

革新的情報通信技術研究開発委託研究
Beyond 5G 機能実現型プログラム
基幹課題 研究計画書

課題 006

Beyond 5G 次世代小型衛星コンステレーション向け
電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発



1. 研究開発課題

『Beyond 5G 次世代小型衛星コンステレーション向け電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発』

2. 目的

近年、通信の対象が人からモノへと拡大している中、Beyond 5G（以下 B5G）時代においては非居住地域や上空、海上等を含むあらゆる領域で B5G の利用ニーズが高まると想定される。これらの領域から発生されるトラフィックを収容するためには、従来の陸上移動体通信ネットワークだけではカバーできず、グローバルカバレッジ、すなわち、これまでの地表面の領域に高度を加えた全球的な領域をカバーする、三次元的なネットワークの構築が必須となる。そのため、地上系ネットワークと高高度プラットフォーム（High Altitude Platform Station、以下 HAPS）や衛星等を活用した非地上系ネットワークをシームレスに接続し、航空機、船舶等の移動体への通信にも展開可能なシステムを実現することが必要であり、民間フォーラムにおいてもそのアーキテクチャなどの議論が行われているところである。

この非地上系ネットワークの基幹網として、地表から高度数百 km の低軌道を周回する低軌道周回（Low Earth Orbit、以下 LEO）衛星群によるコンステレーションが重要な役割を果たすと期待されており、近年海外事業者により新たに市場投入がなされると同時に、多くの計画が存在している。しかし、軌道上の衛星をメッシュに接続するための衛星間通信、並びに地上と衛星間のサービスリンク及びフィーダーリンクに多くの周波数資源を消費し、将来的な周波数の割当てが困難となり、今後の円滑なネットワーク構築に支障を来すおそれがある。そのため、限りある周波数資源を有効に活用しつつ、広帯域な光空間通信を併用する、衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発が必要である。光空間通信は、LEO コンステレーションにおける衛星位置や地上の天候の変化等により、光通信回線の状況の変化が性能に影響を大きく与えるため、フレキシブルに光通信の特性を変化させることが必須となる。一方、衛星コンステレーション通信システムのサービス総容量の拡大のため、システムを構成する衛星数は増加するため、システム全体コストを考えれば衛星一機当たりのコストを下げる必要があり、小型化が必須となる。宇宙基本計画（令和 2 年 6 月 30 日閣議決定）においても、「静止衛星と地上の間で世界最高レベルとなる 10Gbps 級の宇宙光通信技術について、フィールド実証を行う。また、衛星コンステレーションでの活用等も視野に入れた小型化技術や、今後の我が国の宇宙活動の深宇宙への展開等に備え、更なる超長距離・大容量な宇宙光通信等の基盤技術の確立に向けて取り組む。」とあり、静止衛星用の光衛星通信システムの研究開発が進められているが、LEO コンステレーション衛星用に小型化及び将来に向けた大容量化の研究開発の必要性が述べられている。さらに、コンステレーションを構成する 100 機を超える膨大な数の衛星に搭載される通信機器をシステム運用するためには、自動運用技術の確立が必要となる。

本研究開発課題では、B5G グローバルカバレッジを支える次世代小型衛星 LEO コンステレーション向け電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発する。具体的には、

- ・コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発
- ・超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発

を実施する。なお、コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発については、国際競争力確保の観点から、いち早い市場投入を目指し、衛星搭載を前提とした研

究開発を実施することとする。本研究開発により、B5G ネットワークのグローバルカバレッジ実現に寄与するとともに、電波・光ハイブリッド通信を実現することにより、衛星通信用無線周波数の逼迫を緩和することで、電波の有効利用に資する。

なお、本研究開発課題は、「Beyond 5G 研究開発促進事業 研究開発方針」（令和 3 年 4 月 22 日総務省国際戦略局）における「3. 研究開発項目」の「① Beyond 5G 機能実現型プログラム」（p.3）のうち、ア）開発目標（数値目標等）を具体的かつ明確に定めてハイレベルな研究開発成果の創出を目標として NICT で研究計画書を作成し、実施者を公募する基幹課題として実施する。

3. 内容

本研究開発課題では、2030 年ごろの B5G の非地上系ネットワークを支える LEO コンステレーションの構築に必要な通信技術として、コンステレーション内の衛星間通信を実現する衛星搭載光通信技術と、コンステレーション内の衛星と地上を結ぶ衛星-地上間通信を実現するための電波・光ハイブリッド技術を研究開発する。

本委託研究における衛星コンステレーションは以下の条件を想定したものとする。

- 想定軌道高度 : 400km-1200km
- 衛星機数 : 100~500 機以上
- デオービット : 25 年以内
- 通信サービス総容量 : 18Tbps 級
- 衛星質量 : 100kg 級

・研究開発項目1 LEO コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発

本項目では、衛星搭載用として電波と光をハイブリッドに使用し、超高速大容量データ転送を実現する革新的ハードウェア技術の研究開発を目的に、以下の 3 つの研究開発を推進する。搭載機器の開発に当たっては、2024 年に搭載可能となる仕様を考慮し提案することとし、2022 年度末までに、宇宙環境耐性を確認できるよう「宇宙での実験を目的とした光通信用デバイスのスクリーニングプロセス」（適用文書（1））を参照し、有識者を含む設計審査会を設けること。

a) 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの研究開発

LEO コンステレーションにおける衛星位置や光通信回線等の状況により、フレキシブルに光通信の特性を変更でき、かつ、高速に初期捕捉可能で、通信容量や追尾性能を最適にして光通信回線の確立を行う衛星搭載用小型光通信システムの研究開発を行う。

より具体的には、光送受信機においては、通信容量を通信回線状態に応じてフレキシブルに変化する機能を実現し、ビーム広がり角をフレキシブルに変換可能な機能等の活用により高速な初期捕捉追尾を実現しつつ、MEMS 等を活用し高速超小型可動ミラーの導入により小型化を実現すること。

- 光通信システムの通信容量：最大の通信容量 5Gbps 以上
- 光通信システムの目標リソース：質量：光通信機器部 6kg 以下、捕捉追尾系 9kg 以下、サイズ：一辺 25cm 以下、電力：50W 以下
- 初期捕捉時間の高速化：1 分以内（地上局可視時間の 1/10 以下の時間）

- ・高速超小型可動ミラー：追尾最大周波数百 Hz 以上、質量 100g 以下

b) 小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発

衛星間、地上一衛星間の通信回線状態（衛星擾乱、伝搬遅延、天候状態等）と通信要求により、通信容量及び通信回線を設定し、電波・光通信回線をシームレスに接続する小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発を実施する。電波の通信は、地上一衛星間のみを用いる構成とし、データ用回線及びテレメトリ・コマンド用回線に使用する。LEO コンステレーションでは、通信回線の状態に応じて衛星間、衛星・地上間の通信回線の切り替え制御が必要になる。このため、衛星間、衛星・地上間の接続を通信回線の状態と通信容量に応じてフレキシブルに変更するデータリンク層での回線切り替え機能を実現すること。衛星の姿勢制御アクチュエータによる微小振動擾乱や姿勢・軌道の決定・予測誤差を考慮して、a) で開発するフレキシブル光通信システムのビーム広がり角で光通信可能な追尾精度を達成すること。

- ・通信容量：光通信 5Gbps 以上、電波通信 100Mbps 以上
- ・光通信初期捕捉・姿勢協調制御機能：システム配分値 0.1 度
- ・衛星擾乱協調制御性能：総合追尾精度 2μ ラジアン (rms) 以下

c) フレキシブル光通信システム対応光地上局システムの研究開発

a) のフレキシブル光通信システムに対向する低軌道衛星を自動で捕捉追尾可能な可搬型光地上局の設計・開発を実施する。フレキシブル光通信システムと整合した手順で初期捕捉追尾が可能で、シングルモードファイバにカップリングし、通信容量を通信回線状態に応じてフレキシブルに変更可能な光地上局システムの研究開発を実施する。

・研究開発項目2 超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発

本研究開発項目では、2030 年頃の B5G 時代の衛星コンステレーションで必要となる通信帯域を確保するために、小型衛星に搭載される超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発を推進する。

a) 100Gbps 級フレキシブル光衛星通信システムに向けた搭載用光通信機器の研究開発

小型衛星等への搭載を想定し、超広帯域化に向けた搭載用光通信機器を開発する。衛星搭載化を考慮して、強度変調やコヒーレント光通信等の最適な通信方式のトレードオフの検討を実施する。回線状態に応じて、回線パラメータ（変復調方式、通信容量等）を切替可能で、信号処理等により大気ゆらぎや追尾誤差起因によるフェージング耐性をもつ機能を有し、高出力化、多値変調技術や波長分割多重等を用いて、システムとして通信容量 100Gbps 級の搭載用光通信機器を開発する。

- ・光通信システムの通信容量：最大の通信容量 100Gbps、5~100Gbps で変更可能なこと
- ・変復調方式：BPSK・QPSK 方式等を切替可能なこと
- ・フェージング耐性機能：フェージングがあってもリカバーできる機能を有すること

b) LEO コンステレーション用光通信機器の自動運用システムの研究開発

コンステレーションを構成する 100 機を超える膨大な数の衛星に搭載される数百から数千の光

通信機器を運用する場合、不具合や故障等により衛星ネットワークを再構成する必要がある。ネットワークの再構成をリアルタイムに実施するには、必要な情報をリアルタイムで管理し変更し、光通信機器の動作パラメータを自動的に設定する運用システムが必要である。各光通信機器が通知すべき性能や情報を具体化し、システム全体での健全性把握を行うロジックの検討を行い、シミュレータ上で検証する。

4. アウトプット目標・アウトカム目標

・研究開発項目1 LEO コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発

2024 年度末におけるアウトプット目標（最終目標）

- a) 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの研究開発
 - ・小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの詳細設計及び小型衛星搭載モデルの開発を実施し、小型衛星に搭載可能となる小型化を実現すること。
 - ・低軌道への投入を前提とした環境試験を実施し、宇宙空間での動作及び衛星への搭載可能性を検証すること。
 - b) 小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発
 - ・衛星搭載用電波・光経路制御システムの詳細設計及び小型衛星搭載モデルの開発を実施し、小型衛星に搭載可能となる小型化を実現すること。
 - ・低軌道への投入を前提とした環境試験を実施し、宇宙空間での動作及び衛星への搭載可能性を検証すること。
 - c) フレキシブル光通信システム対応光地上局システムの研究開発
 - ・フレキシブル光通信システムに対応する可搬型光地上局システムの詳細設計を実施し、低軌道衛星を自動で捕捉・追尾可能な望遠鏡の口径が 20-40cm クラスと同等の可搬型光地上局を開発すること。a)、b) と組み合わせて試験を実施すること。
- 上記の成果として、知財化に向けた取り組みを実施すること。

2022 年度末におけるアウトプット目標

- a) 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの研究開発
 - ・小型衛星搭載用フレキシブル光通信システム（最大の通信容量 5Gbps 以上）の基本設計を実施し、試作モデルを開発する。
 - ・宇宙環境耐性を確認できるよう有識者を含む設計審査会を実施する。
- b) 小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発
 - ・衛星搭載用電波・光経路制御システムの基本設計を実施し、試作モデルを開発する。
- c) フレキシブル光通信システム対応光地上局システムの研究開発
 - ・フレキシブル光通信システムに対応する可搬型光地上局システムの概念設計を実施する。

アウトカム目標

2025年 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システム、衛星搭載用電波・光通信制御システム及びフレキシブル光通信システム対応可搬型光地上局システムを用いた軌道上実証を実現、捕捉追尾方式のプロトコル、フレキシブルな通信方式及び電波・光経路制御方式について関係機関に提案し業界標準化を実施

2026年 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システム、衛星搭載用電波・光通信制御システムの量産・低コスト化を実現、フレキシブル光通信システム対応可搬型光地上局システムの量産・低コスト化を実現

2027年 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムや衛星搭載用電波・光通信制御システムの普及・サプライチェーンに貢献、サイトダイバーシティを考慮した地上局ネットワーク構築に貢献、開発した成果のグローバルマーケット獲得に向けたビジネス展開を実施

(ただし、ステージゲート評価後も研究を継続した場合)

・研究開発項目2) 超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発

2024年度末におけるアウトプット目標 (最終目標)

a) 100Gbps 級フレキシブル光衛星通信システムに向けた搭載用光通信機器の研究開発
将来の衛星コンステレーションにおける競争力を持った光衛星通信技術の研究開発を実施し、地上での評価試験を実施し、システム当たりの最大の通信容量として 100Gbps 級の超広帯域光衛星通信技術を実現する。

b) LEO コンステレーション光通信機器の自動運用システムの研究開発
多数の光通信機器が、軌道上での故障や不具合等を仮定し、ネットワークの再構成が自動的に可能な運用システムを実現し、シミュレータ上で確認する。

上記の成果として、知財化に向けた取り組みを実施すること。

2022年度末におけるアウトプット目標

a) 100Gbps 級フレキシブル光衛星通信システムに向けたコヒーレント光通信機器の研究開発

高出力化、多値変調技術や波長分割多重等を用いて、システム当たりの最大の通信容量として 100Gbps 級の搭載用光通信機器の基本設計を実施し、試作モデルを開発する。

b) LEO コンステレーション光通信機器の自動運用システムの研究開発

軌道上での故障や不具合を仮定し、各光通信機器が、ネットワークの再構成が自動的に可能な運用システムの概念検討を行う。主要な機器の状態を知らせる仕組みを開発し、ネットワークノードを自動的に再構成可能な地上シミュレータの基本設計を実施する。

アウトカム目標

2025年 100Gbps 級フレキシブル光通信システム及び自動運用システムについて関係機関に提案し業界標準化を実施、自律運用システムの実証ミッションへの適用

2026年 100Gbps 級フレキシブル光通信システムの衛星搭載化の開発の推進
2028年 100Gbps 級フレキシブル光通信システムの宇宙実証、自動運用システムのサービスへの適用、開発した成果のグローバルマーケット獲得に向けたビジネス展開を実施

(ただし、ステージゲート評価後も研究を継続した場合)

5. 採択件数、研究開発期間及び研究開発予算等

採択件数 : 研究開発項目1、研究開発項目2ごとに1件。

研究開発期間: 契約締結日から2024年度まで(2022年度に実施するステージゲート評価を踏まえ、継続の必要性等が認められた場合には、2024年度まで継続予定。ステージゲート評価やBeyond 5G研究開発促進事業の後年度予算の状況等により、研究開発期間を変更する場合がある。認められなかった場合2022年度末で終了。)

研究開発予算: 各年度、研究開発項目1及び研究開発項目2を合わせて総額950百万円(税込)を上限とする(提案の予算額の調整を行った上で採択する提案を決定する場合がある。ステージゲート評価やBeyond 5G研究開発促進事業の後年度予算の状況等により、各年度の研究開発予算を変更する場合がある。)

研究開発体制: 単独の提案も可能であるが、産学官連携等による複数の実施主体からなる体制とすることを推奨する。その際、社会実装を考慮した体制とすること。

6. 提案に当たっての留意点

- 研究開発項目1、研究開発項目2のいずれか又は両方の研究開発項目に提案することができる。両方の研究開発項目に応募する場合、提案書は一つにまとめること。
- 提案書には、ステージゲート評価後2024年度まで実施することを仮定して、2024年度までの計画を記載すること。
- 具体的目標に関しては、2022年度後半のステージゲート評価を受ける際の間目標と、当該評価で継続が認められた場合の2024年度の最終目標について、定量的に提案書に記載すること。
- 本研究開発の遂行過程で得られるデータについては、広くオープンにするのが望ましいことから、公開できると想定するデータがある場合には、その公開や利活用促進に関する計画(例: 公開するデータの種類、公開先、公開方法等)を提案書に記載すること。なお、本項目は採択評価時の評価項目とする。
- 本委託研究で研究開発する技術について、具体的にBeyond 5Gの実現にあたりどのような分野のどのような知的財産の取得が期待できるのか、何件程度の特許出願を目指すのか、また、知的財産の取得とともに標準化活動の推進も重要であることから、どのような分野のどのような標準の策定が期待できるのか、どのような標準化活動を推進するのか、知財戦略と標準化戦略をどのように一体的に推進しようとしているかについて提案書に記載すること。特に研究開発中からの知財獲得及び標準化の取り組み、並びに光

衛星通信システムの市場の形成方法等についても提案書に記載すること。本項目は採択評価時の評価項目とする。

- 本課題に関連する研究プロジェクト（B5G 研究開発促進事業の基幹課題・一般課題、あるいは他の事業によるプロジェクト等）や研究機関等との連携で相乗効果が見込める場合には、連携等を行うとともに、通信事業者を中心としたベンダ、アカデミア等との緊密な連携やチーム形成、国内外の標準化への寄与による国内産業の競争力強化を推奨する。
- 外国の民間企業、大学、アライアンス、コンソーシアム等との連携体制が構築できている又は計画している場合には、具体的な連携の方法について提案書に記載すること。なお、本項目は採択評価時の評価項目とする。
- 実施体制については、本研究開発の目的に則した実施体制を構築することとし、それぞれの役割を明記すること。研究開発の推進体制だけでなく、成果の社会実装の推進体制についても記述すること。
- 研究開発の実施に当たっては、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言をいただくとともに、実際の研究開発の進め方について適宜指導をいただくため、学識経験者、有識者等を含んだ研究開発運営委員会等を開催する等、外部の学識経験者、有識者等を参画させること。
- 本研究開発成果の社会実装に向けて、到達目標の項目に記載したマイルストーンを意識しつつ、具体的な時期（目標）、体制、方策等を記載すること。その際、持続的に自走するための計画等についても記載すること。
- 研究開発成果の情報発信を積極的に行うこと。

7. 運営管理

- 複数の機関が共同で受託する場合には、代表提案者が受託者間の連携等の運営管理を行い、受託者間調整会議を定期的で開催すること。
- 国立研究開発法人情報通信研究機構（以下「機構」という。）と受託者の連携を図るため、代表提案者は、機構の指示に基づき定期的に連絡調整会議を開催すること。
- 特に本事業における関連する他の基幹課題・一般課題との連携で相乗効果が見込める場合には、研究や運営において積極的に連携などを行うこと。
- 社会情勢や研究環境の変化等、必要に応じて、機構が研究計画書を変更する場合があるので、留意すること。

8. 評価

- 機構は、研究開発終了時に終了評価を実施する。2022 年度後半において、評価委員会による評価（ステージゲート評価）を実施し、継続の必要性等が認められた場合には、2024 年度まで委託研究を継続し、2024 年度末に委託研究を終了する。評価の結果、継続性の必要性が認められなかった場合は 2022 年度末に終了とする。
- 機構は、本委託研究終了後に成果展開等状況調査を行い、追跡評価を行う場合がある。

- 機構は、上記以外にも本委託研究の進捗状況等を踏まえて、臨時にヒアリングを実施することがある。
- 研究開発内容については、我が国の ICT 産業が世界市場の一翼を担うことを目的に実施される委託研究課題であり、国産技術を活用している提案を評価する。

9. 成果の社会実装等に向けた取組み

- B5G の実現を支える技術として、知的財産戦略及び標準化戦略、さらには製品化と海外市場への展開戦略を記載するとともに、知財獲得に向けて必要な取組みを視野に入れること。特に衛星サービス事業者及び衛星開発ベンダ等とどのようにパートナーシップを確立するか等、具体的な成果展開の戦略を提案書に記載すること。
- 実用化、事業化、社会実装に向けた出口戦略を明確とすること（委託研究後の事業化等の内容を明確にする）。
- 上記の出口戦略を実現するため、場合によっては本委託研究で得られた成果のオープン化（例えば、成果発表やそれに留まらずコミュニティ先導のための国際ワークショップや国内特別セッション主催、展示、標準化、オープンソース化等）も行う等、成果の社会実装等に向けて必要な取組みを行うこと。
- 本研究開発成果の軌道上実証に向けて、採択後に、宇宙政策委員会衛星開発・実証小委員会における検討への協力や宇宙開発利用加速化戦略プログラム（スターダストプログラム）の戦略プロジェクトとの連携を行うこと。

10. 適用文書

(1) 情報通信研究機構、「宇宙での実験を目的とした光通信デバイスのスクリーニングプロセス」、2021年6月

なお、適用文書の提供を希望する場合は、イノベーション推進部門委託研究推進室（e-mail: info-itaku@ml.nict.go.jp）に連絡すること。

参考

衛星コンステレーションとは、多数の通信衛星で構成される衛星システムのことである。多数の衛星で地球全域をカバーすることで、世界中のどこにいても衛星から常時可視の状態を実現でき、全世界をインターネットで結ぶことが期待されるシステムである。米国 SpaceX の Starlink は、コンステレーション計画の主たる例であり、合計 12,000 機を超える衛星を打ち上げることが計画しており、既に千機以上の衛星が軌道上にあり、日本向けのサービスも計画されている。この他にも、Amazon や Facebook といった巨大企業をはじめ、Onweb、Telesat、O3b、Eutelsat などの多くの企業が衛星コンステレーション計画を有している。本委託研究では、これらの多くのプロジェクトに対して、国産技術で 100kg 級衛星に向けた光通信技術を開発することにより、日本の国際競争力を強化するものである。