

次世代の通信インフラ

安立 恭晴*

1. はじめに

世界中でデジタル化を促進する取り組みが拡大している中、既にパソコンやスマートフォンを用いたコミュニケーションや公共交通機関の電子決済など、日常生活になくてはならない通信サービスが世界中に普及し、それを支える大容量通信ネットワークは私たちの生活において欠くことのできない社会基盤になってきている。日本の内閣府でもSociety5.0というビジョンを提唱し、通信環境を重要な社会基盤と位置づけその整備を強く推進している。このSociety5.0の内容は「サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を融合させた仕組みを構築することで、経済発展と社会的課題を解決し、人間中心の社会とする」と定義づけ、次世代の情報無線通信インフラと期待されるB5G（Beyond 5G）／6Gのコンセプトが導入、整備されることで新しい価値創造をも牽引されるとしている。

これからの世界において通信は空気と同じくあって当たり前なもの、電力や水と同様に重要なライフラインとしてその重要性はますます高まってきている。このような社会的な動向を踏まえ、本稿では、通信インフラというものを基本的な事項から整理した上で、最新のデジタル通信ネットワークに関わる技術的動向を解説し、今後の海事業界における通信インフラの重要性について考察する。

なお現在B5G（Beyond 5G）という名称でよばれている将来の6Gを本ドキュメントでは以下「B5G」と称する。

2. 通信とは

通信とは、送り手と受け手の間で情報を共有する手段であるとされている。人々はこれまで離れた相手にメッセージを伝えようと様々な方法を試みてきた。

船の世界でも遥か昔から、国籍旗を掲げ、航行灯、非常用信号を灯すことで周囲の船舶や陸上へ「目で見てわかる情報」を伝え、汽笛などの音響信号を用いて周囲の船舶に自船の位置や動きを「耳で聞いて

わかる情報」として伝えるなどの工夫を続けてきた。そして長きにわたり使われてきたこれらの通信手法は現代においても船舶間のコミュニケーションや安全な航行を維持するために重要な役割を果たし続けている。

また通信の形態は、技術の進歩と社会の変化に合わせて進化し、現在では、安定性や高速通信に向いている固定回線による通信と、移動性や柔軟性に優れた無線通信の二つのカテゴリに分けることができる。インターネットをはじめとした通信インフラの主役は、固定回線による通信であり、無線通信は、そのラストワンマイルに利用される傾向にある。すなわち通信インフラの中で主要なデータ転送経路やバックボーンネットワークは通常、固定回線を使用して構築される。固定回線による通信は、物理的なケーブルを敷設し、そのケーブルを伝わることで情報を伝達するため、高い帯域幅と信頼性を確保できるのと同時に大量のデータを効率良く転送できる。このため、企業内外の通信インフラやクラウドネットワークを構成するサーバ間などでは、できる限りこの固定回線を伝送路として利用するのが一般的である。

しかし末端の送受信機器までの接続において、回線を敷設することが難しい場合や、端末の移動性を考慮する必要がある場合には無線による通信が重要な役割を果たす。

この無線による通信は、電波を使用して情報を伝送する通信方式であり、1900年代初頭のマルコーニによるモールス信号の大西洋横断無線通信から始まり、1980年代に使われ始めた移動体無線通信技術の1G（第一世代）まで、アナログ信号を用いていた。

当時は画期的な技術とされた1Gもその主な用途は音声通話であり、携帯電話本体も大型であったうえに音声以外のデータの通信には適していなかった。

しかし、その後の3Gでは、完全にデジタル信号へ移行されたことで、多少の遅延はありながらもリアルタイムでビデオ通話などもできるようになった。そして現在の5Gでは、リモート会議を行いながら資料を共有し、さらに同時にインターネット検索も行える超高速で大容量の無線通信が行える時代に

* 技術研究所

なっている。

これら1Gから現在の5G、そして次世代のB5Gへと技術改革が進んでいる移動体無線通信技術と並行して、デジタル方式を前提とした新たな無線通信技術も多数実用化されてきている。数十m以内での近距離無線通信に適しているWi-Fi (Wireless Fidelity) とよばれる無線通信技術や、非接触での情報共有、公共交通機関の乗車券、モバイル決済までを一瞬のうちに完了させるNFC (Near Field Communication) とよばれる近距離無線通信技術など、今では街中で当たり前のように使われている。

3. 無線通信

無線通信の仕組みは、電波が空間を伝播することで、遠隔地へ情報を届ける通信手法である。

電波は電磁波の一種であり、電磁波は電場 (Electric Field) と磁場 (Magnetic Field) が交互に直交することで発生する。この現象は電流が、電荷のある物体を通過することで周囲に磁場が発生する。そしてこの磁場の变化を妨げる方向に電場が自然発生する。さらにその電場の变化により磁場が再び発生するという相互作用によって電波が空間を伝わっていく。また、電場と磁場が相互に作用しあって伝播するものであるため、宇宙空間などの振動媒体が無い真空の空間でも伝わる事ができる。さらに電磁波は、広範囲周波数範囲 (帯域) を持ち、異なる波長やエネルギーを持つことで、さまざまな特性を持つ波として存在している。

そして無線通信では、この電磁波の周波数、波長、帯域幅が、通信の伝播特性を決定づける重要な要素であり、アナログ信号、デジタル信号共に、これらの基本的な伝播特性の仕組みは同じである。

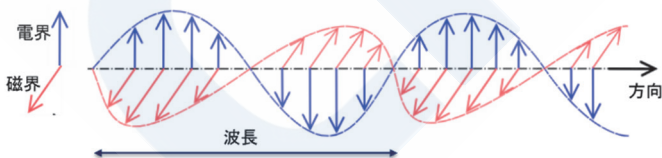


図1 電波の基本的な特性

以下に電磁波の波長、周波数、帯域幅について説明し伝播特性との関係性を述べる。

3.1 周波数

無線通信で利用されている電磁波は「波」であり、波長と周波数という関連する特性を持っている。

波長は連続した波の周期的特徴であり、隣接する波の同一位置における距離を示し、その単位はメートル (m) またはその倍数 (センチメートル, ミリ

メートル, ナノメートルなど) で表される。

周波数は単位時間あたりに波が繰り返される回数であり、現れる波の数を秒あたりに示し、その単位はヘルツ (Hz) で表され、1ヘルツは1秒間に1回の振動を意味する。

電波の伝播速度は周波数にかかわらず一定で光と同じ1秒間に約30万km進む。これを周波数で割ると波長になる。また、周波数が高くて低くても電波自体の届く速さは変わらない。波長と周波数は次のような式で表される。

$$\lambda \text{ (波長)} = \frac{c \text{ (光速)}}{f \text{ (周波数)}}$$

3.2 帯域幅

帯域幅 (Data Bandwidth) とは、利用できる周波数の幅であり「最高周波数」と「最低周波数」の差のことである。すなわち、データを伝送するために利用できる周波数の範囲であり、データの転送速度に関係する。データの転送速度の単位は1秒間に何ビット転送できるかを表すデジタルビットレート bps (bits per second) が用いられる。例えば転送速度1Mbpsは、1秒あたりに最大で1メガビットのデータが伝送できるという意味である。帯域幅とデータの転送速度の関係は、次の関係式で示すことができる。

$$\text{データの転送速度} = \frac{\text{帯域幅}}{\text{デジタル信号のビット数}}$$

基本的な考え方は、帯域幅が広いほどより多くの情報 (データ) を転送できるため、転送速度も速くなるというものである。ただしこの関係式は理論的な最大データ転送速度を計算するために使用されるもので、実際のデータ通信ではノイズや信号の変調方式、誤り訂正符号、プロトコルのオーバーヘッドなどの要素も考慮する必要がある。以下の式によりデータ転送速度を求めることが多い。

$$R = B \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

ここで、Rはデータの転送速度 (ビットレート)、Bは帯域幅 (ヘルツ)、 \log_2 は2を底とする対数とし、S/Nは信号対雑音比 (Signal to Noise Ratio) を示す。Sは信号の平均電力、Nはノイズの平均電力で

ある。S/Nは通信路の品質やノイズの影響を表し通信システムの性能に影響を与える。すなわちS/Nが大きいほどより高速なデータ転送速度が実現でき、またデジタル信号のビット数 (bps/Hz) は、デジタル信号の効率や変調方式によって決まる。言い換えると、より効率的な変調方式を使用すると1Hzあたりのビット数が増え、結果としてデータ転送速度も向上することとなる。

なお、この関係式は情報理論の枠組みであり、データ転送速度の計算式として利用されるが、実際の通信システムではさまざまな要件を考慮することで実現可能な転送速度を決定する必要がある。

3.3 電波の衰退

一般的に周波数が低い電波は波長が長く比較的障害物を通り抜けやすい伝播特性を持つ。その一方で周波数が高い電波は波長が短く障害物による衰退や反射が起こりやすい傾向にあるが高速なデータ転送速度を実現できる可能性をもつ。また、電波の波という性質は自由空間であっても衰退するとされ、その衰退の度合いを示すためにはフリスの伝送公式によって以下のような考え方ができる。

通信をつかさどる電波の電力密度 P_D は、電力 P を、通信距離 d を半径とした球の表面積 $4\pi d^2$ で割った値となり「距離の2乗に比例して減衰する」という特性を持つ。例えば、距離が2倍になると面積は4倍になるので電波の電力密度は1/4となる。その計算式は以下で表される。

$$P_D = \frac{P}{4\pi d^2}$$

つまり電波の衰退は距離が遠くなるほど電波のエネルギーは広がって薄まり受信する信号の強度が低下することを示している。電力の減衰はフリスの伝送公式に基づき次のように計算される。

$$P_L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

ここで、 P_L は伝播損失、 d は送信元から受信先の距離すなわち送信アンテナと受信アンテナの距離とし、 λ は電波の波長を示す。

この式からも分かるように、衰退の傾向は伝播距離が長くなるほど増加することに加え「波長の2乗に反比例して衰退する」という特性も持つ。

なお、これらの式は自由空間を想定しており障害物や反射、散乱、回折、干渉などの影響は考慮していないため、実際の通信を考える場合にはこれらの

現象を踏まえた対応が必要となる。

4. 次世代の無線通信技術を目指すB5G

近年におけるデジタル化の目標はフィジカル空間とサイバー空間を融合させた高度なデジタル社会の実現とされており、物理的な制約を意識せず世界中のあらゆる事象を思いつくまに実現できる社会インフラの整備実現が必須となる。

この目標達成に向け2030年にリリースが予定されている次世代の無線通信ネットワークシステムB5Gでは、高速・大容量、さらに低遅延でセキュアな次世代の通信基盤の整備を実現するため、5Gまでで利用していた周波数帯よりも高い周波数領域で、より広い帯域幅を確保する必要がある。

これまでの5G以前の技術改革では、それまで利用していたミリ波とよばれる約300GHz以下の、限られた周波数帯域を利活用する形で通信方式の改良が進められてきた。この理由は、周波数がより高くなると電磁波の直進性が強くなることで、障害物に回り込むことができず、大気による減衰も大きくなるため、数メートルを超える長距離の通信は技術的に難しかったためである。

しかし、このような問題を抱えながら市場からは高い通信品質が求められ、さらに通信に利用できる周波数帯域の利用割当も逼迫する中、近年になり高周波数帯を通信に利用するための半導体素子や、これまでの無線通信技術を発展させた光の位相、振動方向の分布を捉える偏波などの技術革新が進み、新たな高周波数領域を利用するために必要な、様々な技術群が整いはじめている。

B5Gではこれら技術的な進展が後押しとなり、まずはテラヘルツギャップと言われている30THzまでの領域を無線通信に利用することを目指している。そしてさらに、その先の可視光の領域である800THzまでの活用を展望している。

4.1 光による無線通信

以下の図2に示した電波や光の特性について言及した後、光による無線通信について述べる。

無線通信をつかさどる電波も光も同じ電磁波であり同じ空間を共有している。このため電波であっても光であっても、第3章に示した無線通信の基本的な特性は同じである。

情報が伝わる際の伝達容量の違いを生むものは波長である。波が穏やかにうねれば波長は長く、周波数は低いことになり、情報の伝達速度もその分遅くなる。逆に早い波は波長が短く、周波数も高いため、ある一点を通過する波の数も多くなることで単

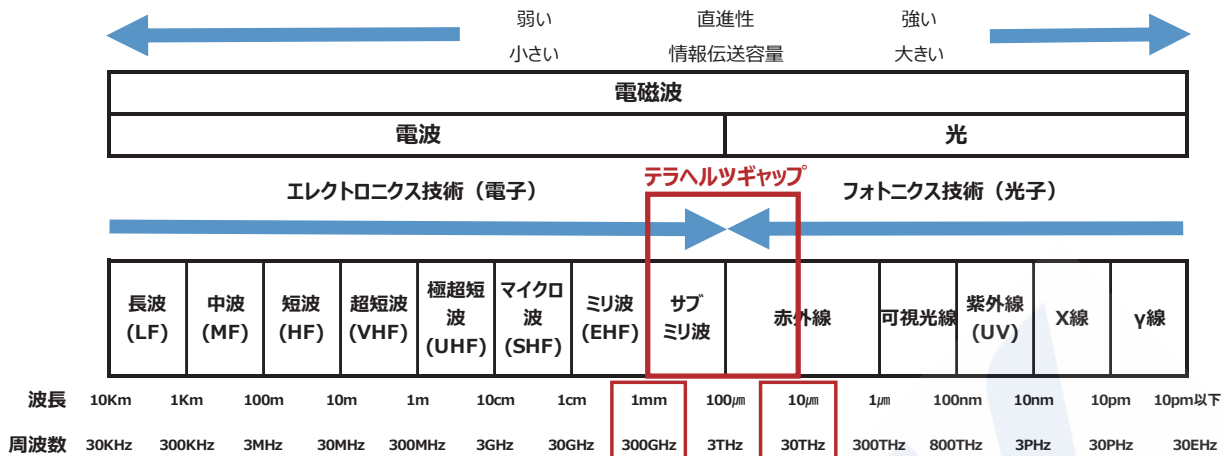


図2 電磁波の周波数

位時間あたりの伝達量も多くなり、通信速度が速いとなる。このように波長と周波数は不可分の関係にある。

光無線通信は光波をキャリア波として使用することで、高周波数のビームが大気中を直接伝搬しポイント・ツー・ポイントの通信リンクを形成してデータを送受信するアクセス技術である。

高い周波数をもつ光は電子に比べて伝搬中に損失するエネルギーは少なく、干渉やノイズにも強い。この特性により、光を使った通信では理論的に長距離での高速データ伝送や高い信号品質を実現することが可能である。ただし直進性が強い伝搬特性を持つため障害物や大気散乱、吸収、気象条件などの様々な外的要因によって光の伝播に障害が発生しやすい。また何よりこの光の直進性の高さゆえ、送信側からの細かいビームを受信するため正確な位置合わせをしないと上手く通信できない技術的事情もある。

ただし一方でこの直進性の高さが、光による無線通信は傍受され難いという恩恵をもたらしてもいる。

電波やこの光のビームは、光が集束して直進する形状のことを指す。光は波動性と粒子性の両方の性質を持ち、波の性質によって広がりを持つ一方、ビームのように集束する性質も持つ。特定の波長で同じ位相と方向を持つ光の波は非常に高い相関を持つように生成され、これにより光が直進集中し光のビームとなる。この光の特性をサイバーセキュリティ対策に生かすことで、これまでになくセキュアな通信が可能となる。

今後これらの光無線通信技術がさらに進み一般化されていくことで、サイバーセキュリティ対策も次世代のフェーズへと移り変わり、より安全な無線通信の実現が期待できる。

一方でこの光無線通信は、電化製品のリモコンや携帯電話の赤外線通信機能として既に利用されてい

る。最近になりその活用方法も徐々に広がりを見せられている。

例えば、電波を利用したWi-Fiに対して、光を利用した無線通信としてLi-Fi (Light Fidelity) という技術が既に開発利用されてきている。Wi-Fiと同様にLi-FiはIEEE 802.11規格を使用した無線であるが、赤外線・可視光線・紫外線など光の周波数帯を利用した無線通信であることから、電波と異なり干渉性が少なく電波障害を引き起こすこともない。また、電子機器の使用に注意が必要な病院や旅客機の機内、原子力発電所などで利用され始めている。このような光の特性を活かした光無線通信は未来へ向けた非常に有望な新しい通信手段となり得る。

なお、無線通信をつかさどる周波数の利用可能な範囲や具体的定義は国際的な規格だけでなく、特定の国や法律、産業規格、地域ごとの規制に基づいて設定されている。各国や地域によって異なる周波数が割り当てられているため使用可能な周波数帯域は地域の通信規制を確認する必要がある。また、船舶には適切な無線通信装置の搭載要件があり、装置ごとに使用できる周波数帯域の制限を受ける場合がある。日本の電波法第2条では周波数が300万MHz、すなわち3THz以下の電磁波を電波と定義づけており、これまで無線通信といえば3THz以下の電波を用いた通信を意味していた。

4.2 テラヘルツギャップ

テラヘルツ帯とは1THz前後の周波数帯を中心としたおおむね300GHzから30THz、波長にして1mmから10 μ mの電磁波領域を示し、光に近い性質を持った電波と光の境界に位置する(図2参照)。このテラヘルツ帯は電波側からみると波長が短いため高い分解能を有し、さらに高周波であるため帯域が広い。一方で、光波側からみると散乱されにくく透過性が高いうえ、分子固有の吸収スペクトルが表れ

てくるなどの特徴を有するため周囲の電波による干渉を受け難いという利点がある。このような理由により近年最も可能性を秘めた電磁波として世界中から注目を集めている。

ただし、このような高い周波数領域になると、電波の回り込みが減少し大気の水蒸気などによる衰減が発生する。そして、電波の発生発振効率が低下することで伝送損失の増大をまねき電波を遠くまで飛ばすことが技術的に難しかった。このため通信用としてはほとんど利用されてこなかった帯域である。これらエレクトロニクス技術とフォトニクス技術のいずれにとっても技術的課題が多く残る領域でもあることから「テラヘルツギャップ」とよばれてきた。

このテラヘルツ帯域を通信に利用するには、目的とする場所だけに送受信できる指向性の高いアンテナ技術をはじめ、電波の反射や透過の性質を利用するための高効率なテラヘルツ波発振検出素子、伝送損失を低下させるための新たな基板材料、そして、高周波の伝播特性や通信リンクの評価制御装置など、ハードウェアに重点をおいた技術革新が必要となる。

また、無線通信の発信源となる光源には高出力特性、受信機には高感度・低雑音特性が要求される。ここで要求される高感度・低雑音特性はひとまとめに雑音等価電力NEP (Noise Equivalent Power) として評価することができる。NEPは雑音電力とひとしくなる信号電力であり、受信機が持つ雑音電圧を電圧感度で割ると求まる。また、雑音電流の場合は電流感度で割ることも求めることができる。つまり、雑音と感度の大きさの比が重要となる。雑音電力は帯域に比例するため、帯域を狭くすると信号対雑音比は向上するが応答速度は低下する。このため構築するシステムによって必要な帯域を決定する必要がある。

$$NEP = \frac{PA}{\frac{S}{N} \cdot \Delta f^2}$$

P : 入射エネルギー (W/cm^2)

A : 検出素子の受光面積 (cm^2)

S : 信号出力 (V)

N : ノイズ出力 (V)

Δf : 雑音帯域 (Hz)

上記式からも分かるように、NEPは信号対雑音(S/N)が1となる時の入射光量で示される。

現在、B5Gを中心に世界中で進められている無線通信分野の研究開発では、テラヘルツ帯を利用す

るためのデバイス開発や新たな無線通信方式の開発、そしてさらに、より高い周波数帯の活用を見据えた国際標準化を活動の範囲としている。

5. 光無線通信によるNTNの展望

次世代の通信ネットワーク環境であるとされるNTN (Non Terrestrial Network) とは、宇宙空間を通信環境として活用することで、これまでにインフラの整備が難しかった場所や通信アクセスが制限されていたエリアなどに対しても、高品質で安定した通信サービスの提供を目指した構想である。地上にある通信基地局との連携も含め、静止軌道衛星や中低軌道衛星、成層圏を飛行する高高度疑似衛星などを立体的に繋ぎ合わせることで全地球上をカバレッジするグローバル・ネットワーク環境が構築されようとしている。現在ITU-R WP5B (ITU Radiocommunication Sector Working Party 5B) および3GPP RAN (Third Generation Partnership Project Radio Access Network) により国際規格化が進められている。

これら人工衛星の間を相互に連携、接続する通信手段として、先に述べた光無線通信が有効な役割を果たすと考えられている。地上では、様々な外的要因を受ける光無線通信ではあるが、宇宙空間では自由空間に近い理論的な振舞が可能となる。これによりそれぞれの人工衛星間を光無線通信により相互接続することで、電波のような距離による衰減も少なく、省電力で高速、大容量な通信の実現性が高まる。ただし成層圏を飛行する高高度疑似衛星のHAPS (High Altitude Platform Station) では大気の影響を受ける可能性が高くなるため、現時点では未だ状況に応じた通信方法を選択考慮する必要がある。

一方で、利用する側の視点に立った技術革新も求められている。利用者の目的は、通信ルートなど意識することなく最適な通信経路を自動で選択してくれる、大容量の情報を高速で送受信できること、さらにその通信エリアにも制限や隔たりのない通信インフラを望んでおり、NTN構想の最終ゴールも幸いにして同じである。ただし、これらの通信環境を切望する利用者は、完成形にこだわらず、その時々で新たな通信技術を上手く取り入れていくことも検討に値する可能性がある。今後も継続的な技術革新に期待したい。

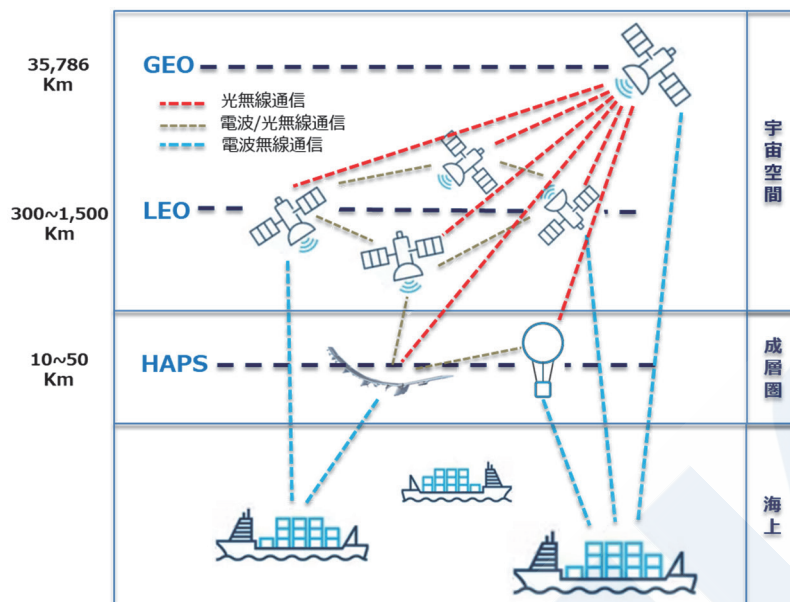


図3 NTN環境のイメージ図

6. おわりに

本稿では、通信インフラについての基本事項から最新の動向まで順を追って解説した。船舶業界における通信インフラのありかたについて考えてみると、頻りに耳にする船員の高齢化と労働力不足の問題があり、その対応改善策のひとつとして、船上でも様々なモノとのつながりを叶えるインターネット環境が特に若い世代で求められている。また、陸上における通信環境が発展、整備されて来ていることを背景に、海運会社へも運航に関わる情報をリアルタイムで陸上と共有することにより安全な運航を強化する取り組みが市場から求められるようになってきた。さらに、世界的なデジタル化の流れと共に、船舶業界を取り巻く環境に対しても改革の波が押し寄せ、IoT化や遠隔からの操船、運航の自動化などにより、航行ルートの最適化や安全性の向上などの改革が迫られている。

ただし、これらの改革はどれも皆、海上でも安定した通信インフラが整わないと成り立たないものであることに気付く。グローバルな世界に目を向けてみても、公共料金の支払いやショッピングなどはオンライン決済が一般的となり、世界中の銀行も全てオンラインで繋がれ、通信がダウンすると世界経済がストップする。

今後も船舶業界が発展を続けていくための一助となるよう通信インフラに関わる最新動向を伝えていきたい。

参考文献

- 1) 3GPP TR 38.821, Solutions for NR to support non-terrestrial networks (Release 16), 2021.
- 2) R1-2110604, LS on combination of open and closed loop TA control in NTN, in 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #106-bis-e, 2021.
- 3) 総務省：電波利用ホームページ,
<https://www.tele.soumu.go.jp/>
- 4) 総務省：令和4年版 情報通信白書,
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/pdf/>
- 5) 安立恭晴：通信ネットワーク技術の最新動向「次世代の海上通信ネットワークシステム」に関する調査報告,
<https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/report/2020/001.html>
- 6) PK Sharma et al., SDN-based Platform Enabling Intelligent Routing within Transit Autonomous System Networks, In Proceedings of the IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference, 2022.
- 7) 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)：Beyond 5G 研究開発促進事業,
<https://b5g-rd.nict.go.jp/program/>
- 8) O Kodheli et al., Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 23(2021), No. 1, pp. 70-109.

- 9) S Schaer and D Hood, Software defined networking architecture standardization, Computer Standards & Interfaces, Vol.54(2017), Part 4, pp. 197-202.

CLASSNK