

船陸間通信の大容量・低遅延化技術に関する調査研究

一般財団法人 日本海事協会 技術研究所

シニア リサーチ サイエンティスト

塚越 郁夫

目次

はじめに	2
1. 5G の NTN 拡張によるスーパーカバレッジ	3
1-1 宇宙コミュニケーションの進化 GEO ⇒ LEO ⇒ HAPS	3
1-2 NTN の海事利用としての期待	4
2. 5G モバイル通信技術の基礎	7
2-1 5G 技術の二大メリット	7
(1) パフォーマンスの顕著な改善	7
(2) ベストエフォートからの脱却	8
2-2 二大メリットを 5G でどのように達成できるのか	8
(1) 高速・大容量通信	9
(2) 超低遅延	10
(3) ネットワークのカスタマイズ ～ネットワーク・スライシング～	11
(4) SLA ベースの品質保証	13
3. 5G の NTN 連携構成例と課題	14
4. 自動運航船の遠隔制御へ向けた課題	16
5. ローカル 5G によるパフォーマンス最適化	17
6. ローカル 5G 実証実験の例	20
7. 海事業界における先進通信技術活用促進へ向けた提案	21
7-1 ネットワークの選択	21
7-2 コネクティビティの優先要素	22
7-3 遠隔操船へ向け考慮すべき要素	24
あとがき	25
参考文献	26

はじめに

インフォメーション・コンピューティング・テクノロジーは、コンピューティング、ネットワーキング、半導体、そして端末技術の進歩とともに目覚ましい発展を遂げてきた。特にスマートフォンは、人々の日常生活に大きな影響を与え日々進化し続けているが、それを結びつけるモバイル通信が地上のインフラとして存在する。

2020 年からは第 5 世代移動通信システム（通称「5G」）が導入されている。その標準化団体である 3rd Generation Partnership Project（3GPP）では「5G Evolution」として、5G の適用範囲を地上以外のエリアにも拡大し、宇宙や成層圏に飛行する通信衛星等を用いる Non-Terrestrial Network(NTN)を標準化議論中で、初期フェーズの仕様完成後、現在も議論中である。NTN を利用することで、自律型船舶の遠隔監視・遠隔制御が現実的なものになると考えられる。

本報告では、主に 5G 関連の技術に焦点をあてたうえで NTN への連携を前提とし、遠隔操船の際に MASS（船）と ROC（陸）との間で想定されるコネクティビティ要求の一つとして、ビデオ・音響データの伝送で優先される品質性能を航行フェーズによって適宜切り替える提案を行う。なお、遠隔操船を行う対象となる船において運航に関与する人数に関し、本報告では特段の考えを有するものではない。

本報告の目的とするところは、遠隔操船時の状況認識の検討が機能・性能の両面で具体的な方向性をもって業界で議論されることにあり、そのうえで MASS の遠隔操船の実現性が高まることを期待するものである。

1. 5G の NTN 拡張によるスーパーカバレッジ

1-1 宇宙コミュニケーションの進化 GEO ⇒ LEO ⇒ HAPS

NTN による商用化へ向けた議論が具体化している NTN プラットフォームは大きく分けて 3 種になる。特に、低軌道周回衛星や高高度基盤ステーションの対象空間で新たな利用が見込まれる。(図 1)

- 静止衛星：高度 36,000km の静止軌道 (Geostationary Earth Orbit; GEO) で地球の自転と同じ速度で周回する。衛星から地上局アンテナ間の片道伝搬時間が約 120ms と比較的長い、地球面に半径 1000km クラスのカバレッジエリアを形成する。また、3～4 基で地球全体をカバーし、常時通信が可能である。放送衛星、長距離通信衛星などが該当する。今後の発展として、衛星の電力・周波数をマルチビーム間で最適化することで、通信帯域を大容量化させる VHTS (Very High Throughput Satellite) が検討されている。
- 低軌道周回衛星：高度 500km～2000km の低軌道 (Low Earth Orbit; LEO) で地球の自転より速い速度で周回する。非静止軌道衛星ともいわれる。片道伝搬時間は約 3ms 程度である。地球面に半径数百 km クラスのカバレッジエリアを形成する。地上から見て高速で地球を周回するため、地上と継続的な通信を確保するには、複数の衛星を組合わせたコンステレーションが必要となる。地球観測衛星、スターリンクサービスの衛星等が該当する。
- 高高度基盤ステーション (High Altitude Platform Station; HAPS)：高度 20km の成層圏で一定の場所に滞空する。成層圏を飛行滞在する理由は、空気密度が地上と比べて約 1/20 と非常に希薄なため飛行時の空気抵抗が少なく、エネルギー消費を抑えられる。また、対流圏に比べ気候が安定していること等があげられる。利用上のメリットとして、片道伝搬時間が約 0.1ms 程度と超低遅延を実現できる。地球面にセル半径 50km 以上のカバレッジエリアを形成可能である。HAPS には専用の無人航空機を用いることが公表されている。

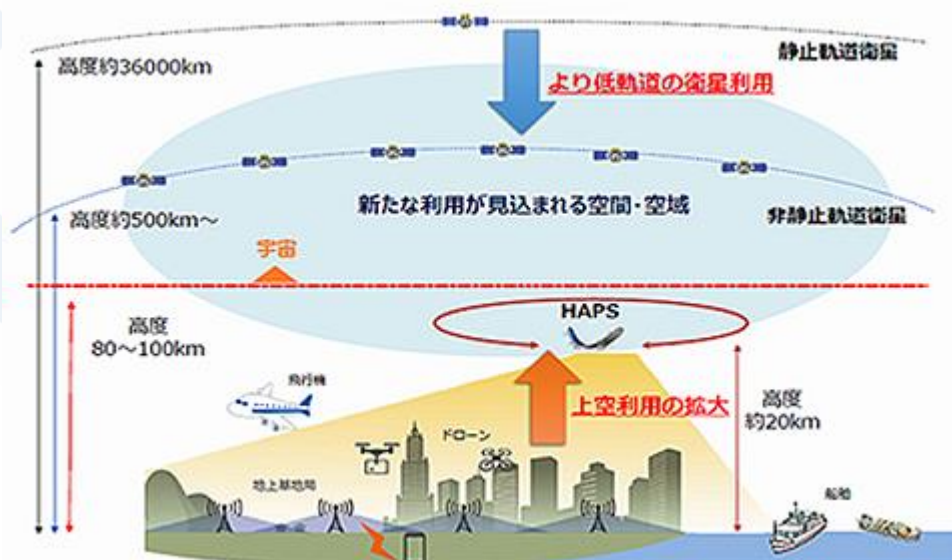


図 1 上空・宇宙における多層的な空間利用の拡大 ^[1]

上述のように、各々の NTN プラットフォームの通信カバレッジは、地上波基地局の対象半径が数 km～十数 km であるのに比べ、いずれも非常に広範囲である。(図 2) [2] [3] NTN への対応は国内・海外の通信事業者等が技術開発を含めて対応を検討しており、従来、地上波ではカバーできていなかったエリアに対しても電波のカバー範囲を広げる、所謂、スーパーカバレッジ通信の実現を目指している。

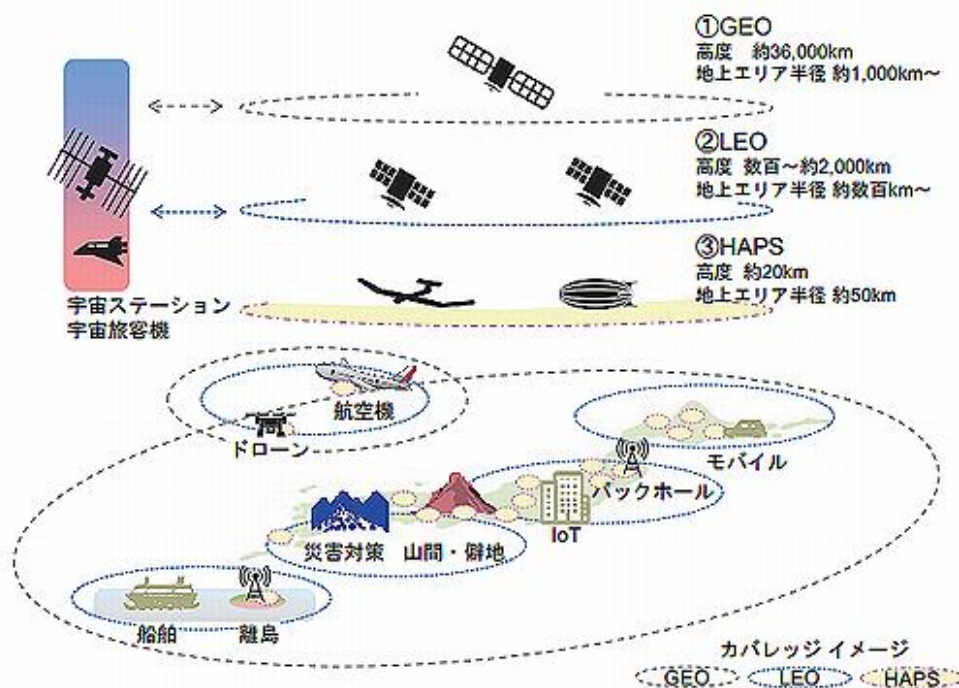


図 2 衛星や HAPS を用いる空・海・宇宙へのカバレッジ拡張^[3]

1-2 NTN の海事利用としての期待

海事業界では、自動運航船(Maritime Autonomous Surface Ship; MASS) の開発が進められており、遠隔操船は ConOps (Concept of Operation) の 1 つとして検討されている。^[4] 非常時対応も含め、遠隔操船を行う際には MASS の遠隔監視、そして遠隔制御を行う拠点で、陸などに設けられる遠隔オペレーションセンター (Remote Operation Center; ROC) と接続されることが前提となる。MASS と ROC の間では双方向通信が基本となるが、典型的なデータ通信の 1 つとして、船上カメラ等からのビデオ・音響データや、他のセンサ群からの情報を受信し、ROC のオペレータがそれを見聞きして判断し、フィードバック操作を行うための制御コマンドを ROC から船へ送信する。この双方向通信において、ラウンドトリップタイム(Round Trip Time; RTT)が小さいことが、有意性をもって MASS 制御に反映させるために重要となる。MASS の航行地点と ROC との間の物理的な距離による伝搬遅延は不可避だが、通信経路、データ処理による遅延を可能な限り小さくする伝送アーキテクチャの構築と、船橋と同様の状況認識や判断を ROC でも行えるよう、船上カメラ映像や様々なセンサ情報と同期したシステムにより構築されたモニタリング環境が ROC 側で必要となる。(図 3)



図3 自動運航船遠隔操作のための ROC 設備の例 [5]

ROC 側のコントロール・ユニットと船側の コネクティビティ・マネージャとの間でコネクティビティが確立され、両者の間でセンサ情報や制御情報が共有される（図 4）。特に、MASS の状況を ROC でオペレータが視覚的・聴覚的に状態認識するために、ビデオや音響のデータ等が必要になると考えられる。また、ROC からのフィードバック制御を効果的に MASS に反映させるためには即時性が求められる。このように、MASS から ROC へは大容量かつ低遅延のビデオ・音響データの伝送、ROC から MASS へは低遅延のコマンド伝送、という双方向通信が必要となる。

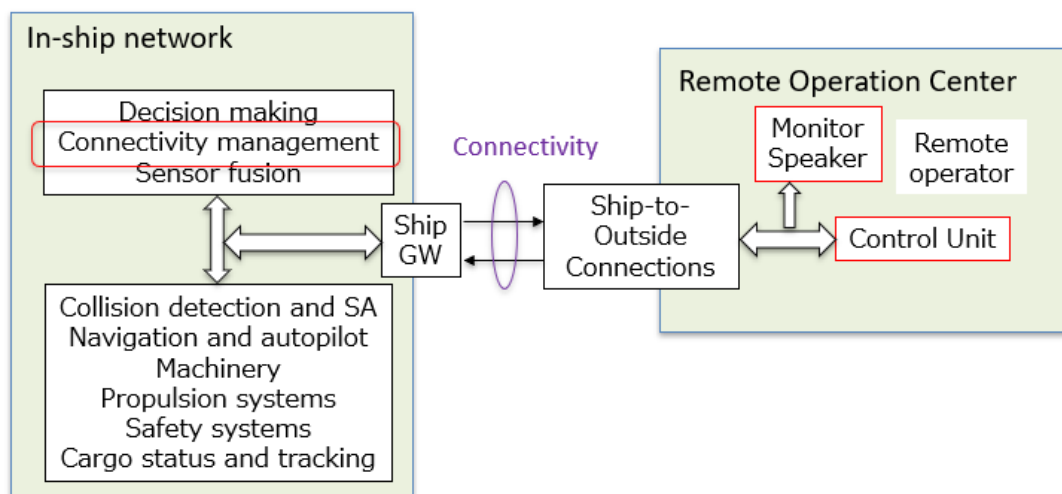


図4 自動運航船の機能概念図 [6]

船と陸との通信は船舶運航のためだけでなく、既存船を含めた船舶が外洋航行中、長時間船上に滞在する船員の福利厚生のためにも重要であると考えられる。船上にいる船員が陸上の人とのビデオチャットやゲーム等を行えることは余暇時間の大切な過ごし方となろう。

ゲーム用途では、スマートフォンを使うネットワークゲームアプリで、双方向のインタラクションが通常の使い方であり、スマートフォンからゲームサーバへ、そしてゲームサーバからスマートフォンへ、各々異なるタイプの通信性能が要求される。ゲームサーバからスマートフォンへのビデオ伝送（図中、紫色）には大容量かつ低遅延の伝送が必要であり、一方で、スマートフォンからゲームサーバへのコマンド伝送（図中、青色）には超低遅延の伝送が要求される。スマホを介して、ビデオを受信した後、フィードバックのコマンド送信がミリ秒単位でゲームサーバ側に反映されることが基本となる。（図 5）

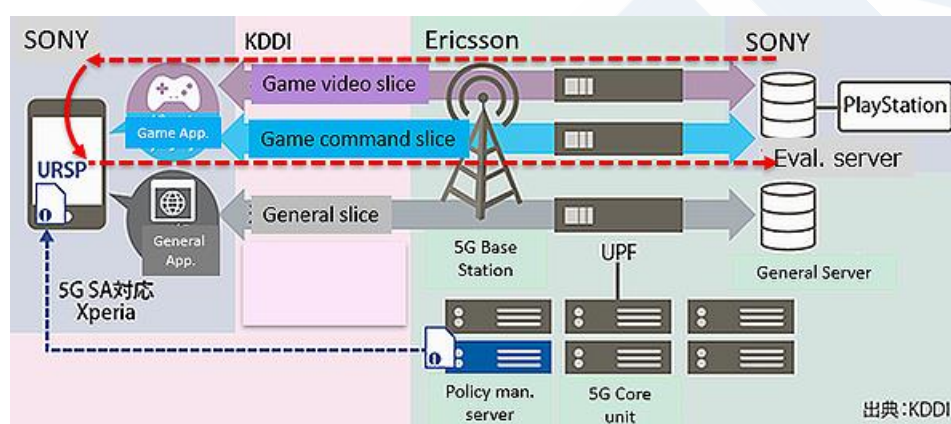


図 5 ネットワークゲームの実験例^[7]

上記のように、海事産業の期待として 2 例を挙げたが、いずれの場合も船舶の航行位置によらずに実現するためには NTN 対応が不可欠となる。

次章では、NTN の基本形となるネットワーク構成である 5G モバイル通信技術に関して掘り下げる。

2. 5G モバイル通信技術の基礎

2-1 5G 技術の二大メリット

5G モバイル通信には、大きく分けて通信キャリア系のいわゆる“パブリック 5G”と、独立運用系の“ローカル 5G”（後述）が存在する。そのいずれにも該当し、筆者が考える二大メリットを以下に記す。

(1) パフォーマンスの顕著な改善

5G では新たな無線技術の導入と最新のネットワークテクノロジーにより、以下の 3 つの特徴をもった利用シナリオが想定される。（図 6）

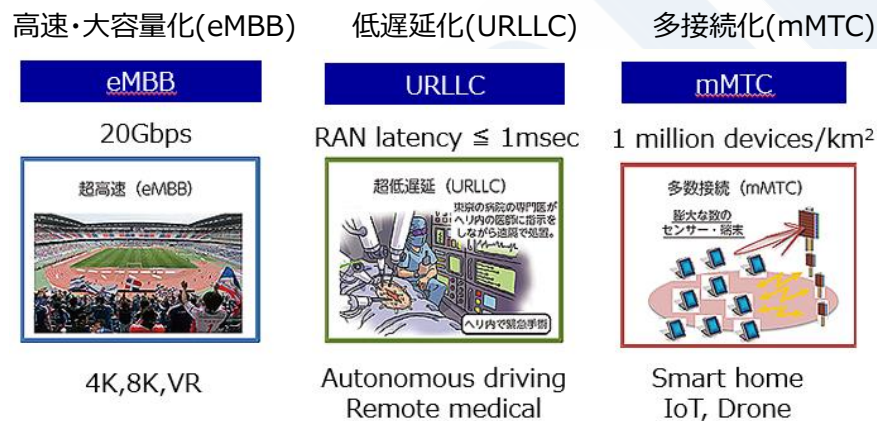


図 6 5G の 3 つの特徴 [8]

- 高速・大容量化 (enhanced Mobile BroadBand; eMBB) :
MIMO 技術（多素子アンテナによる高速化技術）と電波を細かく絞って特定の方向へ集中的に発射する「ビームフォーミング」を組み合わせることで、安定して高速大容量通信を実現できる。ピーク伝送速度の目標値は 20Gbps（下り）, 10Gbps（上り）となっている。4G では 1Gbps(下り), 数百 Mbps(上り)なので、従来比 10 倍以上に相当する。超画質(4K,8K)や VR 等の映像伝送が主な対象になる。
- 超信頼・低遅延化 (Ultra-Reliable and Low Latency Communications; URLLC) :
無線区間の許容遅延を 1 ミリ秒以下の超低遅延を目標とする。4G は 10 ミリ秒なので、従来の 10 分の 1 程度に短縮されることが見込まれる。自動運転, 遠隔ロボット操作, 遠隔医療等, ミッションクリティカルな産業分野への応用が期待される。また, 信頼性に関しては, 32 バイト以上のパケットデータ量の 99.999%以上の送信成功率が目標とされている。
- 多接続化 (massive Machine Type Communication; mMTC) :
1 km² あたり 100 万デバイス同時接続可能であることが目標。4G では 1 km² あたり 10 万デバイスの同時接続が可能とされていたので, 従来比 10 倍になる。スマートファクトリー等, IoT 時代に膨大なセンサや端末がネットワークに接続される ICT 基盤として期待されている。

(2) ベストエフォートからの脱却

従来、ネットワークのサービス性能は「目標は示すが保証はしない」というレベルにとどまっていた。VoD(Video on Demand)のような用途においては問題ないとみなされる場合もあるが、特定のタイムセンシティブなアプリケーション、例えば、自動運転や遠隔医療などではリモート側とローカル側がミリ秒オーダーの遅延精度でやり取りを行うことが要求される。従来のような性能保証のないベストエフォート型サービスでは立ち行かないことになり、そのジレンマからの脱却が求められるが、カスタマイズされたネットワークにおいて優先制御を行うことで、目標設定されたサービス品質を保証することが可能となる。サービス品質の保証により信頼できる高精度コミュニケーションが可能となり、信頼できるネットワーク^(#1)が手に入れば、従来のような現場で操作しなければならなかった作業をリモートで実行することが可能となる。

2-2 二大メリットを 5G でどのように達成できるのか

はじめに、5G モバイルネットワークの構成を図 7 に示す。

- 無線アクセス・ネットワーク (Radio Access Network; RAN) は、スマートフォン等のユーザ端末 (UE) との間で電波の送受信を行う基地局で構成され、その中身はアンテナ、無線機、伝送装置である。電波の送受信のほか、基地局間ではハンドオーバー制御を行う。
- コア・ネットワーク (Core Network; CN) は、モバイル通信の中核機能が集まるもので、端末の認証、位置管理、通信経路の確立、ポリシー制御、通信経路の確立、ポリシー制御などの制御機能とデータ転送機能をもつ。
- トランスポート・ネットワーク (Transport Network; TN) は、RAN と CN の間でデータを受け渡すブリッジの役目を果たす。
- CNは LAN やインターネットなどのデータ・ネットワーク (DN) に接続するインターフェースを定義する。

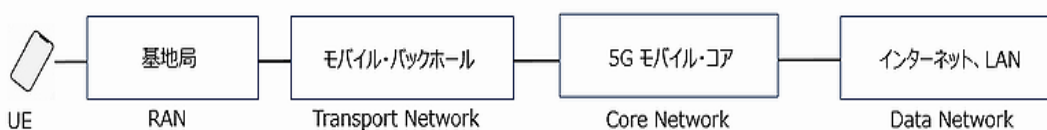


図 7 モバイルネットワークの構成 ^[9]

5G のネイティブ性能を実現する 5G SA(Stand Alone) ^(#2) は、基地局そしてコア・ネットワークが共に 5G 仕様に対応したもので構成される。

(#1) 本稿で対象とする“信頼できるネットワーク”とは、ネットワークの性能面でのことを指すもので、セキュリティは別途の議論とする。

(#2) 5G の無線技術に対応した基地局と 5G 用のコア・ネットワークの組み合わせにより、制御信号 およびユーザデータの送受信を行う方式。それに対し、Non-Stand Alone(NSA)は 4G/5G の基地局と 4G のコア・ネットワークが混在して構成される。

(1) 高速・大容量通信

RAN において、5G で新たに利用される New Radio(NR)の周波数帯は、“ミリ波”といわれる 27GHz~29.4GHz と、“Sub6”といわれる 3.6GHz~4.6GHz であるが、いずれにおいても高い周波数帯を利用すること、そしてサブキャリア^(#3) 間隔の拡大により広帯域化が可能となることで、高速で大容量の伝送を提供できる。(図 8)

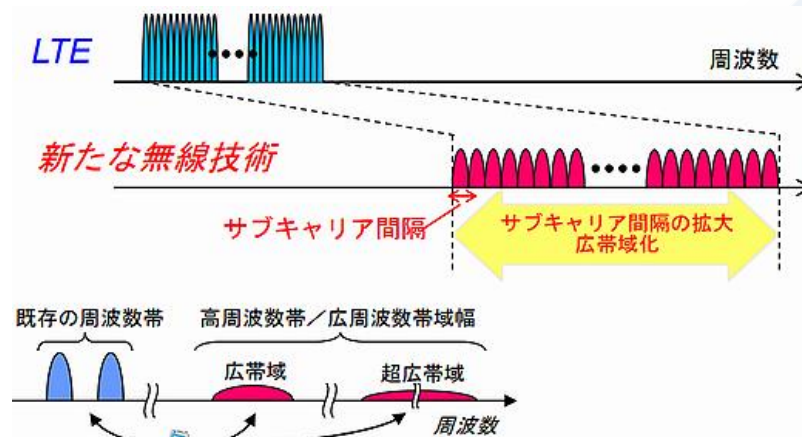


図 8 5G の新たな無線技術 5G NR^[10]

ただし、5G 無線は利用周波数が高く直進性が強いので、障害物を回避することが難しい。また、空間伝搬での減衰が大きいので伝送距離を長くとれないという欠点がある。この問題を解決するために、超多素子アンテナである Massive MIMO、そして、アンテナ位相制御により指向性パターンを形成し、特定方向にアンテナ利得を増加・減少させ照射するビームフォーミング(Beam Forming)の技術が導入された。図 9 のように、4 GHz 以下の周波数を用いる 4G は広範囲にビーム形成するので、カバーエリアは広い。それに対して、5G ではミリ波を用いる場合の距離減衰が大きいので、電波を広範囲に拡散させると十分な電波強度を供給できない。Massive MIMO アンテナを用いてビームを鋭くし、特定方向に集中させたビーム形成を行うことでアンテナ利得を制御し、伝搬損を補償する。

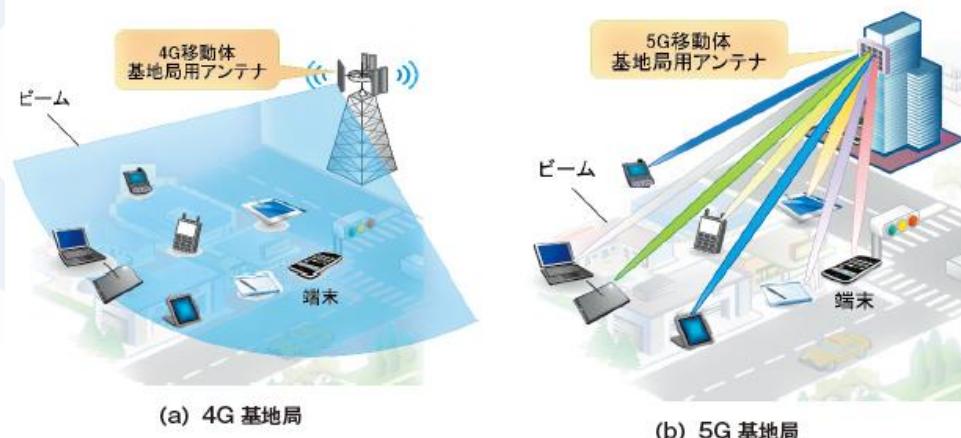


図 9 4G と 5G の基地局アンテナによるビーム照射イメージ^[11]

(#3) サブキャリア：変調する際に構成単位となる個々の搬送波をいう。

(2) 超低遅延

ネットワークの無線区間と有線区間を含めたネットワーク全体の低遅延化が必要になる。このうち、無線区間に関しては、NR ではサブキャリア間隔を広くすることにより、送信するデータ量に対する時間間隔を短縮することができるショート TTI (Short Transmission Time Interval; Short TTI)を採用した。(図 10) また、Fast HARQ-ACK というデータが正常に受信できたかどうかを端末から基地局に高速でフィードバックする技術により超低遅延が実現される。

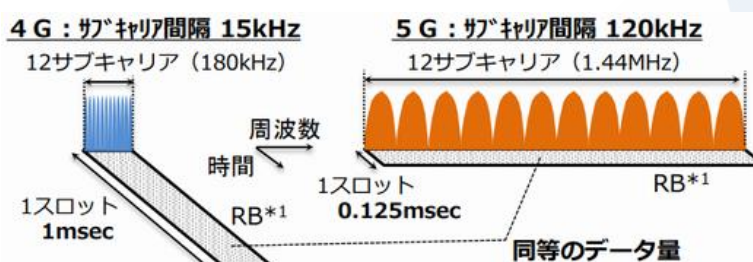


図 10 ショート TTI [10]

有線区間に関しては、図 11(A)に示すように、従来のモバイル通信システムではユーザ端末から送信されたデータの処理はクラウドサーバで行われており、インターネット経由となることが多く、応答を得るまでの遅延は大きい。これに対し、図 11(B)(C)のように、ユーザ端末の近くにサーバを設置するエッジコンピューティングでは通信遅延を低減でき、サービスの応答速度向上が可能となる。5G で導入されるマルチアクセス・エッジコンピューティング (Multi access Edge Computing; MEC) はエッジコンピューティングの 1 つであり、以下の 2 つのメリットがある。[12]

1. MEC サーバをユーザ端末に配置することで、待ち時間を短縮できる。
2. ユーザの近くにある MEC が処理を行うため、遠くのデータセンタへのアクセスが減少する。

その結果、ネットワーク内のトラフィックが減少し、データの通り具合がよくなる。

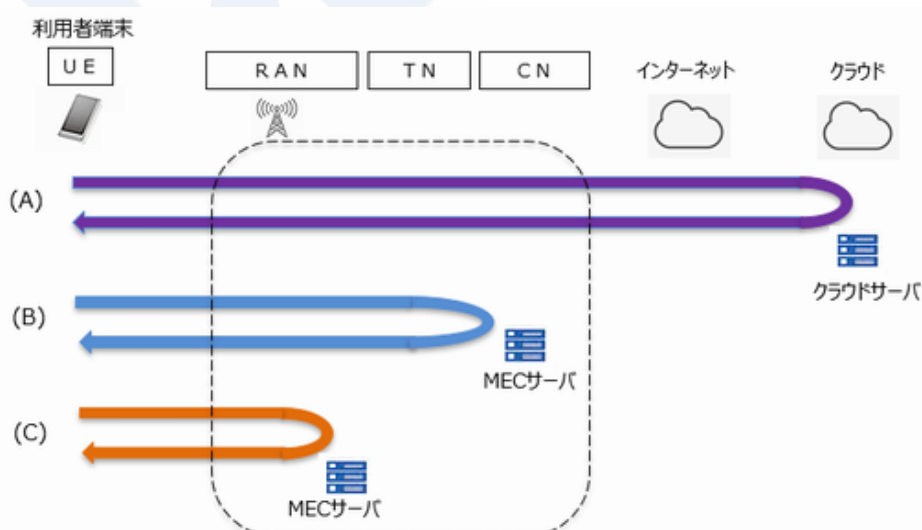


図 11 MEC による応答時間の短縮

(3) ネットワークのカスタマイズ ～ネットワーク・スライシング～

5G SA では、ネットワーク・スライシング(Network Slicing)という概念が導入され、論理的に分割された個々のネットワークに対してネットワーク性能をカスタマイズすることができる。データをフロー単位で優先制御することが可能になる。これは 5G の最も興味深い部分であり、以下に簡単に整理しておく。^[13]

- 物理ネットワークは、仮想化により論理的に複数の独立したネットワークに分離される。(図 12) ^[14]
- 各ネットワークは「スライス」と呼ばれ、各スライスはアプリケーションのフローに合わせてカスタマイズされ、スライスごとに最適なルーティングとネットワークリソースが構成される。
- 5G ネットワークの各ドメインでスライスの優先制御を行い、目標とするサービス品質を満たす。

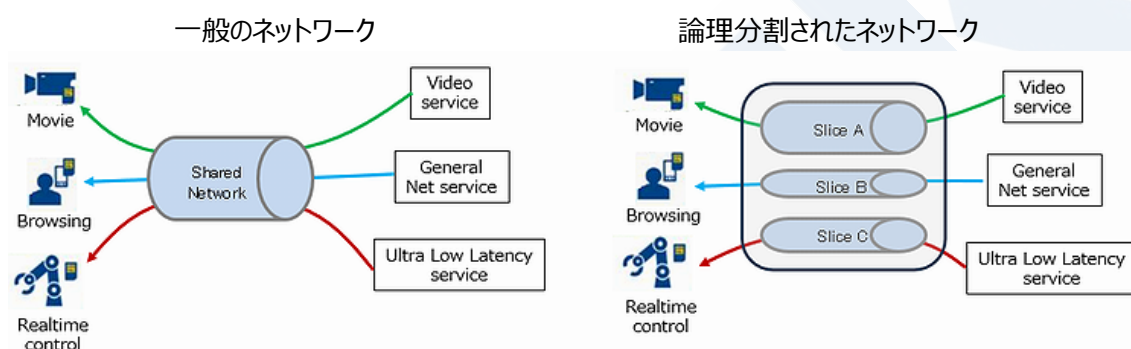


図 12 ネットワーク論理分割の概念

5G ネットワークでは、図 7 で示したように 4 つのドメインを定義している。その中で、コア・ネットワークが関係する部分は CUPS（Control User Plane Separation）アーキテクチャが採用され、C-Plane と U-Plane に分離される。C-Plane は CN 内のクラウド側近くに集約され、スライスごとに最適なルーティングとネットワークリソースを割り当て、データの優先制御を行う。U-Plane はサービスが展開される地点の近くに配置されることで、エッジコンピューティングが実現可能となる。

ここで、C-Plane と U-Plane のスライスごとの流れの概略を説明する。(図 13)

C-Plane では、UE が RAN(gNB)にセッション確立と sliceID^(#4)のリクエストを発信する。gNB は AMF^(*)を選択し、AMF は UDM^(*)から位置情報や端末認証など契約情報を取得し登録する。NSSF^(*)は UE が使用する sliceID を割当てる。AMF は UE へ通知し並行して課金制御、モビリティ制御を行うほか、sliceID により PCF^(*)を選択する。PCF では QoS 制御、転送パスの速度や遅延時間に関するポリシー制御を行う。AMF はスライスごとに SMF^(*)を選択し、SMF は UPF^(*)を選択しデータ転送パスのセッションを確立する。^{[15] [16] [18]}

(#4) sliceID の正式名称は、"Sub Network Slice Selection Assist Information ; S-NSSAI"。

*AMF (Access and Mobility Management Function) : 認証・セキュリティ・端末の位置管理

*UDM (Unified Data Management) : 加入者データ、端末移動情報の保持

*NSSF (Network Slice Selection Function) : ネットワークスライスを選択、スライスごとの SMF 選択

*PCF (Policy Control Function) : ポリシー制御、QoS 制御、課金制御

*SMF (Session Management Function) : セッション管理、QoS ポリシー関連で UPF を制御

*UPF (User Plane Function) ; CN から外部ネットワークへのデータ転送を担うゲートウェイ

このように、スライス識別情報の sliceID は、NSSF, gNB, PCF, AMF, SMF, UPF 等で参照される。これらネットワーク・ファンクションのプロトコルは HTTPv2 が適用される。

次に RAN においては、RU・DU・CU の 3 つのコンポーネントに分離可能な構成をとっている。^(#5) この分離方法は“O-RAN split”として標準化されており^(#6)、それに準拠する形で RU のみをもつ子局、RU+DU+CU をもつ親局が存在する。RU と DU 間はフロントホールと呼ばれるネットワークで接続され、3 章で説明する NTN プラットフォームの構成においても採用されている。^[16]

トランスポート・ネットワークは、RAN と CN を接続してパケットデータを転送する。ここでは、sliceID にリンクされる“5QI(5G QoS Identifier)”の値^(#7) をパケットヘッダ内の DSCP(Differentiated Services Code Point)に格納し、U-Plane の UPF はユーザパケットのルーティングや転送、QoS の優先処理を DSCP を参照して行う。データは UPF を経由して MEC サーバに接続される。超低遅延を実現させる場合には、MEC サーバを CN 内の UPF ではなく、例えば RAN 内に Local UPF を設け、そこから RAN の別端末や LAN 等へ転送するという構成も可能である。トランスポート・ネットワークのプロトコルは TLS(Transport Layer Security)を利用する。^[17]

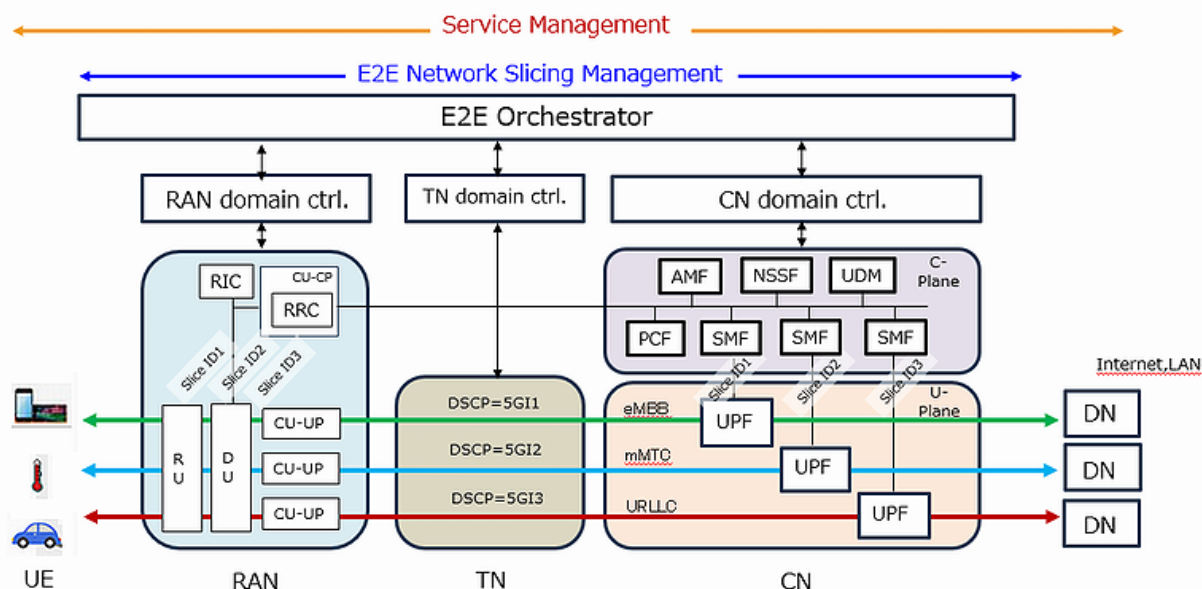


図 13 ネットワーク・スライシング アーキテクチャ

(#5) RU (Radio Unit) : AD/DA 変換, ビームフォーミング等, 無線物理層の下位を担う。

DU (Distributed Unit) : MIMO 信号分離合成, 変復調, FEC(Forward Error Correction)等, 無線物理層の上位および MAC レイヤ, 無線リンクレイヤを担う。

CU (Centralized Unit) : RRC(Radio Resource Control;無線リソース制御)を C-Plane で行う CU-CP と, U-Plane でスライスごとにパケットデータ処理等を担う CU-UP に分けて担う。

(#6) O-RAN split: オープンでインテリジェントな RAN の構築を目的に設立された O-RAN Alliance で標準化された RAN 内機能分割方法。

(#7) 5QI: リソース確保, 優先度, 遅延時間, エラー率, 用途等の組合わせで優先度を定義する値。

(4) SLA ベースの品質保証

図 13 において、各ドメインコントローラは、担当ドメインごとにスライスに関するネットワーク関連リソースのライフサイクル管理、予約、割り当て、拡張、制御機能を提供する責任を負う。また、隣接するドメインとのインターフェース管理を行う。

E2E オーケストレータは、ネットワーク・スライスのキャパシティ、適格性、契約合意内容、ネットワークの健全性等を監督する。言わば、各ドメインコントローラを統合管理するシステム調停役であり、全ドメインの状態の変化を監視し、制御をクロスドメインで最適化し連携を図ることで、E2E で各スライスに関する品質・性能を保証する機能を担う。^{[13][19][20]}

Service Management レイヤでは、ユーザとネットワーク事業者との間で一定のネットワークサービス品質に関して、あらかじめ契約合意を交わす。ネットワーク事業者側は提供可能なネットワーク品質に関し、サービスクラス、トラフィック制御ルール等、項目ごとに数値目標をユーザに提示する。ユーザ側はそれが費用対効果の点で満足できるものであれば契約成立になる。これをサービス・レベル・アグリーメント (Service Level Agreement; SLA) という。この SLA を適用することでスライスごとに「必要とされるサービスレベル」「期待されるサービスレベル」を数値化し、ネットワーク事業者側にはスライスごとに合意した目標を保証することが義務づけられる。SLA が満足できているかどうかの監視は、サービスを提供する側による報告がなされることは必須だが、提供される側においても客観的な数値により評価できる。^[21]

従来からインターネットサービスにおいて、特定の品質でデータ伝送を行う際の総称を Quality of Service (QoS) 制御といい、伝送速度 (Throughput)、遅延 (Latency)、パケット消失率 (Loss rate) などに関して一定の性能指標で評価される。4G までのモバイル通信では、QoS 制御の対象はクライアント・デバイスとサーバ等との間で IP アドレス等による論理通信路 (セッション) 単位であり、個々のアプリケーションの Flow データには非対応であった。^[22] E2E システム全体としての性能を保証するものではなく、あくまで部分的な範囲での“ターゲット”であった。また、品質を保証するためにユーザ契約を取り交わすことはなく、これらの点で 5G の SLA ベースの品質保証とは異なる。

5G において E2E で性能保証を行うためにキーの一つとなるのは、RAN における帯域確保である。図 13 中、RAN ドメインの中の Ran Intelligent Controller (RIC) ^(#8) は、O-RAN Alliance で標準化されていて、ここでは“Near Realtime RIC”を意味し、RAN のリソース (対象範囲の各スライスの電波帯域等) を秒単位で自動制御するもので、AI 導入等により管理を行う。RIC による高精度な管理の成否が SLA 内容の達成へ向けカギを握るとされる。他のドメインでのリソースの増加は比較的容易なのに対し、無線に関しては割り当て可能な電波周波数は有限なので、正確な管理を行うことにより、無線リソースの限界に起因する品質保証の破綻を回避することが狙いとなる。^[23]

SLA による保証がなされることで実現可能となる“ミッション・クリティカル”なサービスが存在する。遠隔医療・手術、自動運転、各種遠隔制御等がそれにあたる。^[24]

(#8) RIC は Non-Realtime RIC と Near-Realtime RIC とが O-RAN Alliance で定義されている。

後者の Near-Realtime RIC が無線リソースの自動制御を行うのに対し、前者の Non-Realtime RIC は UE とネットワークとの間の管理を行う Service Management にあつて、E2E オーケストレータとともに、無線環境やトラフィック負荷に合わせパラメータの最適化を行い CU/DU に送る。また、RAN 制御のポリシーを生成し、Near-Realtime RIC に通知する。

3. 5G の NTN 連携構成例と課題

第2章で説明した5G地上モバイルの機能をNTNへ拡張する場合の構成例を、HAPSをNTNプラットフォームとした例で以下に記す。

HAPSの最もシンプルな構成として、内部に中継機能を搭載する場合を考える。図13の地上ネットワーク構成を基本とし、RANの一部で無線機能を担うRUをNTNゲートウェイに配備する。(図14)

HAPS中継器は地上のNTNゲートウェイとはフィードリンクで接続され、海上の船舶とはサービスリンクで接続される。HAPS内部では周波数変換と電力増幅のみ行われる。別の構成方法としては、RUあるいはRUにDUを加えた機能をHAPSに搭載し、HAPSと直接、無線アクセスを行う方式も検討されている。^[25]

この例以外にも、用途、性能、重量に応じたユースケースに対し種々のNTN構成をとりうる。HAPS同士あるいはGEO/LEO衛星等との異種オービタとのリンク構成をとる、三次元宇宙ネットワークの多層型NTN技術検討がなされている。^[26]

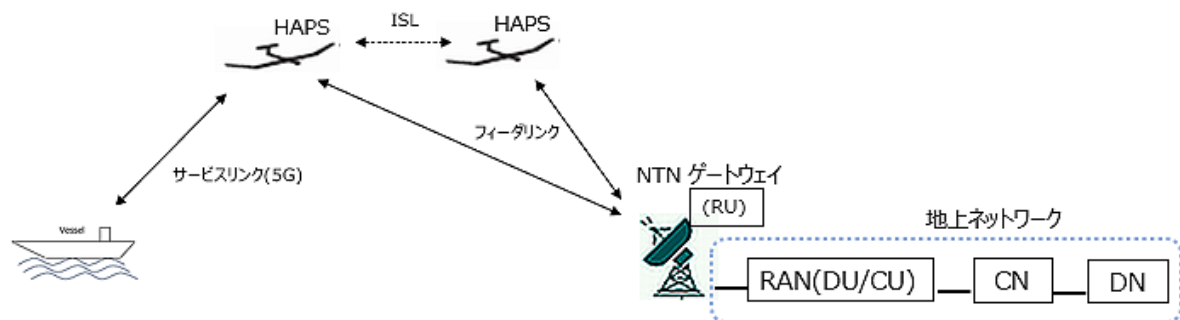


図14 船と陸の通信のHAPSによる中継イメージ

ここで、HAPS実用化へ向けての課題を簡単に記す。まず、HAPS側の課題に関しては、HAPSと地上局とを電波で通信する前提で、HAPS1機で百km級のエリアをカバーしうが、複数の船、あるいは船上端末と通信する場合は、伝送帯域が不足する可能性がある。また、図14に示したようなHAPSフィードリンクの照射範囲内に地球局（NTNゲートウェイ）が存在すれば通信可能であるが、それ以外の飛行位置においては通信エリアを構築することはできない。そのような場合の対策の一つに、HAPSを光通信等によるISL(Inter Satellite Link)で他のHAPSと、あるいは衛星と連携させることで飛行位置の制約から解放させる検討がなされている。^{[26] [27] [28]} 光通信を利用すれば、電波よりも大幅な高速化が可能で数十ギガbps～数テラbpsの伝送帯域の確保が可能になるが、光レーザの通信リンクを維持することが課題となる。HAPSは成層圏を飛ぶため気流によって振動する。対流圏よりは気流は激しくはないが、成層圏にも気流は存在する。気流の振動がある中で通信対象の追尾を行い、光レーザによる通信リンクを維持して双方向の通信を確保することは容易でないとの見方がある。また、地上との間で光通信を行う場合、レーザ光はビームが細く大気ゆらぎによる屈折が起き、雨などで

急激な減衰が起こるなど、電波以上に気象の影響を受ける。これらの課題を克服し、レーザ光を数百～数千 km 離れた通信相手に照射し続けるための技術開発が必要となる。

そして、HAPS の動力源は太陽光発電であるが、日本上空を飛行する緯度では、太陽光のバッテリーや通信機器を搭載して長時間飛行を行うための太陽光強度が足りないという課題がある。赤道直下に近い国からサービス提供を開始し、高効率発電の技術開発を進めながら徐々にサービス対象エリアの緯度を上げていき、日本での提供を目指すという戦略に言及する事業者もある。^[29]

次に、地上システム系の課題としては、衛星システムとしての NTN と地上系システムの相互接続に関し、通信要求やリンク状態の時間的変動、NTN と地上系の特性の違いなど、様々な課題を解決する必要がある。そのなかで、NTN と地上系のインターフェースやリソース調整を行うオーケストレータを配置し、NTN と地上系が連携して動作するための検討が行われている（図 15）。

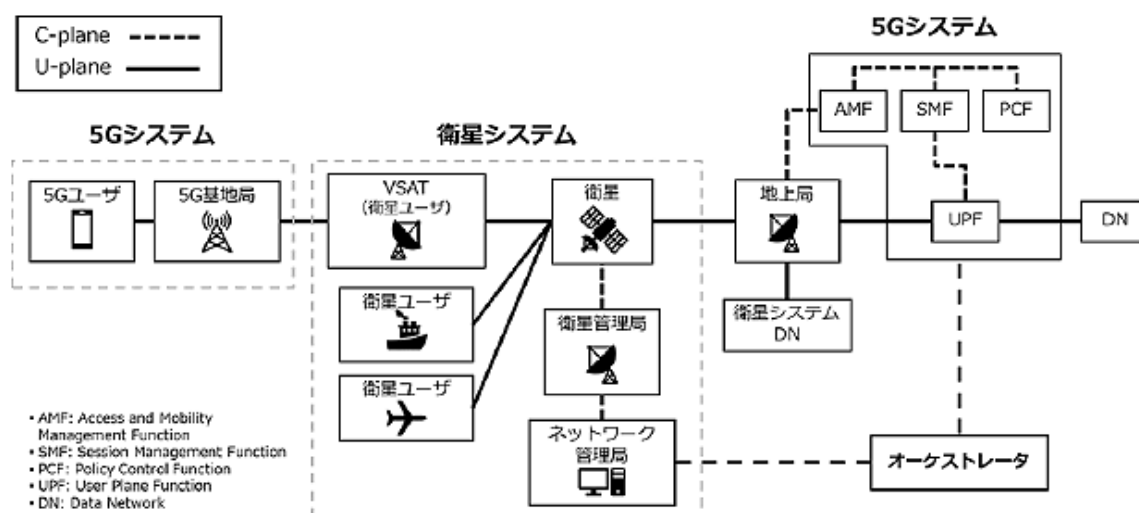


図 15 NTN 地上システムの連携アーキテクチャ ^[30]

このように、HAPS を含めた NTN の実用化へ向けて克服しなければならない課題は少なくないが、日本ではスペースコンパス社、及び HAPS モバイル社が、携帯電話基地局としての HAPS の導入に向け無線機器や機体の開発を進行中で、2025 年度に実証デモ、その後に実用サービスを開始する予定とされている。^[1] また、LEO 衛星-HAPS 間の光無線通信を 2026 年に実証予定とのことである。^[31]

海事産業としては、HAPS のみならず、LEO 衛星、GEO 衛星を含めた宇宙空間連携を対象とし、海上での通信インフラとして必須である NTN の商用導入が早期に実現されるよう、5G 以後の地上系通信システムとの連携を含み、通信事業者に対して積極的に働きかけていくことが求められる。

一方で、通信インフラ利用側としての海事産業において、次世代の自動操船に必要となり得る技術検討を進めていく必要があり、それに関する筆者の考えを次章以後で述べる。

4. 自動運航船の遠隔制御へ向けた課題

ネットワーク側で大容量・低遅延の高速通信が確保された場合に可能となるものは何か。

ROC から遠隔操船を的確に行うためには、オペレータがリモートでの状況認識を行うのに十分な環境が必要になると考えられる。例えば、MASS に対して適用される COLREG と同様のルールが ROC にも適用されることを仮定した場合、ROC には高精度なデータによる船舶周囲状況を再現する環境が必要となる。センサ情報の計器による確認のみならず、オペレータが視覚・聴覚による確認を行うことが必要となろう。それを満足するビデオ・音響データ伝送の帯域や遅延の要求に対し、適宜対応できる柔軟性がネットワーク側に望まれる。船と陸との間のコネクティビティにフォーカスすると、船橋にいる場合と同様の状況認識環境を ROC において構築するため、伝送性能に関して以下の2つの要求が考えられる。

- 超低遅延（ $\leq$ 数十～数百ミリ秒）^(#9) の伝送

- 高画質、通常のフレームレート（1920x1080, 30Hz）以上の複数アングルのビデオ・音響
複数アングルのビデオ・音響データ伝送には数十 Mbps もの大容量帯域が必要となる（図 16）。

現存するサービスの課題の一つに、上記の実現に対して船側のアップリンク（UpLink; UL）の速度が十分でないことが懸念される。衛星通信、地上モバイル通信ともに、通信キャリア（事業者）によるパブリックなネットワークサービスでは、動画配信など大量のウェブ配信に対応できるよう、ダウンリンク（DownLink; DL）がアップリンクに比べて圧倒的に速いサービスとなっている。



図 16 Up/Down リンクで異なる帯域要求

もう一つの課題は、ある状況下では複数の優先性能に同時対応する必要がある場合がある。即ち、“超低遅延”と“大容量通信”とを同時に実現するケースがありうる。例えば、MASS の遠隔着陸制御を行う場合、船を岸壁に付けるために、ROC のモニタで高精細な映像・音響でディテールを確認しながら、制御コマンドを瞬時に MASS 側へ送り、対象機器にコマンド反映させる必要がある。MASS と ROC は上記要求を満足させるような SLA 契約をネットワーク側と結ぶことが予想されるが、所望のネットワーク性能を満足するような合意が取れるとは限らない。複数のユーザが各々の思惑で個別にネットワーク側と交渉するため、ユーザ各々に対して十分なフレキシビリティが常に確保可能であるとはいえない。

これら2つの課題は、通信キャリアが提供するパブリックネットワークであるが故に起因するものと考えられる。これに対し、5G には次章で紹介するような非パブリックなサービスが存在する。

(#9) 遅延量の要求は、航行フェーズにおける RTT の変異幅と、伝送機器の動作性能から決まる。

5. ローカル 5G によるパフォーマンス最適化

5G には非パブリックなサービスとしてローカル 5G が存在する。ローカル 5G とは、全国的にサービスを提供する携帯事業者によるパブリックなサービスとは異なり、主に建物内や敷地内で利活用することが目的で、それに対し個別に免許が発行される 5G システムである。地域や産業の個別のニーズに応じて地域の企業や自治体等の様々な主体が、自らの土地内でスポット的に柔軟に構築できる。2019 年 4 月に 5G 用周波数割当てが行われ、同年 12 月に図 17 のようにローカル 5G に対応する周波数帯が制度化された。^[32]

上記のように、ローカル 5G は、ネットワーク事業者による一般的なパブリックのモバイル 5G とは独立したもので、特定の場所・敷地において専用の無線周波数帯が割り当てられる。その範囲で電波を占有利用することができる。

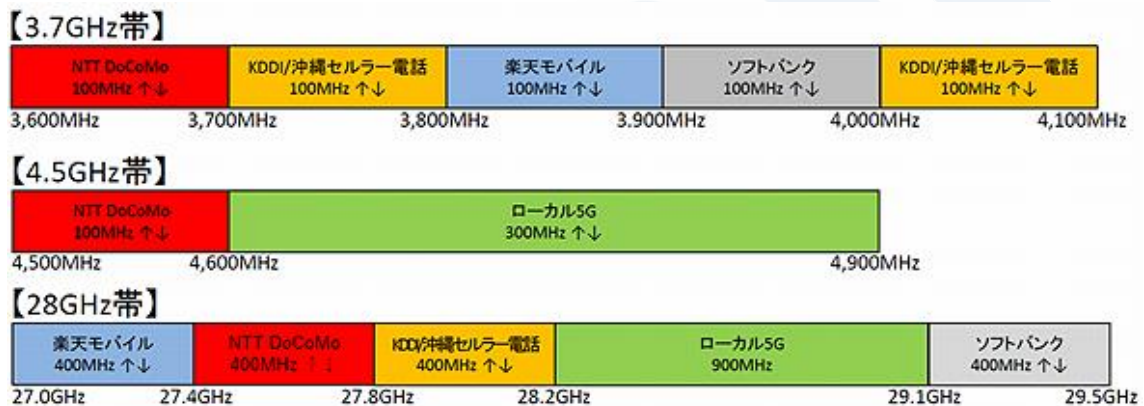


図 17 ローカル 5G の周波数帯 ^[33]

ローカル 5G の利点を以下にまとめる。

1. キャリア（ネットワーク事業者、本議論の場合は携帯通信事業者）によるエリア展開が遅れる地域において、5G システムを先行して構築可能。
2. 用途に応じ必要となる性能をユーザが柔軟に設計し、個別に最適化することが可能。（図 18）
3. ローカル 5G 専用の無線周波数なので、他の場所の通信障害や災害などの影響を受けにくい。
4. Wi-Fi と比較しローカル 5G はエリアカバレッジが広く、またハンドオーバー機能により低遅延で基地局間の切替がなされる。無線局免許に基づく利用が前提なので、電波干渉が生じにくい安定的な環境での利用が可能で、利用端末を SIM 認証で制限できるためセキュリティが強固といわれる。

第 4 章の 1 つ目の課題、すなわち、アップリンクの広帯域化に関し、上記ローカル 5G の利点の中で特に重要な点が、2. のネットワークの個別最適化である。キャリアによるパブリック 5G では、既述のように、マス・ユーザの需要に応える設定になっており、それが全てのユーザに対して画一的に適用される。例えば、アップリンクを高速化したいといった個別ユーザの需要には対応不可能となっている。

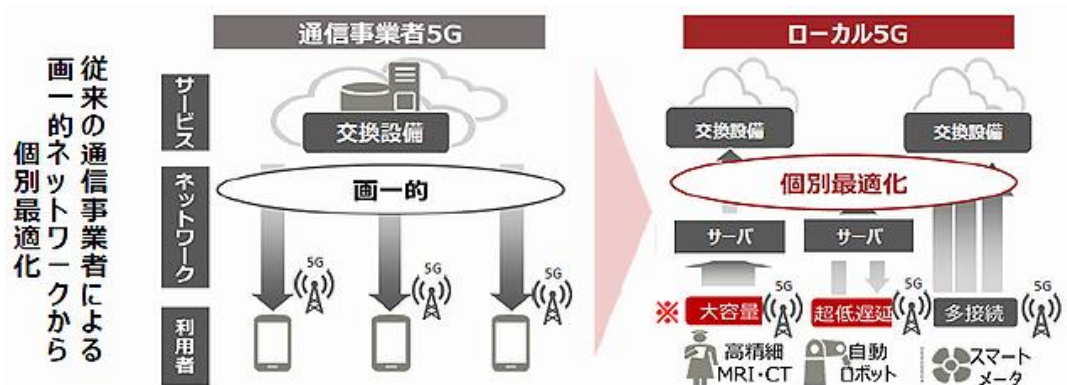


図 18 ローカル 5G では個別最適化が可能 [34]

無線通信でデータ送受信を同時に行う技術として、5G モバイル通信では無線帯域の効率的利用を念頭に、同じ周波数においてアップリンクとダウンリンクに異なるタイムスロットを設けることで、1つの通信チャネル上の双方向伝送を実現させている。これを時分割複信（Time Division Duplex; TDD）という。この方式は、送受信間で正確な時刻同期を維持することが不可欠で、GNSS 等によって時刻情報を取得し同期制御をおこなうことで、基地局間で無線フレームのタイミングを正確に合わせることが前提となる。これはパブリック 5G とローカル 5G とで共通の要件である。

そのうえで、パブリック 5G では無線フレームのタイムスロットは同期方式に固定され、ユーザは同期方式以外の選択はできない。これに対し、ローカル 5G ではダウンリンクの一部のスロットをアップリンクに変更することが可能である。これを“準同期”といい、アップリンクとダウンリンクの帯域比率を柔軟に設定することができ、アップリンクの速度帯域を向上させることが可能になる。（図 19）キャリアによるパブリック 5G では UL vs. DL 比は 1:8 でプリセットされ、ユーザ側で変更することはできないが、ローカル 5G では UL:DL=1:2(例)など、アップリンク/ダウンリンクの帯域幅を柔軟に設定することが可能である。

無線フレーム (10msec)																				
スロット番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
同期TDD	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D
準同期TDD 1	D	D	D	S	U	U	D	S	U	U	D	D	D	S	U	U	D	S	U	U
準同期TDD 2	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U
準同期TDD 3	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U

既存

追加例

“D”: ダウンリンク、“U”: アップリンク、“S”: スペシャルスロット

図 19 同期・準同期パターン [32]

具体的には、図 19 に示すとおり、TDD は 10msec の無線フレームを単位に繰り返される。各タイムスロットはマイクロ秒単位で管理される。同期フレーム“同期 TDD”の中のダウンリンク用スロット“D”の一部をアップリンク用スロット“U”に変更する種々のパターン、“準同期 TDD1”、“準同期 TDD2”、“準

同期 TDD3”を示したものである。なお、図中のスロット“s”はダウンリンクからアップリンクに切り替えるために挿入されるスペシャルスロットで、スロット内でダウンリンクシンボルからガード時間を経て、アップリンクシンボルへ切り替わる時間に相当する。準同期は、キャリアによるパブリック 5G などの「同期」で運用しているシステムと基本的な無線通信のタイミングは揃えつつ、同期システムがダウンリンク通信に使用している時間帯の一部をアップリンク通信に使用することで、同期運用への影響を最小限に抑えてアップリンク通信の割合を増やし、アップリンク速度を上げられるように設計されている。

柔軟な帯域設定が可能なローカル 5G であるが、Wi-Fi のような免許不要帯域を使った技術ではないため、導入するには自営網として免許を取得し、専用 SIM カードを入手したうえでネットワーク設備を構築する必要がある。^(#10) また、コスト面では初期設置費用や月額料金が高めになる懸念はある。

第 4 章の 2 つ目の課題、すなわち、“超低遅延”と“大容量高速通信”という複数の優先順位を同時に満足させるネットワーク品質の保証であるが、ローカル 5G はクローズドなネットワーク、すなわち、「無線版の LAN」と考えることができ、ネットワークを占有できるので、物理的に実現可能な範囲内において、課題への対応は可能であると考えられる。

このように、ローカル 5G には柔軟性があり、また、ネットワークを占有できることから、ユーザにとって所望のネットワーク性能を実現させることが可能と考えられる。なお、ローカル 5G は 3GPP において、Stand-alone Non-Public Network (SNPN) として標準化されている。^[35]

海事業界において、ローカル 5G を含んで所望のネットワーク性能に関する技術的見地を獲得し、必要な制度的・経済的側面を探りながら、遠隔操船の技術的実証を行うことは重要である。

一昨年 8 月の制度改正により、ローカル 5G は「土地地権者」による利用だけでなく、「他者土地利用」による移動体端末の利用が認められた。ローカル 5G 普及促進を図る総務省の最近の動向として、より広範な利用のため、免許手続きの簡素化とともに、洋上風力発電を含んだ海上利用への拡大を鑑みた議論が進められている。^{[1][38]} その認可を待たずとも、「実験目的でのローカル 5G の海上利用は可能な場合がある」との総務省からの見解が別途得られている。^(#11)

(#10) 免許の申請は必ずしも利用者自らが行う必要はなく、システム構築を依頼された者などが代行することも可能である。通信事業者（携帯電話事業者以外）によるローカル 5G の導入をサポートする商用サービスがあり、免許の許認可サポート、設置工事、運用をワンストップで提供している。そのため、専門的な知識や免許がなくても比較的容易にローカル 5G を利用することができる。^[36] 一方、通信キャリアが提供することで、利用者が免許取得を行わずに済む、同類のサービスである“private 5G”も存在する。

(#11) 実験場所を管轄する総合通信局への事前確認は必要となる。

6. ローカル 5G 実証実験の例

遠隔操船を行うことを想定し、5G電波と水との関係を実証する実験結果の一例を紹介する。
以下は、ハツ場ダムでの水陸両用船の無人運航に関する記事^[37]からの引用である。(図20)

2022 年、群馬県ハツ場あがつま湖にて水陸両用船（11.83m，総トン数 11 トン）を用い，ローカル 5G による無人運航実証を約 2km の距離，約 30 分間にわたり行われ，結果は成功であった。

- 本実証実験は，公益財団法人日本財団が推進する無人運航船プロジェクトである，「MEGURI2040」の一環であり，水陸両用船による無人運航の実証は世界初となる。
- 「ローカル 5 G 無線局」を開設することによって，高解像度の映像，データを水上と陸の無線局の間でスムーズにやり取りすることができ，より安全な遠隔操作を行う仕組みを作り上げた。
- 計画した航路を高精度に追従するために，準天頂衛星と，位置補正のためのセンサである光ファイバージャイロを利用した。また，障害物の自動検知と回避のために複数のセンサ（可視光カメラ，LiDAR，水中音波を利用したソナー）を搭載した。また，船舶と車両のハンドルやレバーを同時制御することで，船舶と車両の自動切り替えもスムーズに行えるシステムも開発した。



図 20 水上でのローカル 5G 実証実験の様子 ^[37]

7. 海事業界における先進通信技術活用促進へ向けた提案

前章までの議論を踏まえ、通信の理想環境からスケーラブルに実際の海上ユースケースを想定した、データ伝送フォーマットのアーキテクチャを開発することが今後重要になると考える。

船陸間通信の実証へ向けた技術的検討・議論のきっかけになることを期待し、次のような提案を行う。

1. 航行フェーズに応じてネットワークを適宜切り替える。
2. 各運用環境に応じてコネクティビティの優先度を設定する。

7-1 ネットワークの選択

遠隔操船を行う場合を想定し、航行フェーズによる ROC での接続オプションを考えてみる。ROC は船上のコネクティビティ・マネージャとの接続ネゴシエーションにより、図 21 のように、大別して 3 つの海域においてローカル 5G、パブリック 5G、NTN のいずれかに切り替える機能を有するものとする。

1. 港湾海域：離着岸時の制御

離着岸時の船の制御は、船上ないしは岸壁側のカメラ映像等を利用し、船と岸壁との距離情報を映像に重畳表示することや、船の位置を俯瞰表示することなどにより、時々刻々変化する船体と岸壁との位置関係の視覚表示等^[39]を目視確認しながら、ROC において船への遠隔制御をリアルタイムに反映させる。陸に近接するエリアで、最適化されたネットワーク性能を得るために、ローカル 5G で対応しようとする。

2. 沿岸海域・運河：比較的近距離での避航制御

航行中に近隣他船の動きを認知するためには、レーダ、AIS^(#12)、画像認識技術等を組合わせたナビゲーションシステムと連携し、それに視覚・聴覚上の確認を行うことを前提とする。基地局間のスマート・ハンドオーバーによるローカル 5G 利用が可能な場合もあるが、ローカル 5G を維持するには航行位置の制限がある。航行位置によって、ローカル 5G とパブリック 5G を切り替えての運用が必要と考える。

3. 外洋海域：遠方に見える他船との衝突回避のための早期避航制御

外洋において、運航上のリスク、例えば、衝突可能性のある他船が出現した際、他船の大きさ、それがどの方向に、どれ程の速度で進んでいるのかを船上の自動認識システムによって判断を行い、ROC で上記情報を受け、ビデオ・音響による確認も行ったうえで、コマンドを船に送るまでの時間的猶予はある程度あると考えられる。外洋では、HAPS/LEO/GEO に接続された NTN のみが利用可能となる。

(#12) 船舶自動識別装置(Automatic Identification System)

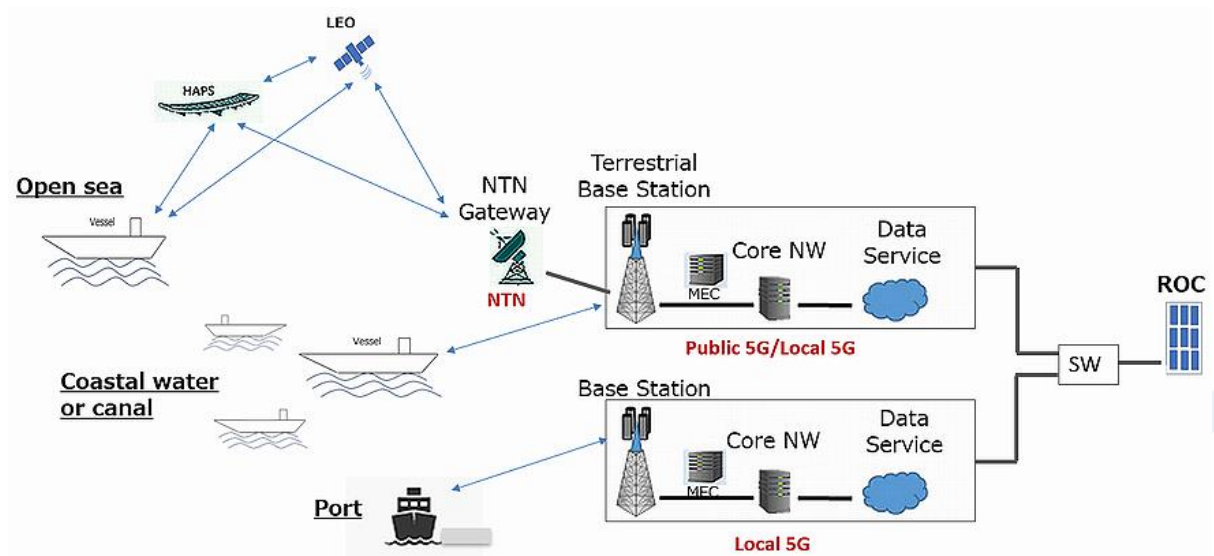


図 21 航行海域に応じたネットワーク切替え

7-2 コネクティビティの優先要素

ROC オペレータが的確な状況認識を行うためには、ROC で高精度なデータによる船舶周囲状況を再現する環境が必要となる。レーダ・AIS 等の船から送信されるセンサ情報を計器により確認するとともに、オペレータが視覚・聴覚による確認は必須であると考えられる。そのために必要となるビデオ・音響データ伝送の帯域や遅延に対する要求を明確にすることが重要となる。なお、高画質のビデオは高解像度であることが必然であり、それを満足するには大容量の伝送帯域の確保が要件となる。

航行する環境によりコネクティビティの優先順位は異なると考えられる。船上コネクティビティ・マネージャがネットワーク側、ROC 側との間の交渉で取り行う際の一例を以下に示す。(図 22)

1. 港湾区域での離着岸時

ROC オペレータは、船周辺のビデオ・音響、その他のセンサ情報を確認し、離着岸制御する。船からの通信では、超低遅延、高精度なフレーム周波数、高画質ビデオが同列の優先度で求められる。

⇒優先順位：[低遅延] = [更新レート] = [高画質]

2. 沿岸海域・運河

ROC オペレータは、ビデオ・音響そして距離などのセンサ情報を確認しながら、他船の動きを含めた自船周辺状況を把握し、必要に応じて周辺他船と適宜、音声あるいはデータの交信を行うための低遅延性が優先され、必要十分な更新レートで状況の正確なアップデートがなされ、そのうえで必要最低限な解像度での映像を得て、避航ルート反映のコマンド送信を行う。

⇒優先順位：[低遅延] > [更新レート] > [高画質]

3. 外洋

海況そして船周辺の状況変化の確認を行うため、リアルタイムのビデオ・音響データの伝送は必

須である。そのうえで、遠方の物体認識と動作状況の把握は重要であり、ビデオの解像度やフレーム周波数は高いことが重要と考えられる。一方で、状況変化に対する ROC 側での追従要求は沿岸海域・運河ほど高くはなく、遅延の優先度は他よりも高くない場合がある。MASS と ROC との距離による通信の伝搬遅延があるため、低遅延に対する要求は緩和され、ROC からの制御コマンドの船上反映は限られたものとなる。

優先順位は、高画質ビデオと状況に応じた更新レートが高く、次いで低遅延の順となる。

⇒優先順位：[高画質] = [更新レート] > [低遅延]

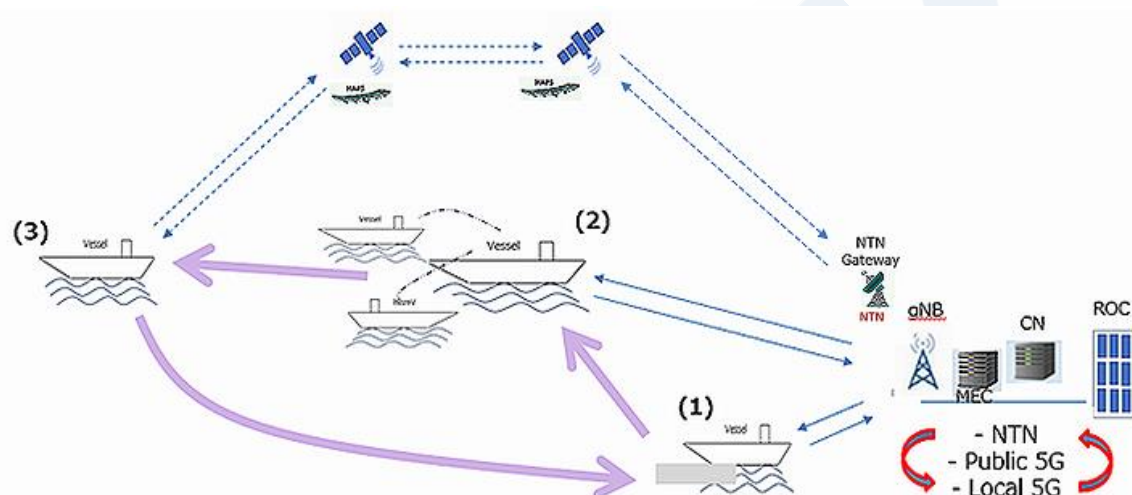


図 22 航行海域に応じた優先順位

以上、遠隔操船の際に MASS と ROC との間で航行状況に応じたコネクティビティ要求に対し、ビデオ・音響データ伝送の性能に関する優先項目を適宜切り替えることで、スムーズな遠隔制御を実現させる方法の一例を述べた。MASS 側システムと ROC システムは、双方とも GNSS 衛星から供給される UTC 時刻データを参照し、NTP (Network Time Protocol) あるいは PTP (Precision Time Protocol) により同期関係が確立されることが前提となる。

上記のいずれの場合であっても、通信・伝送の各レイヤにおいて冗長性に関する考慮は必須である。通常運用する高画質・低遅延の接続に異常が起きた場合でもコネクティビティが途絶せぬよう、バックアップ回線に接続切替が可能であること、また、伝送帯域が制限された場合にも安全性確保のための通信を維持できるセーフティネットの検討も必要であろう。

本章で述べた内容を含む要求議論、それを実現させる伝送アーキテクチャの技術検討が早期に開始されることを期待する。

7-3 遠隔操船へ向け考慮すべき要素

コネクティビティの視点で述べた上記議論以外に、遠隔操船の際に衝突回避のために重要となる要素として、以下の項目が考えられる。

ROC において状況判断のために必要と考えられる要素：

1. 視覚・聴覚情報

- 数マイル先の目視ターゲットを判別可能となるカメラ設置方法
- 他船の移動方向を判別できるだけのカメラ性能（HDR^(#13)、遠隔操作による拡大等）
- 広視野角（左右両側）のカメラ映像
- 複数のアングル映像を同時伝送しうる通信帯域の確保

2. 視覚・聴覚情報以外

- 従来からの NMEA 信号を ROC に送り、遠隔オペレータがレーダ情報や ECDIS 情報をオンデマンドで抽出する機能
- 船と陸の間のリアルタイム警報共有として、システムの異常や問題を検知し通知する AMS^(#14)の機能や、オペレータに対する当直警報システム BNWAS^(#15)の連携

今後は、これらの項目も含み、遠隔操船の実現へ向けた技術的検討を進めていきたい。

(#13) High Dynamic Range; 従来の輝度レンジよりも輝度幅が広く、自然界の実際の明るさを表現することが可能な技術。一般に、従来輝度レンジでは日陰が黒つぶれしたり、日なたが白飛びしたりするが、HDR 映像では明るい部分と暗い部分のいずれの階調も犠牲にすることなく、より自然でリアルな描写が可能とされる。

(#14) Alert Monitoring System

(#15) Bridge Navigational Watch Alarm System; SOLAS 条約によって、2011 年 7 月 1 日以降に建造される総トン数 150 トン以上の貨物船および旅客船(新造船)に搭載が義務付けられており、それ以前に建造された就航船にも段階的に搭載が義務付けられる。

あとがき

本報告では、次世代 MASS のオペレーションの一つとされる遠隔操船に利用可能な通信テクノロジーを、5G モバイル通信を中心に通信衛星や HAPS を用いた NTN 拡張を含み紹介した。

遠隔操船を行うために、MASS に対して適用される COLREG と同種のルールが ROC にも適用されることを仮定すると、ROC には高精度なデータによる船舶周囲状況を再現する環境が必要となり、ROC オペレータには、その環境において状況認識に基づいた遠隔制御を行うことが求められると考える。

NTN 拡張された通信を利用し、遠隔操船時の ROC 状況認識環境の提供へ向け、船舶と陸との間のコネクティビティを航行フェーズに応じて確立し、そして、ビデオ・音響データの伝送で優先性能を切り替えることで船周辺の状況判断に役立たせる方法の一例を示した。低遅延で信頼性をもつ高画質ビデオ再生を実現させる伝送アーキテクチャを含め、遠隔操船の実現に対する要求内容の明確化と技術検討が早期に開始されることを期待する。

また、通信の各レイヤで冗長性に関する考慮は必須であり、通常運用する高画質・低遅延の通信接続に異常が起きた場合でもコネクティビティが途絶せぬよう、セーフティネットの検討が必要となる。

高画質・低遅延・高信頼性のデータ伝送がカバーする利用範囲は、遠隔操船のみならず、船内乗組員の福利厚生改善にも通ずる。次世代の船舶運航は、安全かつ効率的で、船員にとって魅力的な業務・空間となることが望まれる。

本報告が関係者間の協力や知見の共有を促し、有意義な議論につながることを期待する。

参考文献

- [1] 豊嶋基暢「電波政策の最新動向」, 総務省 総合通信基盤局電波部長 令和5年2月
- [2] 「非地上系ネットワークの現状と将来像」, 国立研究開発法人情報通信研究機構, ワイヤレスネットワーク研究センター, 宇宙通信システム研究室, 2024.02
- [3] 外園悠貴, 岸山祥久, 浅井孝浩「5G evolution & 6G に向けた NTN 技術の研究」, NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル Vol. 29, No. 2, 2021.07
- [4] 山田智章「自動運航船関連技術に対する安全評価について」 ClassNK 技法 No.3 2021(1)
- [5] 長浜和也「自律運航船の遠隔監視・操船を担う「フリートオペレーションセンター」に潜入！」
https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2110/08/news030_3.html
- [6] Marko Horhtya and Jussi Martio「Integrated Satellite-Terrestrial Connectivity for Autonomous Ships: Survey and Future Research Directions」, Remote Sensing 2020
- [7] 「ソニーとKDDI, 5G SA 構成で複数ネットワークスライスの同時通信に成功」, KDDI ニュースリリース, 2023.12
- [8] 「令和時代における基盤としての5G」, 総務省, 情報通信白書 令和2年版本編 第1部
- [9] 川上雄也「5G モバイルネットワーク入門 CN/TN 編」, SoftBank, Internet Week 2022
- [10] 「新世代モバイル通信システム委員会における5G技術的条件に関する検討状況」新世代モバイル通信システム委員会
- [11] 渡辺光, 宇賀晋介, 中溝英之, 堤恒次, 新庄真太郎, 栗山侑「第5世代移動通信基地局向けミリ波アンテナ店R Fフロントエンド技術」, 電子情報通信学会 2020
- [12] 「ドコモの5G ネットワーク展開戦略」ホワイトペーパー 2020
- [13] 鹿志村康夫「E2E ネットワークスライシングアーキテクチャとその課題」, ノキアソリューションズ&ネットワークス
- [14] 「「5G」×仮想化基地局のスライシング技術を開発」株式会社 KDDI 総合研究所, 2018.05
- [15] 「5G; Procedures for the 5G System」, 3GPP TS 23.502 V15.2.0 Release 15, 2018.06
- [16] 大槻暢朗「5G 時代の無線アクセス」, シスコが考える 5G 時代のエンドツーエンドアーキテクチャ, 第2版 2020
- [17] 田中優多, 荒川雅矢, 奥田兼三, 清水和人, 國友宏一郎「5G SA 方式を実現する5G コアネットワーク技術概要」, NTT DOCOMO テクニカルジャーナル Vol. 30, No4, 2023.01
- [18] 高橋智彦「3GPP SA2 における標準化 -5G コアネットワーク・アーキテクチャ-」, ネットワークインフラエンジニアから見た5G システム, 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
- [19] 「Beyond 5G/6G White Paper 日本語 3.0 版」国立研究開発法人 情報通信研究機構 (NICT) , 2023.03
- [20] 「Technical White Paper Network Slicing」, Samsung, 2020.04
- [21] 阿多信吾「QoS/SLA」電子情報通信学会「知識ベース」5群-9編-3章 ver.1/2011.02
- [22] 清水和人, 阿部元洋, 宮崎祐哉, 小原啓希「5G SA 方式での音声通話を実現するコアネットワ

ーク技術概要」 NTT CODOMO Inc, 2023

- [23] 「世界初, RIC を活用した 5G SA の SLA 保証型スライシング実証に成功」 KDDI ニュースリリース 2023.01
- [24] 國友宏一郎, 奥田兼三, 佐々木孝志 「NW スライシング SLA 補償の夢を見るか?」, NTT ドコモ, 2024.01
- [25] 外園悠貴, 岸山祥久, 浅井孝浩 「宇宙 RAN における HAPS 実用化に向けた取り組み」, NTT 技術ジャーナル 2022.10
- [26] 山下史洋, 松井宗大, 加納寿美, 阿部順一 「Beyond 5G/6G に向けた多層型 NTN の研究開発」 NTT 技術ジャーナル 2023.06
- [27] 「Guidelines for Payload Operation in the Stratosphere」, HAPS Alliance 2022.12
- [28] 「株式会社 Space Compass における HAPS 事業について ～デジタルビジネス拡大に向けた電波政策懇談会～」, 株式会社 Space Compass, 2023 年 12 月 22 日
- [29] 石川温 「成層圏基地局「HAPS」はスターリンクに対抗できるか」, UchuBiz, 2024.05
<https://uchubiz.com/article/fea46038/>
- [30] 三浦周, 関口真理子, 大倉拓也, 小竹秀明, 白玉公一, 斎藤嘉彦, カラスコーカサド・アルベルト, 阿部侑真 「衛星通信/NTNと5G/Beyond 5Gの連携の動向と研究開発の取組み」 電子情報通信学会論文誌, C Vol.J106-C No. 9, 2023.05
- [31] 「次世代型 NTN のための HAPS における光無線通信の研究開発」, 国立研究開発法人情報通信研究機構, 2024.02
- [32] 「ローカル 5G の取り組み」 総務省 総合通信基盤局 移動通信課
- [33] 「ローカル 5G 事業参入ハンドブック」, 一般社団法人 情報通信ネットワーク産業協会, 5G/Beyond5G システム委員会, Communications and Information Network Association of Japan, 2023
- [34] 辺見聡 「ローカル 5G の普及展開に向けて」, 総務省 令和 3 年 12 月
- [35] 「Non-Public-Networks -State of the art and way forward」, 5G PPP Technology Board version1.0, 2022.11
- [36] 「ローカル 5G オープンラボ」資料, NTT 東日本
- [37] 「世界初, 水陸両用船の無人運航---ハッ場ダムで実証, 実用化へ向けて前進」, X, 2022.03
- [38] 「ローカル 5 G の柔軟化に関する検討の再開について」 総務省 令和 6 年 2 月
- [39] 「船舶のデジタルトランスフォーメーション 自動運航へ向けて」 フルノ製品情報サイト 離着岸支援システム, <https://www.furuno.com/jp/marine-dx/autonomous/#Docking>