

非地上系ネットワークの現状と将来像

2024年2月26日

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



非地上系ネットワーク (NTN) への期待

プラットフォームの進化

- **HTS** (ハイスループット衛星)
- **メガコンステレーション** (多数の低軌道衛星による衛星システム)
- **HAPS** (高高度プラットフォーム)



<https://www.inmarsat.com/service/global-xpress/>



<https://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2019/06/post-12259.php>



<https://www.nict.go.jp/publication/NICT-News/0504/p02.html>

- 回線コストの大幅低減
- 高速化、大容量化、低遅延化
- 端末の進化

5Gのネットワーク技術の衛星系・NTNへの展開

- ソフトウェアで定義されるネットワーク (SDN) / Network Functions Virtualization (NFV)
 - ネットワークスライシング
 - ネットワークオーケストレーション
 - エッジコンピューティング
- ⇒衛星-地上接続が効率よく実現できる可能性

標準化



<https://www.3gpp.org/>

- 3GPP/ETSIによる地上系・非地上系標準化
- ユースケース実現の制度化

NTN
+5G/B5Gによる統合ネットワーク

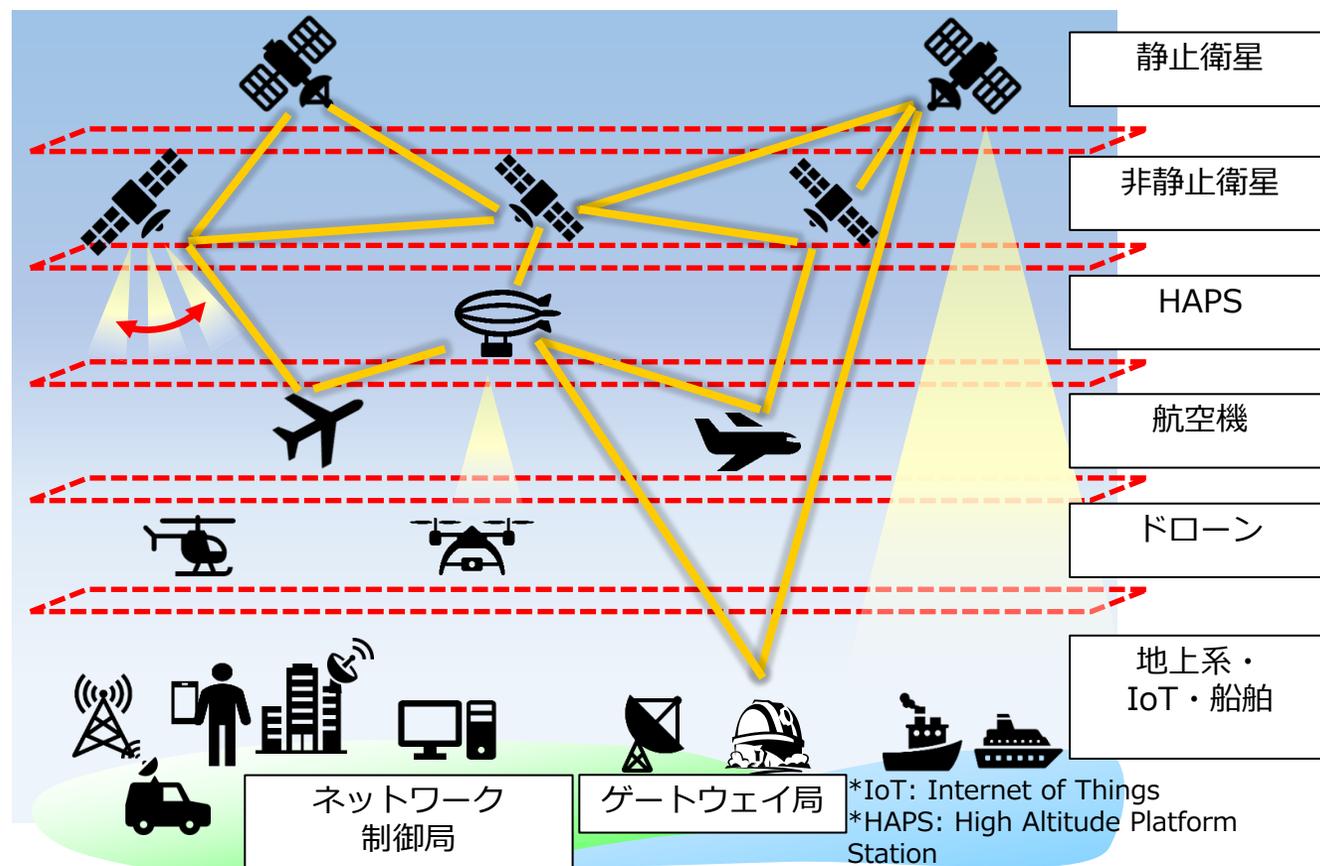


従来にない
ユースケースの登場

- スマートシティ
- モビリティ
- 緊急通信

Beyond 5G/6G時代のNTNを活用した 三次元ネットワークのイメージ

今後、B5G/6Gのネットワークは、ドローン（無人航空機）、高高度プラットフォーム（High Altitude Platform Station, HAPS）、非静止衛星のような高度や通信特性がそれぞれ異なるプラットフォームの登場により、二次元から三次元へ拡張された新たなネットワークサービスが期待される。



- ◆空飛ぶクルマ、ドローン、無人航空機、スペースプレーンなど、空間/空への活動の拡大
- ◆海洋域での産業(自律航行船によるロジスティクス、養殖漁業、環境保全、資源採掘、etc.)におけるICT利活用拡大



- ◆地上、海上、空中、宇宙まで、境目なく、様々なコネクティビティが求められる社会が到来

衛星通信におけるスペクトラム用途の動向

衛星通信におけるスペクトラム用途の動向サマリ

ダウンリンク周波数	大規模な技術的運用 利用開始	用法例
-----------	-------------------	-----

10+ Gbps***	光	190-300 THz	2023+*	<ul style="list-style-type: none"> 衛星-衛星間リンク データダウンリンク 衛星-HAPS/UAVs 深宇宙通信
	Q/V-帯	40-75 GHz	2025+	<ul style="list-style-type: none"> ブロードバンド: FSSサービス
	Ka-帯	26-40 GHz	2010-2015	<ul style="list-style-type: none"> ブロードバンド: FSSサービス データダウンリンク (EO) – <i>being explored</i> 深宇宙通信
	Ku-帯	12-18 GHz	1995-2000	<ul style="list-style-type: none"> ブロードバンド: FSSサービス、BSSサービス
	X-帯	8-12 GHz	2000-2005	<ul style="list-style-type: none"> データダウンリンク(EO) 軍事通信 TT&C 深宇宙通信
	C-帯	4-8 GHz	1980-1990	<ul style="list-style-type: none"> ブロードバンド: FSSサービス、BSSサービス
	S-帯	2-4 GHz	2005**	<ul style="list-style-type: none"> ナローバンド: MSSサービス TT&C 深宇宙通信
22-705 Kbps***	L-帯	1-2 GHz	1980s**	<ul style="list-style-type: none"> ナローバンド: MSSサービス

- 全体として、衛星通信はギガクラスの通信需要が高く、より高い周波数に移行。

- 例:ほとんどのHTSは要求容量提供に向け、Ka帯等周波数では十分な帯域幅を確保上は必須。

RFスペクトルは、ますます混雑し、新しい帯域の必要性は増加(従って、光通信の検討)。

- Q/ V/ W帯装置の開発
- 光帯域の利用へ加速
- 但し、より高い周波数は、減衰/ 気象条件による減衰を受ける。
- 電波法では 3000GHz(3THz)が上限



周波数帯域が高いほど、気象条件に対する感度が高くなる。



10+ Gbps***

より高い周波数帯域は、より高いデータレート/速度を可能にする。Ka帯とKu帯は、一般に、ブロードバンドのサービスのための焦点の帯域である。

22-705 Kbps***

* 現在までのところ、限られた数のシステム(特に技術実証)。2023年及びそれ以降、大規模な採用を予想(主に衛星コンステレーションにおける採用にて牽引)

**大部分~2000年、あるいは以降に展開されたL帯の限られた数のシステム

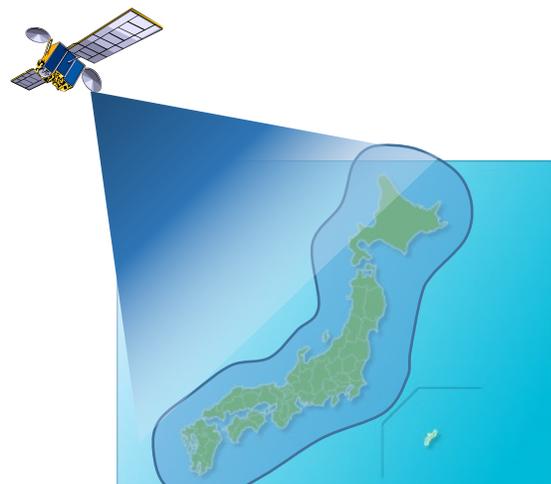
***データレート速度は、地上及び衛星機器、スペクトル効率等に依存することに留意すべきである。

ハイスループット衛星 (HTS)

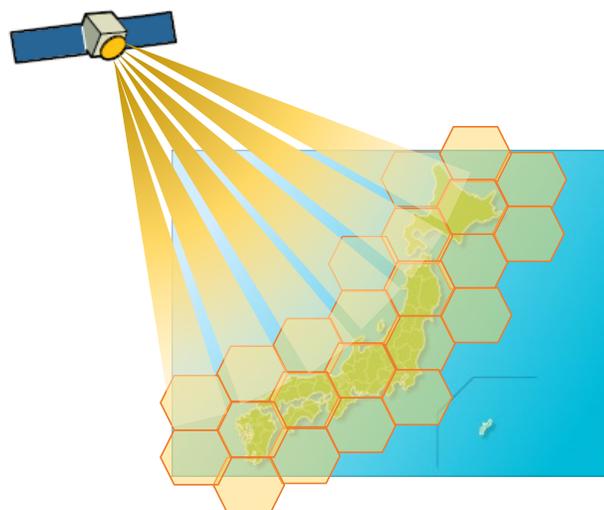
衛星通信回線の低コスト化（ビット当たり単価の低減）を目指し大容量化

HTS: High Throughput Satellite

- 静止衛星
- マルチビーム化（シングルビーム→100ビーム～1000ビーム級）
- 広帯域化（Ku→Ka帯）



従来のシングルビーム衛星のイメージ



HTSのイメージ

これまで

Inmarsat-5
80-100ビーム級
容量：数十Gbps



今後

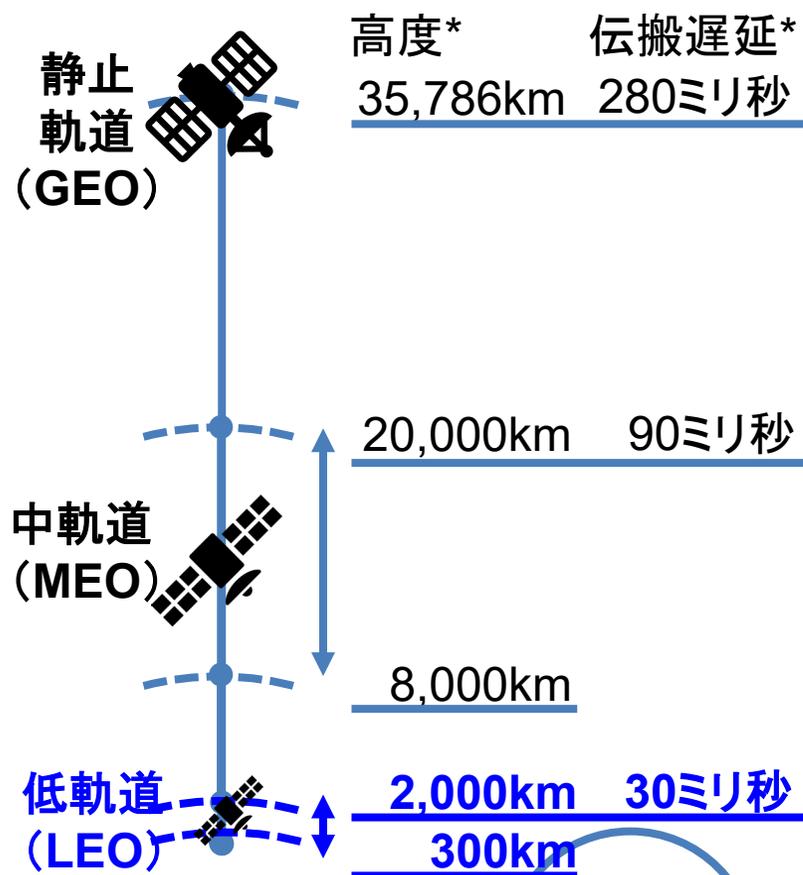
Viasat-3
1000ビーム級
容量：1Tbps



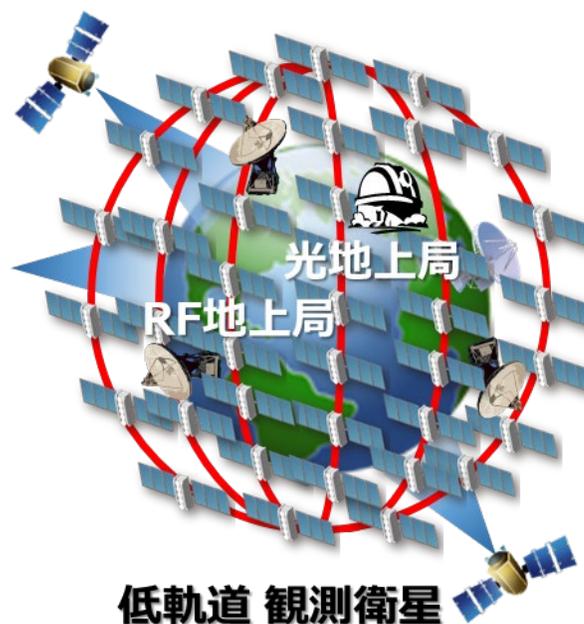
左上図： https://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2015/03/GX-10-things_e.pdf
 左下図： <https://www.inmarsat.com/service/global-xpress/>
 右上図： https://www.exede.com/viasat-satellite-internet-service/?_ga=2.235477377.1231254540.15984292861660798736.1598429286
 右下図： <https://www.viasat.com/news/going-global>

メガコンステレーションと成層圏無線通信 (HAPS)

- 数百～数千以上の小型衛星群を低軌道に投入しグローバルにカバーする衛星通信サービスを計画
- 静止衛星に比べ低遅延な通信が実現



低軌道衛星コンステレーション



成層圏プラットフォーム

- 特に20km付近は気象条件が穏やか
 - 大気希薄、常に晴天、太陽E補給
- 成層圏無線通信層**

50 km

(成層圏)

20 km

10 km

- 衛星系に比べて伝搬遅延 (0.3ms、静止軌道の800分の1)、電波減衰小 (100万分の1)
- 高い周波数の利用容易 (未利用周波数の有効活用に期待)
- 地上系に比べてサービスエリア大 (200kmのサービスエリア)
- 電波遮蔽、マルチパス影響小
- 1機での柔軟なシステム展開可能

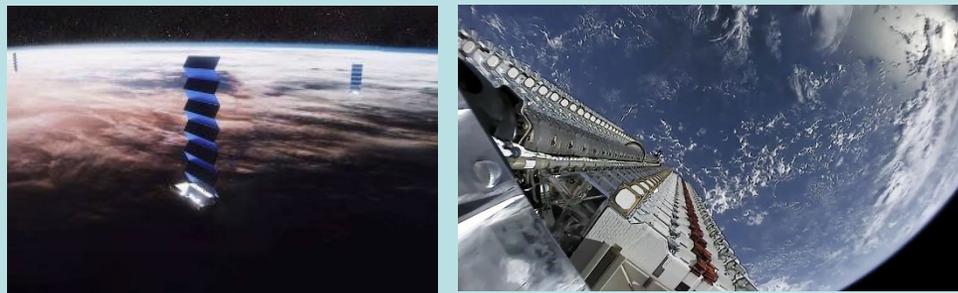
地上系無線通信層

*高度: Service requirements for the 5G system, 3GPP TS 22.262 V17.0.1, Oct. 2019の定義による地表面からの高度

*伝搬遅延: Service requirements for the 5G system, 3GPP TS 22.262 V17.0.1, Oct. 2019の定義によるone-way propagation delay

Starlinkの例

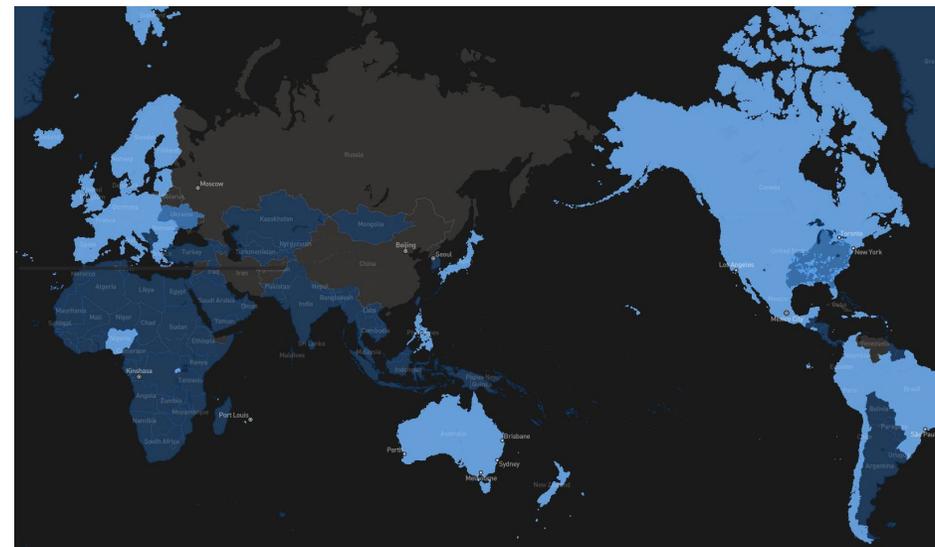
Starlink
LEO (340km, 550km, 1,150km)
2019年より打上開始(約5500機以上打上済)



左図: <https://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2019/06/post-12259.php>

右図: <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites-phone-home-dimming.html>

現在のサービスエリア



上図: <https://www.starlink.com/map>

- Starlinkは低軌道衛星
 - 高度550kmの約4,400機
 - 高度1,150kmのKu/Kaバンドを用いる約2,800機の衛星
 - 高度340kmのVバンドを用いる約7,500機の衛星
 - 参照: <https://spacenews.com/fcc-oks-lower-orbit-for-some-starlink-satellites/>
- Starlink Businessでは、150~350 Mbpsのダウンロード速度と20~40ミリ秒の低遅延を期待でき、オフィスや店舗などの環境で、最大20ユーザーを対象
- 航空機へのサービスも予定
- 衛星間は光通信を利用予定

現在のHAPSプラットフォームの開発状況



SCEYE Inc. (米)
飛行船型HAPS、152m長、40m直径
<https://www.sceye.com/>



STRATOBUS Thales (仏)
飛行船型HAPS、100m長、33m直径、ペイロード250kg、5kW電源供給
<https://www.thalesgroup.com/en>



Zephyr AIRBUS
固定翼HAPS、成層圏滞空3000時間の世界記録を持つ
<https://www.airbus.com/defence/uav/zephyr.html>

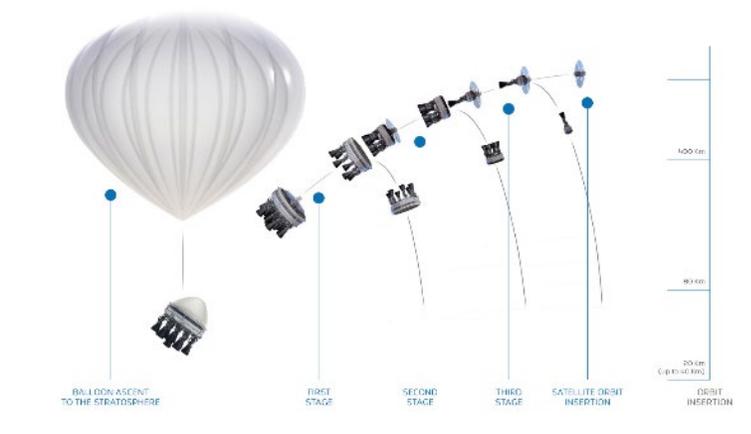


Stratospheric Platforms Limited (UK)
水素を動力源とし、飛行時間1週間以上、翼長60m、ペイロード140kgを目標として開発中
<https://www.stratosphericplatforms.com/>



ソフトバンク (日本)
固定翼HAPS, Helios, Pathfinderなどを開発したAV(米)とSoftbankとの合弁で設立
<https://www.softbank.jp/corp/philosophy/technology/special/ntn-solution/haps/>

Zero 2 Infinity (スペイン)
HAPSとは異なり、バルーンにて成層圏以上の高度まで衛星を持ち上げ、その後低軌道に衛星を打ち上げる
<https://www.zero2infinity.space/>



HAPSに関する動向（国際標準化）

項目	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年
ITU-R WP5C HAPSによる固定通信用の 周波数標準化	▲WRC-19 38-39.5GHz帯がHAPS広帯域通信システム 向けフィーダリンク周波数の特定					
ITU-R NTNとしてのHAPSの標準化				 新議題化提案		▲WRC-23
ITU-R WP5D HAPS搭載IMT基地局による 移動通信用の周波数標準化		 2.7GHz以下のHAPSからIMT移動局への直接 移動通信のサービスリンク周波数の特定			▲WRC-23	
3GPP NTN(Non-Terrestrial- Network)の標準化	 Beyond5GとHAPSを含むNTNとの ネットワーク融合にかかわる規定			▲Release-17発行	 Release-19	
					▲Release-18発行	
ICAO*, RTCA* HAPS及びドローン運航管理 の標準化		日本提案	▲MOPs *発行	▲SARPs *承認		
			5GHz帯でのHAPSを含む無人航空機のC2リンク (Command&Control) システムにかかわる規定			

* ICAO : 国際民間航空機関

* SARPs (Standard and Recommended Practices) : ICAOの標準文書



各標準化団体においてNTN/HAPSにかかわる議論が活発化。

WRC-23 議題1.4の結果 (参考)

	第一地域	第二地域	第三地域
694-960MHz RR 5.317Aを追記	<ul style="list-style-type: none"> 694-960MHzまたはその一部はHIBS使用として特定 694-728 / 830-835 / 805.3-806.9MHzはアップリンクに限定 	<ul style="list-style-type: none"> 698-960MHzまたはその一部はHIBS使用として特定 698-728 / 830-835 / 805.3-806.9MHzはアップリンクに限定 	<ul style="list-style-type: none"> (オーストラリア、モルディブ、ミクロネシア、パプアニューギニア、トンガ、バヌアツにおいて) 698-960MHzまたはその一部はHIBS使用として特定 (中国、インド、インドネシア、日本、韓国、マレーシア、フィリピン、タイにおいて) 703-733 / 758-788 / 890-915/935-960 MHzまたはその一部はHIBS使用として特定 698-728 / 830-835MHzはアップリンクに限定
1710-1885 MHz 1885-1980 MHz 2010-2025 MHz 2110-2170 MHz RR 5.388Bを削除 5.388Aを修正	<ul style="list-style-type: none"> 1710-1980 / 2010-2025 / 2110-2170MHzはHIBS使用として特定 1710-1785 MHzはアップリンクに限定 	<ul style="list-style-type: none"> 1710-1980 / 2110-2160MHzはHIBS使用として特定 1710-1785 MHzはアップリンクに限定 2110-2170 MHzはダウンリンクに限定 	<ul style="list-style-type: none"> 1710-1980 / 2010-2025 / 2110-2170 MHzはHIBS使用として特定 1710-1815 MHzはアップリンクに限定
2500-2690 MHz RR 5.384Aに追加	<ul style="list-style-type: none"> 2500-2690 MHzはHIBS使用として特定 2500-2510 MHzはアップリンクに限定 	<ul style="list-style-type: none"> 2500-2690 MHzはHIBS使用として特定 2500-2510 MHzはアップリンクに限定 	<ul style="list-style-type: none"> 2500-2655 MHzはHIBS使用として特定 2500-2535 MHzはアップリンクに限定

光衛星通信の特徴

高解像度化に対応する大容量伝送

- ・ 数Gbps超の伝送速度が実現可能
- ・ RFと比較し**大容量のデータダウンリンク**に貢献
- ・ **リアルタイムな観測エリア**が拡大



衛星バスや観測センサに対する影響軽減

- ・ 低消費電力化の可能性
- ・ 小さな衛星搭載装置の可能性（擾乱、重量等）
- ・ 光地上局は**10cm級**の望遠鏡で通信が可能であり小型化可能（コスト、建物、敷地、可搬性）

国際周波数調整不要

- ・ レーザは電波法の規制を受けない
- ・ 国際周波数調整不要でタイムリーな打ち上げに貢献
- ・ 標準化の必要性

高秘匿性のあるワイヤレス通信

- ・ RFに比べて小さなビーム
- 例) ビーム広がり角：約 1.2° (X帯)
約 0.001° (レーザ)
- ・ 漏洩電波による干渉や盗聴を気にする必要がない
- ・ 地上にデータ伝送した場合の秘匿性が高まる可能性



NTNを活用したネットワーク将来像



海外におけるNTN向けプラットフォーム及びシステムの開発状況・計画

→多軌道にまたがるハイブリッドNW

国内組織及び企業に対するヒアリングによるニーズ調査

→低遅延・超高速大容量通信



GEO+LEOにて構成される多軌道システム



研究開発の役割と進め方

政府の投資 (宇宙戦略基金等)

政府・大学

大学での研究開発

10-20年先の研究開発

連携 (人材育成、人材確保等)

国研での研究開発

先進的な研究開発 (TRLレベルの向上)

将来の先進技術の実装

政府のサービス調達

開発自在性確保・安全保障への通信サービス

民間

民間サービスの政府利用

先進技術の将来サービス化

民間の通信事業サービス

民間通信サービス

海外技術を利用した通信サービス

国内技術を利用した通信サービス

(海外依存から国内へ)

Starlink Kuiper AST Oneweb

国産システム開発

一部システム開発

日本らしい相互運用システム開発

戦略的コンポーネント/サブシステム開発

実用的な技術開発

国内企業の製造技術・量産技術

まとめ

- NTNでは、プラットフォームの進化、5G技術のNTNへの導入、標準化の進展などにより利活用が期待
- 二次元のネットワークから三次元のネットワークへの拡張
- Beyond 5Gでは海洋から宇宙までの三次元のシームレスな通信ネットワークの実現によるネットワークの拡張が重要。Beyond 5G/6Gの多様なアプリケーションの実現への寄与、宇宙通信の特徴を生かし分散型社会への移行に繋がる社会課題の解決が期待
- NTNでは衛星も含めより高い周波数（30GHz以上）の利用が期待され、そのデバイス開発も重要。しかも低消費電力化も重要
- 光通信は、電波と比べ伝送レートの増大に対応可能であり電波のひっ迫の過少に利用。特に宇宙では大気の影響がないため有利
- 光通信は雲、大気揺らぎによる回線品質の変動が電波よりも顕著となるため、回線品質により、ダイバーシティ地上局、LEO 通信網、RF フィーダリンクなどの迂回経路により通信品質を確保することが必要になる。
- HAPSは地上系と非地上系ネットワークを統合のためには重要
- 衛星開発では、GEO+LEOにて構成される多軌道システムが展開される