

総合試験の実施結果について

- ・ 都市部・郊外部での実施結果
- ・ ビームフォーミングゲインの検証
- ・ 準天頂衛星の野外実測と干渉検討

平成31年4月3日

総合試験について

■ 概要

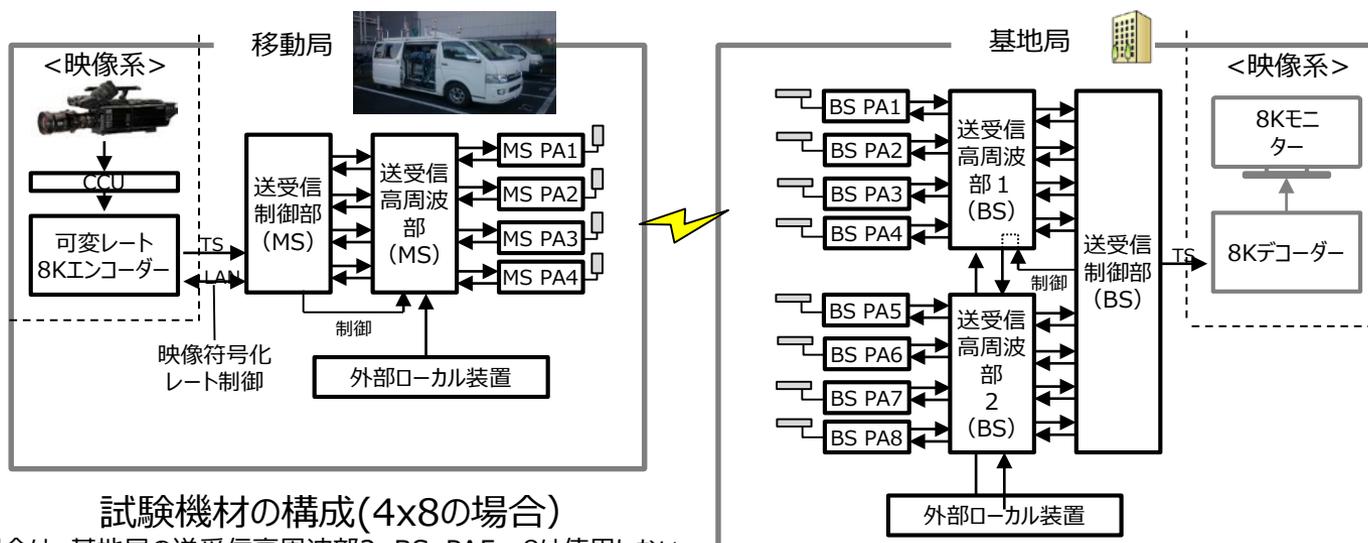
- 「適応制御MIMO方式の検討」及び「周波数共用条件の検討」の検討結果の評価のため、屋外での電波伝搬試験を実施した。
- 試験に当たっては、伝搬距離、遮蔽物・反射物等による伝搬環境等による伝搬特性の違いが比較できるよう複数のコース（郊外を中心とした3箇所程度）を選定した。また、各コースに対して、一つまたは二つの基地局（固定局）基地局（固定局）を設置し、一つの移動局（中継車）との電波伝搬試験を行う。試験は映像の受信状況（画質、フリーズ頻度、フリーズ箇所等）を確認しながら実施した。

■ 総合試験イメージ



総合試験の実施概要について

- **総合試験（第1回）：東京オリンピックマラソンコース周辺**
(概要) 2.3GHz帯SVD-MIMO_FPUの1Kモード/2Kモード（長遅延波対応）による伝送可能エリア確認
(成果) 都市部において、ビルが乱立して長い遅延がある反射波が存在する環境でも、正常に映像伝送が実施できる事を確認した。
- **総合試験（第2回）：NHK放送技術研究所周辺**
(概要) 1.2GHz帯SVD-MIMO_FPU電波伝搬試験による伝搬特性取得及び評価
(成果) 1.2GHz帯SVD-MIMO_FPUによる1Kモード/2Kモードによる8K映像伝送可能エリアを確認して伝送パラメータ等の技術的条件の妥当性を確認した。
- **総合試験（第3回）：埼玉県吉見町周辺**
(概要) 1.2GHz帯、2.3GHz帯SVD-MIMO_FPUによる反射波が少ない見通しにおける郊外環境での電波伝搬試験による伝搬特性取得及び評価
(成果) 1.2GHz帯/2.3GHz帯SVD-MIMO_FPUによる1Kモード/2Kモードによる伝送可能エリアを確認して、郊外部における伝送パラメータ等の技術的条件の妥当性を確認した。



試験機材の構成(4x8の場合)

4x4の場合は、基地局の送受信高周波部2、BS_PA5～8は使用しない

第1回総合試験(都市部・東京都港区)

■ 第1回総合試験の概要

東京タワーを基地局(地上高:約135m)として、東京オリンピックマラソンコース周辺で実施。2Kモード(GI長18 μ s)では伝送特性が大幅に改善し、都市部の伝搬環境で有効であることを確認した。また、ビームフォーミング利得の測定実験を行った。

■ 内容

- ・2.3GHz帯において伝送パラメータを①1Kモード, GI比1/8(GI長約6 μ s)、②1Kモード, GI比1/4(GI長約12 μ s)、③2Kモード, GI比3/16(GI長約18 μ s)とした場合の平均受信電力、TSLレート、パケットエラー等の測定を行った。
- ・アンテナは移動局が2段コーリニア、基地局側は8素子クロス八木アンテナ(円偏波)
- ・移動局には4Kカメラを搭載し、4K映像でフリーズの有無等を確認した。

■ 実験結果の例

伝送パラメータ③でのTSLレートの分布と、受信電力対TSLレートを図2と図3にそれぞれ示す。基地局近傍の日比谷通りを走行した場合は、一部区間で見通し内環境となるため、ばらつきはあるが最大約120Mbpsの高いレートで移動伝送が可能であった。

一方、基地局から3km程度離れた皇居周辺(基地局遠方)では、見通し外環境のため受信電力は-80dBmから-60dBmと低い値となり、エラーの発生を回避するため、TSLレートも40Mbpsから120Mbpsの範囲で変動した。



図2 TSLレートの分布(伝送パラメータ③)

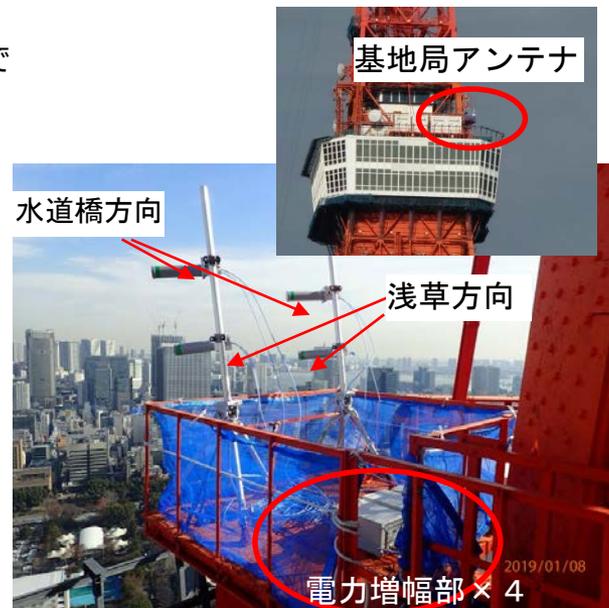


図1 基地局送信アンテナ

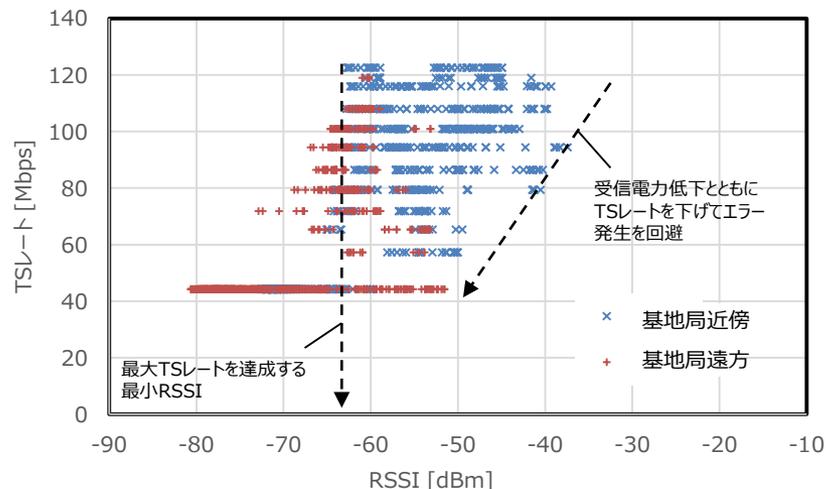


図3 受信電力(RSSI)対TSLレート(伝送パラメータ③)

第1回総合試験(都市部・東京都港区)

■ ガードインターバル長の比較

伝送パラメータ①と③の PACKET エラーレートの実測例を図4に示す。伝送パラメータ①では、区間AB、区間FAはエラーフリー伝送であったが、その他の区間では、エラーが発生して正常な映像伝送ができなかった。GI長が最も長い伝送パラメータ③では、B地点付近と、C地点とD地点の間の一部区間でエラーが発生したが、その他の区間はエラーフリーで映像破綻なく伝送することができた。GI長の拡大が都市部の伝搬環境で有効であることを確認した。



図4 ガードインターバル長の比較
PACKET エラーレート (PER) (赤色がエラー区間)

第2回総合試験(都市部・東京都世田谷区)

■ 第2回総合試験の概要

NHK放送技術研究所屋上に基地局(地上高:約35m)を設置して、1.2GHz帯による8K映像伝送試験を実施した。2.3GHz帯に比べて1.2GHz帯の電波は見通し外環境であっても、反射や回折によって回り込んだ電波が基地局まで届くため、TDD-SVD-MIMOシステムの伝送特性が改善することを確認した。併せて、準天頂衛星システムへの干渉実験も実施した。

■ 内容

- 1.2GHz帯において、伝送パラメータを①1Kモード、GI比1/8 (GI長約6 μ s)、②1Kモード、GI比1/4 (GI長約12 μ s)、③2Kモード、GI比3/16 (GI長約18 μ s)とした場合の平均受信電力、TSレート、パケットエラー等の測定を行った。
- 移動局には8Kカメラを搭載し、8K映像が伝送できること、及び、複数基地局の効果を確認
- アンテナは、移動局側は2段コーリニアアンテナ、基地局側は8素子八木アンテナとした。

■ 実験結果の例

移動局は、比較的低い建物が並ぶ市街地を走行した。移動伝送時のTSレートの分布と、受信電力対TSレートを図3と図4に示す。見通し内と見通し外環境が混在する基地局近傍では、概ね最大145Mbpsでの移動伝送が可能であった。同一偏波アンテナを使用していることから相関の高いところで、TSレートが50Mbpsまで瞬時的に低下することがあった。完全に見通し外伝搬となる基地局遠方では、受信電力の低下によりTSレートは50から145Mbpsの間で変動したが、伝送誤りは発生しなかった。



図1 基地局送受信アンテナ



図2 基地局から見た試験コース

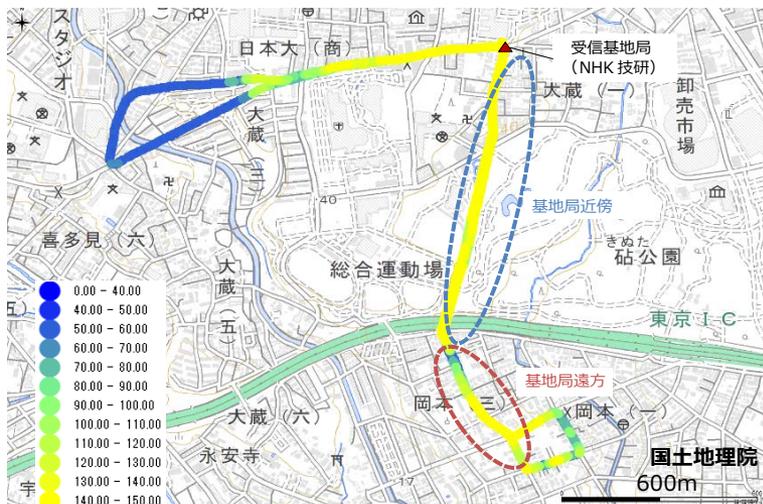


図3 TSレートの分布(伝送パラメータ①)

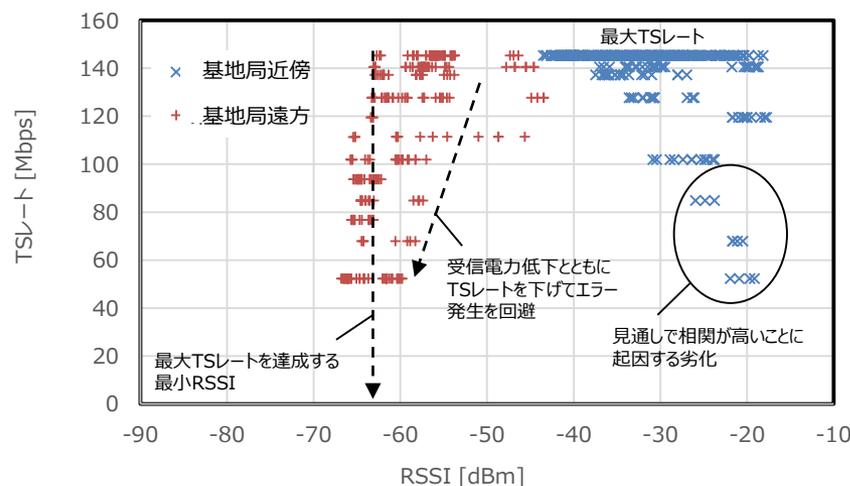


図4 受信電力(RSSI)対TSレート(伝送パラメータ①)

第2回総合試験(都市部・東京都世田谷区)

- 1.2GHz帯と2.3GHz帯の比較
 図1に1.2GHz帯と2.3GHz帯のTSLレートの変動を受信電力とともに示す。
 区間CDでは、1.2GHz帯が2.3GHz帯よりも良好であった。

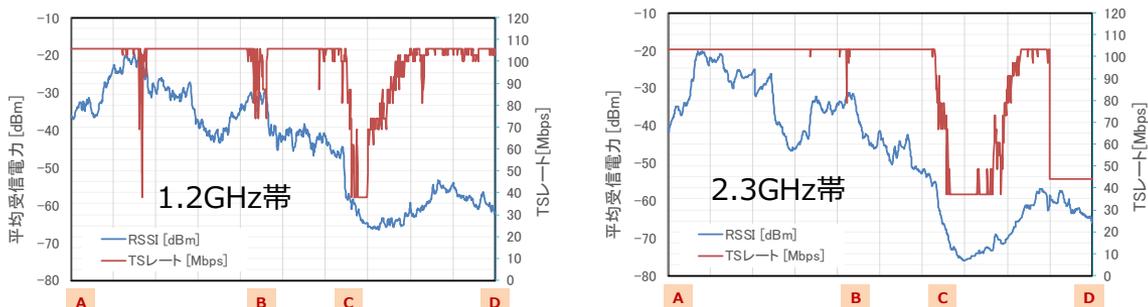


図1 TSLレートと受信電力

- 異なるガードインターバル長での比較
 区間CDにおいて、遅延時間9 μ sの遅延波が発生しており、18 μ sのGI長の効果が確認できた。

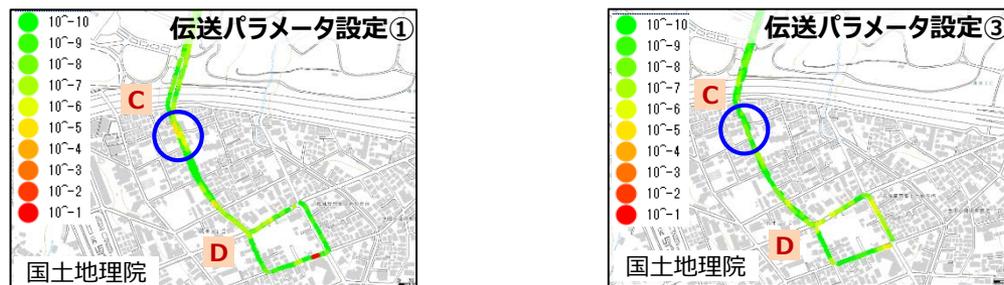


図2 区間CDにおける内符号後BER

- 複数基地局の効果
 複数基地局映像中継機能を用いた場合と用いない場合を比較すると、西側コースで伝送レートの高いエリアを拡大できることも確認した。(図3の黄色が良好な区間)

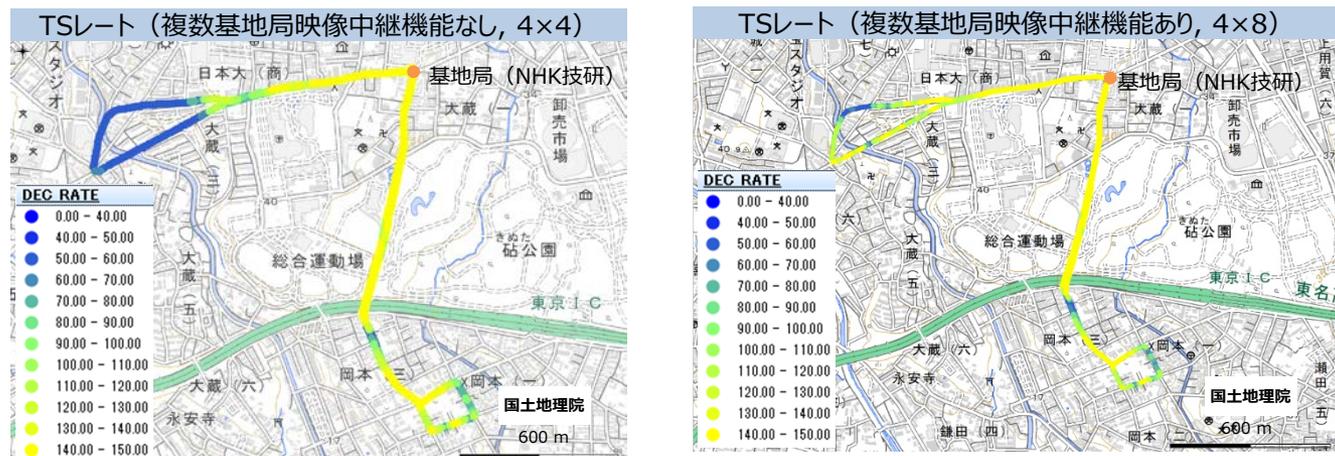


図3 複数基地局の効果 (左: 中継機能なし、右: 中継機能あり)

第3回総合試験(郊外部・埼玉県吉見町)

■ 第3回総合試験の概要

埼玉県吉見町役場5F屋上を基地局(地上高:約20m)として、吉見町周辺で実施した。見通しの良い郊外部において、1.2GHz帯/2.3GHz帯を用いて、SVD-MIMOシステムの伝送特性の測定、4K映像伝送試験を実施した。併せて、準天頂衛星システムへの干渉実験も実施した。

■ 内容

- ・伝送パラメータを①1Kモード, GI比1/8 (GI長約6 μ s)、②1Kモード, GI比1/4 (GI長約12 μ s)、③2Kモード, GI比3/16 (GI長約18 μ s)とした場合の平均受信電力、TSLレート、パケットエラー等の測定を行った。
- ・アンテナは、移動局側が2段コーリニアアンテナ、基地局側が8素子八木アンテナ
- ・移動局には4Kカメラを搭載し、4K映像の伝送性能を確認した。

■ 実験結果の例

2.3GHz帯の電波を用いて移動伝送したときのTSLレートの分布と、受信電力対TSLレートを図3と図4に示す。周囲に障害物の少ない環境であることから、工場の建物の遮蔽となる一部区間を除いて、移動局が基地局から約2km離れた場所まで高いTSLレート(最大120Mbps)で伝送することができた。見通し区間では、伝搬路の相関は高くなったが、直交偏波アンテナを使用することで大幅なレート低下なく安定した伝送が可能であった。



図1 基地局送受信アンテナ



図2 基地局から見た試験コース

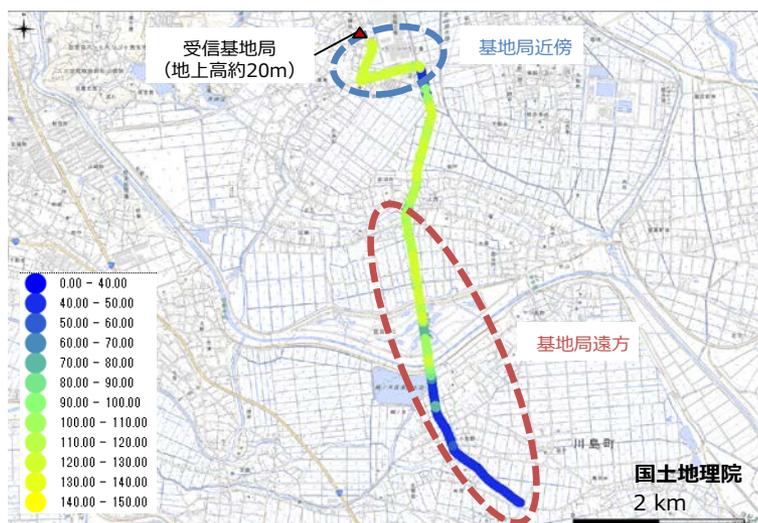


図3 TSLレートの分布(伝送パラメータ③)

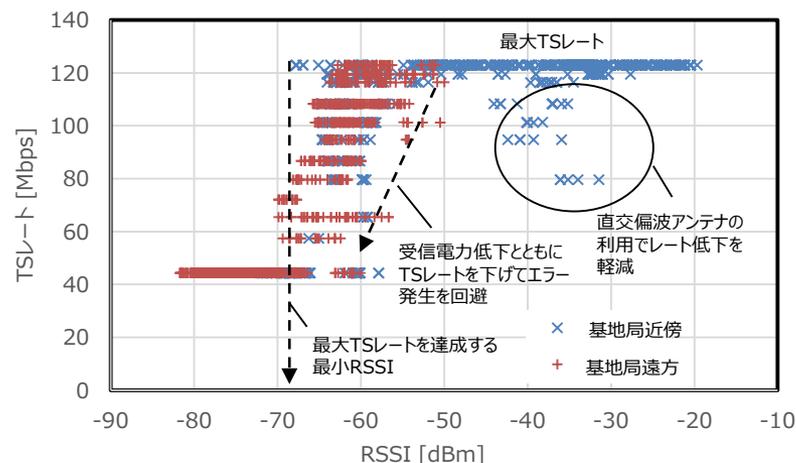


図4 受信電力(RSSI)対TSLレート(伝送パラメータ③)

第3回総合試験(郊外部・埼玉県吉見町)

■ 1.2GHz帯と2.3GHz帯の比較

図1、図2はそれぞれ1.2GHz帯、2.3GHz帯での平均電力、TSレート、パケットエラーの測定値の分布である。1.2GHz帯の測定結果の方が良好であることがわかる。パケットエラーレートがD-E区間で1.2GHz帯の方が悪く見えるが、これはこの区間でのTSレートは1.2GHz帯の方が高く制御されているためである。

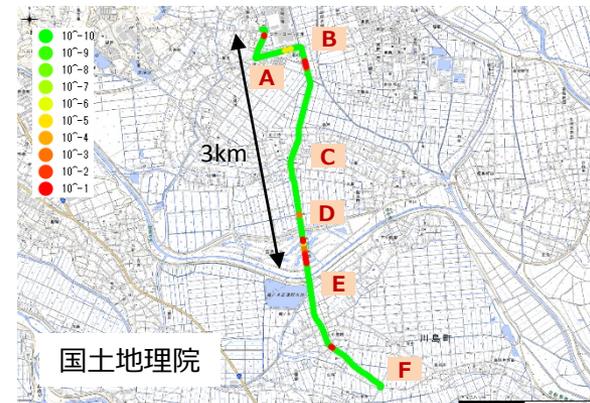
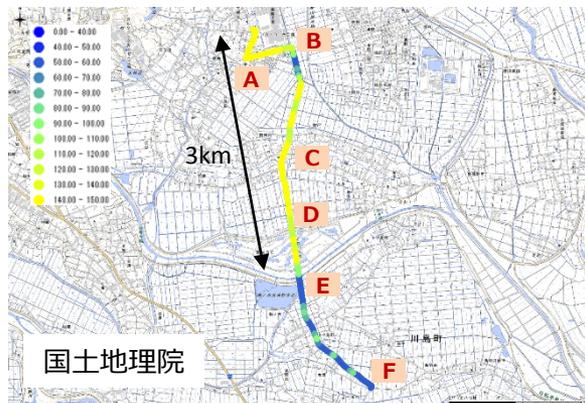
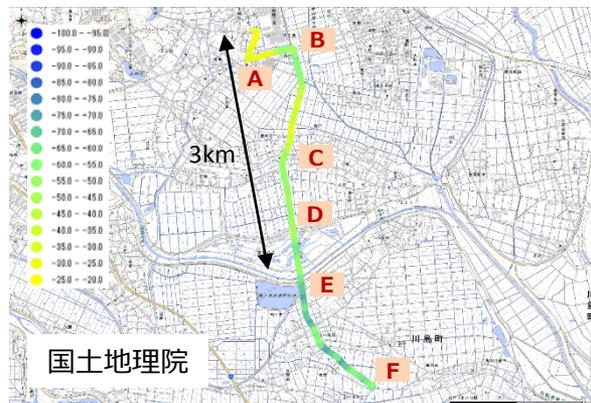


図1 伝送パラメータ設定①：1.2GHz帯VVV, 16bit,1Kモード, GI比1/8 (GI長約6 μ s)

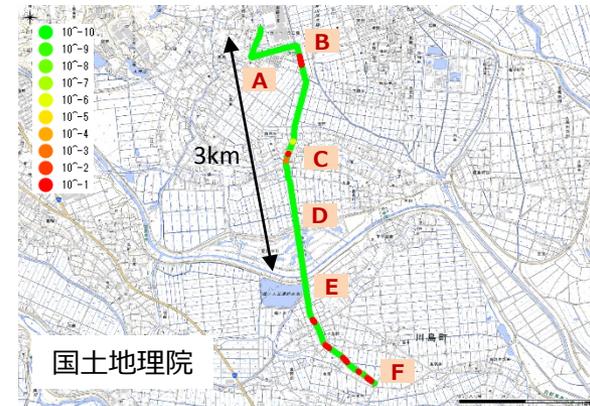
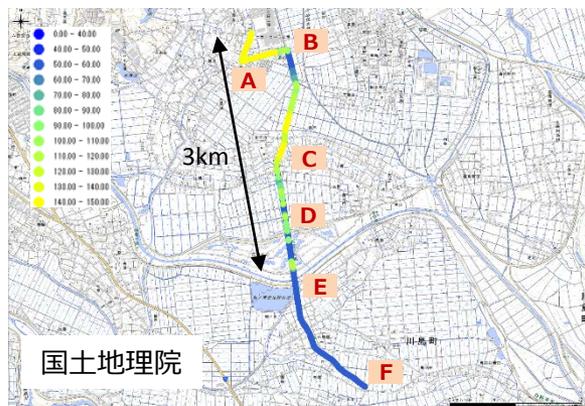
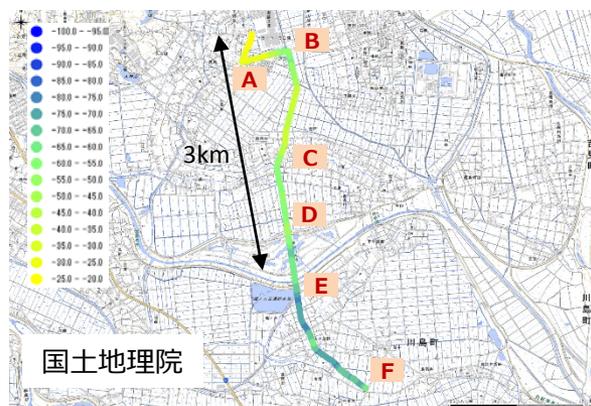


図2伝送パラメータ設定①：2.3GHz帯VVV, 16bit,1Kモード, GI比1/8 (GI長約6 μ s)

第3回総合試験(郊外部・埼玉県吉見町)

基地局送信アンテナ偏波による違い

■ 同一偏波アンテナ (VVVV) を用いた場合

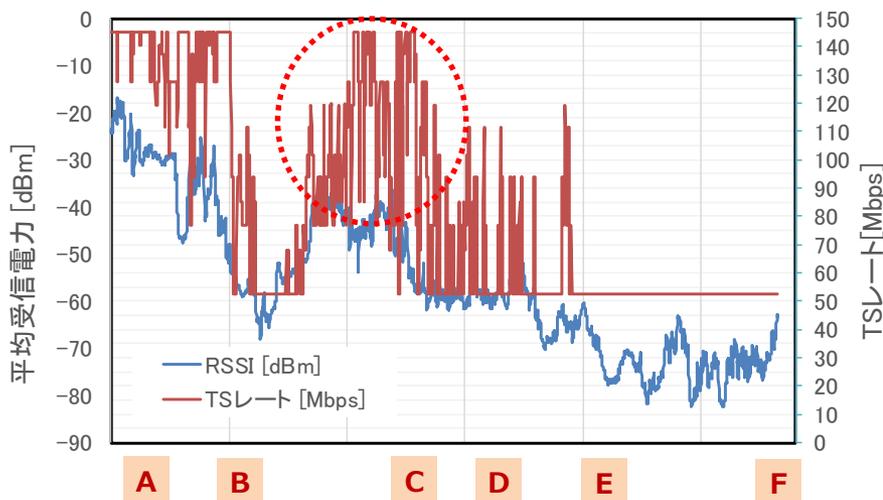
平均受信電力 (RSSI)、TSLレートの変動を図2(a)に示す。図より、B地点とC地点の間では工場の建物で遮蔽される区間を除いて受信電力が上昇しており、伝搬路が見通しであったと考えられる。しかし、TSLレートは低い値で推移した。見通しであったため、空間相関が高くなり、複数ストリームによる並列伝送に厳しい伝搬環境であったと考えられる。

■ 直交偏波アンテナ(VHVV)を用いた場合

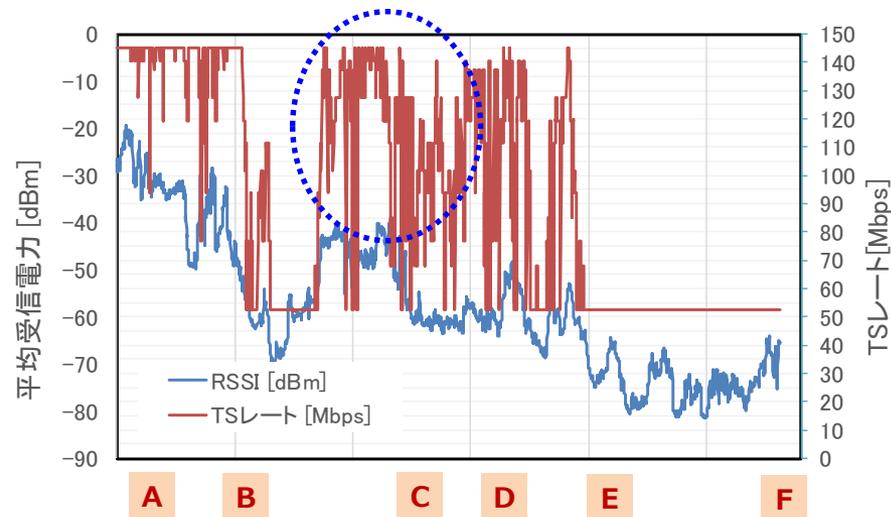
平均受信電力、TSLレートの変動を図2(b)に示す。図(a)と比べて、TSLレートが高い値で推移した。B地点とC地点の間では、受信電力は図(a)と同程度であるにもかかわらず、TSLレートは上昇している。基地局アンテナに直交偏波アンテナを用いたことにより、空間相関が低くなり、複数ストリームによる並列伝送が容易であったと言える。



図1 基地局アンテナ



(a) 同一偏波アンテナ (VVVV)



(b) 同一偏波アンテナ (VHVV)

図2 平均受信電力とTSLレートの変動

伝送パラメータ設定① : 2.3GHz帯、16bit, 1Kモード, GI比1/8 (GI長約6μs)

ビームフォーミングゲイン（複数アンテナ送信による増分効果）の検証

1. FPU移動局の近傍での受信電力測定によるビームフォーミングゲインの実測

■ 概要

第1回の総合試験の中で、理論上のビームフォーミングゲイン最大6dBに対して、実際にはどのような値になるのかを確認するため、実測例を得る事を目的として測定を行った。

■ 内容

測定にあたっては、1ストリーム伝送のために10bit伝送として、5地点ほどの見通し／見通し外測定点を選定し、FPU移動局を停止し30秒ほど移動局近傍の受信電力をスペアナで測定した。測定対象は ①ビームフォーミング有り（適応モード）、②ビームフォーミング有り（1ストリーム伝送）、③ビームフォーミング無し（単位行列モード）の3通りを測定した。図1にビームフォーミング効果測定概念を示す。

■ 結果

移動局から基地局方向の近傍地点に移動局を停車させた場合、スペアナの測定値は単位行列モード（ビームフォーミングなし）で -8.6dBm 、1ストリーム固定で -6.2dBm であった。ビームフォーミングゲインは両者の差であり、 2.4dB であった。

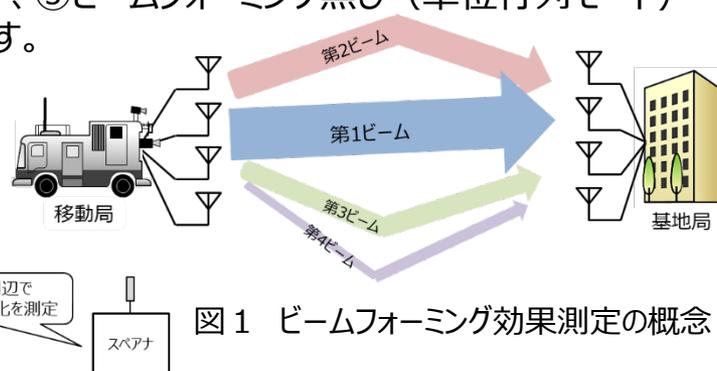


図1 ビームフォーミング効果測定概念

2. FPU基地局でのビームフォーミングゲインの分布

■ 概要

3回実施した総合試験の中で、基地局側で固有値と電力配分を測定し、測定値をもとに基地局受信のビームフォーミングゲインの分布を算出した。

■ 結果

16bit伝送において、基地局アンテナに直交偏波アンテナ、あるいは同一偏波アンテナを用いた場合について、ビームフォーミングゲインの分布を調べた。3dB以下となる累積確率は99%以上であった。図2に分布の例を示す。

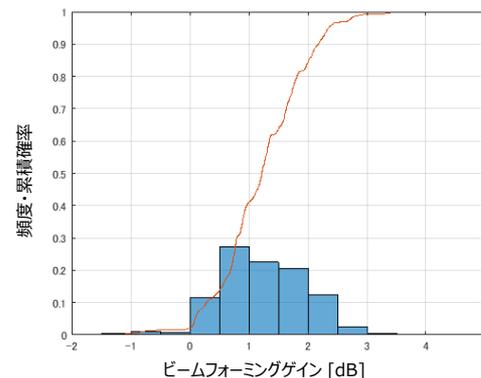


図2 基地局受信点のビームフォーミングゲインの分布の例(吉見町周辺コース、2.3GHz帯VVVV同一偏波)

3. まとめ

総合試験では各環境でのビームフォーミングゲインの確認を行い、何れの環境でも3dB以下となる累積確率は99%以上であった。

準天頂衛星システムの野外実測と干渉検討（総合試験を反映）

■ 離隔距離の計算

衛星通信システム委員会報告（平成28年6月30日）に記載されている離隔距離は、都市部で830m、郊外部で1230mであった。この離隔距離に基づいて、4K・8K用FPU上り回線のビームフォーミング利得（6dB）、TDD方式に係わる補正係数（上り：-3dB、下り：-37dB）、マージン（10%）を考慮して離隔距離を計算した。

【都市部】上り回線：1296.5m、下り回線：28m

【郊外部】上り回線：1921.3m、下り回線：41.5m

■ 影響度の検討

影響度 = [離隔面積] / [携帯電話のカバーエリア面積] × [FPUの使用時間] / [365日×24時間] = 0.0073%

影響度は準天頂衛星システムで許容されているサービスの未達成確率（1%）に比べて小さい値であることから、許容範囲内であると考えられる。

■ 野外実験

停車したFPU移動局と基地局との間で通常通りに電波発射し、QZSS受信車を走行してQZSS受信ステータスを観測した。図2は受信ステータスをプロットした地図である。青色が正常受信、それ以外の色は正常ではない。

【都市部】上り回線：800～900m、下り回線：QZSS受信が途切れることはなかった

【郊外部】上り回線：1500～1900m、下り回線：QZSS受信が途切れることはなかった



図1 QZSS受信車

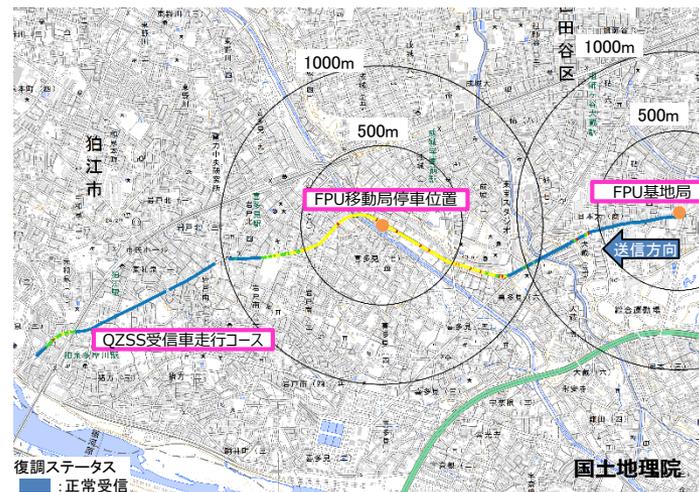


図2 走行コースにプロットした受信ステータス

(参考) 共用検討の結果概要について

干渉対象局	移動局との離隔距離		基地局との離隔距離		干渉対策(運用調整により共用可能とする方法)
	FPU与干渉	FPU被干渉	FPU与干渉	FPU被干渉	
特定ラジオマイク	1.58km	0.29km	1.18km	1.15km	現行の1.2GHz/2.3GHz帯FPUと同様に、TVホワイトスペース等利用システム運用調整協議会、(一社)特定ラジオマイク調整運用機構による運用調整
特定小電力局	1.56km	0.001km	0.92km	0.021km	<p>①FPUの使用について十分な周知を行う、あるいは、必要に応じて潜在電界調査を行い、FPUの使用に問題無いことを確認する等の事前調整を行う。周知方法については、次の方法が考えられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・市報等により該当市町村への周知 ・販売機器メーカーを通じて使用者に周知 ・事前にホームページ等で周知 ・マラソンコース上の潜在電界調査によって確認された特定小電力局を有する工事等に対して文書配布等により周知 <p>②事前調整が不十分な場合には、次の様な干渉軽減措置(調整不要)を行い影響を低減させることが可能。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・特定小電力無線局の電力密度に合わせて、FPUの送信電力を低減して運用 ・FPUの送信周波数を調整、周波数帯域の変更して運用
構内無線局	1.56km	0.004km	0.92km	0.07km	<p>①総務省ホームページ掲載の免許情報により、新たに免許人が現れた場合には、放送事業者と事前調整のルールを作成し共用</p> <p>②事前調整が不十分な場合には、特定小電力局の欄に記載の対策により共用が可能</p>
画像伝送用携帯局	0.2km	0.46km	0.07km	3.76km	<p>与干渉についてはロードレースコース近辺の管理を徹底することにより、干渉を未然に防ぐことが可能</p> <p>被干渉が発生した場合には、他の画像に差し替えるなど対策を施した上で、速やかな対応を求める。</p> <p>予め放送事業者から使用者に対してFPUの運用予定を通知し、調整。周知方法は例えば以下の方法が考えられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・無人ヘリテレ推進協議会の会員に対して周知 ・TVホワイトスペース等利用システム運用調整協議会のHP等でFPUの運用状況を周知
アマチュア無線局 レピータ局		0.08km		0.6km	(一社)日本アマチュア無線連盟を通じ、レピータ局の運用担当者と調整し、干渉を避けるように対応を求める。
移動局		0.14km		0.9km	FPU基地局の空中線の指向性の管理を徹底することにより、干渉を防ぐことが可能。
月面反射地球局		0.72km		12.13km	無線局の運用状況をホームページ等で周知する。 レピータ局は10Wから1Wへの移行が完了しており、より周波数共用が可能となる。
航空路監視用レーダー(ARSR)	3.3km	8.15km	3.0km	8.15km	ARSRの運用されている地点より6.6km以内、及びARSRの設置場所よりも高い位置でのFPUの運用を行わない。
準天頂衛星受信機	1.9km	—	0.04km	—	4K・8K用FPU基地局送信に対して固定運用される準天頂衛星システム地上系設備に対しては、その設置形態も考慮して、干渉が予想される場合は4K・8KFPU運用者と運用調整等について協議を行うことで共用可能であると考えられる。

※下線は現行FPU導入時に定めた干渉対策から追加したものの