

17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの 周波数有効利用技術に関する調査検討会

報告書(概要版)

平成25年3月

17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの
周波数有効利用技術に関する調査検討会

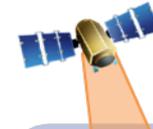
目次

- 1 はじめに
- 2 合成開口レーダーとは
- 3 地上設置型合成開口レーダーの有用性
- 4 観測事例
- 5 利用シーン
- 6 要求条件
- 7 観測実績と需要
- 8 干渉検討
- 9 実証試験
- 10 17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの技術的条件
- 11 調査検討会構成員

1 はじめに

- 合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) は、人工衛星や航空機等に搭載し、地形調査、地質調査、変動調査等、地球の様々な観測に利用。
- 近年、地上設置型の17GHz帯合成開口レーダーが登場し、世界各地において、地すべり斜面、採石場、人工構造物等の監視に利用。

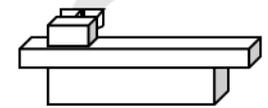
衛星SAR



航空機SAR



観測対象物



地上設置型
合成開口レーダー

我が国においては、自然災害による地殻変動や人工構造物への影響、火山活動の監視が必要不可欠であり、17GHz帯地上設置型合成開口レーダー (GB-SAR: Ground Based SAR) を利用することにより、

- ①観測対象物にセンサを取り付ける必要がない。
 - ②面的な観測を高精度に行うことができる。
- 等、 有用な監視方法の一つとなる。



火山



地すべり斜面



人工構造物



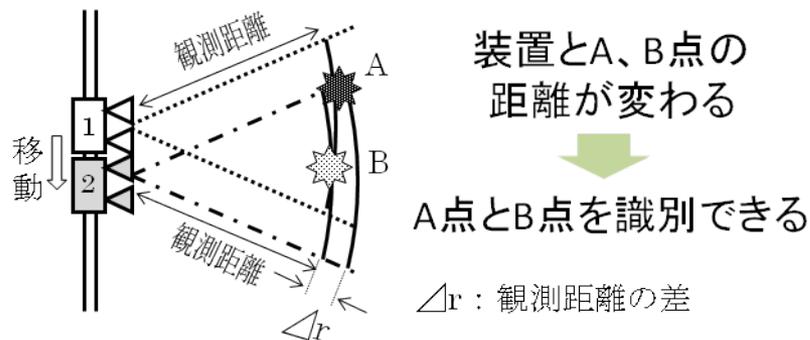
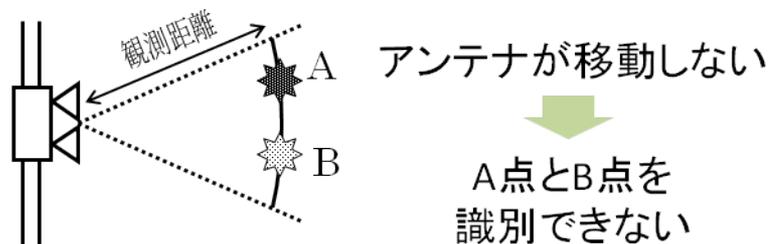
我が国におけるGB-SARの実用化に向けて、技術基準の策定に資することを目的とした「17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討会」を設置。

2 合成開口レーダーとは

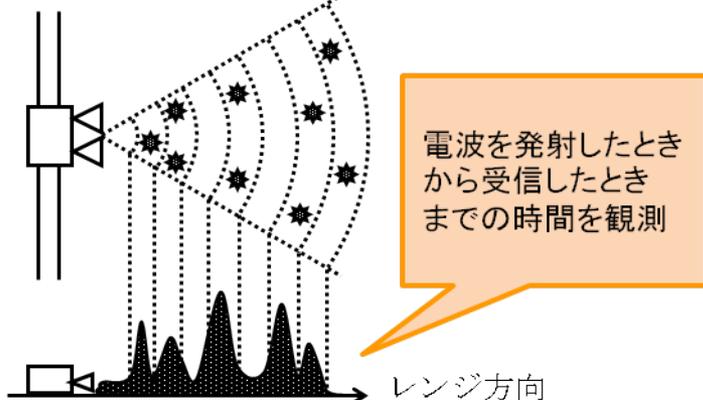
合成開口レーダーとは、アンテナを操作して仮想的に大きな開口面のアンテナを作り出すレーダー。これにより、観測対象物におけるクロスレンジ方向の分解能が向上する。

地上設置型合成開口レーダーの観測原理

・クロスレンジ方向の観測原理



・レンジ方向の観測原理



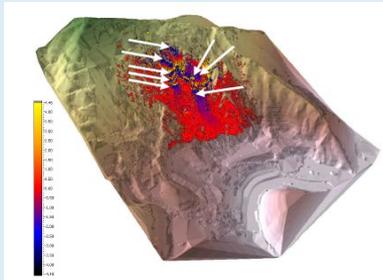
GB-SAR

- ・レール上を送受信部が移動
- ・レール上の各場所において、電波を送受信

高精度な面的観測

3 地上設置型合成開口レーダーの有用性

- ・面的な変位分布を高精度に観測可能



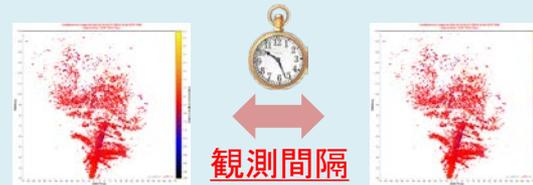
- ・天候による影響を受けにくい
- ・視界が悪いときにも使用可能



- ・対象物にセンサ等を設置する必要がない
- ・装置を対象物から数km離れた場所に設置可能



- ・24時間常時監視、観測間隔が短い



衛星データ使用時の 斜面崩落災害における必要な空間分解能*

利用段階	確認すべき情報	対象物 サイズ	必要な 空間分解能	充分な 空間分解能
災害直後 (2~3時間以 内)*	災害位置	5m	1m	0.3m
	災害規模(土砂量など)	1m	0.3m	0.1m
	家屋への影響	10m	3m	1m
	道路の沈下量・移動量	0.1m	0.03m	0.01m
	道路上のクラック	0.05m	0.02m	0.005m
復旧活動開始 (12時間以内) *	ストックヤード	20m	7m	2m
	迂回路・搬入路	5m	2m	0.5m
	崩壊斜面上の浮き石	0.05m	0.02m	0.005m
	崩壊危険箇所	5m	1m	0.3m

* 平成10~12年度に発生した斜面崩落災害及び浸水災害を対象に、災害復旧に携わった関係者(工事事務所・出張所・施工会社)へヒアリングを行い、災害発生後に確認すべき情報と必要とする空間分解能を整理した。

航空機搭載合成開口レーダー(Pi-SAR2)



Pi-SAR2を搭載した航空機

(<http://www2.nict.go.jp/aeri/plan/site/old/shinmoe/index.htm>)

前兆現象や災害復興のために分解能0.5m以下が必要

↓
分解能0.3mを実現

<参考文献>

- ・国土交通省総合技術開発プロジェクト「災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究」
⑩災害復旧作業における高分解能衛星データ利用に関する研究
- ・地震調査研究推進本部政策委員会 第25回総合部会 総務省提出資料。

4 観測事例①（斜面、鉱山、火山）

観測条件

観測対象物	地すべり斜面※1	鉱山の地表面	火山※2
観測期間	3ヵ月	4ヵ月	4ヵ月
観測距離	100m～400m	800m～1500m	3500m
観測範囲	400m×300m	—	3500m×800m
変位抽出精度	0.1mm オーダー	0.1mm オーダー	0.1mm オーダー
レンジ方向 の分解能	0.75m	0.5m	1.1m

※1: Using ground based radar interferometry during emergency, Nat.Hazards Earth Syst.Sci., 11, 2483-2495, 2011.

※2: 杉山光徳, 他: 溶岩ドーム挙動観測について, 平成24年度九州国土交通研究会論文集.

地すべり斜面

- ・イタリアにおいて大雨による斜面の様子を観測
- ・累積降雨が増えるにつれて変位量が大きくなった



GB-SARの様子



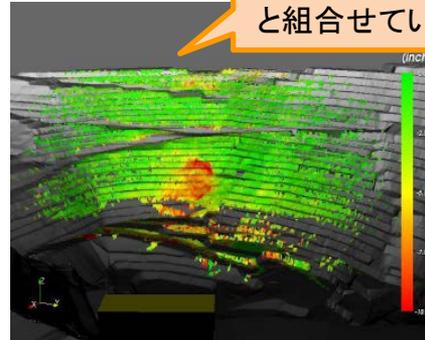
地すべり斜面

鉱山の地表面

変位が観測された場合、危険状態であることを知らせる警報システムが販売されている。



鉱山の様子



観測結果

火山

- ・日本において溶岩ドームの挙動観測
- ・溶岩ドームの崩壊や落石の監視
- ・豪雨による山腹斜面からの土砂災害の防止

4 観測事例②（ダム）

観測条件

観測対象物	ダム※
観測期間	37時間
観測距離	400m
観測範囲	100m×250m
変位抽出精度	0.1mmオーダー
レンジ方向の分解能	0.5m

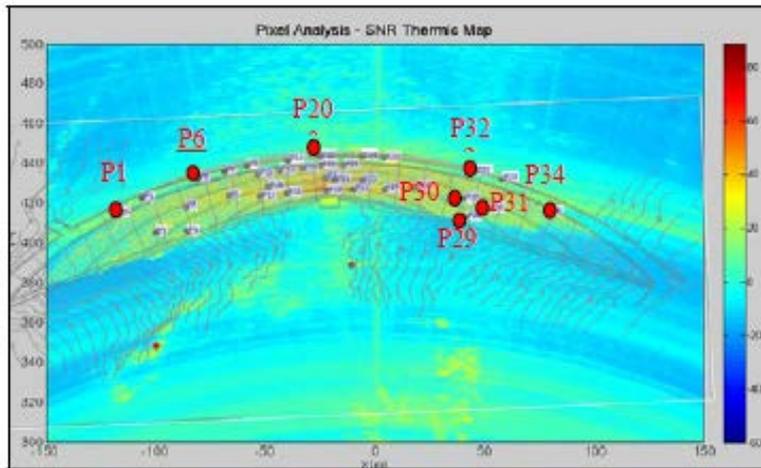
イタリアにおいて、水量や温度の変化による、アーチ型ダム(堰堤)の変位量を観測。

※: MEASUREMENT OF DAM DEFORMATIONS BY TERRESTRIAL INTERFEROMETRIC TECHNIQUES, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008.

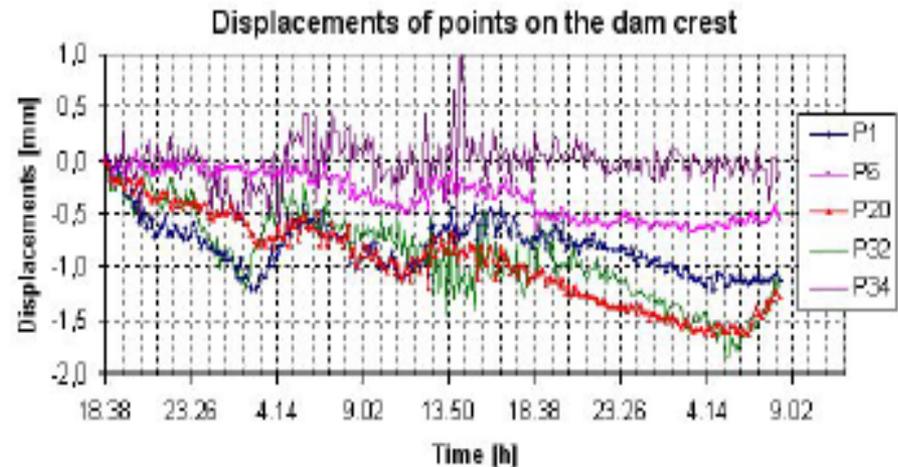


観測の様子

観測対象物の任意の点における、変位の時間変化



観測結果



変位の時間変化

5 利用シーン①

■地すべり・大規模崩壊・がけ崩れの斜面監視



要求条件

観測時期(期間)	常時監視(数ヵ月～数年)
設置場所	山間部
観測距離	数十m～数km程度
観測範囲	(数十m～数km) × (数十m～数km)
変位抽出精度	数mm～数cm程度の変位の観測

※危険区域の範囲によっては、数km以上の観測距離が必要となる場合も考えられる。

■利用目的

- ・斜面の変位量を観測
- ・斜面付近で工事を行う場合、作業員の安全確保等のため、斜面崩壊等の危険度の評価

■要求条件

- ・長距離及び広範囲の観測データの取得、電力の確保
- ・地すべり滑動の前兆の可能性のある末端部の小規模崩落等が検知できると、より高度な監視が可能
- ・0.3m程度の分解能が得られれば、地すべり末端部の小規模崩落等も検知しやすくなる

⇒多数のセンサの必要性減少や遠隔地からの観測による安全の確保、観測精度の向上、面的なすべり状況の把握による危険度評価の高度化が見込まれる。

5 利用シーン②

■火山活動の監視



要求条件

観測時期(期間)	常時監視、火山活動時(数ヵ月～数年)
設置場所	山間部
観測距離	数km～10km程度※
観測範囲	(数km～10km) × (数km～10km)
変位抽出精度	数mm～数cm程度の変位の観測

※火山活動が活発化すると、火口から半径数kmの範囲において、立入りが制限されることから、10km程度の観測距離が必要となる。

■利用目的

- ・溶岩ドームの成長等、火山体斜面の変動状況を観測
- ・火砕流や斜面崩壊等の危険度を評価

■要求条件

- ・長距離及び広範囲の観測データの取得
- ・0.3m程度の分解能を得られ、大規模な斜面崩壊等の前兆となるような小規模崩落等が検知できると、より高度な監視が可能
- ・対象物が1日に数cm～数十cm動く事例もあり、変位量が多い場合でも観測

⇒・火山活動が活発な場合にも遠隔地から高精度な観測及び状況把握をすることが可能となる。
・面的なすべり状況の把握による危険度評価の高度化が見込まれる。

5 利用シーン③

■橋梁等の人工建造物の監視



要求条件

観測時期(期間)	常時監視(数ヵ月～数十年)
設置場所	都市部、平野部、山間部
観測距離	数十km～数km
観測範囲	(数十m～数km) × (数十m～数km)
変位抽出精度	数mm～数cmの変位を ±1mm程度の精度で観測

■利用目的

- ・変位量を定期的に観測し、中長期的な劣化状況把握及び劣化予測
- ・災害時等の被災直後に観測し、定常時の観測結果と比較し、損傷状況等を解析

■要求条件

- ・平野部や都市部でも使用
- ・対象物が急勾配である場合、電波の照射角度を考慮するとレンジ方向の分解能が悪くなるため、GB-SARの分解能の性能値が小さいこと
- ・橋梁は、交通量や温度変化等の要因により絶えず変位しているため、GB-SARによる観測以外にこれらの要因も観測し、双方の観測結果から常時振動と劣化状況等を切り分ける

⇒ 多数のセンサを使用せずに対象物全体を短時間に観測することが可能となる。
・対象物の健全度評価が低コストで可能。ただし、各種センサとGB-SARとの補完及び組み合わせが必要となることもある。

5 利用シーン④

■ 自然災害による崩壊場所や構造物の崩壊場所の監視



要求条件

観測時期(期間)	数日～数ヵ月
設置場所	都市部、山間部
観測距離	数十m～1m程度
観測範囲	(数十m～数km) × (数十m～数km)
変位抽出精度	微小変位箇所の有無の観測

■ 利用目的

崩壊場所や崩壊した構造物の監視を行い、レスキュー隊突入の判断や天然ダム等の決壊後の定常化までの監視

■ 要求条件

- ・観測距離は短く、観測範囲は狭く、変位抽出に関しても高い精度は必要ない
- ・観測結果をリアルタイムに判断できる
- ・緊急性が要求されるため、専門家でなくともGB-SARの設置及び観測結果の判断が正確且つ早急にできる
- ・装置が人力で運搬可能、短時間で設置可能

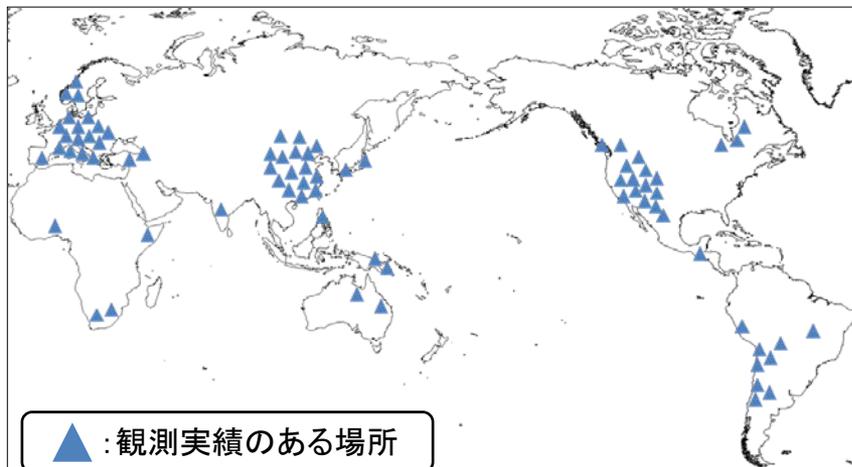
⇒ 危険な場所や構造物に近づくことなく、安全な遠隔地から対象物を監視することが可能となる。

6 要求条件

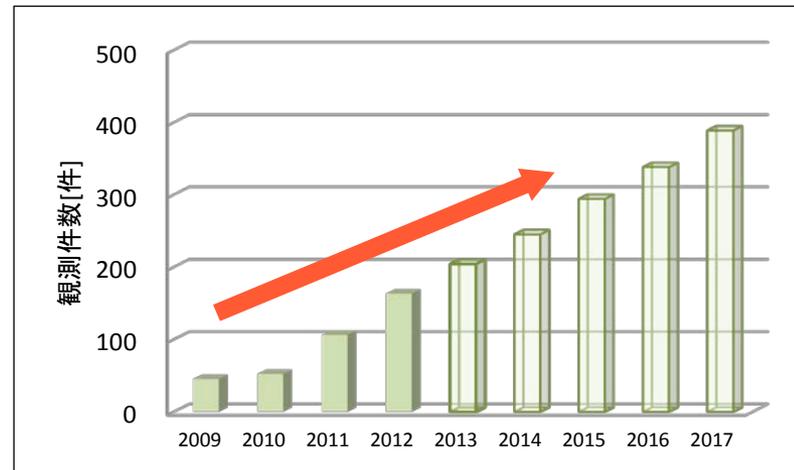
項目	要求条件	要求理由等
観測距離	数十m～10km程度	<ul style="list-style-type: none"> ・斜面や人工構造物を観測対象とする場合、最大数km必要 ・火山活動が活発化すると火口から半径数kmの範囲において立入りが制限される
観測範囲	(数十m～10km) × (数十m～10km)	観測範囲が広い場合には、GB-SARを複数台設置して対応
レンジ方向の分解能	<p>0.3m～0.5m 程度の分解能が得られれば、高度な監視を行うことが可能となり、利用が促進されるものと考えられる。</p> <div data-bbox="280 564 724 921"> <p>占有周波数帯幅の差による観測結果</p> <p>占有周波数帯幅が広がるとレンジ方向の情報が細かく取得可能</p> </div> <div data-bbox="280 963 724 1292"> <p>急勾配な観測対象物における分解能</p> <p>観測対象物に対する電波の照射角度θにより分解能が悪くなる。</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・レンジ方向の分解能は占有周波数帯幅に依存 ・斜面崩落災害の観測や災害復興時等での使用が想定されるため、航空機SARと同様、0.3m～0.5m程度の分解能が得られれば、高度な監視を行うことが可能 ・地すべり滑動の前兆を発見するため、小規模崩落を観測したい ・既存のGB-SARの最大仕様は400MHz(レンジ方向の分解能0.375m)であり、海外で観測実績がある <div data-bbox="772 535 1864 1292"> <p>小規模崩落における占有周波数帯幅の影響</p> <p>地すべりの恐れのある斜面</p> <p>変位を識別することが難しい</p> <p>変位を識別</p> <p>$B[\text{MHz}] < B'[\text{MHz}]$ のとき、$R[\text{cm}] > R'[\text{cm}]$ となる。 ○: 変位なし、×: 変位あり ※: 観測の範囲(1セル)に対して崩落部分が小さいため、変位を観測することが難しい。</p> </div>
変位抽出精度	数mm程度から1mm以下	観測対象物の安定性を評価する基準等に対応

7 観測実績と需要

■世界における実績



GB-SARによる観測実績のある場所



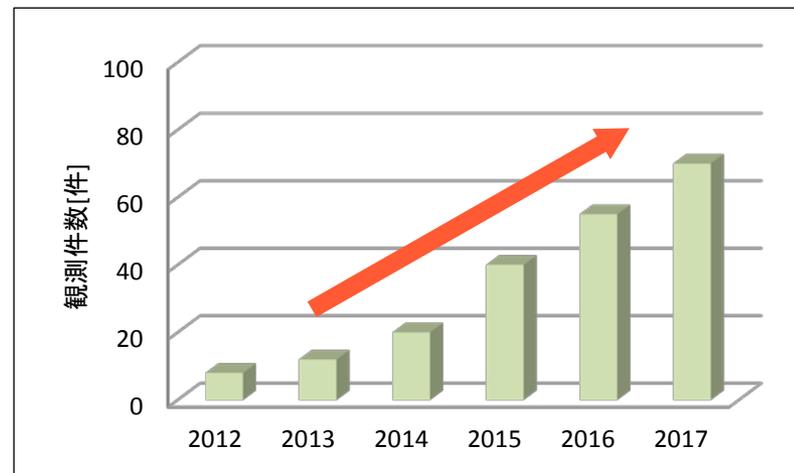
GB-SARによる観測件数(世界)

■日本における需要

- ・活火山や山岳地帯が数多く存在し、降雨や積雪により自然災害が数多く発生
- ・人工構造物は、自然災害による崩壊の恐れや老朽化による損傷等が懸念

GB-SARの観測対象物として考えられる場所及び人工構造物の例※

地すべり危険箇所	1万1千箇所以上
監視・観測体制等が必要である活火山	47火山
橋長15m以上の橋	15.7万橋

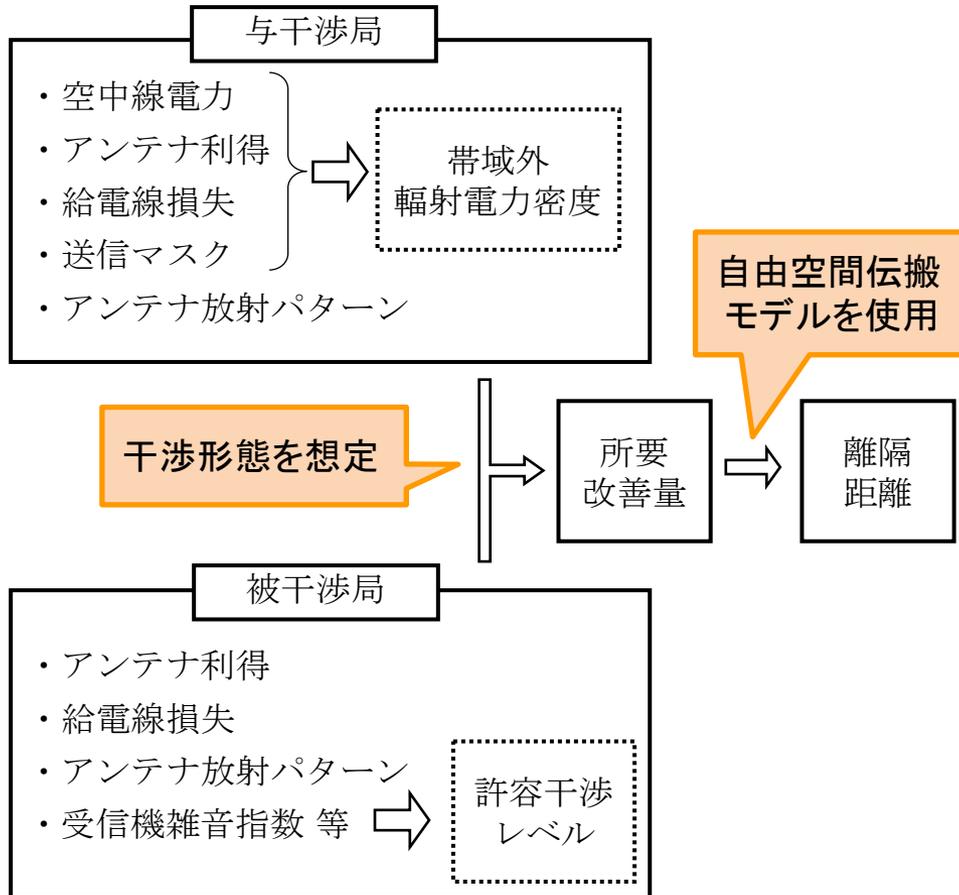


GB-SARの需要予測(日本)

※GB-SARの設置場所や観測対象物の状態等の観測条件により、GB-SARを使用して観測を行うことが難しい場合がある。

8 干渉検討 (検討方法)

近隣周波数システム及び近接複数設置時の干渉検討方法※



※ 参考 CEPT ECC REPORT111, 2007.

近隣周波数システムの仕様

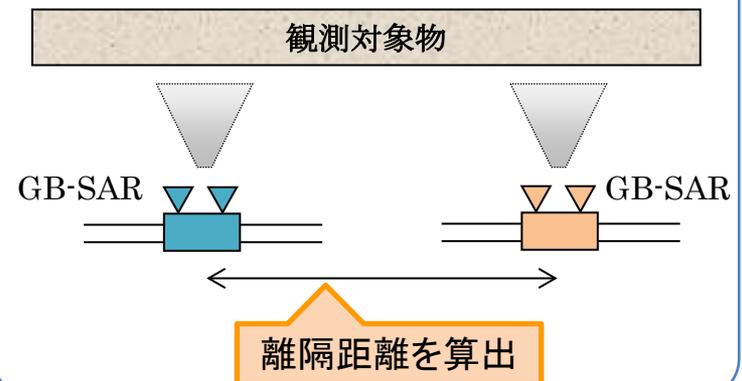
- ・ITU-Rにより勧告された値
- ・無線局免許交付時の仕様

GB-SARの仕様

- EIRPは50dBm
(観測距離10kmを実現するため)
- アンテナ利得は30dBi
(既存アンテナの最大値)

既存装置の占有周波数帯幅、雑音指数、アンテナ放射パターン等を考慮。

近接複数設置時の検討状況



8 干渉検討(検討結果)

検討対象システム※	周波数	干渉検討結果	備考
【気象レーダー／実験試験局】 (気象庁、大阪大学 他)	15.75GHz	◎	-
【散乱解析レーダー／実験試験局】	15.95GHz	◎	-
【航空機SAR／実験試験局】 (三菱電機(株))	16.45GHz	◎	-
【航空機SAR／実験試験局】 (アルウェットテクノロジー(株))	16.7GHz	◎	-
【BSフィーダリンク】 ((株) 放送衛星システム)	17.3GHz～17.7GHz	◎	-
【太陽観測】 国立天文台野辺山	17GHz帯	▲	注1
近接複数設置 (GB-SAR同士)	15.7GHz～17.3GHz	▲	注2

※平成25年2月1日現在

◎:干渉の影響がないと考えられる。

▲:干渉の影響があると考えられる。

注1:国立天文台野辺山から10km以上離れている場合、影響はないと考えられる。

注2:同一対象物を横並びで観測する場合には、離隔距離が必要となる可能性がある。

9 実証試験①

■ 実証試験概要

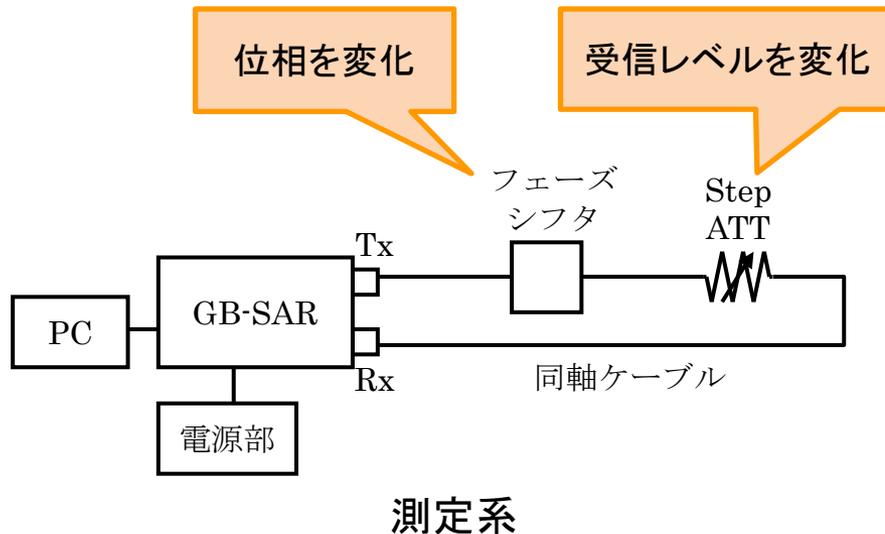
試験内容	実施期間	場所
基礎試験	10/24～11/1	神奈川県横須賀市
距離試験	11/19～11/21	茨城県つくば市
干渉試験	11/5～11/14	山梨県巨摩郡早川町

■ 実証試験装置

	IDS社	LiSALab社
周波数	17.05GHz～17.25GHz	17.0GHz～17.3GHz
占有周波数帯幅	200MHz	300MHz
空中線電力	20mW	100mW
アンテナ利得	19dBi	15dBi

■ 基礎試験の様子

GB-SARを有線接続し、最低受信感度を確認した。

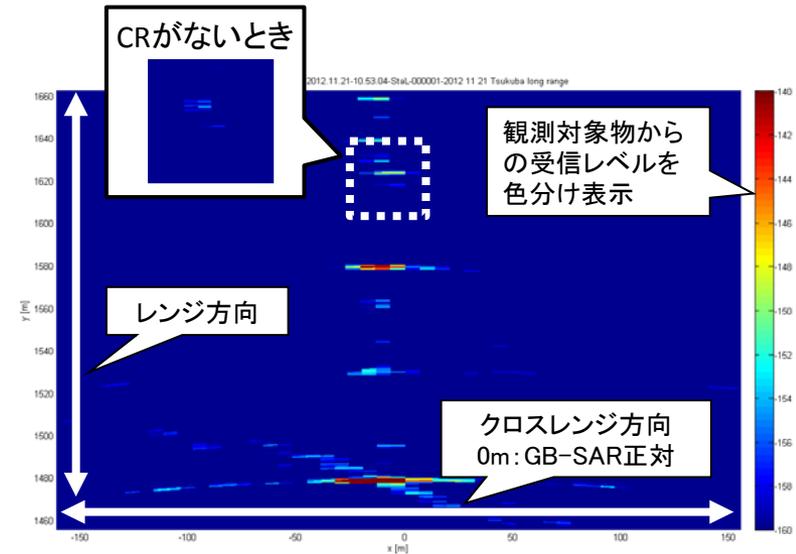
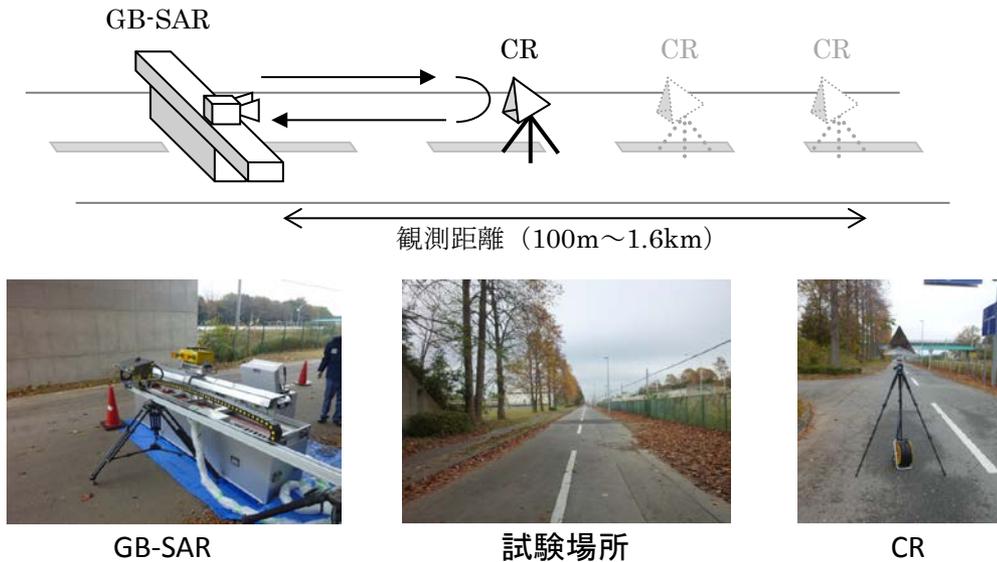


測定風景

9 実証試験②

■ 距離試験の様子

GB-SARからコーナーリフレクター(CR)までの距離を変化させながら、CRの設置前後の観測画像で視認確認を行った。



CRを設置したときの観測画像

■ 干渉試験の様子

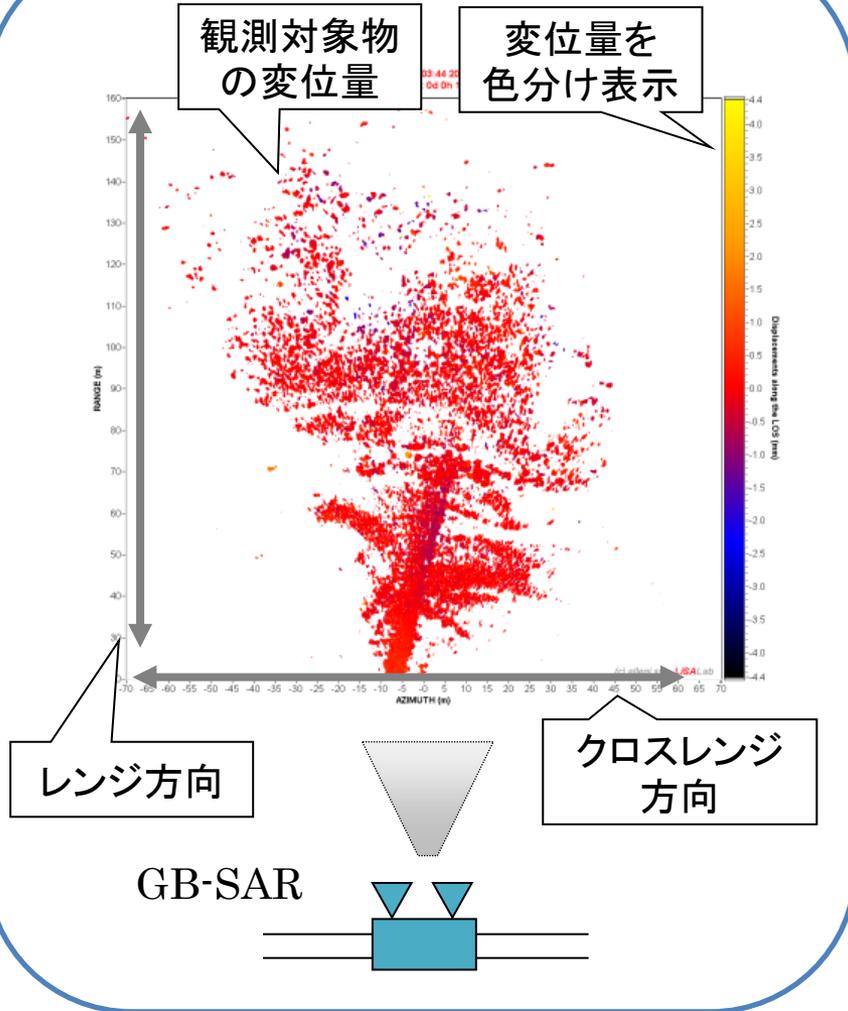
利用シーンに適した環境で、複数のGB-SARを同時に動かし、GB-SARの距離や観測角度を変更し、観測結果から干渉影響の有無を確認した。



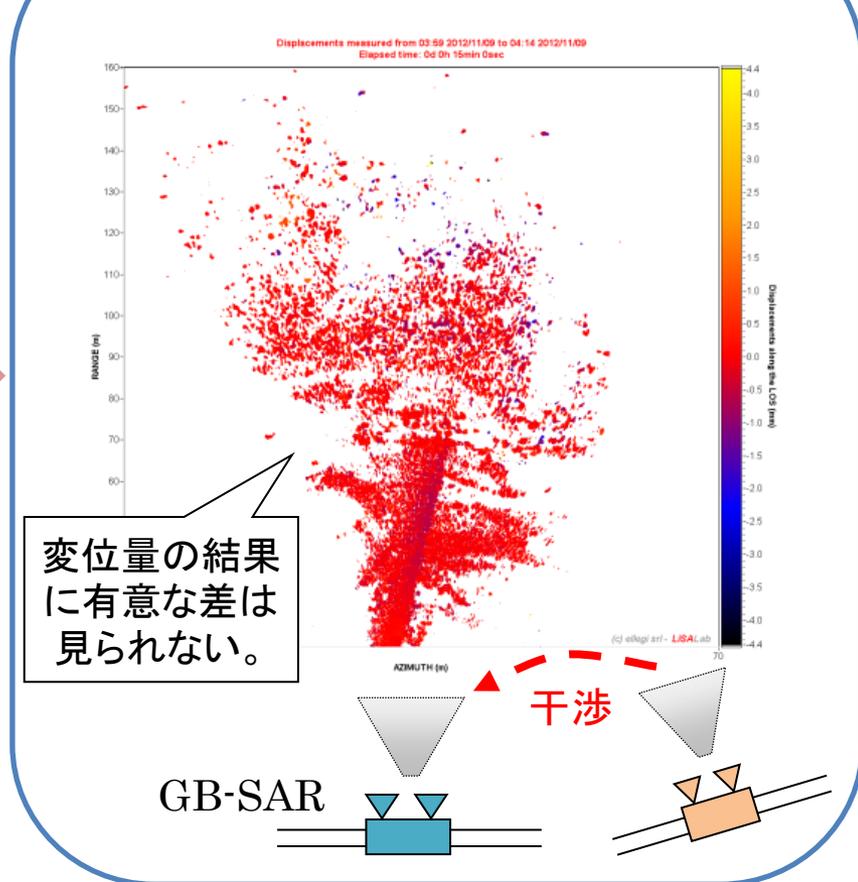
9 実証試験③

■観測画像の比較

GB-SAR1台で観測を行っている場合



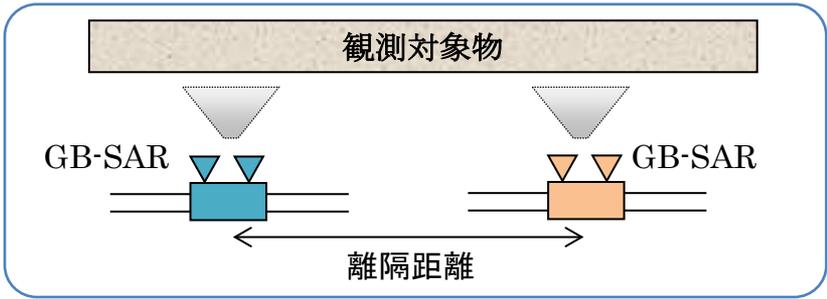
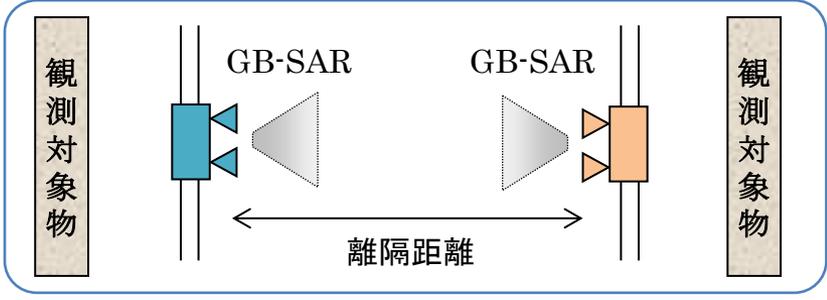
GB-SAR複数台で観測を行っている場合



比較

近接で複数台動作させても干渉の影響は確認されなかった。

9 実証試験 (試験結果)

試験状況	周波数	干渉検討結果	備考
<p>横並び</p> 	17.15GHz	○	※
<p>正対</p> 	17.15GHz	○	-

○: 干渉の影響は確認できなかった。

※: 干渉の影響について、同一対象物を横並びで観測する場合は、机上計算では離隔距離800mが必要となる可能性があるが、実証試験においては、観測対象物の変位量のみをみる限り干渉は確認出来なかったことから、実運用においては離隔距離を短くすることができると考えられる。

- ・試験に用いたGB-SARは、SF-CW変調方式であるため、与干渉局と被干渉局が同一周波数となる確率は低い。
- ・絶えず電波を発射し続けているわけではなく、アンテナの移動時間や受信のみを行っている時間がある。

10 17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの技術的条件

項目	技術的条件(案)
周波数	15.7GHz～17.3GHz
占有周波数帯幅の許容値	レンジ方向の分解能は0.3m程度必要であり、占有周波数帯幅が400MHzのとき、レンジ方向の分解能は0.375mとなる。
周波数の許容偏差	指定周波数帯によるため規定しない。
変調方式(電波型式)	SF-CW又はFM-CW
空中線電力	EIRP 50dBm以下 (例)空中線電力0.1W、アンテナ利得30dBi
スプリアス領域における不要発射の強度の許容値	50 μ W/MHz以下(尖頭電力)
帯域外領域における不要発射の強度の許容値	100 μ W/MHz以下(尖頭電力)
空中線電力の許容偏差	制度化に際して、空中線電力の値を規定する場合、空中線電力の許容偏差については、上限+50%とし、下限については規定しない。
受信装置 (副次的に発する電波等の限度)	<ul style="list-style-type: none"> ・スプリアス領域においては不要発射の強度の許容値以下 ・帯域外領域においては不要発射の強度の許容値以下
制御装置	<p>他のシステムから強いレベルの電波を受けたときには、電波の発射を停止する機能を有することが望ましい。</p> <p>(ECC REPORT111より、海外においては、地上設置型合成開口レーダーに干渉影響を回避する制御機能を搭載することが望ましいと考えられている。他のシステムから強いレベルの電波を受けたときには、地上設置型合成開口レーダーの電波の発射を停止することにより、他のシステムに影響を及ぼすことを避けることができる。)</p>
空中線	構造及び偏波面を規定する必要はない。

11 調査検討会構成員

17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用に関する調査検討会

期間:平成24年7月31日～平成25年2月15日(全5回)

構成員

福地 一 【座長】	公立大学法人 首都大学東京 システムデザイン研究科 航空宇宙システム工学域 教授
浦塚 清峰 【座長代理】	独立行政法人情報通信研究機構 電磁波計測研究所 センシングシステム研究室 室長
五十嵐 喜良	一般社団法人電波産業会 研究開発本部 次長
葛岡 成樹	日本電気株式会社 ナショナルセキュリティ・ソリューション事業部 技師長
倉岡 千郎	日本工営株式会社 中央研究所 総合技術開発部 副技師長
黒田 尚士	東日本高速道路株式会社 関東支社 技術部 技術企画課 課長代理
小木曾 正隆	東京都 建設局 河川部 土砂災害対策担当課長
鈴木 啓介	国土交通省関東地方整備局 河川部 河川計画課 課長補佐
鈴木 博人	東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター 防災研究所 所長
高岸 且	株式会社パスコ 衛星事業部 新技術推進部 部長
飛田 幹男	国土交通省国土地理院 地理地殻活動研究センター 研究管理課 課長
中川 永伸	一般財団法人テレコムエンジニアリングセンター 企画・技術部門 技術グループ 部長
原 芳久	三菱電機株式会社 鎌倉製作所 技術部長
藤井 秀彦	キーコム株式会社 開発技術部 リーダー
山越 隆雄	独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム 主任研究員

オブザーバー

佐藤 源之	国立大学法人 東北大学 東北アジア研究センター長
国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部 砂防計画課	
総務省 総合通信基盤局 電波部 基幹通信課	

総務省関東総合通信局 無線通信部 企画調整課

《参考》地上設置型合成開口レーダー装置

項目	IBIS-FL	LiSAmobile	FastGBSAR※ ¹	GPRI2※ ²
製造会社	IDS社(イタリア)	LiSALab社(イタリア)	METASENSING社(オランダ)	Gamma社(スイス)
日本代理店	株式会社パスコ	株式会社BIT	—	株式会社オープンGIS
外観				
ヘッドのサイズ	270mm × 120mm × 380mm	580mm × 350mm × 350mm	250mm × 110mm × 300mm	(アンテナ長)206mm
電源供給	発電機、太陽光パネル、蓄電池により供給可能。	発電機により供給可能。	蓄電池により供給可能。	発電機により供給可能。
観測距離	50m～4000m	10m～4400m	最大4000m	30m～10000m
観測範囲	数平方km ²	最大2500m × 2500m	最大2500m × 2500m	最大200km ²
合成開口長	最大2m	最大3m	最大2m(拡張も可能)	—
分解能	レンジ方向:0.5m クロスレンジ方向:1km先で4.4m	レンジ方向0.5m クロスレンジ方向:1km先で2.9m	レンジ方向:0.5m クロスレンジ方向:1km先で4.3m	レンジ方向:0.75m クロスレンジ方向:1km先で6.5m
変位抽出精度	0.1mmオーダー	0.5mm～0.8mm	0.1mmオーダー	0.1mmオーダー※ ³
周波数範囲	17.05GHz～17.35 GHz	17.0GHz～17.4 GHz	17.05GHz～17.35 GHz	17.1GHz～17.3 GHz
変調方式	SF-CW※ ⁴	SF-CW※ ⁴	FM-CW※ ⁵	FM-CW※ ⁵
EIRP※ ⁶	26dBm	26dBm～33dBm	最大49dBm	50dBm
空中線電力	4dBm～12dBm※ ⁷	11dBm～23dBm※ ⁷	26dBm	20dBm
アンテナ利得	14dBi～22dBi※ ⁸	10dBi～15dBi※ ⁸	17, 23dBi	30dBi

※1: 2013年6月頃発売予定

※2: アレーアンテナを使用した実開口レーダー装置。使用周波数帯、装置の使用目的、装置のサイズ等が他の装置と同様。

※3: SN比30dB、観測距離1kmの場合、装置に起因する誤差は0.03mm程度。

※4: Stepped Frequency Continuous Wave(ステップ周波数連続波)

※5: Frequency Modulated Continuous Wave(周波数変調連続波)

※6: CEPT(European Conference of Postal and Telecommunications Administrations)では最大EIRP+26dBm。

※7: 空中線電力はアンテナによって可変。

※8: アンテナ利得はアンテナ形状によって可変。

《参考》近隣周波数システム

周波数割当計画			周波数使用状況等※
周波数	国際分配	国内分配	
15.43～15.63GHz	固定衛星、航空無線航行	固定衛星、航空無線航行	無線局無し
15.63～15.7GHz	航空無線航行	航空無線航行(公共)	無線局無し
15.7～16.6GHz	無線標定	無線標定(公共・一般)	【気象レーダー／実験試験局】15.75GHz (気象庁、大阪大学他) 【散乱解析レーダー／実験試験局】15.95GHz 【航空機SAR／実験試験局】16.45GHz(三菱電機(株))
16.6～17.1GHz	無線標定 宇宙研究		【航空機SAR／実験試験局】16.7GHz (アルウェットテクノロジー(株))
17.1～17.2GHz	無線標定		【特定実験試験局】17.175GHz (日本工営(株)、東京大学、東北大学、(株)パスコ) 【海外許可状況】(カナダ(型式認定)、アメリカ(個別認証)、ヨーロッパ(免許不要))
17.2～17.3GHz	無線標定、宇宙研究等	無線標定、宇宙研究等	無線局無し
17.3～17.7GHz	固定衛星(地球から宇宙)	固定衛星(地球から宇宙 ／公共・放送)	(株)放送衛星システムでは、5機の放送衛星を運用中。

注: 長野県にある国立天文台 野辺山において、17GHz帯を用いて太陽の活動モニター等を行っている。

※平成25年2月1日現在

国内分配状況

