

3-11 陸上移動通信実験報告

菅 智茂 赤石 明 鄭 炳表 川崎和義 浅井敏男 高橋 卓

衛星通信は災害時等の緊急時の有効な通信手段として注目されている。NICT では超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS) を自動追尾するアンテナシステムを搭載した小型車載局を開発し、移動しながら衛星回線を構築できるようになった。本稿では南海トラフ地震を想定し、四国近畿地方、九州地方、西日本日本海沿岸地方において高速移動環境下での Ka 帯衛星通信における電波伝搬測定を行った結果について報告する。

1 まえがき

大規模災害が発生した場合、災害現場の状況把握、情報収集及び救援活動における情報共有において情報通信技術は重要なものとなる。携帯電話等地上系のインフラが使用不可になった際に衛星通信は代替利用として有効な手段となる。情報通信研究機構 (NICT) では超高速インターネット衛星 (WINDS) の研究を行っており [1]、衛星を自動捕捉、自動追尾可能なアンテナシステムを搭載し、走行しながら WINDS 衛星との通信が可能な小型車載地球局 (以下、小型車載局) を開発し、運用している [2]。

通信システムを構築する際に伝搬環境の把握は重要となる。NICT では、これまで小型車載局の特徴を活かし、南海トラフ地震が発生した際に巨大大津波等の被害が想定される四国近畿地方の太平洋沿岸における広域 [3] 及び九州地方 [4]、西日本の日本海沿岸地域 [5] において、衛星と移動している地球局との間の伝搬測定をしてきた。本稿では各地域において移動しながら伝搬測定を行った結果について報告する。また、静止状態における衛星回線のダウンリンク及びアップリンクマージン測定を行ったのでその結果についても報告する。

2 WINDS 小型車載局

小型車載局の諸元及び外観を表 1 及び図 1 に示す。小型車載局はレドーム付きの開口径 65 cm のカセグレンアンテナ、20 W クラスの大電力増幅器 (HPA)、3 軸ジンバル機構及び変復調器などで構成され、図 1 に示すように一般の車両に搭載されている。

小型車載局に搭載されているアンテナシステムは GPS 受信機から得られる自局の位置情報と衛星からグローバルビームで送信される Beacon 信号レベルを

表 1 小型車載局諸元

送信周波数	27.5-28.6 GHz
受信周波数	17.7-18.8 GHz, 18.9 GHz (Beacon を受信)
偏波	直線偏波 (V/H)
SSPA 出力	20 W
EIRP	55.5 dBW
G/T	16.0 dB/K
アンテナ	カセグレンアンテナ 開口径 : 65 cm
アンテナ駆動範囲	El : 20-90 deg Az : 無限回転 X-El : ± 15 deg
追尾精度	$< \pm 0.2$ deg
データレート	再生中継方式 Tx : 1.5, 6, 24, 51 Mbps Rx : 155 Mbps
ユーザーインターフェース	Ethernet (1000 base-T)
発電能力	2.8 kVA 以上



図 1 小型車載局外観図

用いて衛星を自動捕捉、自動追尾を行うことができ、走行しながら衛星回線を構築することが可能である。ここで Beacon 信号とは網モニタ信号 (ミッションテ

レメトリ)の残留キャリアである。また、HDカメラや無線LANアクセスポイントなど災害時、緊急時に有効な機能も搭載している。

3 伝搬測定実験

3.1 実験方法

伝搬測定実験は、WINDSより送信されるBeacon信号(18.9 GHz)を小型車載局において走行しながら受信することでBeacon信号の強度を測定した。Beacon信号の強度は、スペクトラムアナライザを用いて、約100 msごとに受信電力のピーク及び周波数を測定した。また、測定中の最高速度は高速道路において100 km/hであった。

測定コースは南海トラフ地震が起こった際に巨大津波等の被害を受ける可能性のある場所として、図2に示す四国、近畿地方の太平洋沿岸の道路、図3に示す大分から鹿児島島の海岸沿いの道路及び図4に示す島根から富山までの日本海沿岸の道路であり、走行しながら測定を行った。各図はBeacon信号受信電力マップを示し、遮蔽などにより受信電力が低下した場所は青色で表されている。なお、受信電力は各測定時における最大値で正規化している。

3.2 測定結果

図5～7に四国近畿エリア、九州エリア、西日本日本海沿岸エリアにおけるBeacon受信電力の累積確率分布(CDF)を示す。図より衛星を捕捉できている見通し環境におけるBeacon信号の変動は2 dB程度となっており、衛星を捕捉できていない時はピークより-18～-20 dB程度減衰したノイズフロア以下となっていることがわかる。なお、九州エリアでの見通し環境におけるBeacon信号の変動は5 dB程度となっているが、これは測定中に降雨があったために変動が大きくなったと考えられる。図2～4の衛星Beacon信号受信電力マップにおいて、濃紺で示される地点は衛星信号を捕捉できていない地点となる。本測定実験で走行したコースにおいて衛星を捕捉できた見通し環境の割合は四国近畿エリアで約70%、九州エリア、西日本日本海沿岸エリアで約80%であった。この時見通し外となる主な要因となる建築物は電柱、道路案内標識、周辺建物、崖、トンネル、鉄橋の柱、樹木等であり、大部分はトンネルによるものである。また、高速道路走行時において100 km/hの高速移動時においても衛星を捕捉していることを確認できた。

図8にマルチビームアンテナ(MBA)九州ビームから送信された再生中継回線のTDMAリファレンスバースト信号の受信C/N₀と、ビーム中心からの距離

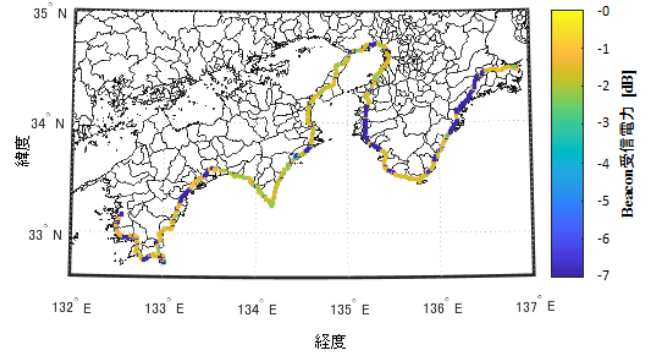


図2 四国近畿エリアでの測定コース (Beacon 電力マップ)

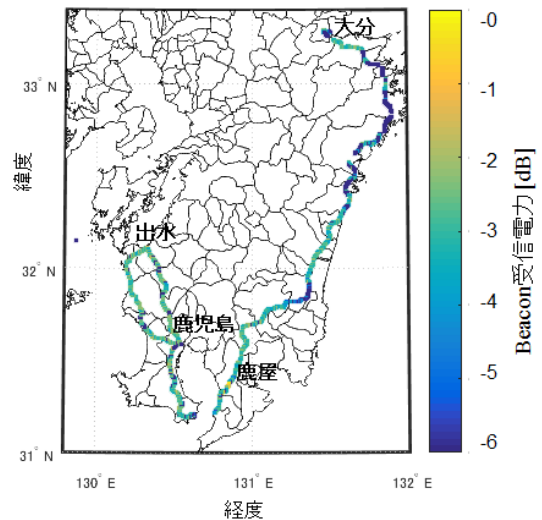


図3 九州エリアでの測定コース (Beacon 電力マップ)

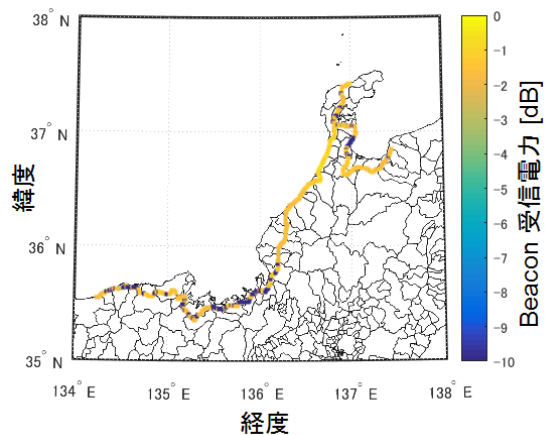


図4 西日本日本海沿岸エリアでの測定コース (Beacon 電力マップ)

との関係を示す。鹿屋①と鹿屋②は同一の測定点において日付を変えて測定したものであるが、鹿屋②を測定した際は降雨があったため、鹿屋①のデータと比べて降雨減衰の影響で1.5 dB程減衰していることがわかる。また赤線で示した理論値と測定値の標準偏差は

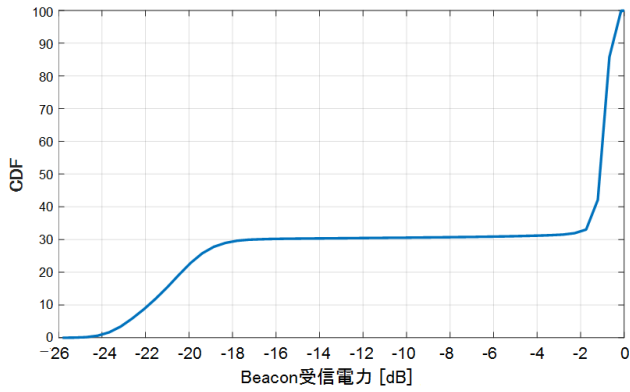


図5 四国近畿エリアでの Beacon 受信電力の CDF

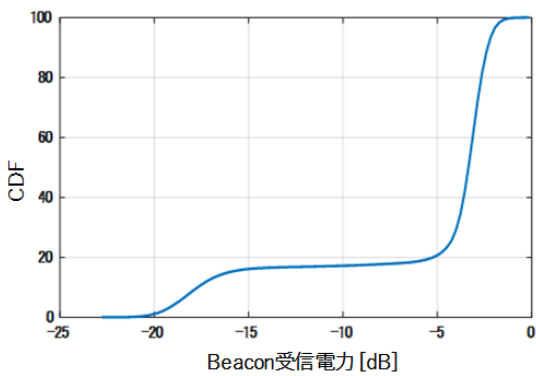


図6 九州エリアでの Beacon 受信電力の CDF

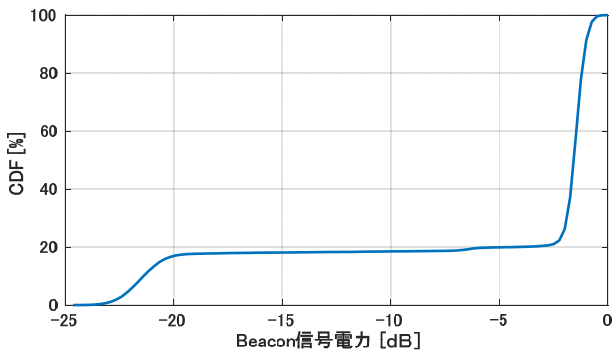


図7 西日本日本海沿岸エリアでの Beacon 受信電力の CDF

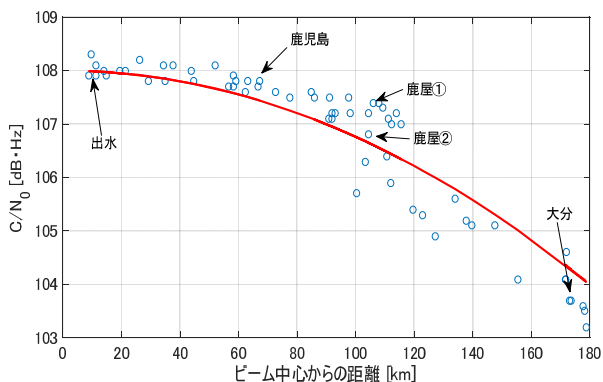


図8 九州ビームにおける受信 C/N₀ 測定結果

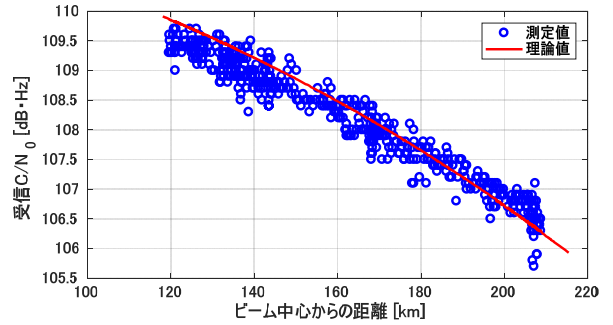
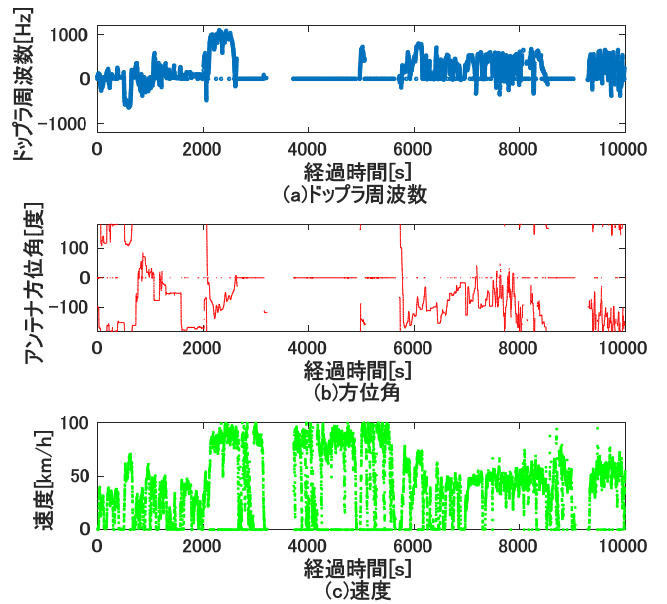


図9 MBA 中部ビームにおける受信 C/N₀ 測定結果



(a) ドップラ周波数, (b) 方位角, (c) 速度

図10 宇和島 - 高知間における測定結果

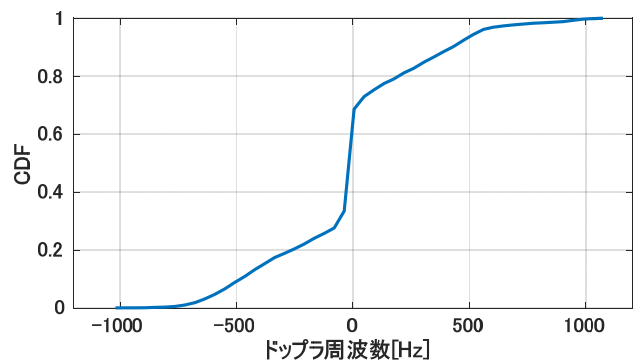


図11 ドップラ周波数の CDF

0.48 dB であり、測定値と理論値がよく一致していることがわかった。同様に、図9に西日本日本海エリアで測定時のMBA 中部ビームから送信された信号の受信 C/N₀ と、ビーム中心からの距離との関係を示す。こちらの結果も理論値と測定値の差は± 1 dB 以内に収まっており、測定値と理論値がよく一致しているこ

3 超高速衛星通信技術

とがわかった。

図 10 に宇和島-高知間における測定結果を示す。図 10 (a) はドップラ周波数、(b) は小型車載局に搭載したアンテナの方位角、(c) は小型車載局の移動速度を示す。ドップラ周波数と方位角の関係性より、衛星はほぼ真南に位置するため、小型車載局が衛星方向となる南側へ移動する際にドップラ周波数は正の値を持ち、衛星から遠ざかる方向となる北側へ移動する際にドップラ周波数は負の値を持つことを確認できた。図 11 に四国近畿エリアで測定した全区間でのドップラ周波数の CDF を示す。この時のドップラ周波数の最大値は 1094 Hz であった。

ドップラ周波数 f_d は

$$f_d = \frac{v \cos \theta}{\lambda} \quad (1)$$

で与えられる。この時 v は移動速度 [m/s]、 θ は進行方向に対する電波の入射角、 λ は波長 [m] である。実験に用いた Beacon 信号の中心周波数を 18.9 GHz、アンテナの仰角を 41.3 度、移動速度を 100 km/h を (1) 式に代入すると最大ドップラ周波数は 1154 Hz となり、測定されたドップラ周波数の最大値は理論値に達することが確認できた。

4 伝搬測定実験

4.1 データ伝送実験

近畿四国エリアにおいては図 12 に示す 9 カ所の測定地点において、小型車載局が停車した静止状態にて、図 13 に示すように、「小型車載局」-「衛星」-「固定地球局 (NICT 鹿島宇宙技術センター：鹿嶋市)」との間で iperf [6] を用いて UDP 通信を行い、パケットエラーが発生するレベルを測定することで、アップリンク及

びダウンリンクの回線マージンの測定実験を行った。

データ伝送実験は MBA を用いて再生交換中継方式 24 Mbps モードにて行った。使用したビームは宇和島、足摺岬、高知では中四国ビームを用い、その他のエリアでは近畿ビームを使用した。ビーム間での比較のため

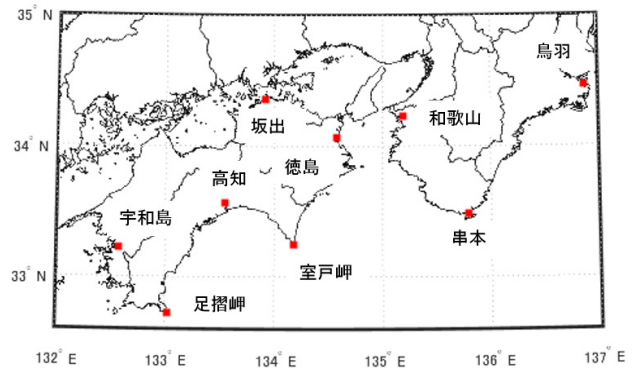


図 12 データ伝送実験測定地点

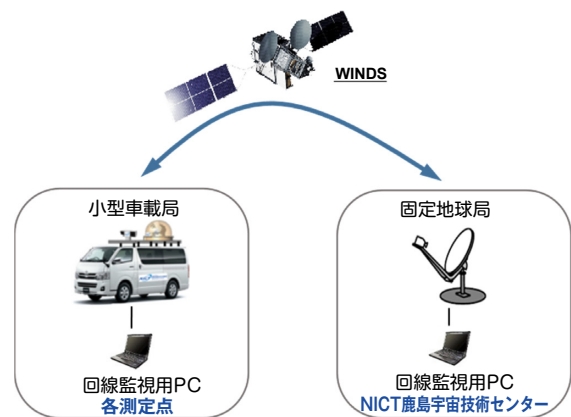


図 13 データ伝送実験ネットワーク構成図

表 2 回線マージン測定結果 (四国近畿エリア)

観測点	宇和島	足摺岬	高知 1	坂出	高知 2	室戸岬	徳島	和歌山	串本	鳥羽	
使用ビーム	中四国ビーム			近畿ビーム							
ビーム中心と観測点離角 [deg]	0.1395	0.2209	0.2073	0.1392	0.2354	0.1973	0.0695	0.0434	0.1634	0.2783	
アップリンク	観測点アンテナ利得 [dBi]	47.9	44.4	45.1	46.6	42.2	44.3	8.4	48.8	45.7	39.5
	回線マージン [dB] (予測値)	7.04	3.55	4.24	5.62	1.25	3.35	7.44	7.84	4.75	-1.46
	回線マージン [dB] (実測値)	8.9	6.8	3.8	9.7	4.5	7.3	10.5	8.8	7.6	1.9
	偏差 (実測値 - 予測値)	1.86	3.25	-0.44	4.08	3.25	3.95	3.06	0.96	2.85	3.36
ダウンリンク	観測点アンテナ利得 [dBi]	46.4	45	45.3	47.1	45.2	46.1	47.9	48	46.7	44.1
	回線マージン [dB] (予測値)	6.8	5.42	5.71	7.49	5.61	6.51	8.3	8.4	7.11	4.5
	回線マージン [dB] (実測値)	12.6	10.6	10.7	13	12.2	13.1	14.3	14.4	13	10.5
	偏差 (実測値 - 予測値)	5.8	5.18	4.99	5.51	6.59	6.59	6	6	5.89	6

表3 回線マージン測定結果(九州エリア)

観測点	四国中央	別府	別府	日向	宮崎	鹿屋	山川	いちき串木野	出水	
使用ビーム	中四国ビーム			九州ビーム						
ビーム中心と観測点離角 [deg]	0.1983	0.1635	0.259	0.2044	0.1597	0.1262	0.1339	0.0694	0.0143	
アップリンク	観測点アンテナ利得 [dBi]	45.4	47	40.7	43.8	45.7	46.9	46.6	48.2	48.8
	回線マージン [dB] (予測値)	4.46	6.06	-0.2	2.91	4.82	6.02	5.73	7.32	7.91
	回線マージン [dB] (実測値)	5.8	6.8	0.3	3.1	5.8	5.7	7.2	9.3	9.3
	偏差(実測値 - 予測値)	1.34	0.74	0.5	0.19	0.98	-0.32	1.47	1.98	1.39
ダウンリンク	観測点アンテナ利得 [dBi]	45.4	46	44.4	45.7	46.5	47	46.9	47.6	47.8
	回線マージン [dB] (予測値)	6.34	6.94	5.34	6.66	7.47	7.97	7.87	8.56	8.76
	回線マージン [dB] (実測値)	8.7	9.3	7	8.4	9.7	10.6	11.4	11.8	12.1
	偏差(実測値 - 予測値)	2.36	2.36	1.66	1.74	2.23	2.63	3.53	3.24	3.34

表4 回線マージン測定結果(西日本日本海沿岸エリア)

観測点	鳥取(餘部)	天橋立	京丹後	若狭(三方五湖)	福井	京丹後	福井	金沢	輪島(千枚田)	富山	
使用ビーム	近畿ビーム					中部ビーム					
ビーム中心と観測点離角 [deg]	0.1614	0.161	0.1808	0.2185	0.2899	0.3273	0.2352	0.1598	0.2352	0.1435	
アップリンク	観測点アンテナ利得 [dBi]	45.8	45.8	44.9	43.2	38.6	37.7	46.9	47.7	44.1	48.2
	回線マージン [dB] (予測値)	4.71	4.82	3.9	2.22	-2.4	-3.25	5.95	6.76	3.15	7.24
	回線マージン [dB] (実測値)	4.9	4.1	6	1.5	-0.8	-0.1	7	5.2	2.2	8.4
	偏差(実測値 - 予測値)	0.19	-0.72	2.1	-0.72	1.6	3.15	1.05	-1.56	-0.95	1.16
ダウンリンク	観測点アンテナ利得 [dBi]	46.8	46.8	46.4	45.6	43.8	42.2	46	46.3	44.8	46.6
	回線マージン [dB] (予測値)	7.02	7.63	7.2	6.44	4.6	3.1	6.9	7.21	5.7	7.5
	回線マージン [dB] (実測値)	11.4	11	8.6	9.9	5.3	2.9	7.4	10	7.7	7.1
	偏差(実測値 - 予測値)	4.38	3.37	1.4	3.46	0.7	-0.2	0.5	2.79	2	-0.4

め、高知においては両ビームにおいて測定を行った。

4.2 測定結果

各測定における回線マージンを測定するため、まず衛星のアンテナ利得を算出した。衛星のアンテナ利得は照射点と照射領域のみ公表 [1] されているが、個別の地点での利得は明らかになっていない。そこで、衛星から見た照射点と測定地点方向の Az と El を計算し、この2点間の離角を計算により求めた。次にアンテナビームの中心付近の形状は 3 dB ビーム幅を用いた軸対称の放物線で近似できることから、これを用いて中心からの利得低下量を計算し、照射点利得と利得低下量から各測定地点におけるアンテナ利得を求めた。

回線マージンは上記で求めたアンテナ利得を用いて、

各パラメータより回線設計を行った。表2に各測定地点におけるアップリンク及びダウンリンクの回線マージンの測定結果を示す。表中プラスマージンとなったところは赤字で示しているが、24 Mbps モードにおいて実測値はすべての地点においてプラスマージンとなり、実測値は予測値に比べアップリンクでは平均 2.5 dB、ダウンリンクでは平均 5.8 dB 高かった。

高知においては中四国ビーム(高知1)、近畿ビーム(高知2)と2ビームにおいて測定を行った。マージンの予測値と実測値の偏差が高知1と高知2において逆転していること、足摺岬における偏差が大きいことから中四国ビームのビーム中心は南西にずれていることが想定される。なお、文献 [7] の初期チェックアウトの結果からも南西へのずれが報告されているが、その

3 超高速衛星通信技術

値は要求値以内に収まっており、経年変化によりずれが大きくなっていることが考えられる。また、近畿ビームにおいても実測値と予測値の偏差が近畿地方の測定地点に比べ四国地方の測定地点が高いことから、ビーム中心は公称値よりも南西にずれていることが想定される。

同様に九州エリアで測定したものを表3に示し、西日本日本海沿岸エリアで測定したものを表4に示す。両エリアにおいても今回測定したすべての地点においてプラスマージンとなっており、24 Mbps モードにおいて通信が可能であることが確認された。

5 むすび

Ka 帯衛星通信システムにおいて広域における高速移動時の伝搬測定及びアップリンク回線、ダウンリンク回線のマージン測定を行った結果、高速移動時においても衛星を捕捉できることを確認した。また、今回測定を行ったコースにおいては四国近畿エリアでは約70%、九州エリア、西日本日本海沿岸エリアでは約80%以上のエリアにおいて衛星を捕捉することができた。またこれらエリアにおいて遮蔽される主な要因はトンネルに入るときであった。

また、MBAからのリファレンスバースト信号の受信C/N₀の測定結果より、測定値と理論値の偏差は±1 dB程度であり、よく一致することがわかった。

さらに、ドップラ周波数の測定結果より、理論値とほぼ同様の結果を得ることができ、回線設計の際には移動速度から求められる最大ドップラ周波数を考慮すればよいことがわかった。

また、回線マージン測定により、今回測定したすべてのエリアで24 Mbps モードの十分通信可能であることを確認できた。トンネル以外において見通し外となる状況は一時的なものなので、今回測定したエリアにおいては災害時において衛星通信が有効的な手段であることを示した。

【参考文献】

- 1 情報通信研究機構, “超高速インターネット衛星 (WINDS) 特集,” 情報通信研究機構季報, vol.53, no.4, 2007年12月
- 2 Akira AKAIISHI, Takashi TAKAHASHI, Mitsugu OHKAWA, Toshio ASAI, and Byeongpyo JEONG, “Ka-band Mobile Earth Station for WINDS,” 29th ISTS, June 2013
- 3 菅智茂, 高橋卓, 川崎和義, 赤石明, 浅井敏男, 鄭炳表, 薄田一, 村上修二, 豊嶋守生, “Ka 帯衛星通信における高速移動環境下での広域伝搬測定,” 信学技法, vol.115, no.287, SAT2015-62, pp.79-84, 2015年11月
- 4 菅智茂, 赤石明, 浅井敏男, 高橋卓, 川崎和義, 鄭炳表, 薄田一, 村上修二, 豊嶋守生, “九州地区における WINDS を用いた移動体衛星電波伝搬測定,” 2016年電子情報通信学会総合大会, B-3-16, 2016年3月
- 5 菅智茂, 高橋卓, 川崎和義, 赤石明, 浅井敏男, 鄭炳表, 薄田一, 豊嶋守生, “西日本日本海側地域における WINDS を用いた移動体衛星電

波伝搬測定,” 信学技報, vol.116, no.470, SAT2016-75, pp.81-86, 2017年2月

6 <https://iperf.fr/>

- 7 小澤悟, 島田政明, 中村安雄, 小石洋一, 草間哲, 平山勝規, 前田健, 福原圭太, “WINDS [きずな] マルチビームアンテナ (MBA) 軌道上性能評価,” 宇宙科学技術連合講演会講演集, vol.52, pp.ROMBUNNO.1 A09, 2008年



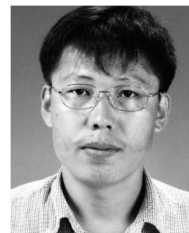
菅 智茂 (かん ともしげ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
研究員
博士(工学)
衛星通信、電波伝搬



赤石 明 (あかいし あきら)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
技術員(当時)
衛星通信システム



鄭 炳表 (じょん びょうびょう)

耐災害 ICT 研究センター
応用領域研究室
主任研究員
博士(工学)
防災、GIS、衛星通信



川崎和義 (かわさき かずよし)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
主任研究員
衛星通信



浅井敏男 (あさい としお)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
衛星通信システム



高橋 卓 (たかはし たかし)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
副室長
衛星通信