

HAPSを用いたミリ波帯バックホールシステムの の研究開発

2024年5月30日



SKY Perfect JSAT
Corporation

スカパーJSAT株式会社 通信システム技術部
北之園 展（きたのぞの ひろむ）

本日の内容

□ HAPSを用いたバックホールシステムの研究開発概要

- ✓はじめに・背景
- ✓ユースケースと目標設定、研究開発の観点
- ✓研究開発システムの紹介（HAPS搭載局と地上局との通信の仕組み、各無線局の仕様概要）
- ✓実証試験の一例・様子

□ HAPS回線におけるミリ波帯の電波伝搬モデルについて

- ✓HAPS回線の伝搬路について
- ✓HAPS回線の伝搬距離、自由空間損失、仰角と課題
- ✓機体遮蔽シミュレーション評価例
- ✓ミリ波回線について
- ✓降雨減衰
- ✓サイトダイバシティ

□ まとめ

HAPSを用いたバックホールシステム の研究開発概要

はじめに・背景

- 上空約20km付近の成層圏を飛行・滞留するHAPSは、5G以降のネットワークにおいて光ファイバーが地理的・コスト的に敷設できないエリアに対して、**非地上系ネットワーク（NTN：Non-Terrestrial Network）**によるカバレッジ拡張の手段の一つとして近年注目を集めている
- HAPSは、2019年のWorld Radiocommunication Conference (WRC-19)において、ミリ波帯の中の**38.0-39.5GHz**の周波数が割り当てられ、今後その活用が本格化する
- 本研究開発は、このミリ波帯を用いた**基地局向けのバックホール回線**をHAPSにて提供するシステムを想定し、令和2年度～令和5年度の4年間実施した

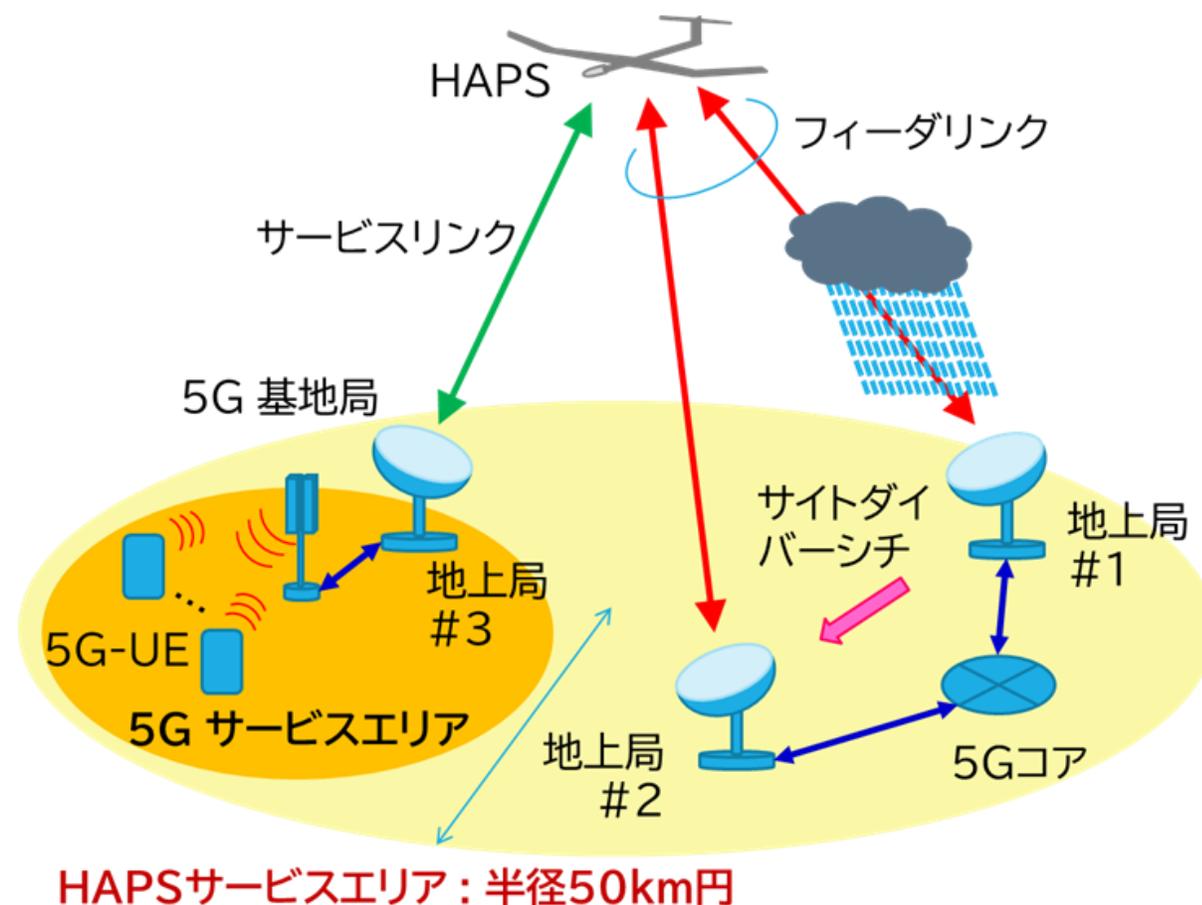


図1 HAPSバックホールシステム概要

ユースケースと目標設定

- ✓ 下記想定するユースケースにおいて、1Gbpsのスループット目標を設定（100MHz帯域帯域を両偏波利用時）
- ✓ 一般的なKuバンド衛星回線と同等の回線稼働率99.9%のミリ波帯回線稼働率を維持しながら、周波数利用効率を3bit後半から4bit台へ1.1倍以上、従来のKuバンド静止衛星のVSATシステムより改善させることを達成する

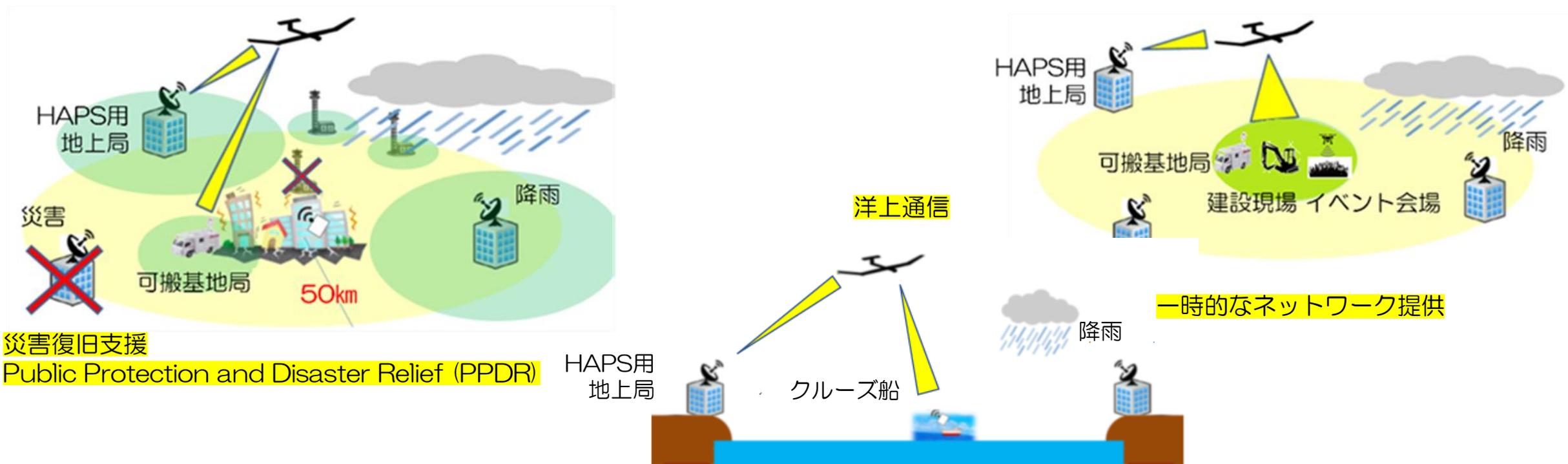


図2 様々なHAPSユースケース

研究開発の観点

□ HAPS搭載アンテナ通信システム

HAPSの滞留位置の変動や姿勢動揺、並びに成層圏の環境条件やHAPSの搭載要件の制約（重量、寸法、供給電力など）においても、無線回線を実現するためのHAPSに搭載する38GHz帯アンテナ通信システムの開発

□ HAPS地上局アンテナ通信システム

HAPSの不規則な滞留位置の変動においても、精度よく追尾が可能な対向する固定通信システム用高利得な地上局の開発

□ 5G網連携ミリ波降雨減衰補償技術

降雨減衰影響が大きい38GHz帯においても、従来の国内Ku帯の静止衛星システムを利用した携帯電話のバックホール回線と同等の回線稼働率を確保するための5G網と連動したサイトダイバーシチなどの降雨減衰補償技術の開発

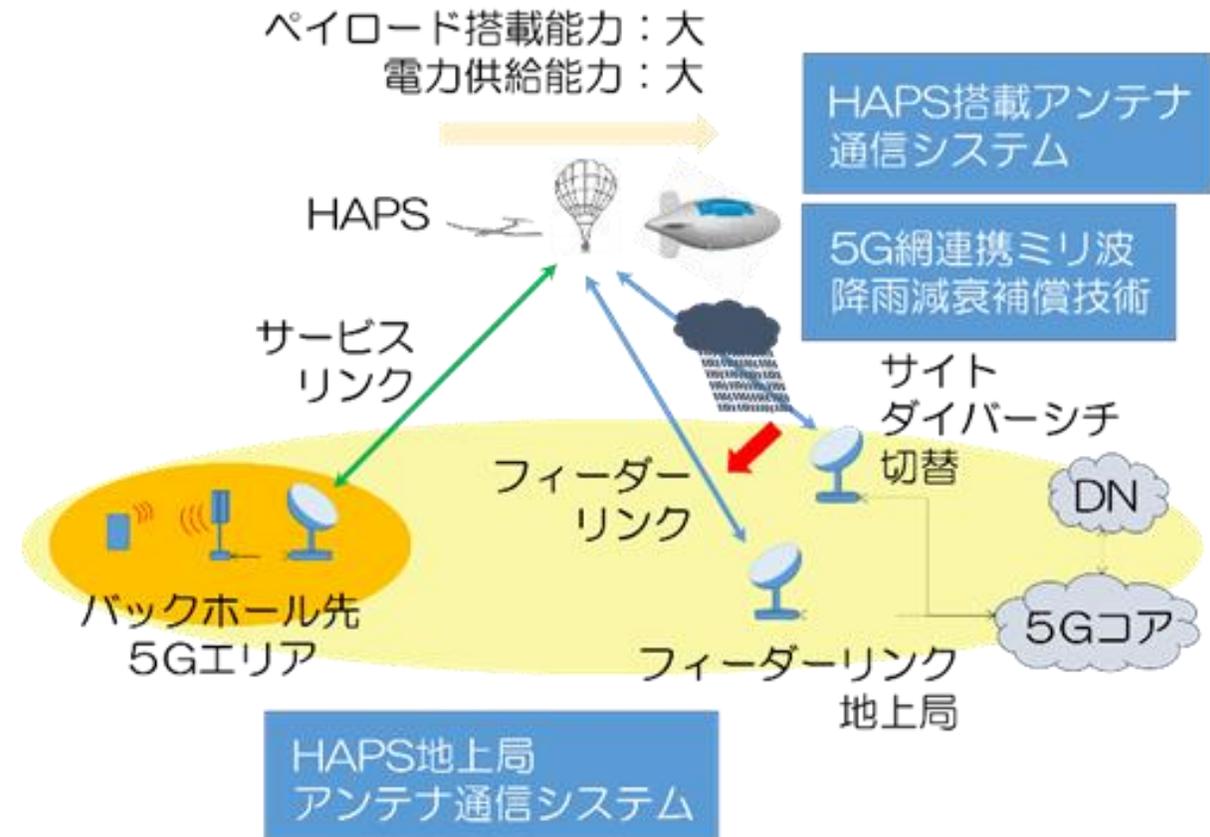


図3 3つの研究開発観点

HAPS搭載局と地上局との通信の仕組み

- HAPS搭載ミリ波システムは、5Gの基地局・コア機能・モデムをベースとした再生中継方式を採用し、OFDM/Sub-6の周波数帯をミリ波帯に周波数変換して利用する
- 対向するミリ波地上局システムも同様に5Gモデムをミリ波帯に周波数変換して利用し、結果的に、HAPS搭載局から見て、各地上局はUE (User Equipment) のように扱われる
- 3局の地上局のうち、任意の2局の地上局間の接続制御により5G閉域網を構成し、地上網の5Gコアと地上携帯基地局間のバックホール回線をHAPSにて提供する
- HAPS搭載と地上局のミリ波通信システムとは別に、HAPSの位置情報、地上局の位置情報などの伝送のための5GHz帯のC2 (Command and Control) リンクシステムを別途搭載し、ミリ波帯アンテナの捕捉追尾制御に使用している

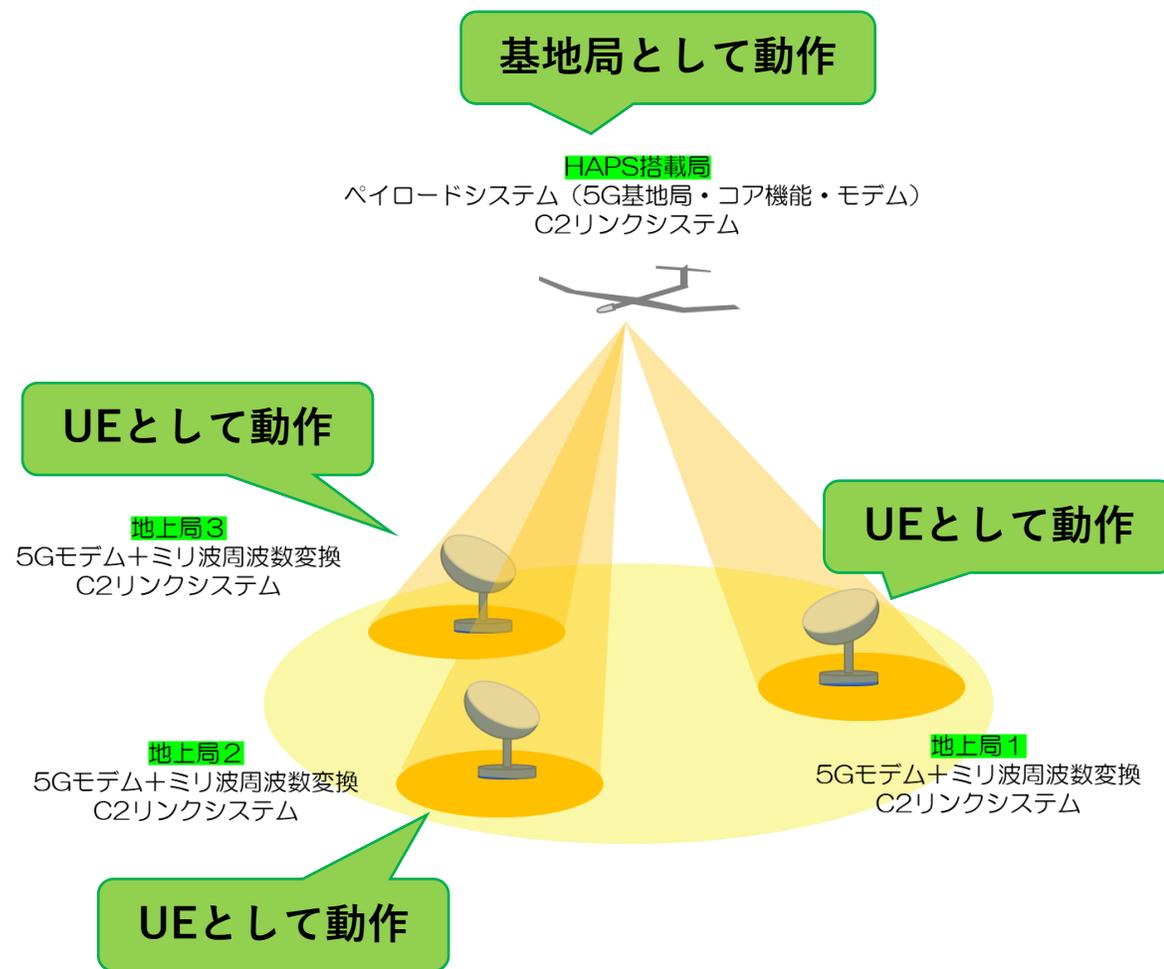


図4 HAPS搭載局と地上局の構成

HAPS搭載局の仕様概要

- コロナ禍やウクライナ情勢による影響により、当初計画していたドイツでの有人航空機による成層圏（約14km）の試験を断念した
- 国内での上空3~4kmのセスナ機に搭載する仕様に設計変更（伝搬ロスの差を考慮してスケールダウン）
：目標EIRP=33dBm（アンテナ利得20dBi）
- アンテナ7素子(3.6mmピッチ)×8層の計56素子@両偏波対応の高密度回路実装のフルデジタルアレイ型アンテナシステム
- C2リンク局による地上局の位置情報取得と、セスナ機体の姿勢情報や位置情報により、地上局へ精度良くビームフォーミングを行う

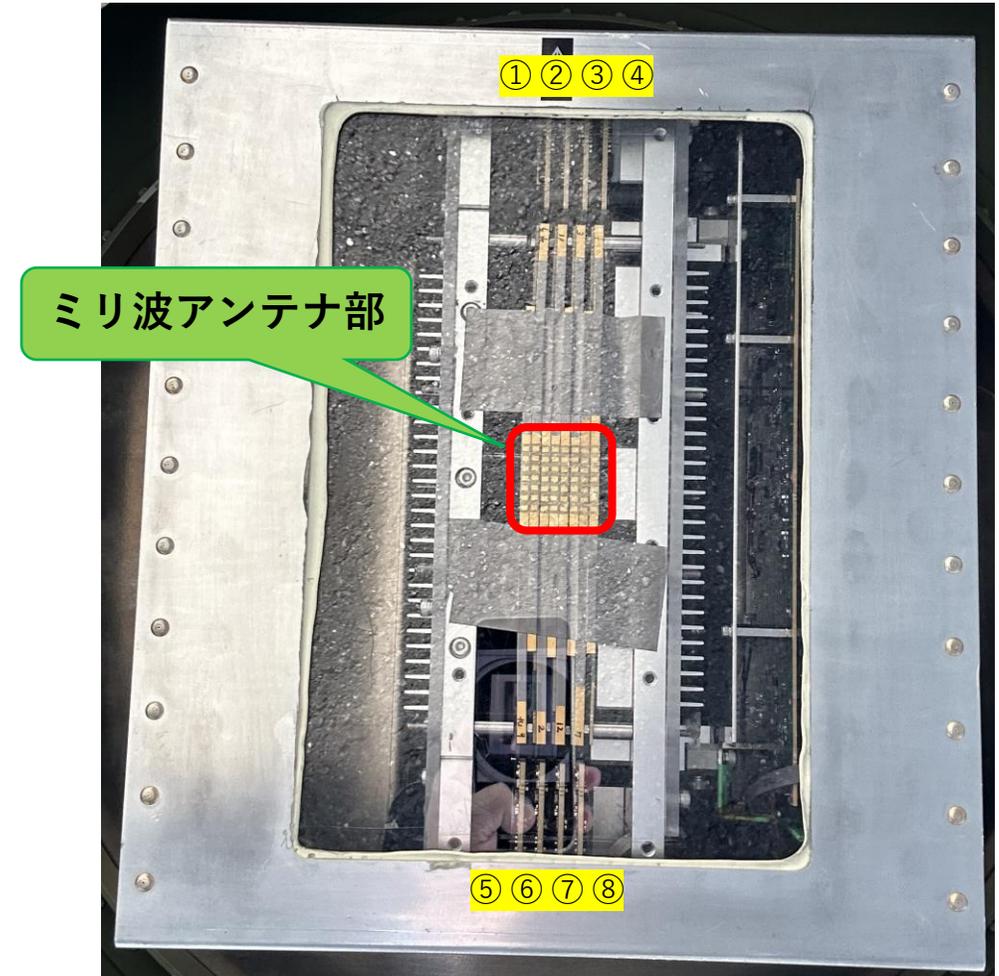


図5 ミリ波HAPS搭載局
(セスナ機搭載状況)

HAPS地上局の仕様概要

- ポリプロピレン誘電体レンズアンテナとアレイフィーダ（4×4素子）の組合せ
- 粗捕捉・粗追尾：ジンバルによる機械駆動制御（AZ回転台機構とELチルト機構）
- 精追尾：アレイフィーダによる電子追尾制御（パッチフィーダアレイとX-Yステージ機構）
- GPSコンパスによる位置・方位の検出、傾斜計によるロール・ピッチの検出
- C2リンク局によるセスナ機的位置情報の取得により、HAPS搭載局へ精度良くアンテナ追尾を行う

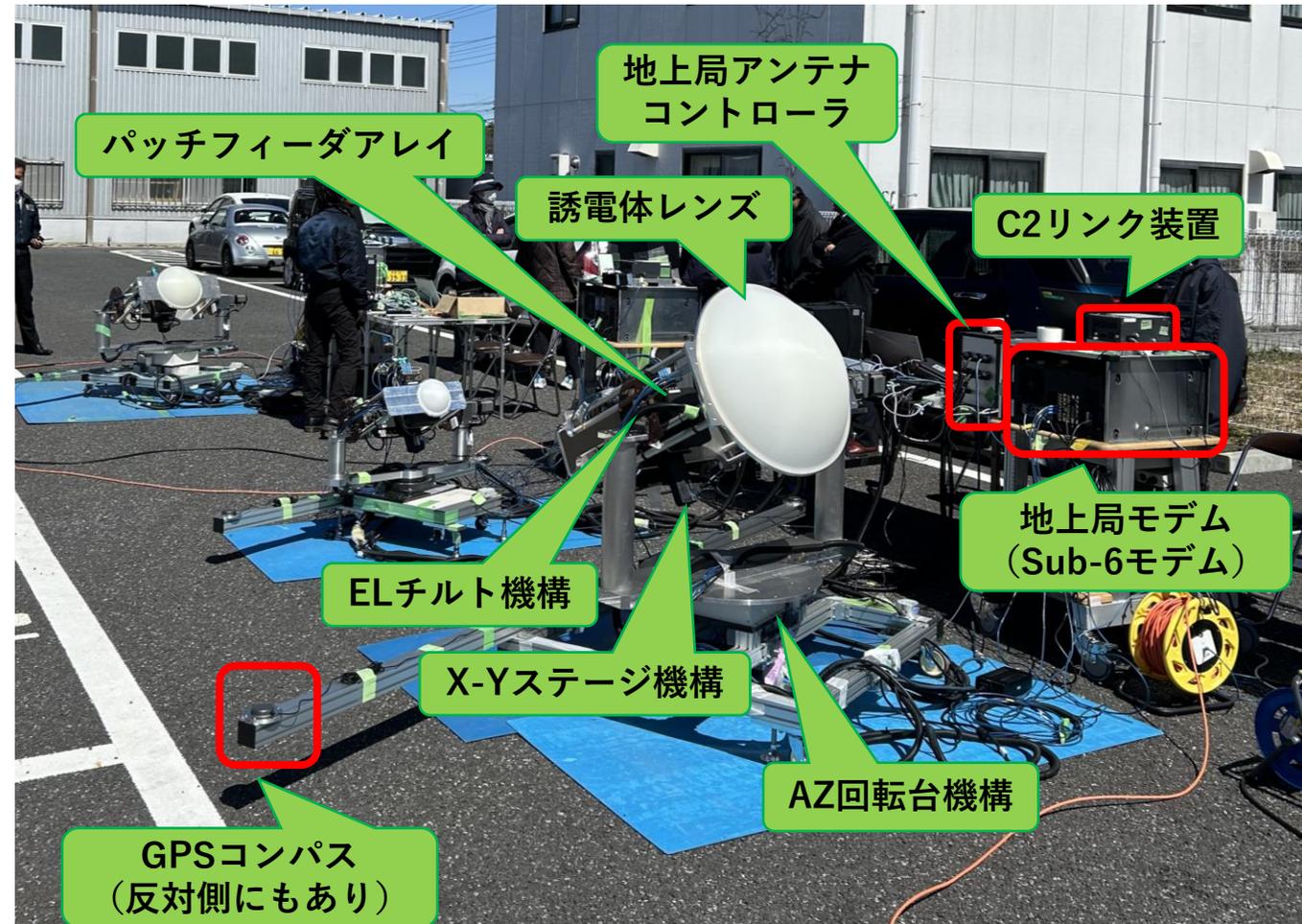


図6 地上局3局展開状況
(奥から、30cmφ、15cmφ、60cmφ)

C2リンク局の仕様概要

- 地上局アンテナのHAPSの初期捕捉及び追尾用途として、5GHz帯（5050MHz）を利用した双方向のGMSK/TDD通信方式によるデータリンク（地上局とHAPS搭載局の装置は同一仕様）
- パッチアンテナ（3.5dBi）によるブロードかつ高出力（0.2W）な送信による広範囲なエリアでの位置情報の伝送が可能



図7 C2リンク局
左上：本体、右上：セスナ機搭載状況
左下：地上局設置状況

実証試験の一例

- セスナ機を高度約3km～4kmにて飛行させ、それぞれの地上局にて追尾しながらHAPS想定回線のバックホールをコアネットワークと基地局（#1）間にて確立
- コアネットワークと通信端末間のE2EのIPレイヤの測定を実施
- 地上専用線をバックホールとする基地局（#2）を別途確立しておき、試験用通信端末にて基地局#1、基地局#2間のハンドオーバ
- 地上局#1と地上局#2間のサイトダイバシチ切替え

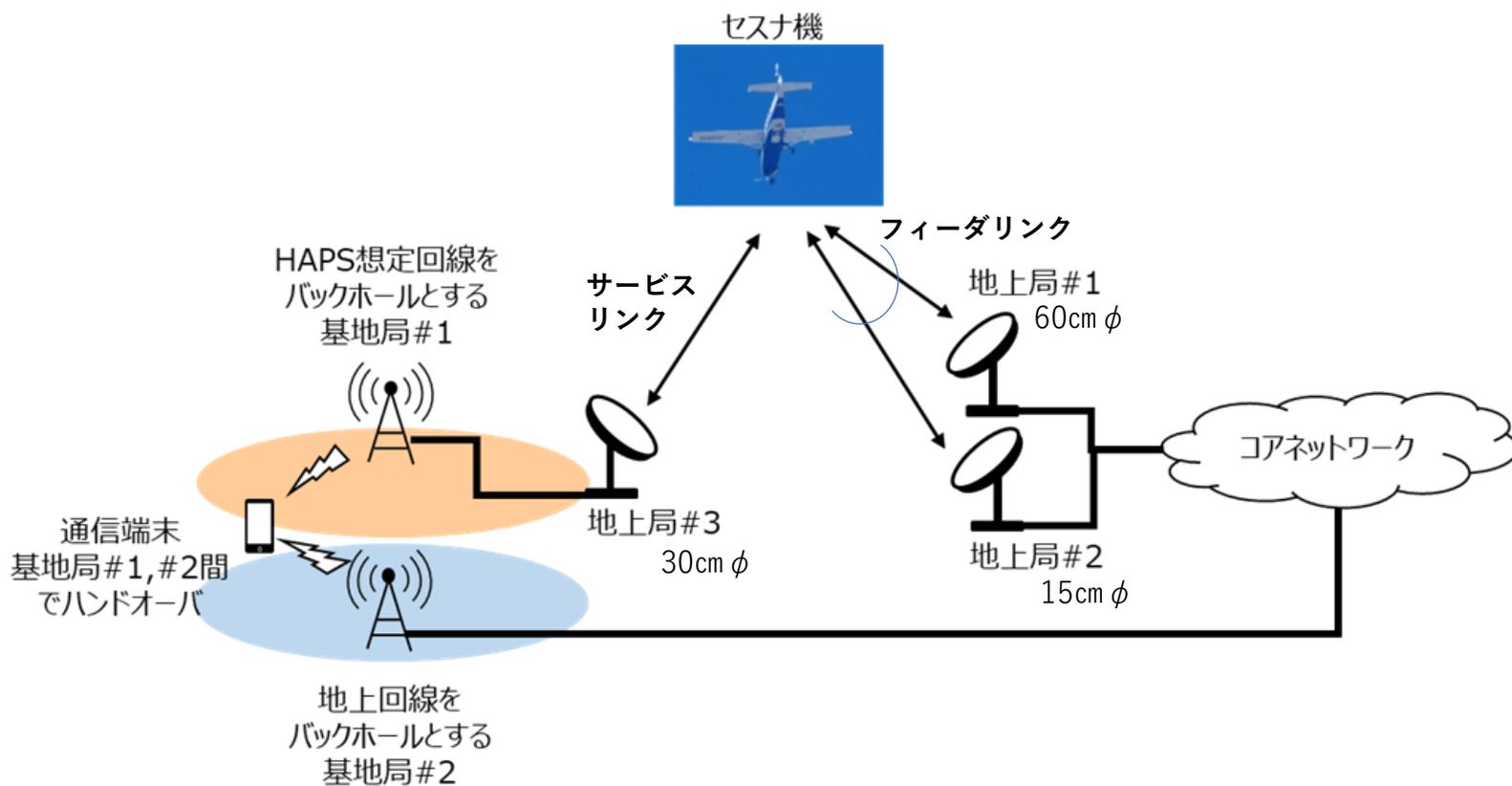


図8 実証試験の概要

実証試験の様子



モデムで得られたRSRP (Reference Signal Received Power) やSNRの値

5G NRでの状態が、“RRC_connected”

ID	IMSI	RNTI	Cat.	RRC	EMM	Cell (PCI)	RSRP	SNR	TA	Position	IP
2	001010000001009	4e30	nr	connected	registered	0x1	-79.2	8.3	1195	<none>	10.241.10.1, 10.242.10.1

図9 実証試験の様子

左上：アンテナ追尾動画、右上：スペアナ波形
右下：地上局モデムの表示

RRC (Radio Resource Control) : 無線ネットワークにおける無線リソースを制御するプロトコルで、“connected” は無線リンクが確立している状態

HAPS回線におけるミリ波帯の電波伝搬モデルについて

HAPS回線の伝搬路について

HAPS回線の伝搬距離、自由空間損失、仰角

- 上空20kmに滞留するHAPSとサービスカバレッジ内の地上局との位置関係は、図10
- HAPSは一定範囲内（円筒形に例えられる）で刻々と飛行位置が変わるため、伝搬距離や自由空間損失、地上局の仰角は、表1のように意外と変動する

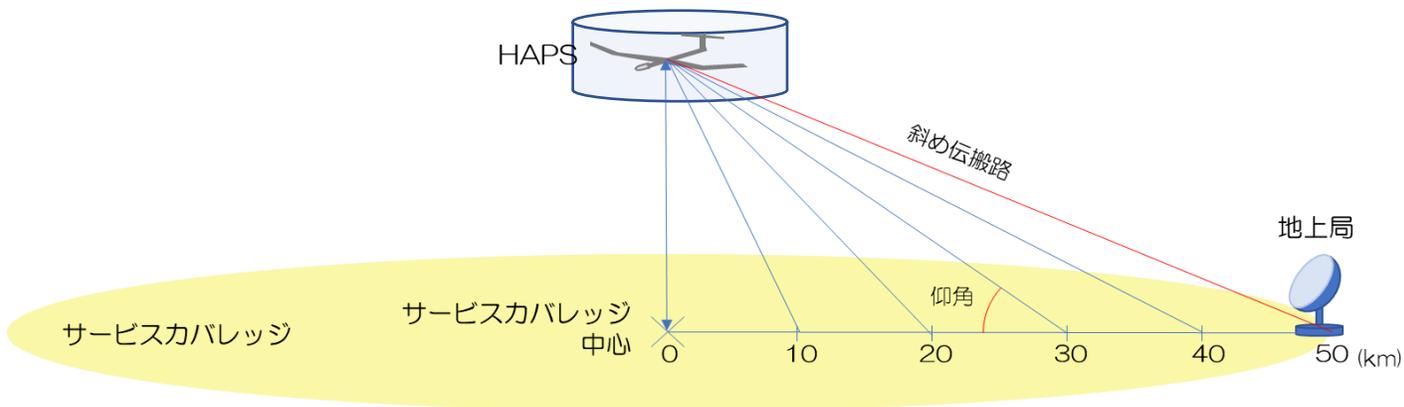


図10 HAPSと地上局の位置関係

表1 各地上局位置での伝搬距離、自由空間損失、仰角

サービスカバレッジ中心からの距離	単位		0	10	20	30	40	50
	km							
伝搬距離	km	最小	18.0	18.0	20.6	26.9	35.0	43.9
		最大	24.2	29.7	37.2	45.7	54.6	63.9
		差	6.2	11.7	16.6	18.7	19.6	20.0
自由空間損失 (39GHz)	dB	最小	149.4	149.4	150.5	152.9	155.1	157.1
		最大	151.9	153.7	155.7	157.5	159.0	160.4
		差	2.6	4.4	5.1	4.6	3.9	3.3
仰角	deg	最小	60.9	42.0	31.0	24.2	19.8	16.7
		最大	119.1	90.0	65.6	47.7	36.3	28.8
		差	58.1	48.0	34.6	23.5	16.5	12.1

例として、円筒形の中心点をサービスカバレッジ中心点上空20kmとし、直径を20km、高さ4kmと仮定し算出

HAPS回線の課題（1）追尾

- サービスエリアのフットプリントを固定するため、HAPSは上空の一定の範囲内に留まりながら機体を旋回（円または8の字）して運用する必要があるが、成層圏の気象条件などの外的要因もHAPS機体の飛行コースや姿勢に少なからず影響を及ぼす
- そのため、HAPS搭載アンテナのビームを目的の方向に正しく指向させるか、あるいはブロードなビームとして変動をある程度吸収しておくとかが必要となる
- HAPS搭載アンテナがブロードなビームの場合、同一周波数干渉の要因にもなり、またアンテナ利得も低いため回線容量を大きく取りづらく、周波数利用効率が低下する
- 地上局は何れにせよ範囲内の不規則な位置を飛行するHAPSを追尾する必要がある

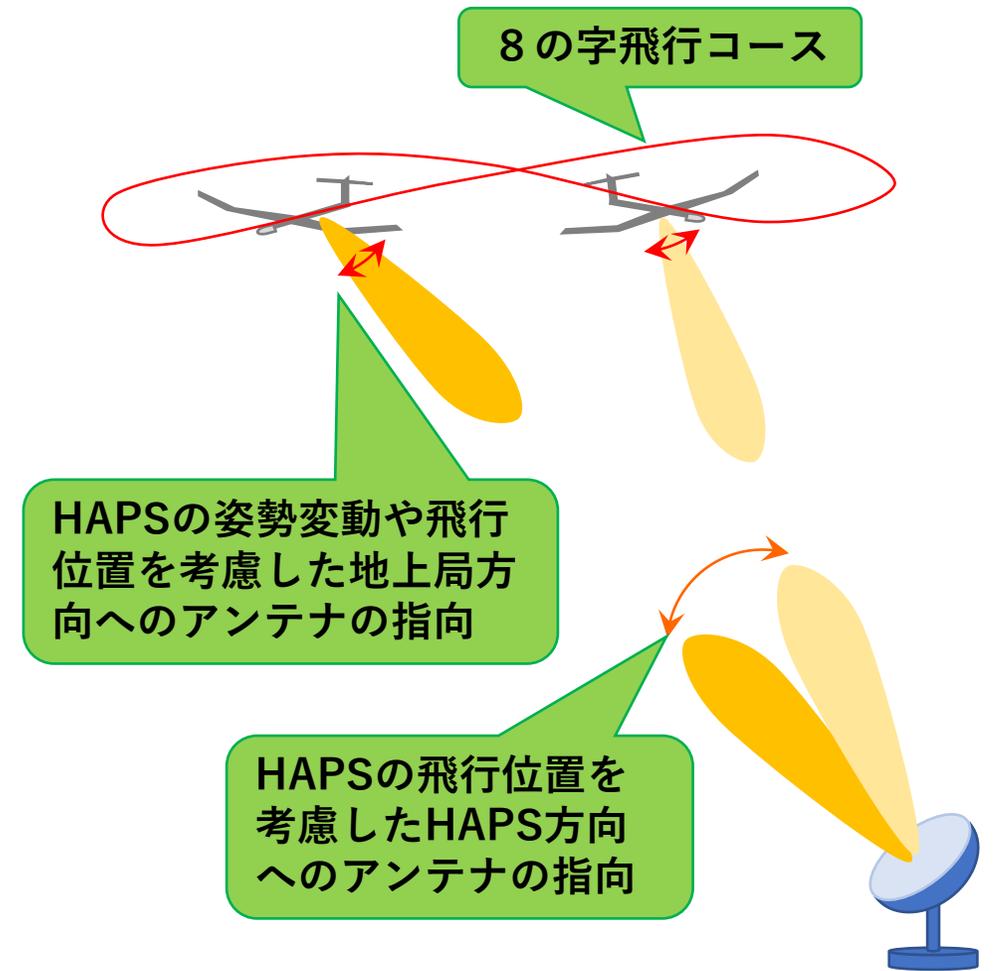


図11 HAPS搭載アンテナと地上局のアンテナの追尾の必要性

HAPS回線の課題（2）機体遮蔽

- HAPSへの機器搭載については、全体の重量やバランス、搭載可能な位置・サイズなどを考慮して決定されるため、自由度はそれほど大きくない
- アンテナ部分も空中に露出しているとは限らず、また搭載位置によっては姿勢の変動とビーム指向方向により、機体遮蔽やマルチパスが生じてしまう可能性もあり、姿勢変動による損失を見込んでおく必要がある
- また機体の翼など遮蔽となる構造物も外的要因で変形するため損失量も一定ではない

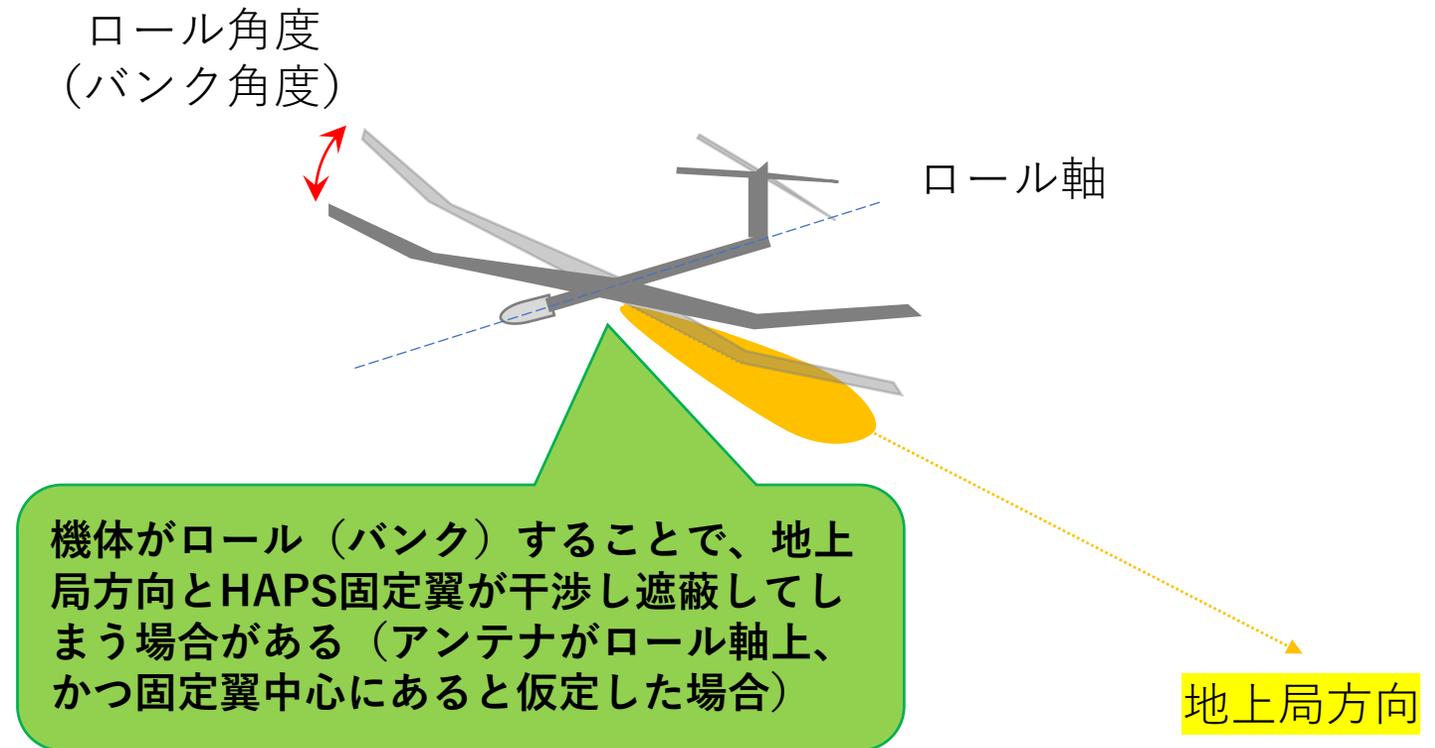
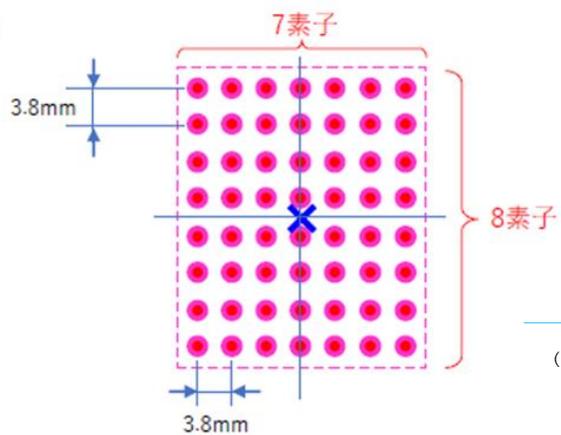
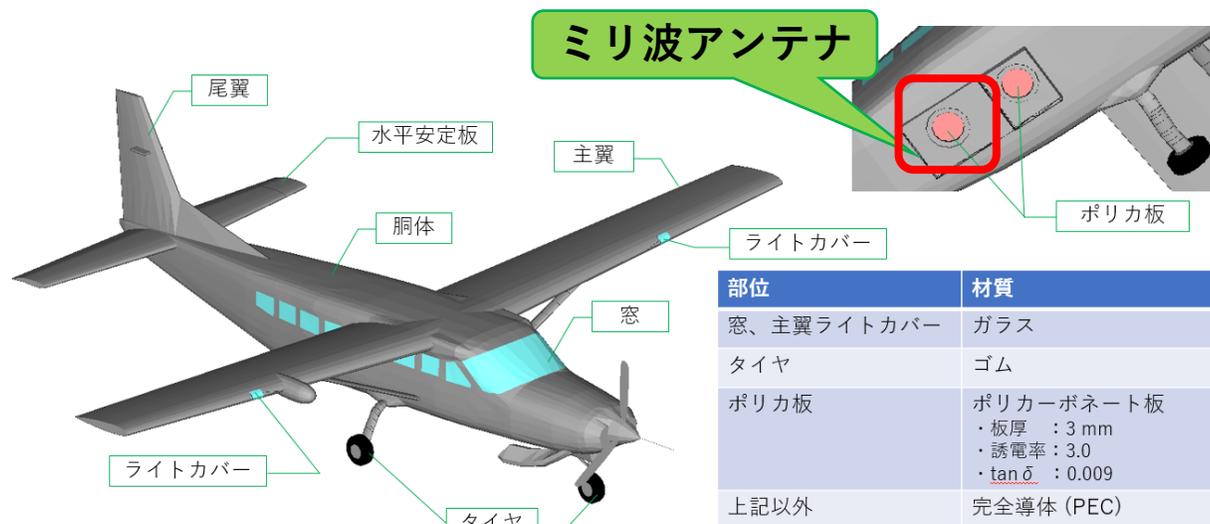


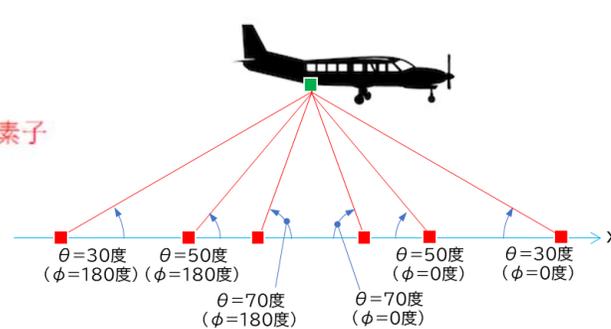
図12 HAPS搭載アンテナ位置と機体遮蔽の関係

機体遮蔽シミュレーション評価例

- 実証試験時に使用したセスナ機の3Dモデルを作成し、ミリ波アンテナ（56素子）を機体の底部のシャッター部内側の実機と同じ位置に配置
- 機体のバンク角がそれぞれ、0度、10度、15度の時の機体の前方／後方、右側／左側の機体と並行、直交の特定の仰角方向（ θ ）でのアンテナ利得についてレイトレース法にて計算



機体と並行



機体と直交

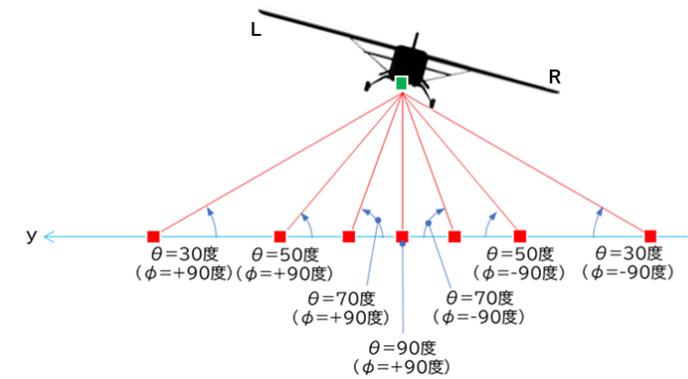


図13 実証試験時に使用したセスナ機体の3Dモデル作成とミリ波アンテナ配置

機体遮蔽シミュレーション評価結果例 (1)

- 概ね19.0dBi (垂直偏波)、19.3dBi (水平偏波) 付近となり、直接波が支配的
- 見通しが確保され、バンク角0度と結果が概ね一致

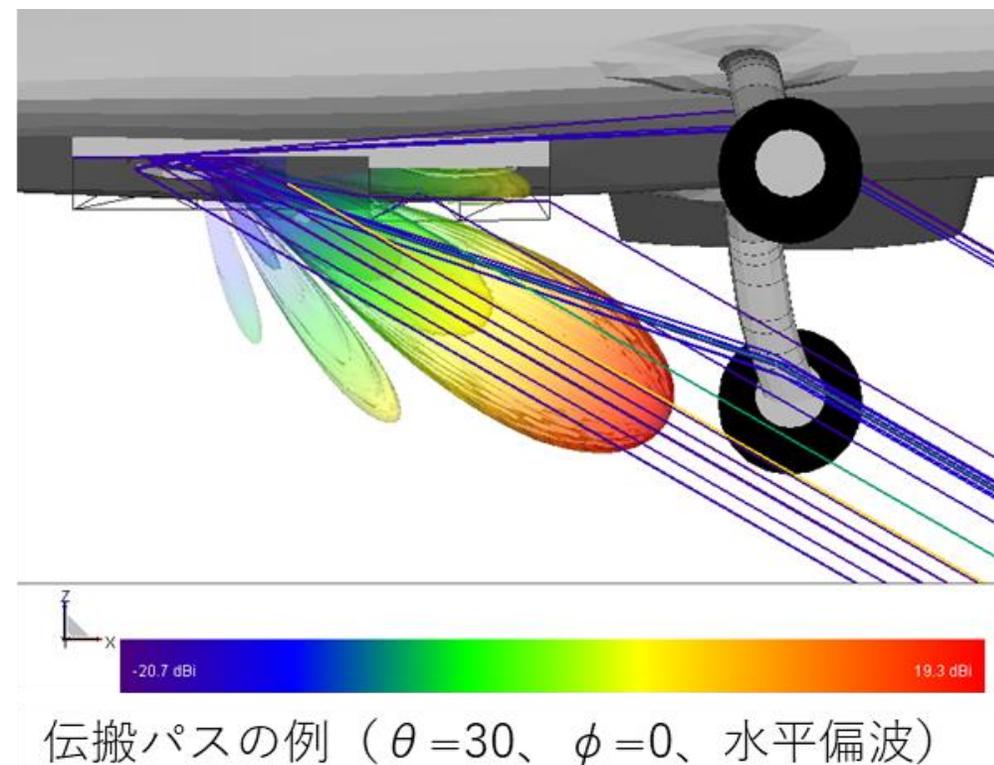
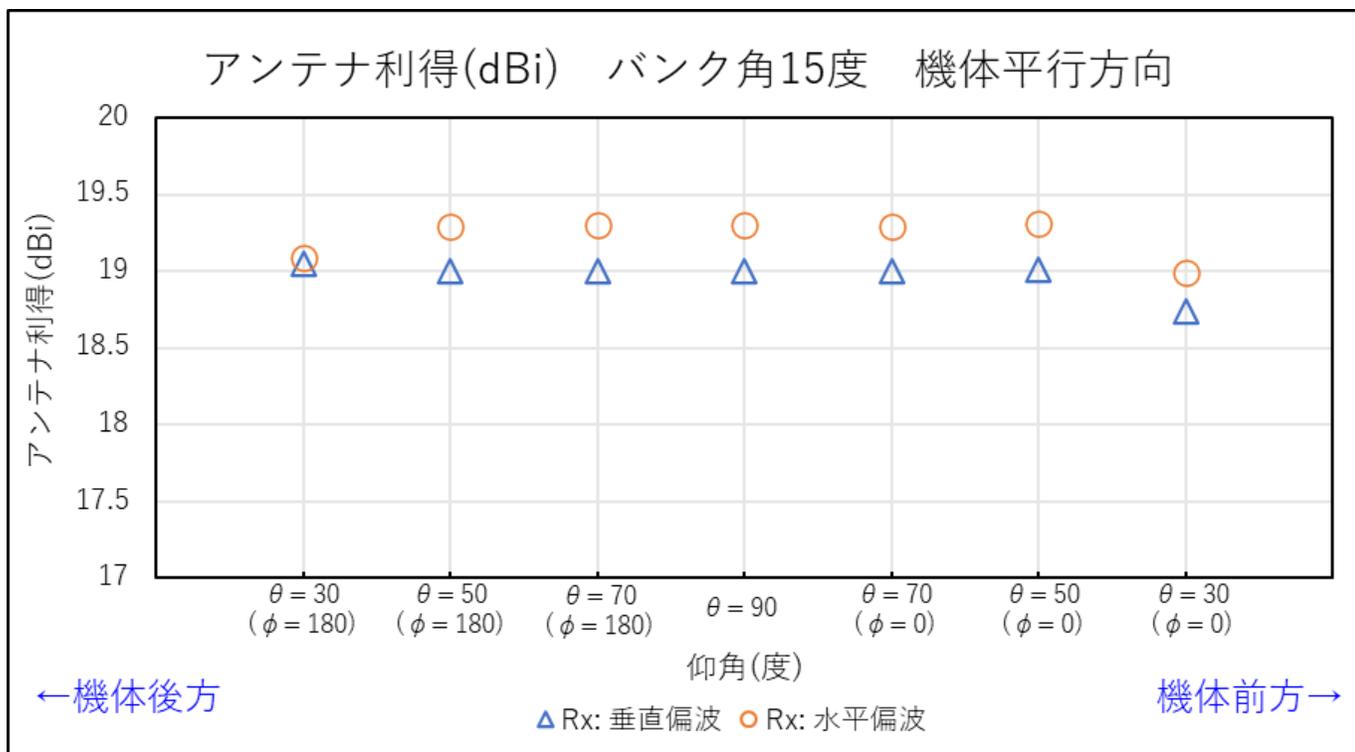


図14 バンク角15度における各仰角方向のアンテナ利得：機体並行方向

機体遮蔽シミュレーション評価結果例 (2)

- 非遮蔽状態においては、平行方向と同様に、概ね19.0dBi（垂直偏波）、19.3dBi（水平偏波）付近となり、直接波が支配的
- 遮蔽状態（ $\theta=28$ 度以下）でメインローブが機体により遮蔽されており、アンテナ利得が約40dB減少した。それ以降の遮蔽状態による変化は、主にマルチパスによる位相の変化の影響と推定。

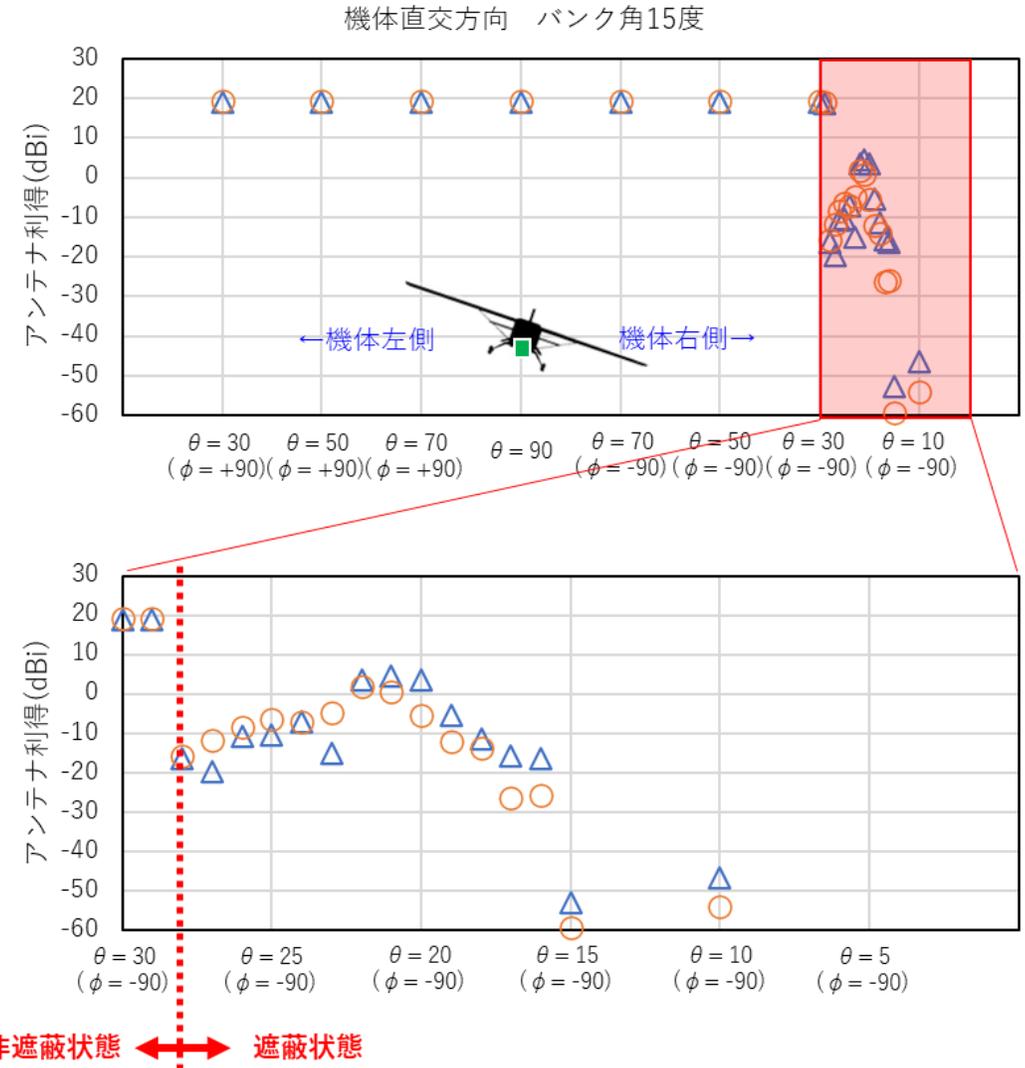
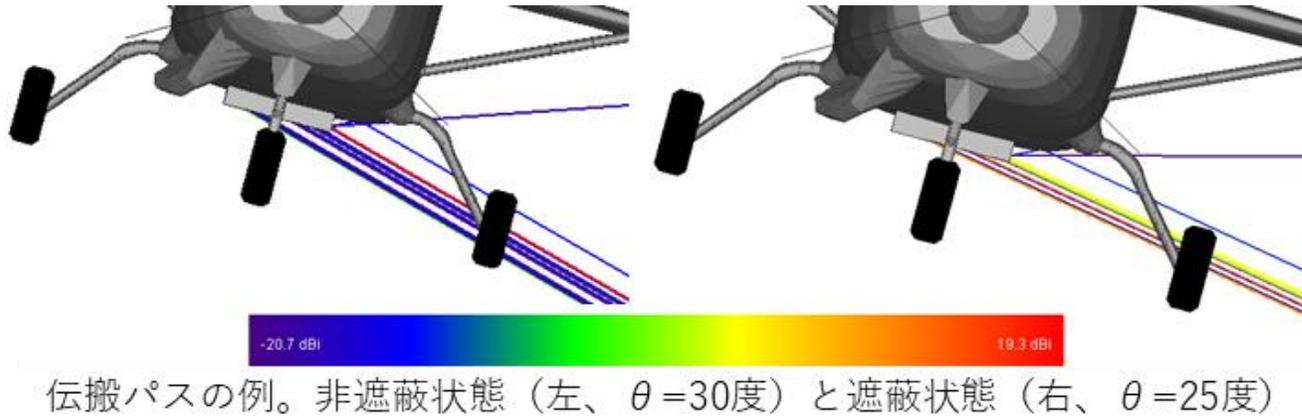


図15 バンク角15度における各仰角方向のアンテナ利得：機体直交方向

ミリ波回線について

その他回線設計上考慮する必要がある項目

- 自由空間損失 (* 1)
- **降雨減衰・サイトダイバシチ (* 1)**
- 大気吸収損失 (* 1)
- 雲による減衰 (* 1)
- 低仰角によるシンチレーションの影響 (* 1)
- 地形による損失
- 植生による損失
- クラッタ損失
- 屋内侵入損失
- 人体遮蔽損失
- 海上伝搬による影響



* 1 : Satellite Communications Toolboxにて対応

ミリ波における単位長当たりの降雨減衰量

- ある降雨強度（雨の強さ）に対する各周波数の単位長（1km）当たりの減衰量（specific rain attenuation）は、図16
- ITU-R勧告P.837-7による年間時間率0.1%の確率で生じる各地の降雨強度に対し、右図から周波数38GHzでのspecific rain attenuationを読み取った結果は、表2

表2 年間時間率0.1%に対する各地の降雨強度と単位長あたりの降雨減衰量

	東京	札幌	那覇
降雨強度 (mm/h)	18.7	12.6	29.4
Specific Rain Attenuation (dB)	5	4	8

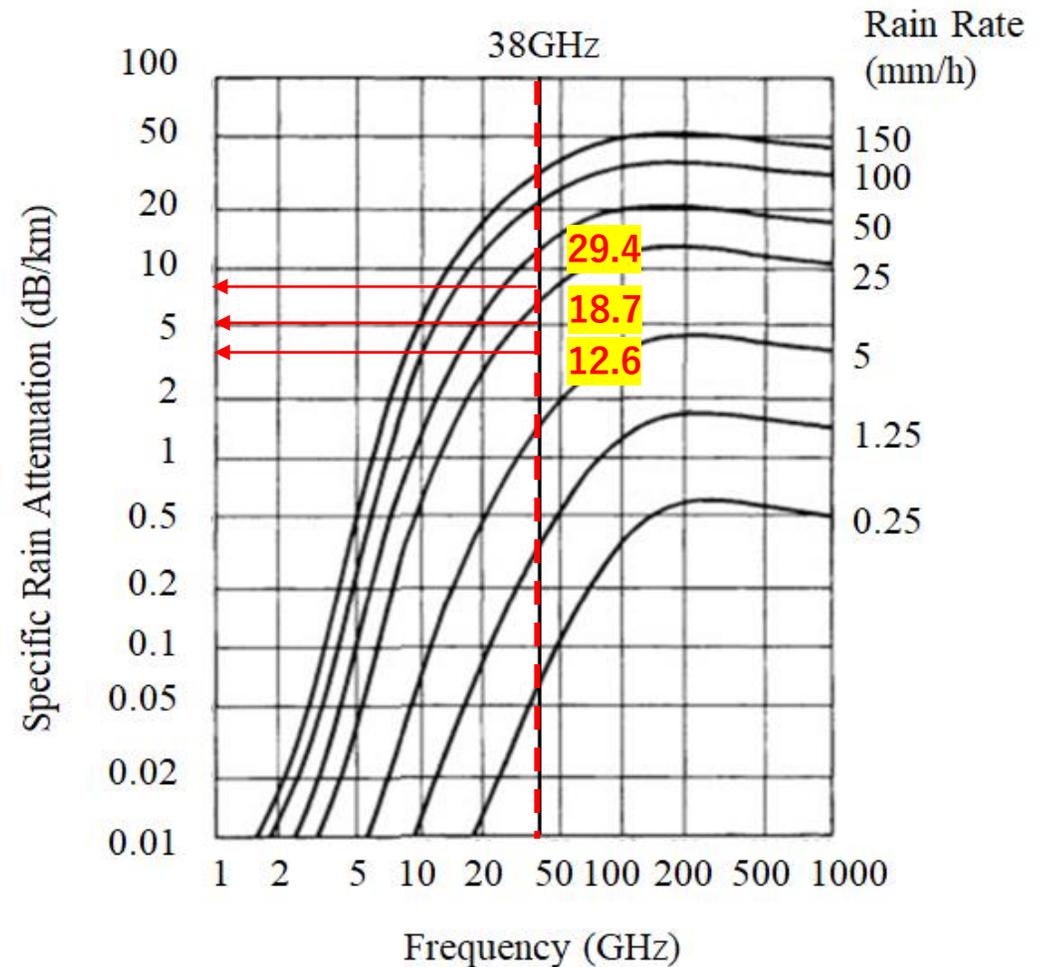


図16 降雨強度に対する各周波数の減衰係数

ITU-R勧告P.618斜め降雨伝搬路長

- 各地の降雨高度（雨滴層高度）が異なるため、斜め降雨伝搬路長についても仰角の違いと同様に異なる結果となる（図17、表3）
- 斜め降雨伝搬路長に前頁の単位長あたりの降雨減衰量を乗ずることで、降雨減衰量を推定（降雨強度が伝搬路にて一様に分布する）できるが、ITU-R勧告では、さらに経験値に基づく補正のため実際は実効伝搬路長（Effective Path Length）にて算出する

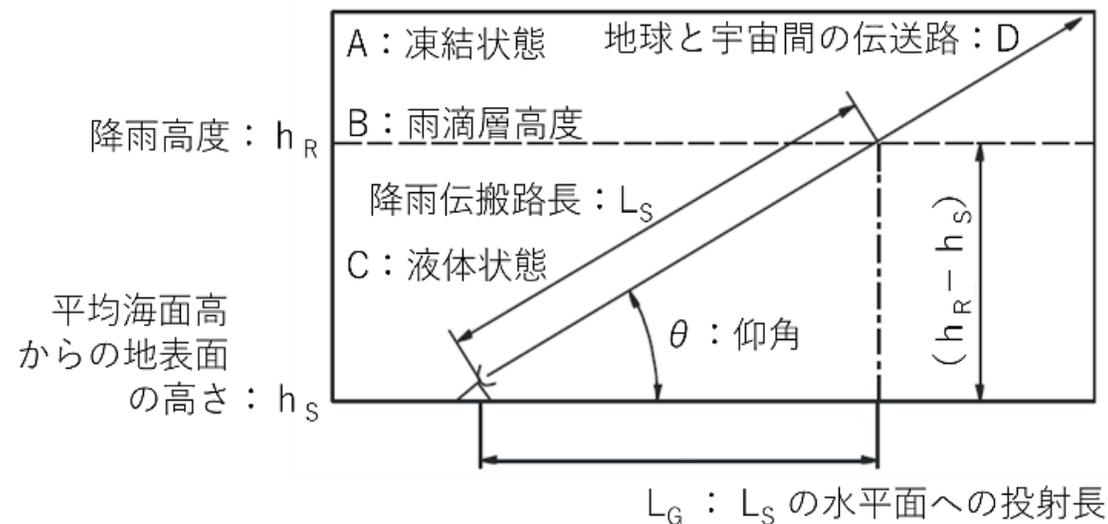


図17 ITU-R勧告P.618-13の降雨伝搬路長

表3 ITU-R勧告P.618-13による各地の斜め降雨伝搬路長

サービスカバレッジ中心からの距離 (km)		0	10	20	30	40	50
仰角 (度)		90.0	63.4	45.0	33.7	26.6	21.8
斜め降雨伝搬路長 (km)	東京	4.1	4.6	5.9	7.5	9.3	11.2
	札幌	2.4	2.7	3.4	4.3	5.3	6.4
	那覇	4.7	5.3	6.7	8.5	9.4	12.7

降雨減衰量CDFカーブ

- ITU-R勧告P.618-13の計算手法による、周波数40GHzにおける各地の年間時間率に対する降雨減衰量CDF (cumulative distribution function)のカーブは、図18
- グラフの見方の例として、東京における年間時間率0.1%（年間8.76時間に相当）に対する降雨減衰量は、サービスカバレッジ中心からの距離が10kmの地点（仰角63.4度）において約28dB、距離が50kmの地点（仰角21.8度）において約44dBと見積ることが出来るため、当該リンクにおいて0.1%の年間稼働率を維持するためには、相当する降雨減衰補償量を賄う必要がある
- 那覇など多雨地域においては、同じ0.1%でも補償量が60dB超と非現実的な値（または、より高い0.01%の要求品質も同様）

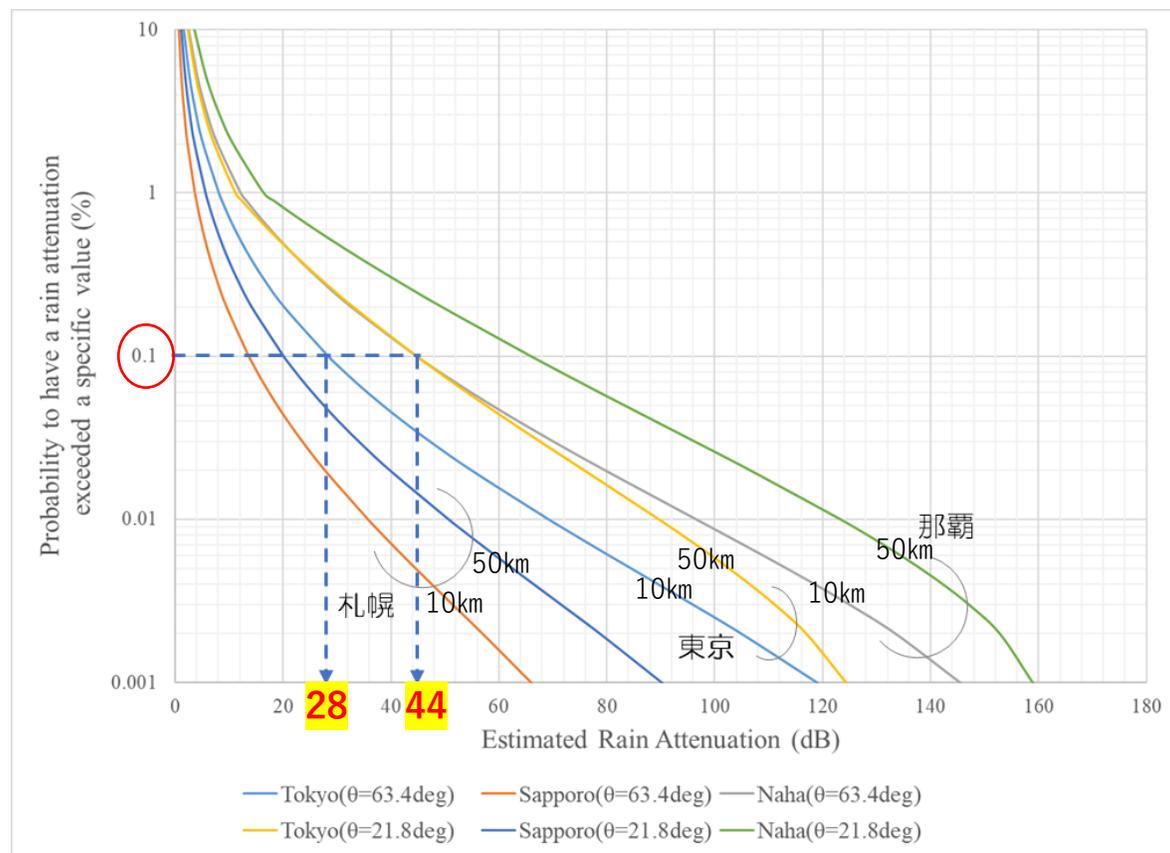


図18 各地での降雨減衰量CDFカーブ
(周波数40GHz)

基本的な降雨減衰補償の手段

- 基本的な降雨減衰補償の対策技術を分類は、表4
- コストを勘案し組み合わせで対策をとるが、補償量には上限がある

表4 基本的な降雨減衰補償の手段一覧

番号	手段	詳細	適用例
1	さらなる晴天時リンクマージンの確保	送受信の回線品質を回線させるため、場所によりアンテナ径を大きくする、あるいは送信機出力を大きくするなどを行う	サービスカバレッジ端においては、地上局が使用するアンテナ径を標準サイズの倍とすることで、アンテナ利得を約6dB大きくする対策をとる
2	ATPC (Automated Transmit Power Control：自動送信電力制御)	地上局の設置場所において、降雨モニターや基準信号の品質モニターを具備し、リアルタイム観測することで降雨減衰量の観測値に応じた送信電力の増力制御を自動的に行う	地上局に雨量計を設置し、10dBのATPC量を確保できるように送信機出力をその分見込んで大きいサイズとするとともに降雨時に自動的に送信電力の制御ができるように機能追加をする
3	ACM (Adaptive Code and Modulation：適応コード変調)	使用するモデムのパラメータのうち、降雨時にはより降雨耐性の強いモードに自動的かつシームレスに遷移させてパラメータ変更を行う（その分スループットが低下する）	晴天時の運用モードを256QAMのMCSインデックス27（所要SNR約25dB）でスループットを最大化して運用し、降雨時には適応変調により16QAMのMCSインデックス12（所要SNR約5dB）のスループットの運用下限値にまで落とすことで約20dBの回線断までのマージンを捻出する（スループットは、晴天時の約1/5に低下）
4	サイトダイバーシチ	運用している局において、降雨が激しくなり運用閾値となった場合、距離の離れた別の場所のバックアップ局へ運用を切り替える（バックアップ局までの信号ルートを別に用意する）	降雨による減衰量により、晴天時の運用SNRが約30dBから下限値の約5dBとなったため、晴れているバックアップ局に運用を切り替える

サイトダイバーシチ運用例

- 一般的なサイトダイバーシチ運用は、図19のようにATPCやACMでも降雨減衰が補償できなくなったレベルに達した時に適用され、また切り戻しの際は十分な天候の回復を待って切り戻しが実行される
- 切り替え先の天候は“晴れ”であることを期待（天候の相関性が小さい前提）

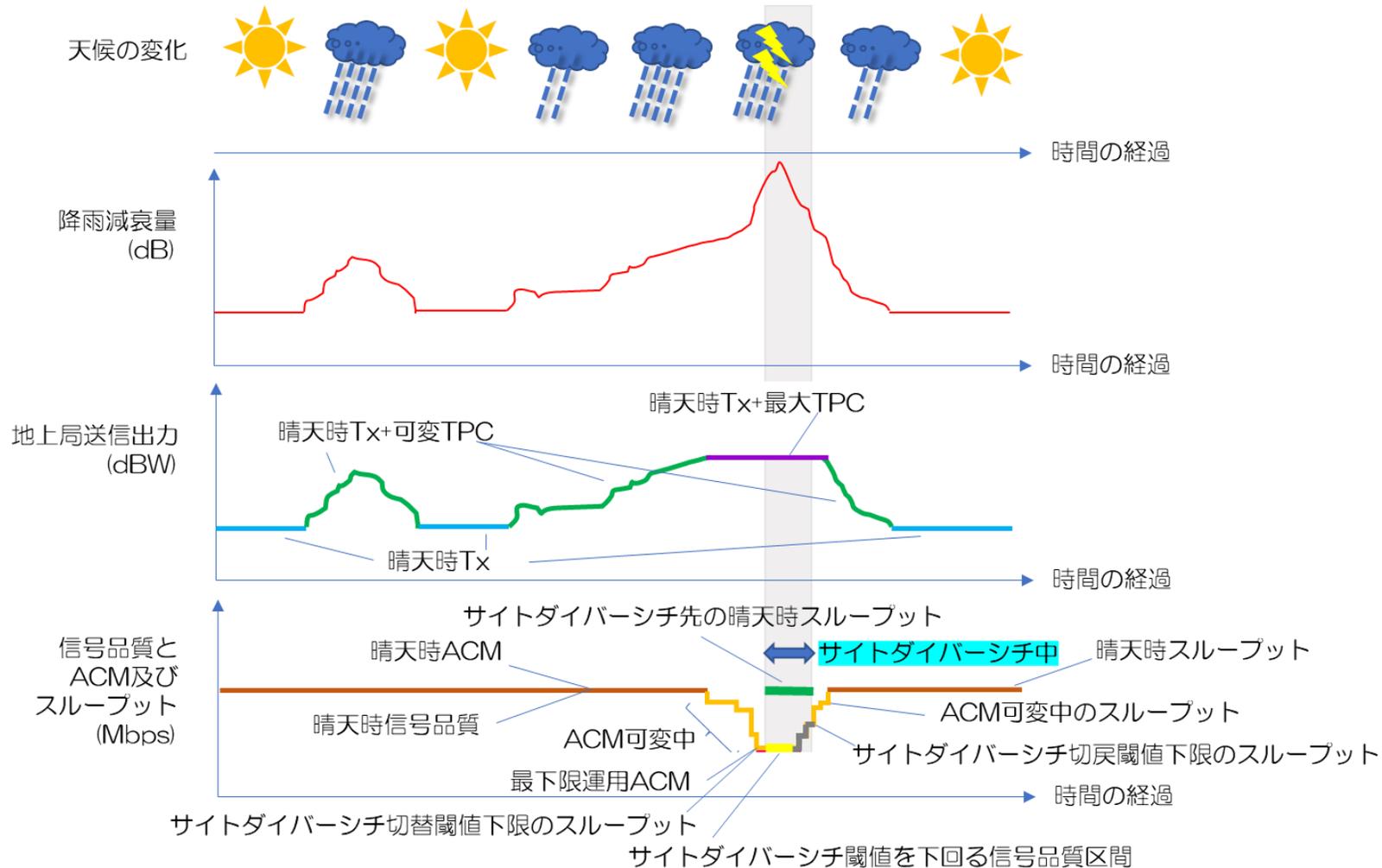


図19 一般的なサイトダイバーシチ運用

HAPSでのサイトダイバーシチ運用上の課題

- サービスカバレッジが比較的狭いHAPSは降雨の相関が大きいいため、サイトダイバーシチによる効果（ゲイン）が十分に見込めない懸念がある
 - サイトダイバーシチ先または、切り戻しの先が必ずしも晴れているとは限らず、切り替えようにも切り替えられず、両方回線断となってしまう懸念
 - サイトダイバーシチ先に切り替わったとしても直ぐにサイトダイバーシチ先も切替閾値に達してしまい、また元に戻ってしまうことを繰り返し、ネットワークに多大な負荷が生じてしまう懸念



図20 HAPSリンクのサイトダイバーシチの課題

ITU-Rでのサイトダイバーシチゲイン計算

- 2局間の距離と、それぞれの場所での特定の降雨減衰量を生じさせる発生確率を算出し、さらにその事象が同時に発生する確率を求めることで、サイトダイバーシチ局がある場合と、無い場合の同じ時間確率で比較したときに、どの程度降雨減衰量の差（どの程度の時間率までサイトダイバーシチを導入すると、導入しない場合と比較して改善するか）が生じるかを求める

サイトダイバーシチを導入した場合の降雨減衰量に対する不稼働時間推定: $100 \times P_r \times P_a$ (%)

2か所が同時に降雨である時間確率: P_r (%)

2サイトの降雨減衰量 A_1 、 A_2 が、それぞれ a_1 、 a_2 (dB) を上回る時間確率: P_a (%)



- P_r , the joint probability that it is raining at both sites; and
- P_a , the conditional joint probability that the attenuations exceed a_1 and a_2 , respectively, given that it is raining at both sites; i.e.:

$$P_r (A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2) = 100 \times P_r \times P_a \% \quad (25)$$

These probabilities are:

$$P_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_r^2}} \int_{R_1}^{\infty} \int_{R_2}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{r_1^2 - 2\rho_r r_1 r_2 + r_2^2}{2(1-\rho_r^2)}\right)\right] dr_2 dr_1 \quad (26)$$

where:

$$\rho_r = 0.7 \exp(-d/60) + 0.3 \exp[-(d/700)^2] \quad (27)$$

and

$$P_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_a^2}} \int_{\frac{\ln a_1 - m_{\ln A_1}}{\sigma_{\ln A_1}}}^{\infty} \int_{\frac{\ln a_2 - m_{\ln A_2}}{\sigma_{\ln A_2}}}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{b_1^2 - 2\rho_a b_1 b_2 + b_2^2}{2(1-\rho_a^2)}\right)\right] db_2 db_1 \quad (28)$$

where:

$$\rho_a = 0.94 \exp(-d/30) + 0.06 \exp[-(d/500)^2] \quad (29)$$

and P_a and P_r are complementary bivariate normal distributions².

complementary bivariate normal distribution : 2変量正規分布の確率密度関数

図21 サイトダイバーシチゲインの計算手法 (ITU-R勧告P.618-13)

サイトダイバーシチゲインの計算例

- 周波数40GHzにおけるサイトダイバーシチゲインの計算例として、右図に示す配置にて、年間時間率0.1%、0.01%の場合についての実施例
- HAPSは渋谷駅上空20kmとし、東京駅にメイン局、東京駅とYRPとを結ぶ直線の上に、東京駅から1km, 5km, 10km, 15km, 20km and YRP (51.5km)とサイトダイバーシチ局を置局



図22 サイトダイバーシチゲインの計算位置

サイトダイバーシチゲインの計算結果（1）

- 図23中の最右の線は、メイン局単独における降雨減衰量CDFカーブ
 - 年間時間率0.1%は30dB
 - 年間時間率0.01%は74dB
- 最右の線（メイン単独のCDFカーブ）から左側へ順にメイン局と1km、メイン局と5km、メイン局と10km、メイン局と15km、メイン局と20km、メイン局と51.5kmの距離地点でのサイトダイバーシチ局による降雨減衰量CDFカーブ

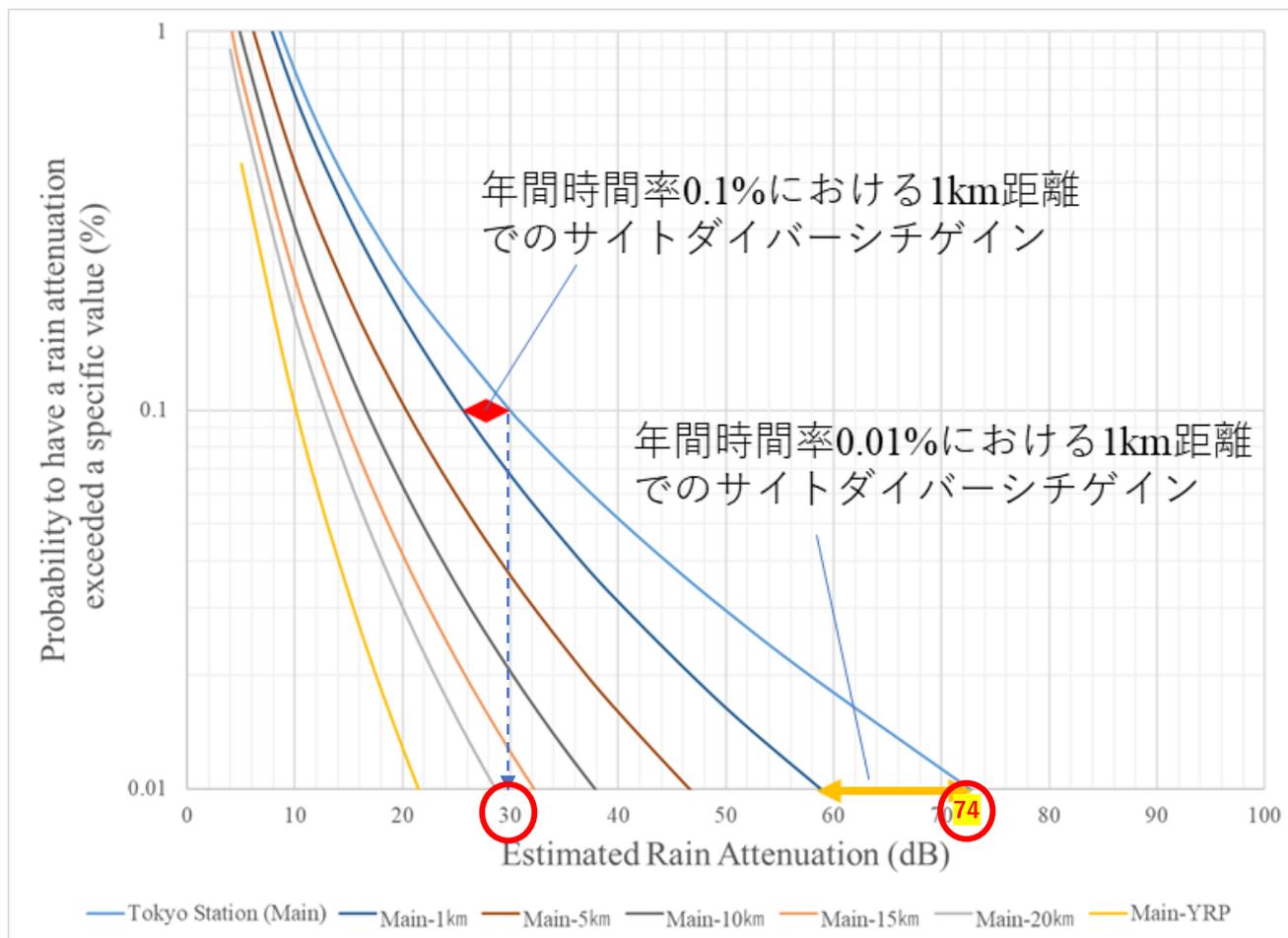


図23 メイン局及びサイトダイバーシチ利用時の降雨減衰量CDFカーブ（周波数：40GHz）

サイトダイバーシティゲインの計算結果（2）

- 図24は、年間時間率0.1%、0.01%でのメイン局からの距離によるサイトダイバーシティゲイン計算例
- 東京では、約5km離れると年間時間率0.1%の降雨減衰量の約30dBのうち、10dBを補償することが可能（残り20dB）
- 東京では、約15km離れると年間時間率0.01%の降雨減衰量の約74dBのうち、40dBを補償することが可能（残り34dB）
- ミリ波においてはサイトダイバーシティはほぼ必須の技術

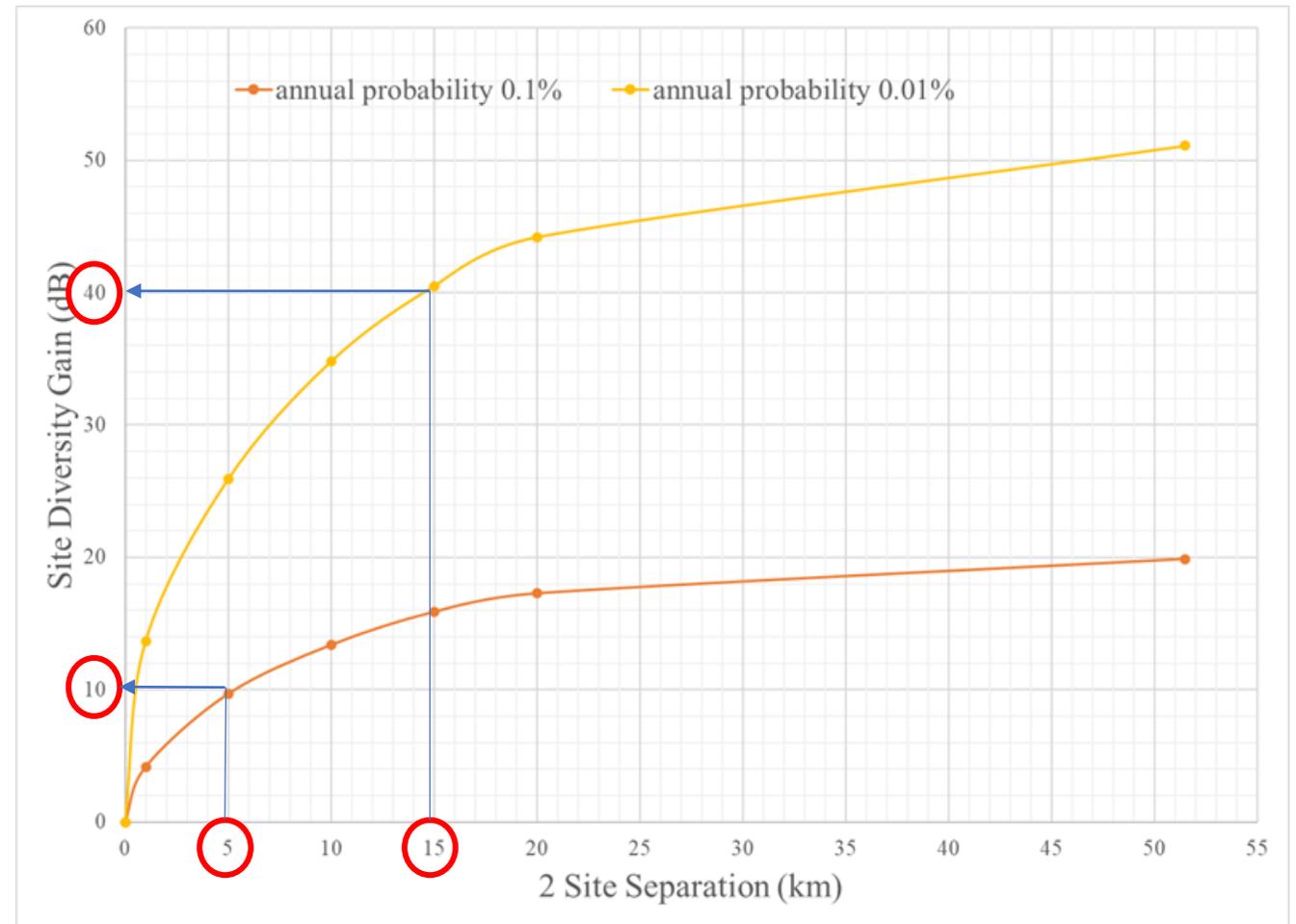
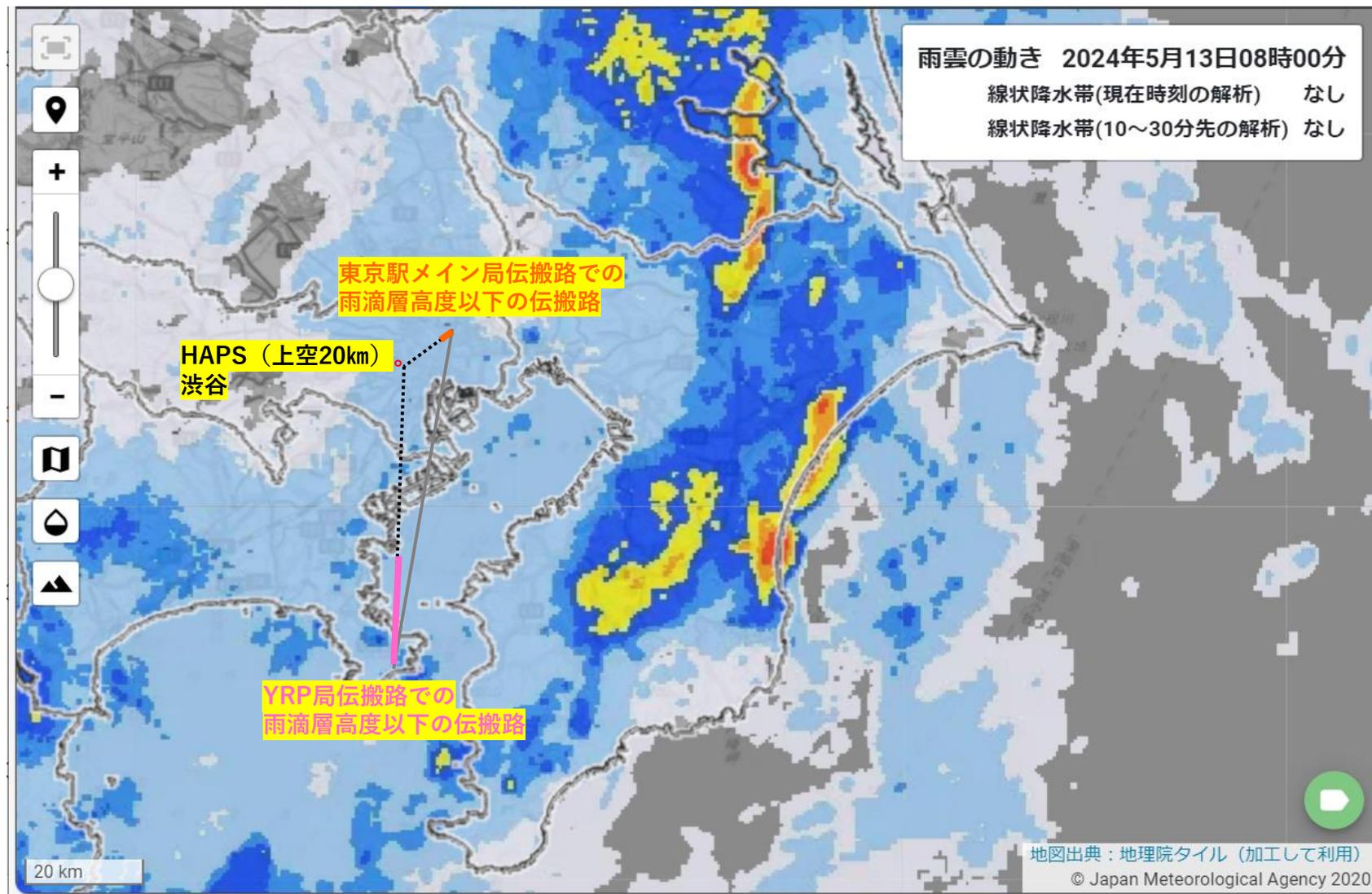


図24 サイトダイバーシティゲインの計算例
(周波数：40GHz)

実際の雨の様子とサイトダイバシチ

- 気象庁が提供する高解像度降水ナウキャスト*による雨雲の動き
- 降雨の相関性が高い2局間でのサイトダイバシチ切替のアルゴリズム開発の必要性
 - 「プロアクティブ・サイトダイバシチ」として、降雨予測に基づいた切替アルゴリズム手法を開発した



*気象レーダーの観測データを利用して、国内の降水の短時間予報（実況値から30分後）を250mの解像度で提供しているデータ
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/nowcast/kurashi/ighres_nowcast.html

まとめ

- 当社及び、株式会社NTTドコモ、パナソニック ホールディングス株式会社、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の4者による、令和2年度から令和5年度に実施したHAPSを用いたバックホールシステムの研究開発概要とHAPS回線におけるミリ波帯電波伝搬モデルについて述べた
- HAPSを用いたバックホールシステムの研究開発概要では、上空3~4kmを飛行するセスナ機を用いた実証試験により、ミリ波帯バックホールに確立によるコアネットワークからユーザ端末までのエンドツーエンドの無線リンクを構築することができた
- ミリ波帯はその周波数の特徴から大気や降雨による影響を大きく受けるため、HAPSリンクモデルについてITU-R勧告をベースに詳細な分析・評価を実施した（MATLABのSatellite Communications Toolboxを使用、サイトダイバシティで使用するcomplementary bivariate normal distributionの関数はエクセルにはなく、p618SiteDiversityOutageのFunctionsで簡単に計算可能）
- HAPSの実用化に向け、各種機会を捉えて成層圏での実証と成果発表を重ねていく予定（乞うご期待）

謝辞

- この研究開発は、総務省の「電波資源拡大のための研究開発（JPJ000254）」により実施されました

参考文献

- [1] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.618 <降雨減衰、サイトダイバシチ>
- [2] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.676 <大気吸収損失>
- [3] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.1511 <地形モデル>
- [4] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.151 <平均地表面温度モデル>
- [5] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.835 <標準大気>
- [6] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.836 <水蒸気・酸素の密度モデル>
- [7] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.840 <雲・霧による損失>
- [8] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.837 <降雨強度モデル>
- [9] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.453 <電波屈折率モデル>
- [10] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.839 <雨滴層高度モデル>
- [11] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.838 <周波数毎の降雨減衰特性>
- [12] Validation examples for Study Group 3 Earth-Space propagation prediction methods <エクセル計算結果例>

ご清聴誠にありがとうございました。

End of paper