では、コンテンツ配置及びルーチングを対象として、メタヒューリスティックの適用例について述べる。

メタヒューリスティックには、焼きなまし法、遺伝的アルゴリズム、タブーサーチ等、多くのアルゴリズムが存在するが、それらのベースとなるものが局所探索法（山登り法）と呼ばれる手法である。最小化問題に対する局所探索法の手順は以下のとおりである。

ステップ1 適当な初期解 x を生成し、その目的関数値 $f(x)$ を計算する。

ステップ2 x の近傍 $\mathcal{N}(x)$ の中で、 $f(x) > f(x')$ となる $x' \in \mathcal{N}(x)$ を選択する。そのような x' が存在しない場合 x を解として出力し終了する。

ステップ3 $x \leftarrow x'$ として、ステップ2へ戻る。ここで、近傍 $\mathcal{N}(x)$ は、 x に少しの変形を加えることによって得られる実行可能解の集合を示す。近

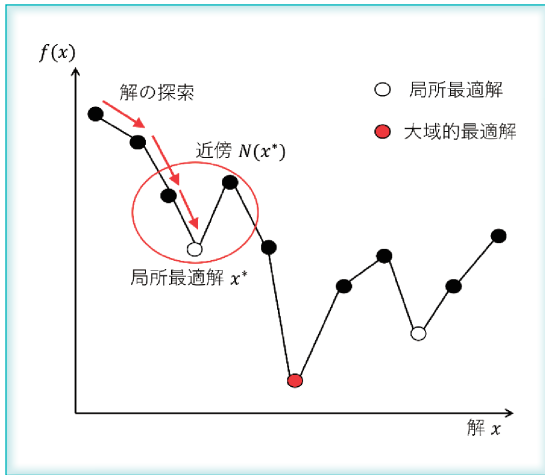


図5 局所最適解

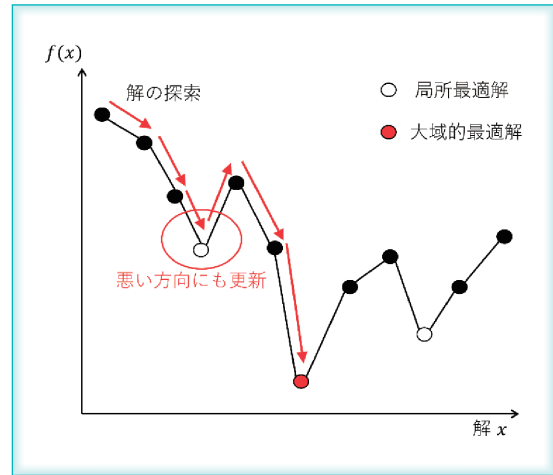


図6 局所最適からの脱出

傍の例としては、解を構成する組合せのうち、任意の二つの変数の値を入れ替えてできる解の集合等が挙げられる。より良い近似解を求めるためには、問題に応じて近傍の定義を適切に行う必要がある。

3.2 焼きなまし法

局所探索法は非常に単純なアルゴリズムであり、目的関数値が改善する方向にのみ解を更新するため、図5に示すように、近傍内で最も良い解である局所最適解を出力とする。(局所最適解と区別するため、厳密な最適解を大域的最適解とも呼ぶ。)しかし、組合せ最適化問題では一般に局所最適解が多数存在するため、大域的最適解を発見するのは困難である。大域的最適解、若しくはより目的関数値が小さい局所最適解を求めるためには、図6に示すように、目的関数値が大きくなる方向にも解を更新する必要がある。メタヒューリスティックの多くは、様々な手法を用いてこの仕組みを実現している。以下では、代表的なメタヒューリスティックである、焼きなまし法の説明と、ネットワーク設計への適用例を述べる。

焼きなまし法 (Simulated Annealing, SA 法, 擬似アニーリング法とも呼ばれる) は、金属の熱処理の一つである焼きなましのアイデアをベースにしている。これは、温度と呼ばれるパラメータで与えられる確率で、目的関数値が悪くなる方向にも解を更新することによって局所最適から抜け出し、より良い解を見つけるといったものである。最小化問題に対する焼きなまし法の手順は以下のとおりである。

ステップ1 適当な初期解 x を生成し、その目的関数値 $f(x)$ を計算する。また初期温度 T を設定する。

ステップ2 以下のステップ (2-1) と (2-2) を、

あらかじめ決められた回数繰り返す。
 (2-1) x の近傍 $N(x)$ の中から、ランダムに解を一つ選択し x' とし、 $\Delta E \leftarrow f(x') - f(x)$ とする。
 (2-2) $\Delta E \leq 0$ の場合 (つまり、目的関数値が改善する場合) は確率 1 で、 $\Delta E > 0$ の場合は確率 $\exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right)$ で解 x' を採用し、 $x \leftarrow x'$ とする。

(つまり、 $\Delta E > 0$ の場合は、 $1 - \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right)$ の確率で解 x' を採用しない。)

ステップ3 温度 T を更新する。

(例えば $T \leftarrow T \times \alpha$ ($0 < \alpha < 1$))。 T がある一定値以下になれば終了し、探索した中で最も目的関数値が小さい解を採用する。そうでなければステップ2へ戻る。

以上の手順に示すように、焼きなまし法では、温度 T が高い状況においては、高い確率で目的関数値が悪くなる解を採用する。これにより、精度の悪い局所最適解を抜け出しやすくなり、探索空間を広くできる。一方、温度 T が低くなると、その動作は局所探索法に近づく。

3.3 コンテンツ配信設計への応用

ここで、焼きなまし法の適用例として、コンテンツ配信におけるコンテンツ配置及びルーチングについて説明する。近年、情報通信技術の発達に伴い高品質な映像配信、IoT, Social Networking Service (SNS) など様々なサービスが提供されている。これらのサービスは我々の生活を豊かにする一方で、大量のデータトラフィックを生成し、ネットワークやサーバへの負荷を増大させている。また、ネットワークに接続されるデバイス数やデータトラフィックは今後も増加することが予想される。この問題に対応するた

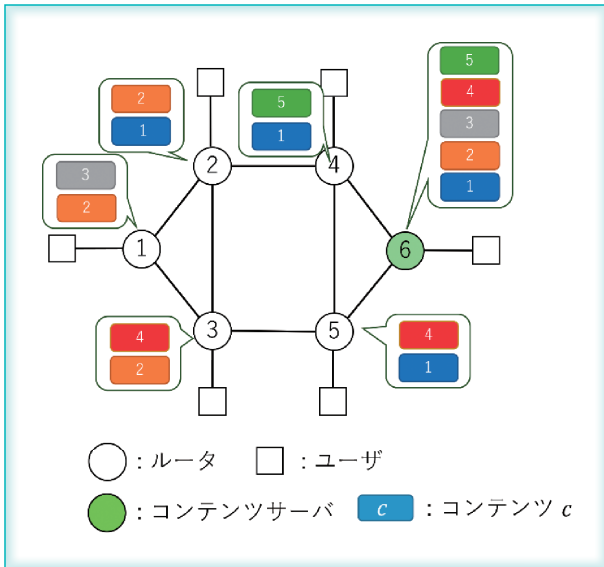


図7 コンテンツ配信設計

めに、キャッシング技術が重要となる。例えば、コンテンツ配信ネットワーク (CDN: Content Delivery Network) ⁽⁷⁾ では、複数の異なるコンテンツサーバに同一コンテンツが保存 (キャッシュ) される。ユーザからの大量のコンテンツダウンロードリクエストに対して適切なサーバをそれぞれ選択することで、ネットワークやサーバに掛かる負荷の分散が可能となる。また、情報指向ネットワーク (ICN: Information Centric Networking) ⁽⁸⁾ と呼ばれる新たなコンテンツ配信の仕組みでは、コンテンツサーバだけでなく、中継ルータが複製されたコンテンツを保持するネットワーク内キャッシュ技術の使用が想定されている。これら CDN や ICN といったコンテンツ配信においては、どのコンテンツサーバやルータにどのコンテンツをキャッシュするのかというコンテンツ配置や、ネットワーク内に複数あるコンテンツコピーをどのキャッシュからダウンロードするのか、というコンテンツルーチングを考えることが重要である (図7)。図7の例においては、各ノードには何らかの基準に従い、コンテンツが保存されている。ユーザはいずれかのノード (サーバ若しくはルータ) から、所望コンテンツをダウンロードすることができる。本稿では、以下の ILP で表されるコンテンツ配信設計問題を考える。

最小化

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{V}} \sum_{c \in \mathcal{C}} \lambda_{i,c} d_{i,j} y_{i,j,c} \quad (5)$$

制約条件

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} b_c \delta_{j,c} \leq S_j, \quad \forall j \in \mathcal{V} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}} \delta_{j,c} \geq 1, \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (7)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}} y_{i,j,c} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{V}, c \in \mathcal{C} \quad (8)$$

$$\delta_{j,c} \geq y_{i,j,c}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{V}, c \in \mathcal{C} \quad (9)$$

ここで、 \mathcal{V} は対象とするネットワークのキャッシュノード (サーバやルータ) の集合、 \mathcal{C} はコンテンツの集合である。 $\lambda_{i,c}$ はノード i に接続されたユーザのコンテンツ c の要求量、 $d_{i,j}$ はノード i からノード j までの最短経路上の距離、 b_c はコンテンツ c のサイズ、 S_j はノード j キャッシュサイズを表す実定数である。本最適化問題における決定変数は、 $\delta_{j,c}$ 及び $y_{i,j,c}$ である。 $\delta_{j,c}$ はノード j がコンテンツ c をキャッシュする場合 1、そうでない場合 0 を取るバイナリー変数である。同様に、 $y_{i,j,c}$ はノード i に接続されるユーザがノード j にキャッシュされるコンテンツ c をダウンロードする場合 1、そうでない場合 0 を取るバイナリー変数である。式 (5) は目的関数であり、ネットワーク負荷の最小化を意味する。また、式 (6) はキャッシュサイズ制約、式 (7) は各コンテンツが少なくとも一つのノードにキャッシュされているという制約を表す。式 (8) は各コンテンツが一つのキャッシュからのみダウンロードされるという制約、式 (9) はコンテンツをキャッシュしているノードからしか、対象のコンテンツをダウンロードできないという制約を意味する。図7の例では、各ルータは二つまでのコンテンツを保持することが可能であり ($S_j = 2$)、一方、サーバでは全てのコンテンツを保持できるものとしている。また例えば、ノード2がコンテンツ1を保持しているため、 $\delta_{2,1} = 1$ となる。このとき、ノード1に接続されているユーザがコンテンツ1を取得する場合は、最も距離が近いノード2から取得することとなる。(つまり、 $y_{1,2,1} = 1$.)

この問題の近似解を焼きなまし法で求めるには、近傍を定義する必要がある。ここでは、現在の構成 x の近傍 $\mathcal{N}(x)$ を次の条件を満たす構成とする。(実行可能解に含まれない構成を含める等、より効果的な近傍を考えることも可能であるが、本稿では単純な例を示す。)

- 構成 x において、任意のノード j にキャッシュされたコンテンツ c_1 ($\delta_{j,c_1} = 1$) を、ノード j にキャッシュされていないコンテンツ c_2 ($\delta_{j,c_2} = 0$) を入れ替えたもの。つまり、 $\delta_{j,c_1} = 0$, $\delta_{j,c_2} = 1$ と入れ替えた構成。

- ただし、式 (6) 及び (7) を満たすもの。

この近傍を用いて上述の焼きなまし法の手順を適用することができる。ステップ1においては、初期解として、各ノードにコンテンツを配置し（例えばファーストフィット法を用いる）、その構成に対して式(5)で与えられる目的関数値を計算する。ステップ2では、ランダムに近傍の中から入れ替えるキャッシュとコンテンツを選択し、確率に従い入れ替えを実行する。入れ替えを実行したら、 $y_{i,j,c}$ の更新も併せて行う。ここでは、各ユーザは最も近いノードにあるコンテンツを取得するものとして $y_{i,j,c}$ の更新を行う。この手順を繰り返すことで、局所最適な $\delta_{j,c}$ と $y_{i,j,c}$ の組合せが求まる。

4 マルコフ近似の紹介

一般的には、ネットワーク設計に対する最適化問題は、ネットワーク内の情報が与えられた上で、ネットワーク管理者等により上述のメタヒューリスティック等によってオフラインで処理される。一方、ネットワーク状態の動的な変動に対応するオンラインの近似解法として、マルコフ近似⁽⁹⁾が提案されている。本節ではマルコフ近似の概要について説明する。

対象とするネットワーク構成の集合を \mathcal{F} とし、構成(解) $x \in \mathcal{F}$ を選択した場合の目的関数値を $f(x)$ とする。この場合、目的関数値を最小とする構成を求める問題は前述のように

最小化

$$f(x) \quad (10)$$

として、組合せ最適化問題で表せる。一方、式(10)と同値の最適値を持つ非線形計画問題は

最小化

$$\sum_{x \in \mathcal{F}} p_x f(x) \quad (11)$$

制約条件

$$\sum_{x \in \mathcal{F}} p_x = 1$$

で与えられる。 p_x はネットワークが構成 $x \in \mathcal{F}$ を取る時間割合を表す実数変数である($0 \leq p_x \leq 1$)。つまり、本最適化問題では、決定変数として p_x を用い、目的関数値を期待値として表現している。最適解 $x^* = \operatorname{argmin}_{x \in \mathcal{F}} f(x)$ に対しては $p_{x^*} = 1$ 、その他の解 x に対しては $p_x = 0$ を与えることにより、式(10)と同じ目的関数値を持つことができる。

ここで、以下に示す式を、式(11)の近似問題として考える。(詳細な導出手順は文献(9)を参

照。)

最小化

$$\sum_{x \in \mathcal{F}} p_x f(x) + \frac{1}{\beta} \sum_{x \in \mathcal{F}} p_x \log p_x \quad (12)$$

制約条件

$$\sum_{x \in \mathcal{F}} p_x = 1$$

ただし、 β は正定数である。式(12)は、式(11)にエントロピー項 $\frac{1}{\beta} \sum_{x \in \mathcal{F}} p_x \log p_x$ を加えたものであり、 $\beta \rightarrow \infty$ のときに式(11)と一致する。また、 $\sum_{x \in \mathcal{F}} p_x \log p_x$ は、 $0 \leq p_x \leq 1$ の場合に負の値となるため、エントロピー項も負の値となる。(最大化問題の場合は、エントロピー項が $-\frac{1}{\beta} \sum_{x \in \mathcal{F}} p_x \log p_x$ となり、結果的に正の値となる。)そのため、エントロピー項である第二項を最小化するためには、いずれの解 $x \in \mathcal{F}$ に対しても均等に p_x を与える必要がある。一方、第一項を最小化するためには、元の問題の最適解 $x^* = \operatorname{argmin}_{x \in \mathcal{F}} f(x)$ に対して $p_{x^*} = 1$ 、その他の解 x に対しては $p_x = 0$ となる必要がある。そのため、式(12)で表される近似問題を最小化することで、 $f(x)$ が小さい解 x に対しては p_x が大きく、一方、 $f(x)$ が大きい解 x に対しては p_x が小さくなる。(元の問題の最適解 $x^* = \operatorname{argmin}_{x \in \mathcal{F}} f(x)$ に対する p_{x^*} が最も大きくなる。)また、 β が大きくなることで、第二項の影響が小さくなり、式(11)の目的関数値により近い近似問題となる。

式(12)は非線形計画問題であるため、カルーシユ・キューン・タッカー(KKT)条件(非線形計画問題において一次導関数が満たすべき最適条件)から、各 $x \in \mathcal{F}$ に対する最適解 p_x^* は、

$$p_x^* = \frac{\exp(-\beta f(x))}{\sum_{x' \in \mathcal{F}} \exp(-\beta f(x'))} \quad (13)$$

となる。ここで、構成 $x \in \mathcal{F}$ を状態とし、その定常状態確率が式(13)で与えられる p_x^* と一致するような連続時間マルコフ連鎖を形成することを考える。マルコフ連鎖とは、将来の状態が現在の状態によって決まり、過去の状態に依存しないという確率過程である⁽¹⁰⁾。その動作は、図8に示すような状態遷移図で与えられ、各状態の滞在時間は遷移率に応じたパラメータを持つ指数分布で与えられる。定常状態確率が p_x^* に一致するためには、隣接する任意の状態 $x, x' \in \mathcal{F}$ において局所平衡方程式

$$p_x^* q_{x,x'} = p_{x'}^* q_{x',x} \quad (14)$$

つまり、

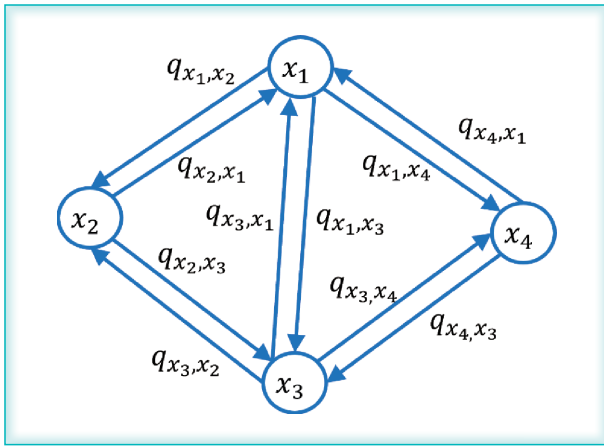


図8 状態遷移図

$$\exp(-\beta f(x)) q_{x, x'} = \exp(-\beta f(x')) q_{x', x}$$

が成り立つ既約な時間可逆マルコフ連鎖を考えればよい。ただし、 $q_{x, x'}$ は状態 x から隣接する状態 x' への遷移率を表す。このようなマルコフ連鎖を形成するためには、遷移率 $q_{x, x'}$ をうまく選択してやればよい。例えば、隣接する任意の状態 $x, x' \in \mathcal{F}$ に対して正定数 α を用いて、

$$q_{x, x'} = \alpha \exp(\beta f(x))$$

及び、

$$q_{x', x} = \alpha \exp(\beta f(x'))$$

とすることで、式 (14) を満たすマルコフ連鎖を形成できる。

このように形成されたマルコフ連鎖では、目的関数値が小さいほどその状態の滞在時間が長くなり、一方、目的関数値が大きいほど、その状態の滞在時間は短くなる。 β を大きくするほどその傾向が強くなり、 $\beta \rightarrow \infty$ とすることで、最適解以外の状態の滞在時間が0となる。マルコフ近似は、このようなマルコフ連鎖上で状態を遷移させながら、式 (10) で表される組合せ最適化問題の最適値を求める手法である。ただし、実際に最適値 (最適解) を求めるのではなく、目的関数値の時間平均が最適値の近似値として与えられる。 β が大きいほど、その近似性能は良く、 $\beta \rightarrow \infty$ のとき、最適値と一致する。

実際のシステム上では、時間変化とともにネットワーク構成を変更することで、マルコフ近似を適用することが可能である。つまり、ある構成 (状態) の維持時間を、目的関数値に応じた平均を持つ指数分布で与え、その時間経過後に、異なる構成に変更する。(構成の例としては、上述のコンテンツ配信

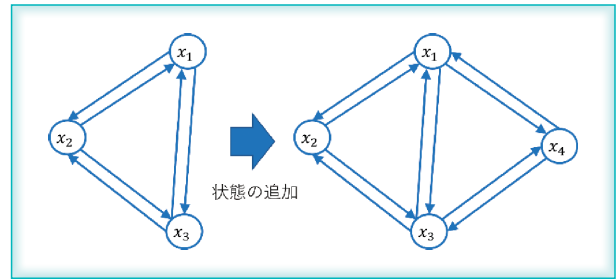


図9 状態変化の例

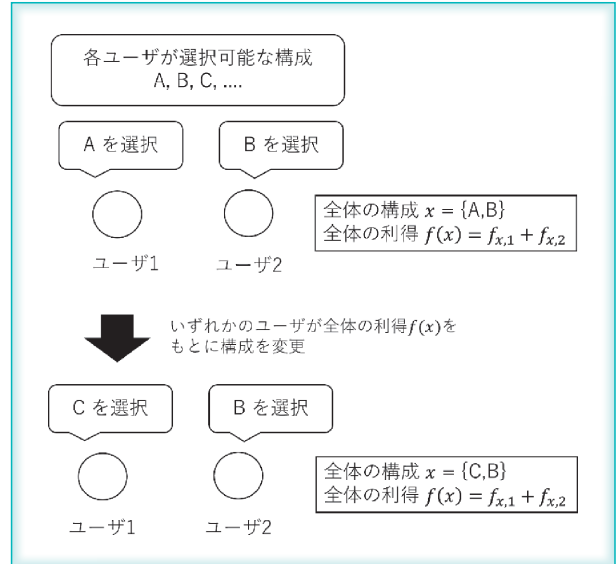


図10 構成変更の例

設計であれば、コンテンツの配置の組合せである。) これを時間変化とともに繰り返していくことで、対象とするシステム上でマルコフ連鎖を形成でき、目的関数値の時間平均が最適値の近似値として求まる。なお、時間変化とともに構成を変更することで最適化を行うため、ネットワーク状況の変動に強く、ある程度自動的に対応することが可能である。例えば焼きなまし法といった通常の最適化手法では、入力となるシステムパラメータ (上述のコンテンツ配信設計では、コンテンツ集合やユーザからのコンテンツ要求量等) が変化すると、もう一度全てのパラメータを入力として問題を解き直す必要がある。一方、マルコフ近似では、対象となるマルコフ連鎖の状態遷移は変化するが、その上で目的関数値に応じた状態遷移を継続させることで、変化した状態に対する近似を行える (図9)。

またそのほかに、マルコフ近似の優れている点は、最適化を分散的に行えるところである。ユーザの集合を \mathcal{N} としたときに、各ユーザ $n \in \mathcal{N}$ の独自の構成によってネットワーク全体の構成 $x \in \mathcal{F}$ が決定されるとすると、その目的関数値 $f(x)$ を、例えば、図10に示すようにネットワーク全体の構成

x におけるユーザ n の利得 $f_{x,n}$ の総和 ($f(x) = \sum_{n \in \mathcal{N}} f_{x,n}$) として表すことができる。この場合、各ユーザは他のユーザ独自の構成を知る必要はなく、現在の目的関数値の情報さえ持っていればよい。例えば図 10 では、ある時刻においてユーザ 1 が構成 A を、ユーザ 2 が構成 B を選択している。このとき、目的関数値 (全体の利得) は、それぞれの利得の和で与えられる。ユーザ 1 及び 2 は、現在の目的関数値に応じたパラメータを持つ指数分布に従い (例えば、分布関数 $F(t)$ を $F(t) = 1 - \exp(-\alpha \exp(\beta f(x)) t)$ で与える)、独立して自身の構成を変更する。このように、各ユーザが現在の目的関数値に応じて自身の構成のみを変更させていくことで全体の構成が変更され、その繰返しによりマルコフ連鎖が形成される。その結果、時間平均値により最適値の近似値が得られる。マルコフ近似に関する適用例は紙幅の都合上省略するが、文献 (9), (11), (12) 等の論文で紹介されている。

5 おわりに

本稿では組合せ最適化問題を応用した情報通信ネットワーク設計に焦点を当て、幾つかの例を交えて、ILP による表現方法や、メタヒューリスティックによる近似解法についての説明を行った。また、オンライン最適化手法であるマルコフ近似の紹介も併せて行った。本稿では、幾つかの単純なネットワーク設計に対して、組合せ最適化問題の適用例を述べたが、組合せ最適化に対する解法はほかにも様々なものが存在する。そのような解法としては、線形緩和、ラグランジュ緩和、劣勾配法、主・双対法等が知られている。メタヒューリスティックにも多種多様な手法があり、対象とする設計問題に応じた適切な解法を用いることが重要である。

文献

- (1) IBM ILOG CPLEX, <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>
- (2) SCIP, <https://scipopt.org/>
- (3) S. H. Owen and M. S. Daskin, "Strategic facility

location: A review," *European J. Oper. Res.*, vol. 111, no. 3, pp. 423-447. Dec. 1998.

- (4) S. Wang, Y. Zhao, J. Xu, J. Yuan, and C. Hsu, "Edge server placement in mobile edge computing," *J. Parallel and Distributed Computing*, vol. 127, pp. 160-168, May 2019.
- (5) O. Kariv and S. L. Hakimi, "An algorithmic approach to network location problems. II: the p -medians," *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 37, no. 3, pp. 539-560, Dec. 1979.
- (6) T. Dokeroglu, E. Sevinc, T. Kucukyilmaz, and A. Cosar, "A survey on new generation metaheuristic algorithms," *Comput. & Industrial Eng.*, vol. 137, no. 5, Sept. 2019.
- (7) N. Laoutaris, V. Zissimopoulos, and I. Stavrakakis, "On the optimization of storage capacity allocation for content distribution," *Comput. Netw.*, vol. 47, no. 3, pp. 409-428, Feb. 2005.
- (8) V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. Plass, N. Briggs, and R. Braynard, "Networking named content," *Commun. ACM* 55, vol. 1, pp. 117-124, 2012.
- (9) M. Chen, S. Liew, Z. Shao, and C. Kai, "Markov approximation for combinatorial network optimization," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no. 10, pp. 6301-6327, June 2013.
- (10) 牧本直樹, 待ち行列アルゴリズム-行列解析アプローチ, 朝倉書店, 東京, 2001.
- (11) T. Kimura, K. Hirata, and M. Muraguchi, "Adaptive access-point and channel selection method using Markov approximation," *International J. Distributed Sensor Netw.*, vol. 14, no. 2, pp. 1-11, Feb. 2018.
- (12) W. He, S. Guo, Y. Liang and X. Qiu, "Markov Approximation Method for Optimal Service Orchestration in IoT Network," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 49538-49548, April 2019.

(2023年2月5日受付, 4月18日再受付)

平田孝志 (正員)

2008 阪大大学院工学研究科電気電子情報工学専攻博士後期課程を修了。博士(工学)。2008 愛媛大大学院理工学研究科助教。2012 東京理科大・工・助教。2014 関西大・システム理工・准教授。2022 同教授, 現在に至る。情報通信ネットワーク設計, 最適化等の研究に従事。



Beyond 5G時代のインフラを支える 高効率・高柔軟光ネットワークキング技術

Highly Efficient and Flexible Optical Networking Technologies That Support Infrastructure in Beyond 5G Era

中川雅弘 Masahiro Nakagawa[†] 関 剛志 Takeshi Seki[†]
宮村 崇 Takashi Miyamura[†] 桑原 健 Takeshi Kuwahara[†]

Summary

2020年前後から世界各国で5Gサービスが開始され、我々はより快適なモバイル通信環境を享受できるようになった。今日では、Beyond 5Gに向けた研究開発が既に動き出しており、ホログラムやテレプレゼンテーション、ハプティクスといった最先端技術を活用したサービス・アプリケーションの登場が期待されている。これらの革新的なサービスは我々の暮らしをより豊かにする一方で、ネットワーク負荷の急激な増大を招く可能性がある。したがって、大量のデータを効率良く遠隔地に届ける役割を担う光ネットワークには、更なる大容量化はもちろんのこと、高効率化・高柔軟化という観点でも進化が求められることとなる。本稿では、Beyond 5G時代に実現が期待されているサービス例や光ネットワークの進化の方向性ととも、光ネットワークの高効率化・高柔軟化に向けた筆者らの取組みを紹介する。具体的には、既存の光ファイバケーブルを最大限活用して効率良くネットワーク容量を拡大できるマルチバンド光ネットワークキング技術と、災害時においても残存資源を最大限活用して柔軟に通信環境を復旧できるアダプティブリストラクション技術について述べる。

Key Words

Beyond 5G, 光ネットワーク, 高効率・高柔軟, マルチバンド, アダプティブ

1 はじめに

インターネットを介した情報のやり取りが当たり前となった現代において、通信ネットワークは我々が社会生活を営む上で欠かせないものとなっている。昨今では、従来の音声通話、Webブラウジング、メールといったアプリケーションに加え、スマートフォンを介したSNS (Social Networking Service) やWeb会議、電子決済等が広く普及し、モバイル通信の利便性が高まっていると言える。そのような中、我が国においては2020年に5G (第5世代移動通信システム) の商用サービスが本格スタートし⁽¹⁾、より快適なモバイル通信環境を享受できるようになった。5Gは、従来と比べ高速・大容量なだけでなく、低遅延、多数同時接続という特長を持ち、あらゆるものがネットワークに接続される時代における通信基盤となることが期待されている一方で、5Gの次の世代「Beyond 5G」に向けた研究開発が既に世界各地で進められている。我が国では、2020年6月に「Beyond 5G推進戦略」を総務省が公表しており⁽²⁾、2030年代の社会像 (図1) や目指すべきBeyond 5Gの絵姿がまとめられ

ている。

2030年代に向けて、実世界を情報化し、サイバー空間 (コンピュータによる仮想空間) でその情報を解析した上で、実世界にフィードバックすることが可能な世界観が構想されている。実世界のリアルタイムな状況把握や、実世界において次取るべき行動の最適化が可能な社会の実現が期待されているわけである。こうした超スマート社会では、あらゆる情報がネットワーク上で常時流通することとなるため、高度な無線通信インフラとしてのBeyond 5G実現だけでなく、光ネットワークの更なる進化が求められる。例えば、文献(2)によると、現在と比べて100倍以上の高速・大容量化が必要と目されている。また、決して無尽蔵ではない光ネットワーク資源を、状況に応じて効率良く柔軟に使いこなすことも極めて重要となる。

本稿では、まずBeyond 5G時代の社会像実現に向けたサービス検討例とネットワークへの要件について述べ、革新的なサービス提供の根幹を成す光ネットワークの進化の方向性を紹介する。続いて、今後重要性がより一層高まることが予測される「光ネットワークの高効率化・高柔軟化」実現に向けた筆者らの取組みを紹介する。

[†] NTT ネットワークサービスシステム研究所, 武蔵野市
NTT Network Service Systems Laboratories,
Musashino-shi, 180-8585 Japan

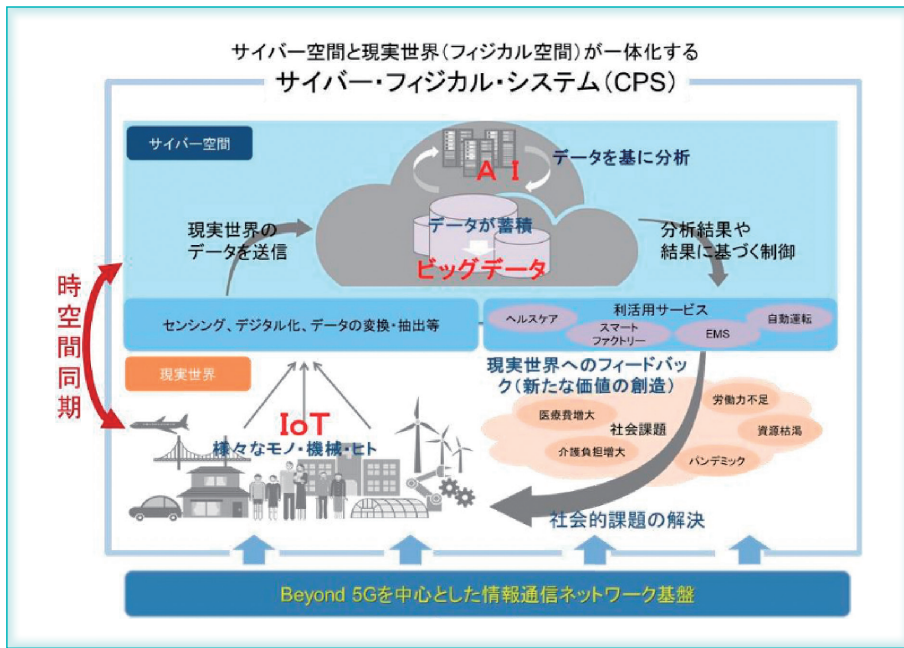


図1 2030年代の社会像⁽²⁾

2 Beyond 5G 時代における通信サービス

本章では、情報通信技術に支えられた昨今の社会動向を概観し、Beyond 5G 時代のユースケース並びにそれらを具現化する通信サービスの検討例を紹介する。検討例は多岐にわたるが、後述のとおり、10年前には想像もできなかった超高臨場体験や仮想空間を活用したサービスの登場・普及が期待されている。

我々の暮らし・社会は、携帯電話／スマートフォンの普及とともに、劇的に変化してきている。我が国では2000年代前半に携帯電話の普及率が80%を超え、場所を選ばずに音声通話やメール、Webブラウジングが可能となった。近年ではスマートフォンが急速に普及し、SNS上の交流が一般化したほか、動画視聴・配信、電子決済、健康管理、ナビゲーション、Web会議等、様々なことが1クリック(1タップ)で実現されるようになった。こうしたスマートフォンが浸透した中でサービス開始した5Gは、スマートフォンだけでなく、あらゆるものがネットワークにつながる社会の通信基盤となることが期待されている。ここで、5Gではスマートフォン等の端末を起点にした無線通信が注目されがちではあるが、多様な情報流通を支える光ネットワークが担う役割は非常に大きいと言える。具体的には、基地局から通信局舎やデータセンター等遠隔地に大容量データを届ける際には光ネットワークが不可欠であり、モバイルサービス提供を陰で支えているわけである。(図2のとおり、無線アクセス区

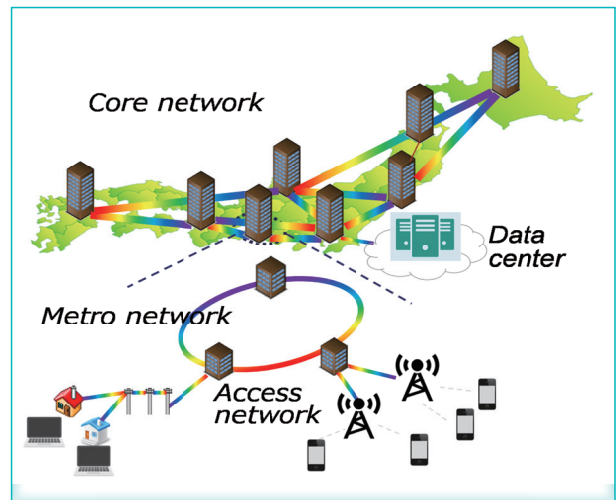


図2 典型的なネットワーク構成

間以外は光ネットワークが活用されている。) これまで光ネットワークは継続的に大容量化が進められてきているが、Beyond 5G 時代を見据え更なる進化が求められている。

今日、Beyond 5G 推進コンソーシアム⁽³⁾やIOWN Global Forum⁽⁴⁾といった種々の団体が設立され、Beyond 5G 時代におけるユースケースや主要アプリケーション・サービスの検討が活発になっている^{(5)~(8)}。これらの文献で共通して述べられていることは、Beyond 5G はもはや単なる通信手段ではなく、経済発展や社会課題の解決に寄与する社会基盤であるということである。すなわち、携帯電話登場当初は通信そのものが目的であり、通信場所制限の緩和という価値をもたらしたわけであるが、Beyond 5G には2030年代のあらゆる産業・

社会活動を支えるという重大な使命が課せられているのである⁽²⁾。加えて、多様なものがネットワークに接続されることが当たり前となる世界において、Beyond 5Gを基盤とした革新サービスの登場が期待されている。革新サービスの特徴付けるキーワードとして、ホログラム、テレグジスタンス、ハプティクスが挙げられる。これらを意識すると、三次元像、遠隔臨場感、触覚通信となり、従来とは比べ物にならない超高臨場感体験が可能になる世界が開かれようとしている。そのような世界では、VR (Virtual Reality, 仮想現実) や仮想空間を活用したサービスや、五感を伝えるサービスが当たり前となっている可能性が高い。また、VR 並びに仮想空間関連市場拡大に伴う経済発展が実現されることが期待される。加えて、革新サービスの登場が社会課題の解決に寄与することも期待されている。具体例には、ネットワークに接続されたロボットを活用した労働力不足解消、遠隔医療・遠隔手術を用いた地域間医療格差の改善がある。

しかしながら、前述の三次元像は写真や動画像と比べてデータ量が大きく、また、無数のセンサからは次々に大量のデータが生成されることとなる。したがって、これら高精細なイメージや膨大な情報をリアルタイムに流通させる際、光ネットワークに非常に大きな負荷が掛かることは想像に難くないであろう。すなわち、革新サービスを具現化し Beyond 5Gの世界観を実現する上では光ネットワークの進化が必要不可欠であると言える。更に言えば、文献(2)などで述べられているとおり、ネットワークのオール光化を見据えた技術開発の重要性が高まっているわけである⁽⁹⁾。

3 光ネットワークの進化の方向性

本章では、これまでの光ネットワークの進化を簡単に振り返った上で、本稿で特に着目する技術課題や進化の方向性について述べる。

今日の情報社会は光ネットワークによって支えられていると言っても決して過言ではない。光ネットワークにおいて情報を伝達する媒体である光ファイバは、メタルケーブルと比べ低損失、広帯域、無漏話・無誘導、細径、軽量といった特長があり、1970年代後半に量産技術が開発されて普及が進むこととなった。その後、レーザや受光器、変調器、電子回路、光増幅器、光合分波器、光スイッチといったデバイス技術の進展とともに、光ネットワークは継続的な容量拡大を遂げてきた。現在は波長多

重方式とデジタルコヒーレント方式を適用した光ネットワークが一般となっている⁽¹⁰⁾。ここで波長多重とは、波長が異なる光信号は互いに干渉しないという光の性質を利用し、複数の光信号を1本のファイバで伝送させる方式を指している。また、デジタルコヒーレント方式では、広く使われてきた光の強弱だけでなく、光の位相や偏波を利用して高度な変調(信号を光に乗せる処理)を行うことができ、波長当りの伝送容量拡大を実現している。

ここで前述の動向を鑑みると、光ネットワークの更なる大容量化の要請は避けられず、容量拡大の継続は既定路線とも言える。これに対し、変調方式の更なる高度化によって波長当りの容量を追求するというアプローチがある。図3に示すように、1秒当りの変調回数を表す変調速度の高速化、並びに1回の変調当りの情報量(変調多値度)の増加によって、波長当りの容量拡大が図れるわけである。しかしながら、変調速度は波長多重数に影響し、変調多値度は伝送可能距離に影響することに注意が必要である。変調速度と波長多重数、変調多値度と伝送可能距離はそれぞれトレードオフの関係にあるのである。つまり、一定の伝送距離を確保するためには、多値度を無限に増加することはできず、変調速度の高速化が必須となる。一方で、変調速度を高速化すると1波長当りの占有波長帯域幅が増加することで波長多重数が制限されてしまう。したがって、トータルの大容量化に向けては、図4に示すようなマルチバンド化や空間多重等の適用が必要となる。マルチバンド化とは複数の波長帯を同時に利用するアプローチである。ここで、光通信で使われる波長帯は表1のように国際標準化機関ITU-Tで定められており、「C+L」はCバンドとLバンドを同時に利用することを意味する。また、空間多重とは、マルチコアファイバ等、革新的な伝送媒体を活用するアプローチである。本稿では、特にマルチバ

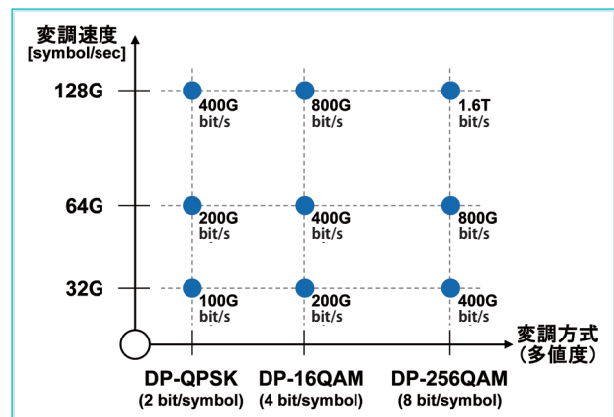


図3 1波長当りの大容量化アプローチ

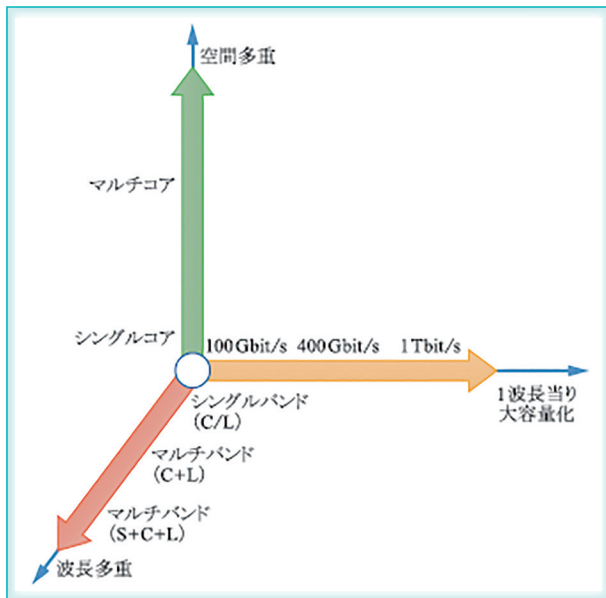


図4 大容量化に向けたアプローチ⁽⁹⁾

表1 波長帯と対応波長

波長帯	O-band	E-band	S-band	C-band	L-band
波長 [nm]	1,260 ~ 1,360	1,360 ~ 1,460	1,460 ~ 1,530	1,530 ~ 1,565	1,565 ~ 1,625

ンド化に着目し、複数の波長帯を効率良く使いこなす取組みについて次章で紹介する。

加えて、あらゆるものがネットワークに接続される5G時代以降では、いかなる環境下でも途切れない通信を実現することも極めて重要となる。大容量化が進む光ネットワークに障害が生じた際の影響は計り知れず、Beyond 5G時代において激甚災害が生じた際にも社会活動の基盤として影響を最小化することが求められる。これに対しては、光ネットワークの効率化・高柔軟化という進化の軸も重要となる。つまり、単純に容量を拡大するだけでなく、状況に応じて自由にネットワークの変更・拡張を可能にし、拡大された容量を極限まで使いこなす技術開発が必要となる。これは、決して無限ではない光資源を有効活用してネットワークのオール光化を目指す上でも重要な進化と位置付けられる。現在、光ネットワークの効率・柔軟性向上という観点では、図3に示すように、変調方式を自由に選択できるようになってきている。本稿では、この技術動向を踏まえ、変調方式の柔軟な変更を活用して、障害時においても迅速かつ効率的な復旧を実現するための取組みについて次章で紹介する。

4 筆者らの取組み

4.1 効率的な容量拡大を実現するマルチバンドネットワークワーキング技術

本節では、まずマルチバンド化による容量拡大の阻害要因を説明し、その上で、複数の波長帯を効率良く使いこなすことで該当要因による影響を回避するネットワークコンセプトを紹介する。更に、提案ネットワークの実証実験を行った結果についても述べる。

これまで、主にCバンドやLバンドと呼ばれる単一の波長帯を用いて波長多重伝送が行われてきた。マルチバンド化とは、簡単に言えば用いる波長帯を増やすアプローチであるが、波長帯を増やせば増やすほど単純に容量が増えるかというところではない。それには、SRS (Stimulated Raman Scattering, 誘導ラマン散乱) と呼ばれる光の物理現象が大きく関わっている。マルチバンド波長多重信号を長距離伝送すると、SRSの影響により、図5のように波長間でパワー遷移が生じてしまう。ここで言うパワーとは光強度 (単位: W や dBm) のことを指し、光信号品質に大きく影響する。例えばパワーが低い光信号は雑音の影響を大きく受け、信号品質が劣化してしまうことから、図5における短波長側の光信号は長距離大容量伝送が不可能なケースが発生し得る。これにより、従来、単純にマルチバンド化した場合、図6のように実効的なネット

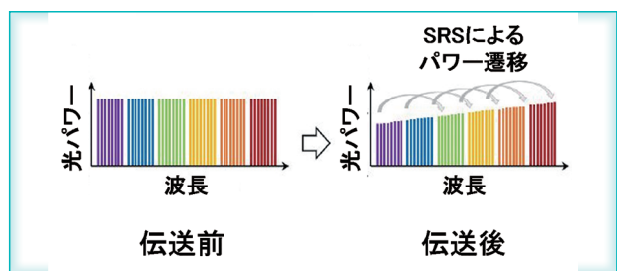


図5 マルチバンド伝送におけるSRSの影響

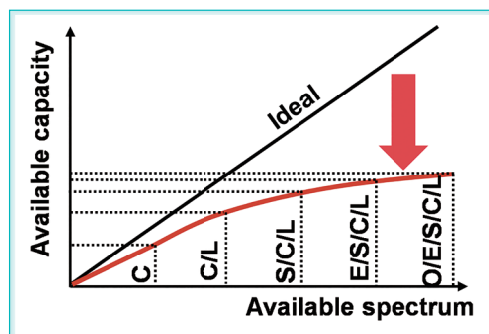


図6 従来におけるマルチバンド化と実効容量の関係

ワーク容量は制限を受けていたわけである。

これに対し、筆者らは、非線形光学効果と呼ばれる物理現象等を利用して光信号の波長帯を変換する波長帯変換技術を活用することで、伝送途中で自由に波長帯を変更可能な光ネットワークを提案している⁽¹¹⁾。図7に示すとおり、従来各波長帯は独立して運用されていたために実効的な容量が頭打ちとなっていたのに対し、複数の波長帯をまたがった波長利用を可能にすることで、前述のパワー遷移の影響が緩和され、大幅な容量拡大を実現できることを計算機シミュレーションによって明らかにしている。

加えて、提案したコンセプトに関して、文献

(12)において実証実験を行っている。実験系を図8に、実験結果を図9にそれぞれ示す。この実験では、C+Lバンドの環境下を想定し、1波長当たり100 Gbit/s、Cバンド、Lバンドそれぞれ72波長の計144波長多重伝送実験を行っている。具体的には、リング状の光ファイバ伝送路を二つ(Ring1, Ring2)準備し、図8(a)に示すとおり、波長帯変換器や波長選択スイッチ等から成る光ノードで接続した系を構成した。光ノードでは光信号を送らせる伝送路(Ring1, Ring2)並びに波長帯(Cバンド、Lバンド)を自由に切り換えることが可能であり、図8(b)に示す四つのパス設定で送らせられた際の信号品質を測定している。なお、図8(b)

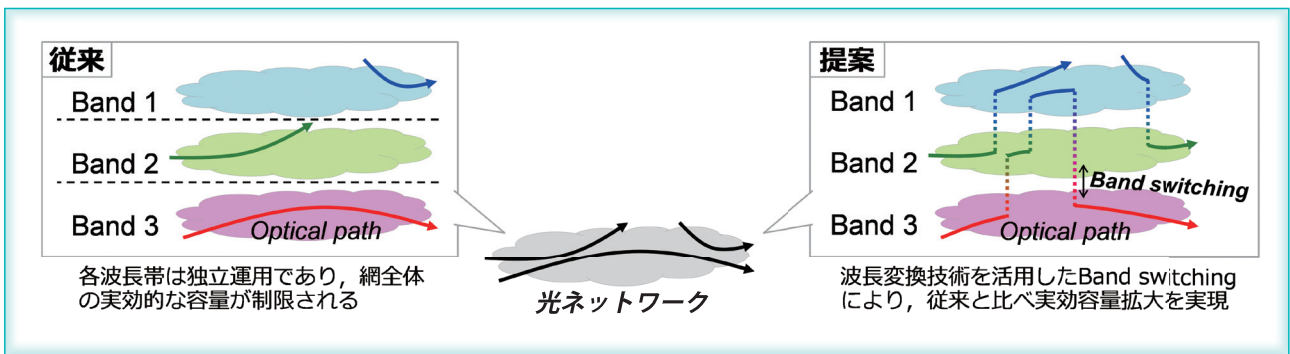


図7 従来のネットワークと提案ネットワークコンセプト

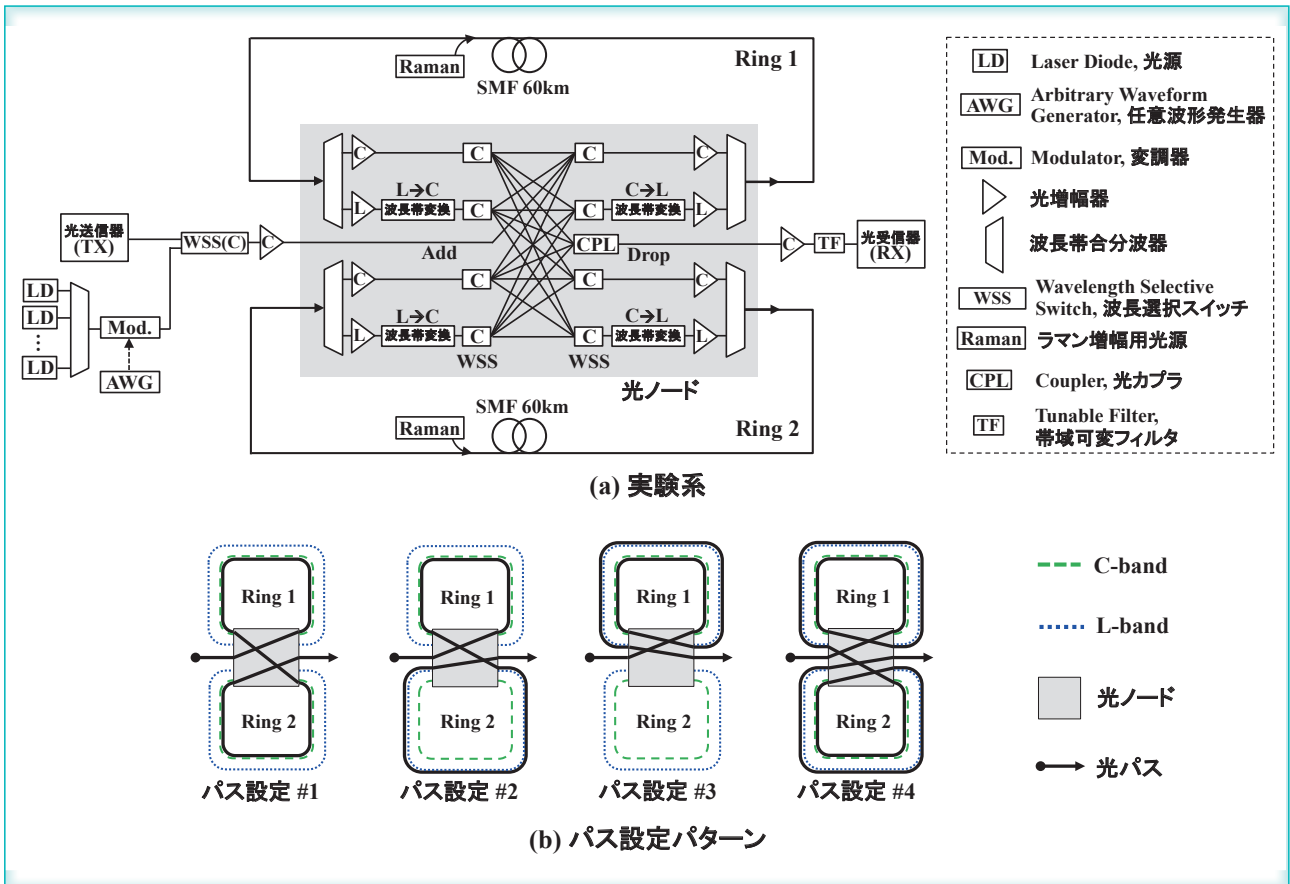


図8 マルチバンド伝送実験系

において黒色の実線が緑色の破線に沿って記載されている場合は該当のリングをCバンドで伝送させることを意味し、青色の点線に沿って記載されている場合はLバンドで伝送させることを意味している。また、図9におけるQ値は光信号品質を表す指標であり、全てのパス設定においてしきい値を上回る良好な結果が得られている。特に、パス設定#4（リングを通過する度に波長帯を切り換えながらリングを4回伝送）においても十分に高い信号品質を達成できていることから、物理特性の観点での実現性を有していることが示されていると言える。

4.2 柔軟な障害復旧を実現するアダプティブリストレーション技術

一般に、不測の事態によりネットワーク障害が発生した場合には、早期復旧が求められる。激甚災害時には道路や橋、トンネル等が損壊し通信局舎までの駆け付けや現地対応に時間を要する場合がある。アダプティブリストレーションは、遠隔からの制御によって、残存する資源（光ファイバ及び通信装置）を活用して可能な限り最大限の通信を速やかに復旧することを可能にする技術である。本節では、激甚災害発生時を想定した際の障害復旧のケースについて述べ、アダプティブリストレーションの概要を紹介する。加えて、フィールド環境下でアダプティブリストレーションの実証実験を行った結果について紹介するとともに、救済トラフィック量を拡大させるための提案方式について紹介する。

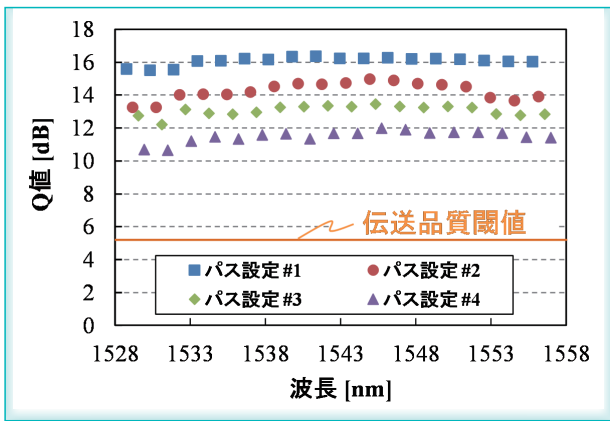


図9 実験結果

かに復旧することを可能にする技術である。本節では、激甚災害発生時を想定した際の障害復旧のケースについて述べ、アダプティブリストレーションの概要を紹介する。加えて、フィールド環境下でアダプティブリストレーションの実証実験を行った結果について紹介するとともに、救済トラフィック量を拡大させるための提案方式について紹介する。

一般に、光ネットワークでは運用中に冗長構成をとって信頼性を担保している。図10の左側は、ルータ間に2系統（PrimaryとSecondary）の光パスを設定した冗長構成の例を示している。このとき、一方に障害が発生した場合においても、他方が生き残る限りはルータ間通信の途絶は回避できることになる。しかしながら、大規模災害発生時等に2系統とも障害が同時に発生した場合には、ルータ間通信が断絶してしまう。そこで、残存するネットワーク資源をうまく活用して復旧させる技術をリストレーションと呼び、更には、変調方式を選択することで、う回経路を通過する場合においても、伝送品質と伝送容量を最適化する技術がアダプティブリストレーションである（図10の右側）。

筆者らは、このアダプティブリストレーションの有用性に着目し、フィールド環境下における実証実験を行っている⁽¹³⁾。図11に実験系を、図12に実験結果をそれぞれ示している。実験では、初期設定経路（Primary route）に障害が発生した際に、う回路（Detour route）に切り換える例を実証しており、経路とともに波長や変調方式の切り換えも行っている。なお、図12における伝送品質マージンは信号品質の余裕度合い（具体的には、着信した信号品質とあらかじめ定められた品質しきい値との差分）を表し、この値が0以上であれば十分な品質が担保されていることを意味する。図12には、アダプティブでない（経路のみ切り換え）従来のリストレーションの例との比較を示しており、従来は変調方式

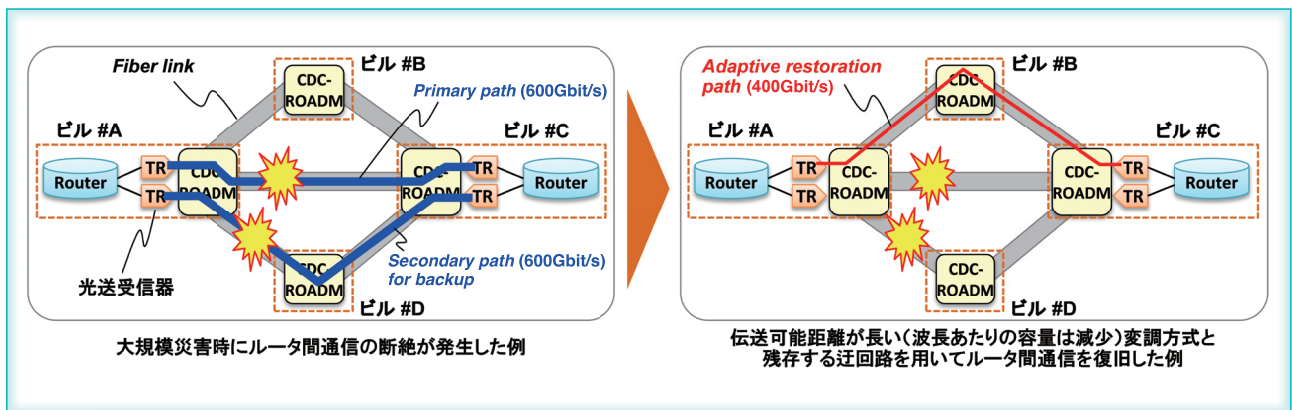


図10 アダプティブリストレーションの概要図

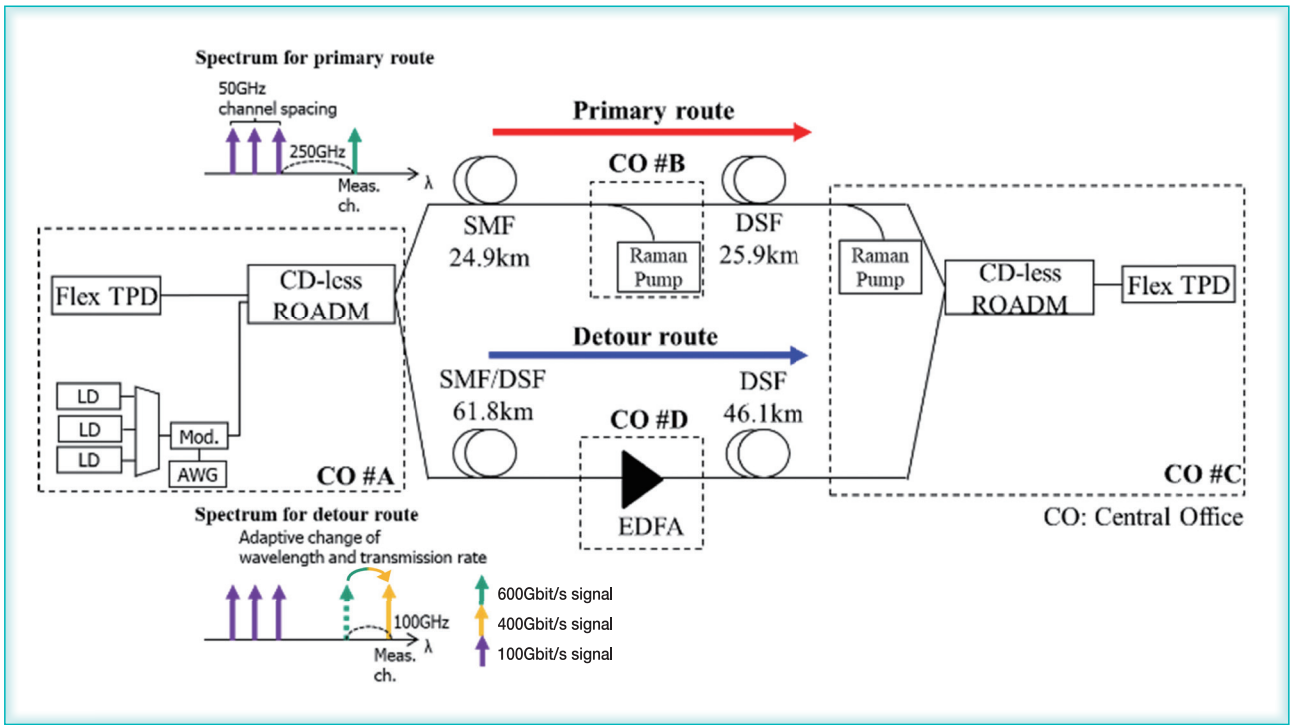


図 11 アダプティブリストレーション実験系

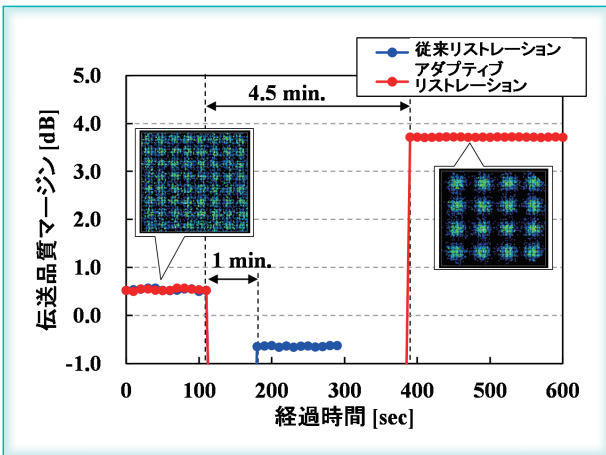


図 12 実験結果

を変更しない場合、経路長が伸びたことによって十分な伝送品質が確保できない（前述の-marginが負の値）という結果となっている。この場合、光は到達するものの不十分な品質によって通信断が生じてしまう。一方、アダプティブに変調方式も切り換えた場合、伝送品質が確保され、通信復旧に成功することが示されている。この切り換えは遠隔からの制御で実現でき、切り換え時間は4.5分程度であるため、非常に高可用なシステムの実現が期待できる。

更に、アダプティブに変調方式を切り換えた場合には、切り換え前よりも波長容量が小さくなることもあり得るため、障害前に疎通していたトラフィック量を全て復旧できない可能性もある。そこで、図13に示すとおり、もう1本リストレーション用のパス

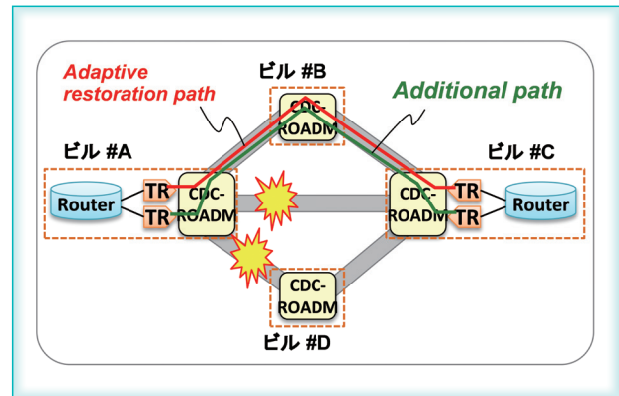


図 13 デュアルパスリストレーションの概要

を設定するデュアルパスリストレーション方式の提案を行っている⁽¹⁴⁾。これにより、救済されるトラフィック量が大幅に向上可能なことが計算機シミュレーションによって示されている。

5 まとめ

Beyond 5G時代に期待されている社会像や、革新サービスの検討例について紹介し、社会インフラを支える光ネットワークの進化の方向性について述べた。更なる光ネットワークの大容量化とともに、今後より一層重要となる高効率化・高柔軟化に着目し、筆者らの取組みとして、効率的な容量拡大を実現するマルチバンドネットワーク技術と、柔軟な障害復旧を実現するアダプティブリストレーション

ン技術を紹介した。前者については、マルチバンド化における容量拡大の阻害要因を説明し、それを打破するコンセプト並びに実証実験結果を紹介した。また、後者については、激甚災害時における柔軟な障害復旧のユースケースを述べ、迅速な障害復旧の実証実験結果並びに救済トラフィック量を向上させる方式について紹介した。本稿が関連分野の研究開発活性化の一助となることを祈念する。

■ 文献

- (1) 総務省, “情報通信白書令和2年版,” <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/r02.html> (2023.2.1 参照)
- (2) 総務省, “Beyond 5G 推進戦略－6G へのロードマップ－,” https://www.soumu.go.jp/main_content/000696613.pdf (2023.2.1 参照)
- (3) 総務省, “「Beyond 5G 推進コンソーシアム」の設立及び設立総会の開催,” https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000484.html (2023.2.1 参照)
- (4) NTT, “NTT, インテル, ソニーがコミュニケーションの未来をめざして国際的なフォーラム「Innovative Optical and Wireless Network (IOWN) Global Forum」を設立,” <https://group.ntt.jp/news-release/2019/10/31/191031a.html> (2023.2.1 参照)
- (5) 総務省, “Beyond 5G 時代の有線ネットワーク検討会 取りまとめ 概要,” https://www.soumu.go.jp/main_content/000675072.pdf (2023.2.1 参照)
- (6) 三宅 優, “ITU-T における 2030 年のネットワークに向けた議論,” 信学誌, vol. 104, no. 5, pp. 412-419, May 2021.
- (7) 情報通信研究機構, “Beyond 5G/6G White Paper 日本語 2.0 版,” March 2022.
- (8) NTT ドコモ, “5G の高度化と 6G,” ドコモ 6G ホワイトペーパー 5.0 版, Nov. 2022.
- (9) 関 剛志, 河原光貴, 宮村 崇, 前田英樹, 原 一貴, 金子 慎, 可児淳一, “オールフォトニクスネットワークの実現に向けた伝送技術の進展,” 信学誌, vol. 104, no. 5, pp. 464-470, May 2021.
- (10) 宮本 裕, 森田逸郎, “大容量光中継伝送技術,” 信学誌, vol. 100, no. 8, pp. 783-788, Aug. 2017.
- (11) M. Nakagawa, H. Kawahara, T. Seki, and T. Miyamura, “Adaptive link-by-link band allocation: A novel adaptation scheme in multi-band optical networks,” ONDM, June 2021.
- (12) H. Kawahara, M. Nakagawa, T. Seki, and T. Miyamura, “Experimental demonstration of wavelength-selective band/direction- switchable multi-band OXC using an inter-band all-optical wavelength converter,” ECOC, Tu1H-5, Dec. 2020.
- (13) H. Kawahara, K. Saito, M. Nakagawa, T. Kubo, T.

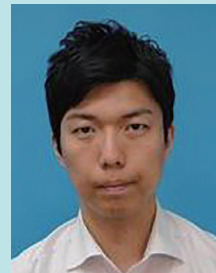
Seki, T. Kawasaki, and H. Maeda, “Real-time experiment and numerical analysis of highly-survivable adaptive restoration for high-capacity optical signal transmission,” IEICE Trans Commun., vol. E104-B, no. 4, pp. 360-369, April 2020.

- (14) M. Nakagawa, H. Kawahara, K. Masumoto, H. Onda, and K. Matsumura, “Numerical analysis of adaptive restoration in optical transport networks,” OECC/PSC, TuG3-2, July 2019.

(2023年2月3日受付, 5月10日再受付)

中川雅弘 (正員)

平 20 名大・工・電気電子卒。平 22 同大学院工学研究科修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、大容量光ノード並びにフォトニックネットワークの研究に従事。現在、NTT ネットワークサービスシステム研究所主任研究員。



関 剛志 (正員)

平 14 東工大・工・電気電子卒。平 16 同大学院総合理工学研究科修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、大容量光クロスコネクタの研究開発に従事。現在、NTT ネットワークサービスシステム研究所主任研究員。平 22 年度本会学術奨励賞、令元第 34 回電気通信普及財団賞（テレコムシステム技術賞）各受賞。



宮村 崇 (正員：シニア正員)

平 11 阪大大学院応用物理学専攻修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。QoS 制御技術、超高速 IP ルータ、光伝送システム等の研究開発に従事。現在、NTT ネットワークサービスシステム研究所主幹研究員。平 13 IEICE APCC Paper Award, 平 21 年度本会通信ソサイエティ活動功労賞, 2017 年 APNOMS Best Paper Awards 各受賞。IEEE 会員。博士 (工学)。



桑原 健 (正員)

平 9 早大大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、ATM, IP-VPN, ネットワークセキュリティ, エッジコンピューティング, フォトニックネットワーク等の研究開発に従事。現在、NTT ネットワークサービスシステム研究所主席研究員として、IOWN の研究開発プロジェクトを推進。

