

400MHz 帯気象・地象観測用周波数の
有効利用に関する調査検討
報告書

平成 30 年 3 月

400MHz 帯気象・地象観測用周波数の有効利用に関する調査検討会

まえがき

九州地方は、我が国の中でも自然災害が多い地域です。例えば火山の面では、17 の活火山が九州地方に存在し、これは日本の活火山のうち約 2 割に相当します。最近では阿蘇山、口永良部島、霧島連山や桜島等火山活動が活発化しています。なお九州地方以外では、御嶽山や草津白根山などの噴火も発生しました。地震災害では、平成 28 年熊本地震において震度 7 の大地震が 2 回連続して発生し、熊本から大分にいたる広い地域に甚大な被害が生じました。また九州地方は、例年台風の通り道となっており、さらに近年の気候変動の活発化に伴い台風やゲリラ豪雨による土砂災害や河川氾濫なども多く発生し、特に去年は九州北部災害が発生しました。

こうした中、九州地方を含め我が国における自然災害に対する対策が急務であり、被害の最小化のための気象・地象（火山・地震）観測の重要性が高まっています。

現在、気象・地象に係る各種観測や種々のセンサー等における計測データの伝送手段としては、70MHz 帯及び 400MHz 帯テレメータ（固定系）、気象援助局、920MHz 帯特定小電力無線、2.4GHz 帯無線 LAN、携帯電話回線、有線回線等が、各々の特長に応じて使い分けがなされています。しかしながら、本来気象・地象の観測データ伝送専用周波数割当てされている 400MHz 帯の周波数を利用する気象援助局及び地震又は火山噴火予知観測用無線局については、伝送距離や消費電力等の点で利用が進んでいません。

このため 400MHz 帯の周波数を利用する気象援助局及び地震又は火山噴火予知観測用の周波数（以下、「400MHz 帯気象・地象観測用周波数」という）における新しい伝送方式について電波伝搬試験を実施し、導入に必要な技術的検討を行うことにより、これらの周波数の更なる利用の活性化及び有効利用を図り、もって防災・減災に資することを目的として本調査検討会を進めて参りました。

本報告書は、気象・地象観測について周波数の有効利用を総合的に考慮した技術的な検討成果をまとめたものであり、今後は本報告書に基づき、自然災害大国である我が国におけるに安全な生活を維持するために重要な火山・地震・気象現象の課題解決に貢献できることを期待しております。

終わりに、本調査検討会にご参加頂き熱心に議論して頂きました構成員各位、アンケート調査及びヒアリングにご協力頂きました大学、国土交通省砂防関係、気象庁、国立研究開発法人、地震・火山観測機器メーカー、九州地方自治体の皆様に対し、心より感謝申し上げます。

400MHz 帯気象・地象観測用周波数の
有効利用に関する調査検討会
座長 松島 健

目次

第1章 現状と課題.....	1
1.1 気象・地象災害の発生状況	2
1.2 気象・地象の観測・監視体制.....	3
1.2.1 地震・津波の監視体制	3
1.2.2 火山の監視体制	4
1.2.3 気象観測体制.....	5
1.3 気象・地象観測に利用される通信システム	6
1.3.1 通信システム概要	6
1.3.2 記録方式と通信量	8
1.4 気象・地象観測用無線局.....	9
1.5 近年注目される新しいシステム	10
1.5.1 LPWA (Low Power Wide Area)	10
1.5.2 LoRa (Long Range)	11
第2章 利用促進に求められるニーズ.....	14
2.1 アンケート調査	14
2.2 ニーズのまとめ	22
第3章 実証試験	25
3.1 実験機の概要.....	25
3.2 ラボ試験	27
3.2.1 試験項目	27
3.2.2 単体試験.....	27
3.2.3 干渉試験.....	31
3.2.4 消費電力測定.....	36
3.3 フィールド試験	37
3.3.1 フィールド試験の概要	37
3.3.2 移動測定結果.....	42
3.3.3 伝搬損失モデル	50
3.3.4 定点測定.....	54
3.3.5 まとめ	57
第4章 共用検討	59
4.1 共用条件の整理	59
4.1.1 共用検討する機器の諸元.....	59
4.1.2 共用検討のモデル	62

4.2 共用検討計算結果.....	67
4.2.1 現行システムの結果.....	67
4.2.2 LoRa システムの結果.....	68
4.3 共用条件のまとめ.....	73
4.4 まとめ.....	75
第5章 提言	76
5.1 システム検討.....	76
5.1.1 占有周波数帯幅.....	76
5.1.2 電波型式.....	77
5.1.3 変調信号の送信速度.....	77
5.1.4 空中線電力	78
5.1.5 周波数と局種について	80
5.1.6 スプリアス	80
5.1.7 キャリアセンス.....	81
5.1.8 周波数の許容偏差	81
5.1.9 隣接チャネル漏えい電力.....	82
5.1.10 受信設備	82
5.2 技術的条件	83
5.2.1 一般条件.....	83
5.2.2 送信設備.....	84
5.2.3 受信設備.....	86
5.2.4 制御装置.....	87
5.2.5 その他	88
5.3 実用化・普及に向けて	88
5.3.1 低廉化	88
5.3.2 利用方法.....	89
5.3.3 今後の検討課題.....	90

第1章 現状と課題

近年、火山活動（口永良部、桜島、阿蘇山、霧島連山、草津白根山等）や地震活動（熊本地震、鳥取中部地震等）が活発に発生しており、火山や地震の観測が重要になってきている。また、ゲリラ豪雨等気候変動による豪雨災害（九州北部豪雨災害）やそれに伴う土砂災害（広島市の土砂災害）も多発しており、気象観測や災害状況を把握する事も重要である。

現在はこれら観測データの伝送に、70MHz 帯、400MHz 帯、920MHz 帯特定小電力、2.4GHz 帯無線 LAN、携帯電話、有線等が利用されているが、いずれも一長一短（伝送容量、通信距離、混信、通信エリア、コスト等の問題）があり、特長に応じた使い分けがされている。しかしながら、この中で気象援助業務及び地震又は火山噴火予知観測用として割り当てられている 400MHz 帯気象・地象観測用周波数は利用が進んでいない。

一方、IoT（Internet of Things）社会の本格的な到来に向け、従来よりも省電力・長距離伝送に優れた LoRa 方式を始め、多様な伝送方式が出現しているため、これら新しい技術の導入により 400MHz 帯の有効利用が可能であると考えられる。

本検討会では 400MHz 帯気象・地象観測用周波数について、新たな通信方式を導入可能にして伝送手段の選択肢を広げることにより、当該周波数の利用促進を図り、周波数の有効利用を図るとともに、防災・減災に資することを目的とした。さらに本検討における LoRa 方式の海上伝播を含めた伝搬測定データ等は、防災を始めとする公共業務等において LoRa 方式を導入する際の検討資料として、有効に活用されることが期待できる。

当該周波数帯の有効利用を実現するために大学・研究機関・官公庁およびメーカ等関係各所へ現状調査およびニーズ調査を行い、これにより洗い出された必要な検討項目について実証試験を行い、得られた結果を基に、技術的条件等の策定に向けた提言等を取りまとめる。検討の流れは図 1-1 のとおりである。

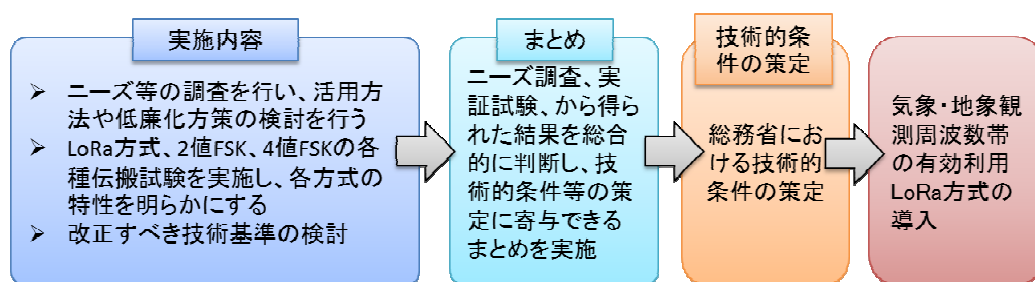


図 1-1 検討の流れ

1.1 気象・地象災害の発生状況

日本は北米プレート、ユーラシアプレート、太平洋プレート及びフィリピンプレートの境界の近くに位置していることから、また、毎年台風の通り道となっていることから、常に災害の危険にさらされている。さらに近年特に火山活動や地震活動が活発化してきているといわれている。ここでは日本における地震・火山噴火・豪雨の発生状況を示す。図 1-2 に我が国におけるマグニチュード 4 および 7 以上の地震発生回数を示す。マグニチュード 7 以上の地震は世界中でこの 90 年間に 900 回ほど起きているが、そのうち 10% もの地震が世界の 0.25% の国土面積しかない日本で起きている。図より、この 7 年間は毎年マグニチュード 7 以上の地震が発生していることがわかる。

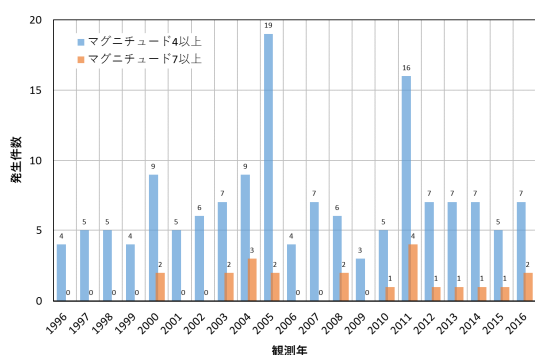


図 1-2 我が国におけるマグニチュード 4 および 7 以上の地震発生回数¹

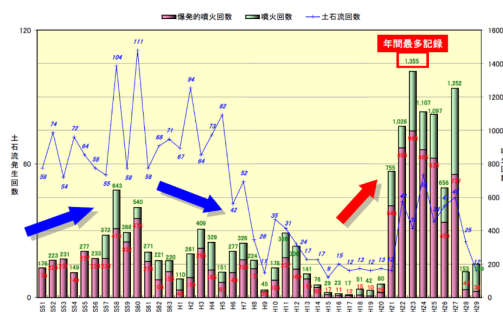


図 1-3 土石流と噴火の発生回数²

日本は「山地」と「丘陵」の占める割合が国土の約 73% を占めるため山国ともいえ、そのうち現在活火山とされている数は 111 に及ぶ。火山活動による災害は、火山灰等の降下物や溶岩流等の流下物が原因となる事例の他、大規模崩壊、降雨時の土石流等もあげられる。図 1-3 に土石流と噴火の発生回数を示す。図より、爆発的噴火回数及び噴火回数が近年著しく増えていることがわかる。

また、近年、局地的大雨や集中豪雨が頻発している。これにより全国各地で急な河川の増水や氾濫などによる人的被害、住家被害、土砂災害など多くの災害が発生している。図 1-4 に 1 時間降水量 80mm 以上の年間発生回数を示す。図より、10 年あたり 2,3 回の割合で増加していることがわかる。このように、気象・地象の観測は近年ますます重要となっている。

¹ データ引用元：気象庁 HP (<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/>)

² データ引用元：気象庁 HP

一方、大学や国立の研究機関では地震予知研究の一環として、研究を主目的とした地震観測が行われており、インフラが整備されていない地点での臨時観測も多く実施されている。表 1-1 に地震及び火山噴火予知のための観測研究計画実施機関の大学の一覧を示す。九州大学による臨時観測の例を図 1-6 に示す。

表 1-1 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画実施機関の大学⁵

北海道大学	東京工業大学	九州大学
弘前大学	名古屋大学	鹿児島大学
東北大学	京都大学	東海大学
秋田大学	鳥取大学	立命館大学
東京大学	高知大学	



オフライン観測
(霧島新燃岳)



VSAT テレメータ
(2011 年東北沖地震)



ユビキタステレメータ
(霧島えびの高原)

図 1-6 臨時観測例 (九州大学)

1.2.2 火山の監視体制

図 1-7 に気象庁による常時火山観測地点、図 1-8 に火山の監視体制について示す。気象庁では、気象庁本庁（東京）に設置された「火山監視・警報センター」、札幌・仙台・福岡の各管区気象台に設置された「地域火山監視・警報センター」（以下、まとめて火山監視・警報センター）において、これらの活火山の火山活動を監視している。

111 の活火山のうち、「火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山」として選定された 50 火山については、噴火の前兆を捉えて噴火警報等を適確に発表するために、地震計、傾斜計、空振計、GNSS 観測装置、監視カメラ等の火山観測施設を整備し、関係機関（大学等研究機関や自治体・防災機関等）からのデータ提供も受け、火山活動を 24 時間体制で常時観測・監視している。

また、各センターの「火山機動観測班」が、その他の火山も含めて現地に出向いて計画的に調査観測を行っており、火山活動に高まりが見られた場合には、必要に応じて現象を

⁴ 引用元：気象庁 HP (<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/>)

⁵ 引用元：地震及び火山噴火予知のための観測研究計画実施機関
(http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/attach/1330707.htm)

より詳細に把握するために機動的に観測体制を強化している。

一方、大学や国立の研究機関では火山噴火予知研究の一環として、火山噴火のメカニズム研究を主目的とした火山観測が行われている。地震観測と同様にインフラが整備されていない火山山頂部での臨時観測も数多く実施されている。

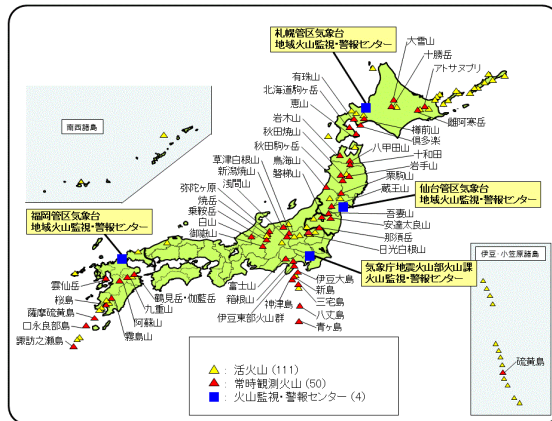


図 1-7 気象庁による常時火山観測地点⁶

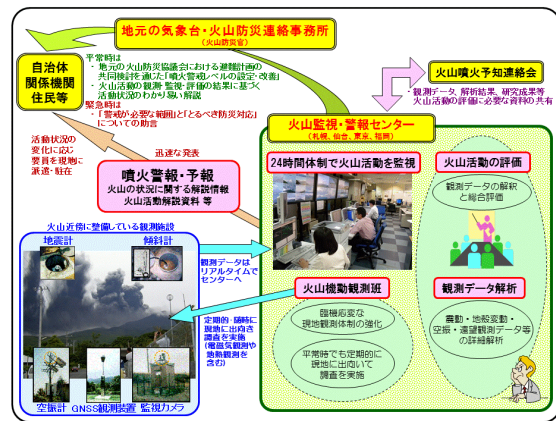


図 1-8 火山の監視体制⁷

1.2.3 気象観測体制

全国約 150 ヶ所の気象官署（気象台や測候所）等では、気温や降水量などの観測を行っており、そのほとんどが自動化されている。観測データは決められた時間に国内外にリアルタイムに伝えられ、天気予報や気候変動の監視等に利用されている。観測要素は、気温、降水量、日照時間、風向、風速、積雪・降雪の深さ、気圧、湿度（相対湿度）、日射量、視程、大気現象（雷・霧など）、天気、雲の形や量である。

地域気象観測システム AMeDAS⁸（Automated Meteorological Data Acquisition System）は、全国約 1300 カ所で雨量を自動的に観測し、このうち約 840 カ所（約 21 キロメートル四方に 1 カ所）では気温、風向・風速、日照時間などの自動観測も行っている。

図 1-9 に AMeDAS 観測網、図 1-10 に AMeDAS 観測所の一例を示す。

気象レーダーでは、電波を使って雨や雪の降り方の強さの分布、移動などを広い範囲で連続的に観測している。またアメダスデータと組合せ正確な雨量分布を作成している。

さらに気象衛星により日本付近を含むアジア東部、オセアニア、西太平洋地域の雲の動きや海面の水温分布などを観測している。

高層の気象観測は、上空の大気の状態を観測するもので、ラジオ・ゾンデによる観測とウィンドプロファイラによる観測がある。ラジオ・ゾンデとは、航空機、自由気球、たこ又は落下傘に通常装置する自動送信設備であり、ウィンドプロファイラは、地上から上空に向けて電波を発射することで上空の風向・風速を観測する装置である。

⁶ 引用元：気象庁 HP（<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index92.html>）

⁷ 引用元：気象庁 HP（<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index92.html>）

⁸ 引用元：気象庁 HP（<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html>）

そのほか高潮などの観測のために全国 66 カ所に検潮所を、沿岸における波やうねりの観測のために全国 6 ヶ所に沿岸波浪計を設置している。

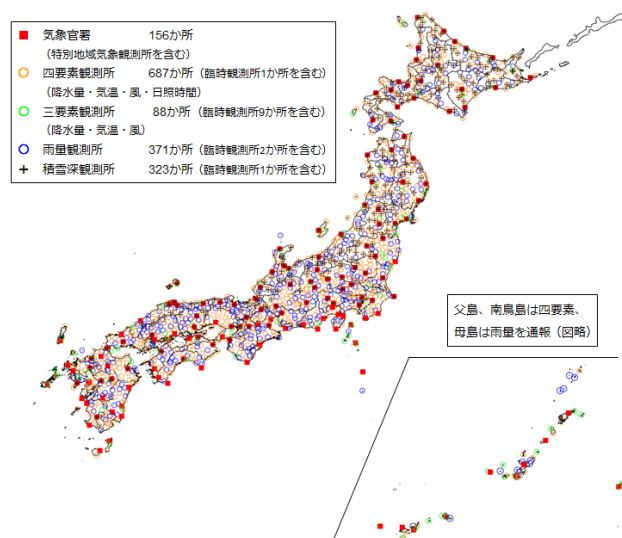


図 1-9 AMeDAS 観測網



図 1-10 AMeDAS 観測所の一例

1.3 気象・地象観測に利用される通信システム

1.3.1 通信システム概要

気象・地象観測に利用される通信システムを表 1-2 に示す。テレメータ、特定小電力、無線 LAN、携帯電話、有線等が利用されており、それぞれの特徴に応じた使い分けがされている。

有線システムとしては現在地象観測において回線利用料が安くへき地でもサービスされている ISDN 回線が多く利用されていたが、2020 年度の回線サービス終了を見越し、光回線や携帯電話網に移行しているケースもある。

無線系としては、VSAT を利用した衛星回線システムでは有線回線が敷設されていない地域で有効であるが、消費電力が大きく維持費が高額であり、アンテナ調整が難しい面もある。2.4GHz 無線 LAN を利用したシステムでは免許が不要で比較的装置が安価なためシステム構築は容易であり、また大容量伝送も可能であるが、見通しの確保が必要であるため山間における通信品質が確保できないことやチャネル混信が短所としてあげられる。ユビキタスモジュールを利用したシステムでは消費電力が小さいが、携帯電話基地局に依存するため携帯電話の電波が届かないエリアでは観測が不可となる。70MHz 帯および 400MHz 帯テレメータは雨量等の定常的な観測で多数利用されているが、受信電界が低く、地形によっては中継局を多数必要とする場合がある。400MHz 帯気象援助局及び 400MHz 帯地震・火山噴火予知観測用無線局は各々専用に周波数が割り当てられているため通信品質は高いが通信速度が遅く、機器の価格が他と比べて著しく高い。920MHz 帯特定小電力は送信電力の関係から伝送速度及び伝送距離が限られるが、無線局免許が不要なため無線局導

入の手間が少ない。

また、観測システムを扱う側からみると、気象庁では防災情報として即時処理を行う必要があるためリアルタイム性を重視しており、遅延が少ないシステムが望まれるのに対して、大学では研究として観測・研究しているため、リアルタイム性は重視せず、遅延も多少は許容できる。このように、それぞれの特徴に合致したシステムを選択することが重要となる。

表 1-2 気象・地象観測に利用される通信システム

項目	70MHz 帯テレ メータ	400MHz 帯			920MHz 特定 小電力	無線 LAN	VSAT (12/14 GHz)	携帯 電話	有線
		テレ メータ	気象援 助局 ※1	地震・火山噴火 予知観測用 (固定系/移動系)					
免許	必要	必要	必要	必要	不要	不要	必要	不要	不要
空中線 電力	5W/ 最大 10W	5W/ 最大 10W	1W	20W/1W	20mW	10mW /1MHz	20W	—	—
伝送 速度	200bps/ 1200bps	1200bps	9.6kbps	57.6kbps/ 9,6kbps	100kbps	数 10 Mbps	下り 10Mbps 上り 2Mbps	下り 84kbps 上り 64kbps	64kbps /100Mbps
通信 距離	10km	10km	10km	10～30km	約 2km	約 1km	全国	サービースエリア 内	サービースエリア 内
通信の 信頼性	高	高	高	高	中	低	低	高	高
機器 価格	約 300 万円	約 300 万円	約 300 万円	約 300 万円	約 10 万円	10 万円 以下	約 300 万 円	10 万円以 下	10 万円 以下
運用 コスト	高	高	高	高	中	低	高	高	高

※1：ラジオ・ゾンデを除く

1.3.2 記録方式と通信量

地震・火山観測における代表的な記録方式を表 1-3 に示す。

表 1-3 地震・火山観測における代表的な記録方式

	最小	標準	最大
チャンネル数	1CH	3CH	6CH
サンプリング周波数	100Hz	100Hz	1000Hz
記録分解能	24bit	24bit	32bit
ダイナミックレンジ	128dB	135dB	140dB
データ伝送方式	イベント方式	連続方式	連続方式

気象庁の火山観測点には、火山総合観測点、恒久観測点、機動観測点があり、火山総合観測点は1火山に1観測点以上を設置している。（九州では、火山活動が活発な霧島山と桜島には、3観測点を設置）恒久観測点は、火山活動の常時観測、監視のために計画的に設置された観測点である。機動観測点は火山活動の活発化などにより、監視強化のために臨時に設置されている。

火山総合観測点では、観測データ別の通信量は以下のとおりである。

地震計データ : 3成分 (NS、EW、UD) を 100Hz サンプルングで 24ビット (3CH)

傾斜計データ : X、Y を 1Hz サンプルングで 16⇔24ビット (2CH)

地中温度データ : シリアル (1CH)

地上温度データ : 100Hz サンプルングで 24ビット (1CH)

空振計データ : 100Hz サンプルングで 16⇔24ビット (1CH)

上記データで1秒毎の WIN⁹ (GPS 観測時刻付加、WIN 圧縮) パケットを作成し、IP パケットで挟み VOIS (火山監視・情報センターシステム) へ伝送する。

気象庁では、GNSS データは、毎時センターシステム (気象庁本庁) から携帯電話回線又は衛星回線で回収する。

代表的な臨時観測に必要な通信量は以下のとおりである。

- 地震観測 (臨時)
 - 地震計 / 広帯域地震計 (3CH×100Hz×24bit)
 - 平均通信量 : 2.4～7.2 kbps 程度
- 火山観測 (臨時)
 - 地震計 (+空振計 / 傾斜計) (3～6CH×100Hz×24bit)
 - 平均通信量 : 2.4～13.2 kbps 程度

⁹ 東京大学地震研究所で開発された多チャンネルの地震波形を取り扱うための処理システム(WIN システム)。

1.4 気象・地象観測用無線局

気象援助局とは、気象援助業務（水象を含む気象上の観測及び調査のための無線通信業務）を行う無線局であり、公共業務用として開設されるものである。ラジオ・ゾンデおよびラジオ・ロボットにより気象データを送信・中継している。なお、ラジオ・ゾンデについては、周波数利用率が高いことから対象周波数から除外することとした。

また、地震又は火山噴火予知観測用無線局とは文部科学省諮問機関（科学技術・学術審議会測地学分科会）の建議に基づく機関が地震予知又は火山噴火予知の観測に必要な通信を行うことを目的として用意されており、固定系及び移動系がある。それぞれの周波数割当を表 1-4 に示す。検討対象周波数を図 1-11 に示す。

表 1-4 気象援助局及び地震又は火山噴火予知観測用無線局の周波数割当

無線局種別	用途	周波数[MHz]	占有周波数帯幅[kHz]	空中線電力[W]
気象援助局	ラジオ・ロボット	402.875～403.025	8.5	1
	ラジオ・ロボット 中継用	405.9～405.9875	8.5	1
固定系	地震又は火山噴火予知観測用	346.6/347.5/363.1/364/ 409.025～409.7	50	20
移動系		402.6～402.85/ 403.05～403.075	8.5	1

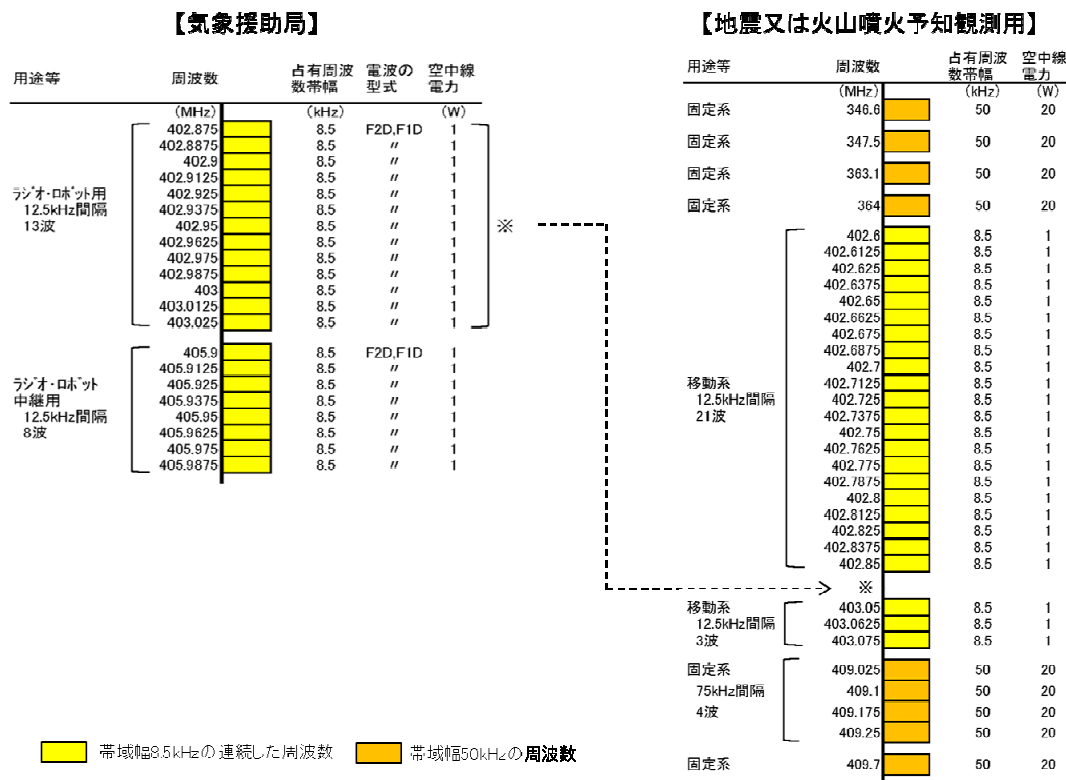


図 1-11 検討対象周波数

表 1-5 には九州管内における過去 10 年間の無線局数の変化を示す。気象援助局においては、平成 20 年～21 年にかけて局数は減ったが、その後に大きな変化はない事がわかる。また、地震又は火山噴火予知観測用においては、無線局数にほとんど増減は見られない。

表 1-5 過去 10 年間の無線局数の変化（九州管内）

無線局数		H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29.12 末
気象援助局	九州	51	29	27	27	24	24	23	22	24	23
地震又は火山噴火予知観測用無線局	FX	11	11	11	11	10	10	10	10	10	10
	FB	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	ML/MP	35	35	35	35	35	35	35	35	41	41

FX:固定局、FB:基地局、ML:陸上移動局、MP:携帯局

1.5 近年注目される新しいシステム

1.5.1 LPWA (Low Power Wide Area)

IoT 社会の本格的な到来に向け、従来よりも低消費電力、広いカバーエリア、低コストを可能とする IoT 時代の無線通信システムである LPWA の実現が期待されている。具体的には、新たな無線通信システムである LoRa、SIGFOX や、携帯電話ネットワークを利用する eMTC (enhanced MaCHine Type Communication)、NB-IoT (Narrow Band IoT) などが提案され、導入に向けた検討が本格化している。主な無線通信規格と比較した際の LPWA の位置付けを図 1-12 に示す。表 1-6 には LPWA の主な規格一覧を示す。

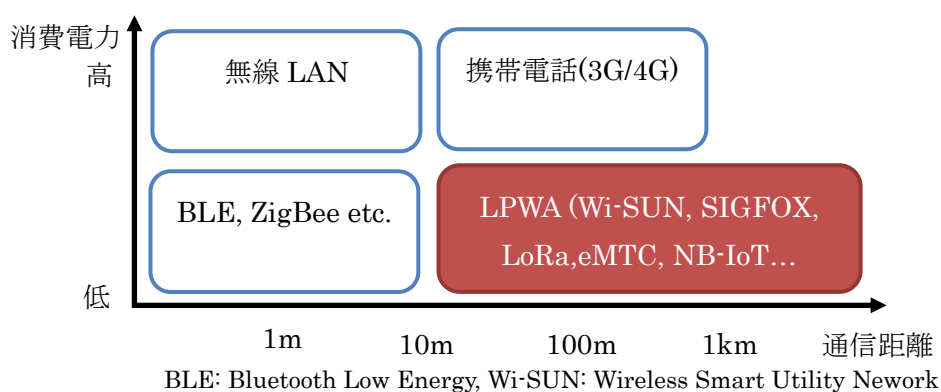


図 1-12 主な無線通信規格と比較した際の LPWA の位置付け

表 1-6 LPWA の主な規格一覧

	新たな無線通信システム		携帯電話システムベース	
システム	SIGFOX	LoRa	eMTC	NB-IoT
推進団体	SIGFOX (仏)	LoRa Alliance(米)	3GPP	3GPP
使用周波数	920MHz 帯(免許不要の周波数帯)	429 /920MHz 帯(免許不要の周波数帯)	携帯電話の帯域	携帯電話の帯域
通信速度	上り：100bps 下り：600bps	上り／下り 250bps～50kbps	上り／下り 300kbps～1Mbps	上り：62kbps 下り：21kbps
カバレッジ 拡張	数 km～数十 km	数 km～十数 km	数 km～十数 km	数 km～十数 km
ビジネス モデル	SIGFOX 又はパートナー事業者がネットワークを展開し、世界32 か国で IoT サービスを展開 (2018 年 1 月時点)	LoRa Allianceの認定機器を用いることで、誰でもネットワークを構築可能。世界100ヶ国以上、300ヶ所以上で実証・運用 (2018 年1月時点)	3GPP リリース 13 (2016 年 6 月) で仕様化。各国・地域の携帯電話事業者が商用サービス開始に向けた実証等を実施	3GPP リリース 13(2016年6月)で仕様化。各国・地域の携帯電話事業者が商用サービス開始に向けた実証等を実施

1.5.2 LoRa (Long Range)

LoRa は元々軍事用に開発された Chirp 拡散方式がベースとなる周波数拡散方式（以下、「LoRa 方式」という）を用いている。図 1-13 に周波数拡散方式のイメージを示す。高速で変調すると周波数帯域が広がる特性を利用しており、拡散係数 SF(Spreading Factor)によりデータレートと受信感度のバランスを最適化し、所望の距離と通信レートを得る。高受信感度により障害物や電波干渉に強く、障害物の多い市街地や屋内でもマルチパスの影響を受けにくく、他の変調方式より安定した通信が可能である。また、LoRa 方式はノイズ・フロア以下のパワーでも受信可能であり、LoRa 方式同士でも拡散係数が異なる場合には拡散タイミングがずれるため互いに干渉しない。ただし受信感度と伝送速度とはトレードオフの関係にあり、受信感度が高いほど伝送速度は低下する。LoRa 方式の特性を表 1-7 に示す。

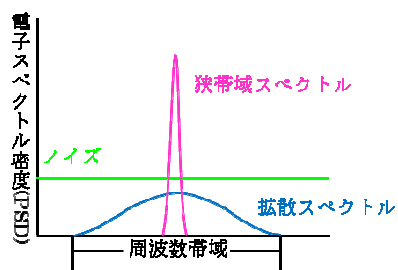


図 1-13 周波数拡散方式のイメージ

表 1-7 LoRa 方式の特性

値		項目		値
下げる	←	SF	→	上げる
低下	←	対 Noise 耐性	→	向上
低下	←	受信感度	→	向上
短く	←	通信距離	→	長く
向上	←	伝送速度	→	低下

そのほか、LoRa 方式を採用した LPWAN（低電力・広域ネットワーク）プロトコルを LoRaWAN という。IoT に特化した規格であり、アップリンクがトリガーとなり、デバイス側から通信が始まる。LoRaWAN はスター型のトポロジを採用したネットワークであるため少数の基地局で広いエリアをカバーでき、低コストでのネットワーク構築が可能である。LoRaWAN は、通信の安定度によって端末の通信データレートを自動的に切り替える ADR(Adaptive Data Rate)を導入している。ADR により、端末と基地局間の距離が近い場合、受信感度を抑えて高データレートの通信を行うことができる。LoRa ゲートウェイは拡散係数の異なる全ての通信レートを待ち受けることができるため、遠距離では受信感度の高いモードで、近距離では伝送速度の高いモードで構成し、トラヒックを緩和することが考えられる。

LoRaWAN では、アプリケーションによって異なるデータ受信タイミングの要求に応えるため、3 つの Device class がある。端末はこの 3 つのうちのいずれかを選択する必要がある。ClassA・ClassB・ClassC の順番に LoRa デバイスが開放する受信用の無線 Slot 間隔は広がるので、省電力となる。Device class と消費電力の関係を図 1-14 に示す。

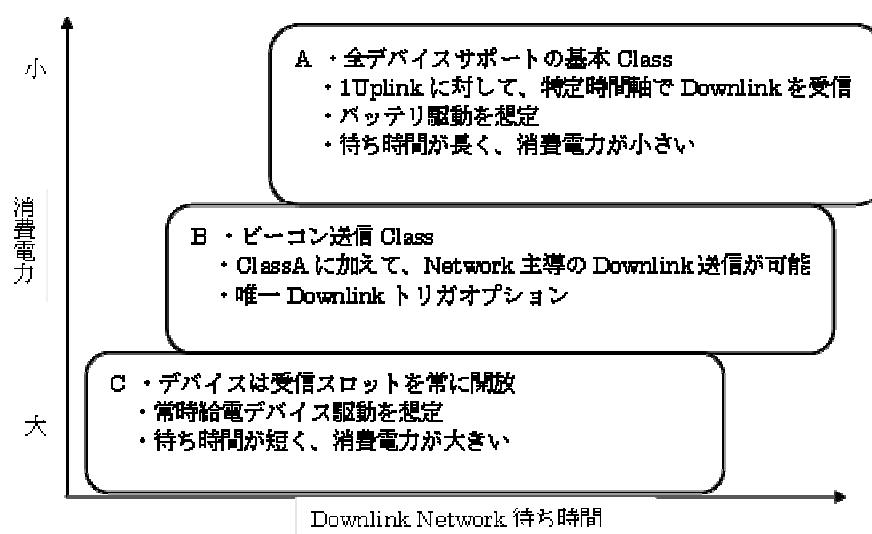


図 1-14 Device class と消費電力の関係

以上のことから、400MHz 帯気象・地象観測用として省電力・長距離伝送に優れた LoRa 方式を導入することにより、400MHz 帯気象・地象観測用周波数の活性化による有効利用が可能であると考えられる。本調査検討会において、400MHz 帯気象・地象観測用周波数の伝送手段の選択肢を広げ、防災・減災に資することとなるようにニーズ調査から要望を取りまとめ、既存システムとの周波数共有、技術的条件について FSK 方式を含め検討を行うこととする。

第2章 利用促進に求められるニーズ

2.1 アンケート調査

利用が進んでいない 400MHz 帯気象・地象観測用周波数の現状と課題を明らかにするために、地震・火山等の観測を実施している公的機関および大学関係者や測定機器メーカー等 67 事業者アンケート及び一部詳細な確認のためのヒアリングを実施した。また、本周波数帯の有効利用のため、長距離伝送が可能で低消費電力の LoRa 方式についてもその有効性、利用方法などについて調査を実施した。なお、アンケートの詳細データは付属資料 5 に記載する。

(1) 調査概要

アンケートは、2017 年 8 月 10 日～2017 年 9 月 1 日（用紙配布から回収期間）、追加のヒアリング等を 2017 年 10 月 6 日～2017 年 10 月 31 日で実施した。

調査対象者は、気象・地象観測に関係する大学、国土交通省砂防関係、国土交通省気象庁、国立研究開発法人、地震・火山観測機器メーカー、九州地方自治体とした。アンケート対象者を図 2-1 に示す。

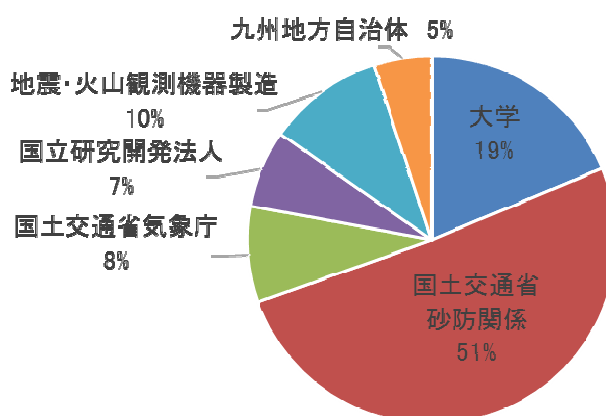


図 2-1 アンケート対象者 (n=67)

本検討会では 400MHz 帯気象・地象観測用周波数が対象であるが、他の周波数帯でも気象・地象データを伝送していると想定される。そのため他の周波数帯システムも調査対象とした。調査対象システムを表 2-1 に示す。

表 2-1 アンケート・ニーズ調査対象システム

対象システム
有線（一般回線/専用回線/構内回線）
携帯電話
400MHz 帯気象援助局
400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用 （移動系/固定系）
70/400MHz 帯テレメータ（国土交通省標準仕様準拠）
920MHz 帯特定小電力テレメータ
無線 LAN 装置（2.4GHz 帯 / 5GHz 帯）
衛星携帯電話（専用使用 / バックアップ用）
その他（自由記入）

表 2-2 にアンケートの回答状況を示す。アンケートを 67 事業者に対して配布を実施し、そのうち有効回答数は 59 件であった。回収率は 88%と高い結果であった。

表 2-2 回答状況

項目	件数
アンケート配布	67
回収済	59
回答辞退 ^{注 1} /未回収	8

注 1：回答辞退の主な理由は「対象システムを所有していないため解らない。」であった。

（2）現状の調査結果

現状を把握するアンケート調査結果を以下に示す。

（a）気象・地象観測に使用している回線（現状把握：設問 1）

気象・地象観測に使用している回線を図 2-2 に示す。

有線（28%）、70/400MHz 帯テレメータ（19%）、携帯電話（14%）で全体の 61%を占めており、400MHz 帯の気象・地象観測用周波数帯を使用している回線数は合計で 10%しか利用されていない。また、衛星利用も合計 12%利用されており、主だった回線の圏外で利用されていると考えられる。さらに、無線 LAN や特定小電力テレメータなどの比較的近距離の無線システムも 17%利用されており、観測地点の環境により様々な通信システムを適材適所で利用していることが判る。なお、回答は複数回答を可能としており、実際は複数の回線種別を重複利用している。

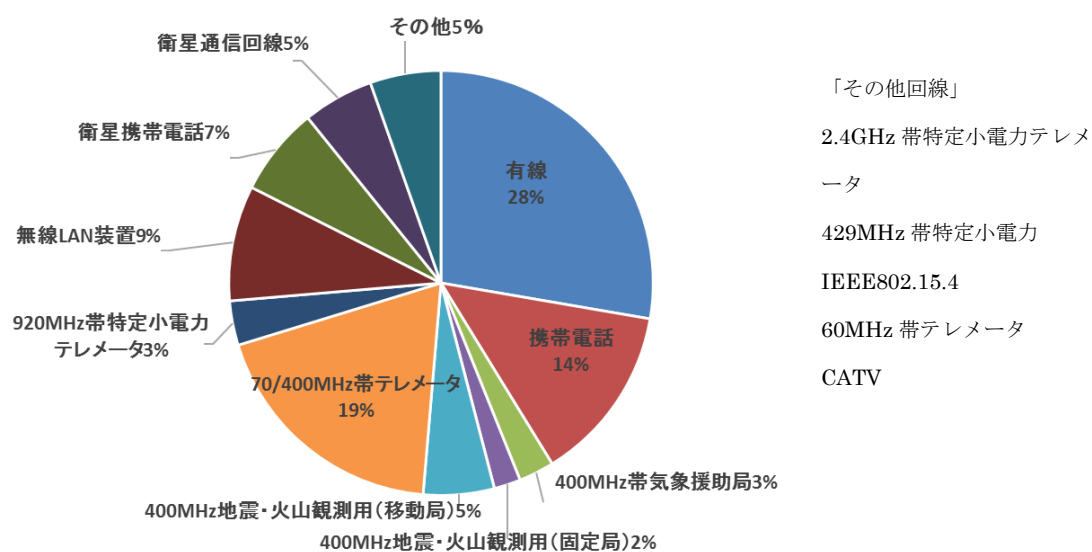


図 2-2 気象・地象観測に使用している回線

(b) 回線又は通信機器の所有数と現在の運用数（現状把握：設問 2）

表 2-3 に回線種別ごとの所有台数と運用台数を示す。

回線種別ごとの運用割合は、ほとんどが 95%以上であるが、400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用の運用割合は低く、固定系で 62.2%、移動系で 4.8%である。

表 2-3 回線種別ごとの所有台数と運用台数

回線種別	所有数 合計[台]	運用 割合[%]	所有数と運用数との差異の理由
有線（一般回線/専用回線/構内回線）	2,770	100	—
携帯電話	703	97.7	・ 予備用 ・ 臨時・緊急観測用
400MHz 帯気象援助局	140	100	—
400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用（固定系）	45	62.2	・ 予備用 ・ 免許の維持のため ・ 新スプリアス規定の改修未対応
400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用（移動系）	84	4.8	・ 予備用 ・ 臨時・緊急観測用 ・ 免許の維持のため

			・新スプリアス規定の改修未対応
70/400MHz 帯テレメータ (国土交通省標準仕様準拠)	1,265	100	—
920MHz 帯特定小電力 テレメータ	98	99.0	・機器試験用
無線 LAN 装置 (2.4GHz 帯 / 5GHz 帯)	73	97.3	・機器試験用
衛星携帯電話	460	99.6	・臨時・緊急観測用
衛星通信回線	462	98.1	・臨時・緊急観測用 ・予備用
その他	123	95.9	・電波環境の影響 (IEEE802.15.4) ・単方向通信が観測目的にそぐわない

さらに、400MHz 帯気象・地象観測用機器の所有数と運用数を個別にヒアリング調査を実施した。

その結果を表 2-4 に示すが、大学の運用数が少ないことが浮き彫りとなった。この理由として、平成 34 年 11 月末まで使用可能ではあるが新スプリアス規定に対応不可のため緊急時の予備機として保管しているとの事である。多くの機器が 5 年以内に廃局となり、5 年後（平成 34 年 11 月 30 日）も改修により使用できるのは固定系 10 局、移動系 4 局となる。

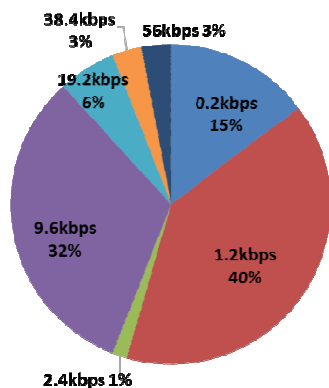
表 2-4 400MHz 帯気象・地象観測用機器の詳細

所有数／運用数	大学	気象庁	研究開発法人
気象援助局	0／0	140／140	0／0
400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用（固定系）	40／25	0／0	5／5
400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用（移動系）	84／4	0／0	0／0

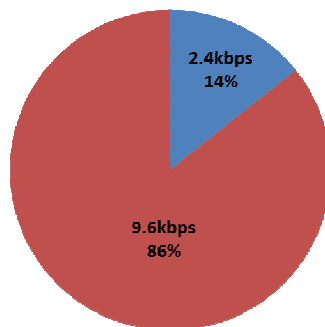
(c) 現在の観測データを送るのに必要な伝送速度について（現状把握：設問 5）

図 2-3 に必要な伝送速度を示す。グラフ中の値は現在の観測データを送信するのに必要な伝送速度である。有線回線（光）や無線 LAN の通信速度とは異なる。

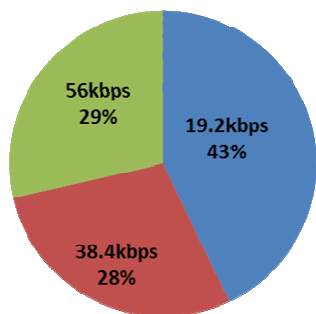
0.2kbps～56kbps の伝送速度が利用されており、気象援助局で 1.2kbps 以上、400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用（移動系）は 9.6kbps、同じく固定系で 19.2kbps 以上で利用されている。



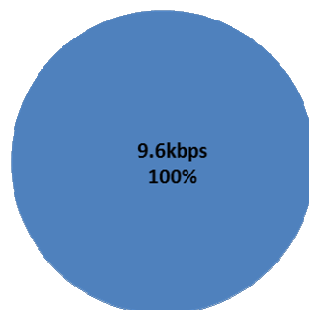
無線回線のみ※高速な携帯、無線 LAN を除く



400MHz 帯気象援助局



400MHz 帯地震・火山用（固定系）

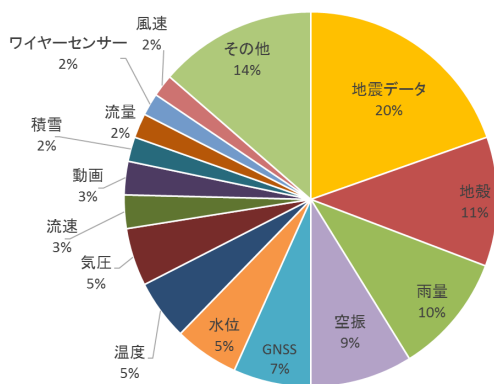


400MHz 帯地震・火山用（移動系）

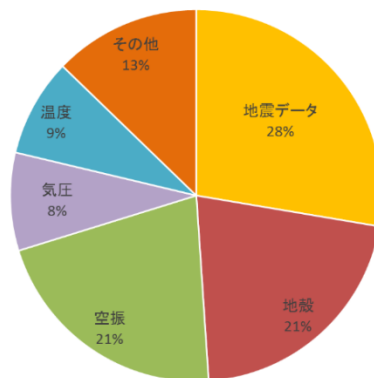
図 2-3 必要な伝送速度

(d) 観測データの種類（現状把握：設問 6）

図 2-4 に観測データの種類を示す。400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用は、地震データ、地殻変動、空震、微気圧、湿度などのデータを観測しているが、テレメータ系では、水位、温度、流速、流量、風速、ワイヤーセンサーの観測やデータ通信に利用されている。



全回線



400MHz 帯回線

図 2-4 観測データの種類

(e) 測定機器の性能（現状把握：設問 7）

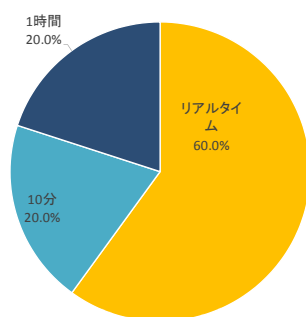
表 2-5 に観測で用いられる測定器の種類と必要な伝送速度を示す。実際に伝送する際は、回線速度内に複数の観測データを束ねて伝送している。また、WIN 圧縮によるデータ量の削減や測定器側でデータを加工（32bit を 28bit に加工）するなどの対策により、観測に支障を及ぼさない範囲でデータ量を軽減している。

表 2-5 測定器の種類と必要な伝送速度

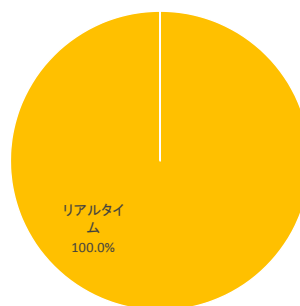
観測データ	測定機器の性能	最小 (kbps)	最大 (kbps)	備考
地震データ	100Hz or 200Hz×16～24bit×3～6CH	4.8	28.8	100Hz×32bit×3CH
地殻変動 (ひずみ・傾斜)	1Hz or 2Hz×16～32bit×3～6CH	0.048	0.288	—
空振動・微気圧	100Hz or 200Hz×16～24bit×1CH	1.6	4.8	100Hz×32bit×1CH
温度	1Hz or 2Hz×16～24bit×1～3CH	0.016	0.144	1Hz×32bit×1CH
GNSS	130～500byte	1.04	4	—

(f) 観測データを送信する周期（現状把握：設問 8）

図 2-5 に観測データを送信する周期を示す。400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用ではリアルタイムに観測データの伝送が行われている。気象援助局では、10 分、1 時間周期の利用用途がある。テレメータ系では半日や 1 日という回答もあった。



400MHz 帯気象援助局



400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用

図 2-5 観測データを送信する周期

アンケート調査及びヒアリング調査結果から、400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用の運用率が低いことが判明した。その理由を以下に示す。

- 観測機器の高度化や観測チャンネル数を多くしたい要望から、移動系の 9.6kbps では通信速度不足である。
- 観測に用いる無線機器は適材適所で選定しており、携帯電話や有線のエリアが比較的広範囲で使え、400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用無線機よりも費用も安価で高速伝送が可能である。
- 予算の減少。太陽光発電等の設置工事費や免許更新費用（登録点検含む）を要する。
- 他の機関へ移管したり、光回線へ乗り換えたりして予備機として保管している。
- 新スプリアス規定に対応不可のため緊急時の予備機として保管している。

(3) ニーズの現状調査

新しい通信方式のニーズについて調査結果を以下に示す。

(a) 通信機器に求められる条件（ニーズ調査：設問 1～3,8）

- 地震・火山観測データの伝送速度は、多項目観測の要望もあることから最低限 9.6kbps でリアルタイム伝送のニーズがあった。一方で、気象データのテレメータでは、一定の頻度でデータ伝送ができればよい、1.2kbps を確保できればよい等の意見、要望もあった。
- 消費電力は、商用電源の利用できない場所で観測する場合が多く、基本的に太陽光を電源とするため、消費電力が低く小型の装置を望むとの意見、要望が多かった。最も多い意見は 1W 以下であった。
- 通信機器は、噴火による破壊、埋没等があるため、高価なものは導入しにくい環境にあり、さらに予算の確保や更新費用・運用費用がかさむため安価を望むとの意見、要望が多かった。最も多い意見は 50 万円以下であった。

(b) 通信機器の通信品質（データ欠損）、通信距離、大きさ（ニーズ調査：設問 4～6,8）

- 通信距離は、頂上付近から観測所まで数 km から場合によっては、10km 程度の距離がある場合がある。離島や山間部に観測場所が点在するため 25km 以上の通信距離を望むとの意見、要望が多かった。
- 通信品質は、データ欠損があると正しい処理が行われず正しい情報（警報、注意報）を提供できなかつたり、遅延が生じたりする可能性がある。欠損がある場合の取扱に非常に手間がかかるためリアルタイム性よりも、データ欠損率を低下させて欲しいという要望もある。
- 大きさは、一人で運べる大きさ、重さを望む意見が多かった。

(c) 現行システムの LoRa 方式への代替

- LoRa 方式が 1CH で 9.6kbps 以上で 3CH 利用で 28.8kbps、伝送距離 30km 以上、

小型・低消費電力が実現できれば利用可能である。テレメータに対する意見では、利用者によって 200bps 以上や 1.2kbps 以上の伝送速度が LoRa 方式で実現できれば利用可能という複数の意見があった。

- 地震計データはデータ量が大きいので、傾斜計データを低速で長距離伝送することや臨時観測点のラストワンマイルの拠点選択自由度を上げるためや携帯電話エリアまでのデータ中継などの利用が可能ではとの意見があった。
- 地すべり監視システム、河川の監視、イベント型で、9.6kbps 以上を実現できれば利用可能な観測点がある。伝送速度が 1.2kbps 以上あればリアルタイム性を必要としない観測に利用したい意見があった。
- 有線や衛星通信で観測を行っている観測点は、最低 32kbps 程度の伝送速度が必要である。LoRa 方式を代替するとしても、最低 9.6kbps 程度の伝送速度、可能なら 19.2kbps の速度があれば利用することもある。定常観測については、代替は簡単ではなさそうに感じるという意見で、現行のシステムをそのまま代替するのは伝送速度、伝送距離の点から難しいのではという意見があった。

(d) その他

400MHz 帯気象・地象観測用周波数の今後に期待する意見は次のとおりであった。

- 現状の移動系に利用できる 1 チャンネルの帯域幅が狭く、リアルタイム常時観測には伝送速度が不足しているため、固定系の様な高速の伝送速度を期待する。
- 伝送能力の低さが時代の流れにそぐわないため、電波の有効利用が図られていない。伝送速度が観測機器のデータにマッチし、気象・地象観測用の無線機が使い易くなることを望む。
- 移動系用ということで、12.5kHz 間隔で 21 波も用意されているが、携帯電話通信網など他の通信手段も整備された現在においては、400MHz 帯無線機（移動系）を同一地域で同時に利用することは想定しづらい。帯域幅 50kHz の無線機と同程度の帯域幅（伝送速度）を与える代わりに、チャンネル数を減らしてデータ容量の増大や双方向通信という需要に応えられる運用にすべきである。

有事の際の火山機動観測においては、国への設置申請を必要とする「固定系」よりも、柔軟な運用が可能である「移動系」が抜群の効果を発揮する。そこで、現在のセンサーや解析技術に見合った高品位・多項目データを取得するために、「移動系」として割り当てられている周波数帯域の見直しを行い、「移動系」においても固定系相当、もしくは現在よりも大量のデータを伝送できるようにすべきである。

- 火山災害時は、有線の通信回線や、電力線が遮断される恐れがあるため、この 400MHz 帯でデータ収集を行っている火山観測点は特に重要な観測点である。今後も、この周波数帯の安定した利用ができるようお願いしたい。

2.2 ニーズのまとめ

これまでのニーズ調査結果から、400MHz 帯気象・地象観測用周波数の有効利用として伝送速度の高速化、低消費電力化、小型化の要望が高いことがわかった。一方で、テレメータとしてもリアルタイム性のない用途で、長距離伝送の要望が高いことがわかった。アンケートから具体的に望まれる数値（伝送速度や伝送距離など）が把握できたことから、これらの結果を基に必要な技術的条件の検討を行う。

表 2-6 にニーズの技術的条件を示す。

表 2-6 ニーズの技術的条件

項目	内容
伝送速度 占有周波数帯幅 (BW)	新しい通信方式に求められる伝送速度は 9.6kbps 以上。 そのために必要な検討や検証を以下に示す。 - LoRa 方式で伝送速度 9.6kbps を確保するためには 1 チャネルの占有周波数帯幅（以下「BW」）は 250kHz が必要となり、周波数の有効利用の観点から効率性が悪い。チャネル結束は必要であると思われるが、ラボ試験やフィールド試験から実現可能な伝送速度の検証を行う。 - 伝送速度 19.2kbps を確保するためには 2 値 FSK 方式では BW=50kHz 以上、4 値 FSK では BW=25kHz 以上が必要となり、チャネル結束の実現が必要となる。 - 現行の割り当て周波数帯域の中で利用可能なチャネル数を考慮しつつ、チャネル結束について検討を行う。また、現行システムと新しい通信方式の共用検討や周波数の再利用について検討を行う。
通信距離 (空中線電力)	400MHz 帯気象・地象観測用周波数の現状では、固定系は平均が 25km、最大 70km。移動系では 10km～30km。 そのために必要な検討や検証を以下に示す。 - 通信距離については、装置の受信感度等を把握した後、使用するアンテナ、使用環境、空中線電力などを総合的に考慮する必要がある。 - 現状と同等以上の通信距離を確保する。 - ラボ試験やフィールド試験、机上検討から実現可能な通信距離の検証が必要である。
通信品質 送信周期	データの信頼性（欠損なし）が高く、送信周期はリアルタイム。 - 送信周期はリアルタイムが非常に多い意見であった。一方で、リアルタイムよりもデータの欠損率の低下を望むニーズや 1.2kbps 以上でイベント型の比較的低速で低消費電力のニーズがある。 - 実現可能な送信周期、通信品質との関係を整理する。
チャネル間 干渉	伝送速度を実現するためにチャネルを結束するニーズに対応した場合、チャネル数が減少する。チャネル数の減少によって干渉が発生しやすくなる

(干渉影響)	と考えられる。 ・ BW を変更した場合における干渉影響を検討するため、実際の装置を用いて測定を行う。 ・ 装置で実現できない組合せなどについては机上計算による干渉検討を実施する。 ・ 干渉検討の結果を基に、周波数の再利用等について整理する。また、BW の変更に伴うチャンネル数の減少も考慮する。
LoRa 方式の具体的な活用法	・ 地滑り、土石流の多点による監視（現在は携帯電話を使用） ・ 地震のトリガー情報や現地での震度 ・ 機器が正常に動いているかどうかのチェック ・ 河川水位検知 ・ 消防緊急通報などのスマートホームなどの防災 ・ 構造ヘルスモニタリング、物理探査 ・ 携帯エリア圏外の山間地現場との内線電話の通信回線 ・ 樋門樋管水門制御

表 2-7 に新しい伝送方式の 400MHz 帯気象・地象観測への適用における課題を示す。また、普及や利用方法、装置自体に求められる条件については、製造メーカーによる開発条件とも関わってくる。

表 2-7 400MHz 帯気象・地象観測への適用における課題

項目	課題
LoRa 方式の適用	LoRa 方式は現行の気象・地象観測システム（9.6kbps）以上の高速化が難しいので、帯域幅 50kHz、SF=6 で低速（3kbps：理論値）利用を検討 ① 観測データで低速な測定データを集めて送信する。例えば、「温度・地殻変動（ひずみ・傾斜）系」で最大伝送量 0.64kbps と気圧の最小伝送速度 1.6kbps の組合せによる 2.24kbps 程度での適用 ② 測定間隔が長い、低速用途への適用 例えば、降灰量計、火山ガスのモニタリングなど ③ 小容量伝送、多地点での間欠測定（IoT 的）な用途への適用 例えば、降灰量計、火山ガスのモニタリング、ワイヤーセンサーや気象・地象観測で用いるデータロガー機器の稼働状況の監視用途への適用 ④ 移動系の帯域幅を 50kHz（4 チャンネル結束）とする。固定系と同じ帯域幅なので容易に実現可能である。LoRa 方式で 3kbps 程度の低速伝送による IoT 的なネットワークの適用を検討

FSK 方式 の適用	400MHz 帯地震・火山観測用における固定系と同程度の伝送速度を実現する検討 ① 移動系の帯域幅を 50kHz（4 チャンネル結束）とする。現行システムの固定系と同じ帯域幅であり既存の技術を用いて容易に実現可能である。 GMSK/2 値 FSK 方式で、50kbps/19.2kbps 以上可能。 ② 移動系のチャンネル間隔を 12.5kHz とし、現行のチャンネル配置を確保する。周波数帯が異なるが他システムで実現されている。
低廉化	無線装置の共有化を図り、機器のコストを下げ、普及につなげる検討 ① 気象援助局（ラジオロボット用）についても地震・火山観測用と同じ無線装置を使用し、機器の共通化により機器の製造コストを安価にする。 ② 既存の 400MHz 帯テレメータの仕様を今回検討している気象・地象観測で用いる新スプリアス対応無線装置の共通化により機器の価格を安価にする。

これらの課題を考慮し、実証試験及び共用検討を行い、400MHz 帯気象・地象観測用周波数帯の利用促進につながる提言としてまとめる。

第3章 実証試験

2 章のアンケート結果及びニーズを実現するために実験機を用いて装置特性を把握するとともに、技術的条件等の検討に必要な測定を行う。

ラボ試験では、各変調方式の基本特性を把握するための単体試験及び共用検討に必要な干渉試験を実施した。

フィールド試験では、実利用環境を想定し平坦地、山岳地、海を隔てた 2 点間で伝搬試験を実施した。各変調方式においては、空中線電力や帯域幅を変化させて伝送距離、受信レベル、スループット、PER (Packet Error Rate) 等を測定し評価した。

3.1 実験機の概要

表 3-1 に実証試験で使用した実験機の諸元を示す。変調方式は LoRa、2 値 FSK、4 値 FSK の 3 種類である。空中線電力や占有周波数帯幅は、特性の比較を行うため、変更が可能とした。なお、実験機は既存製品を使用しており、LoRa 方式と 2 値 FSK 方式は、必要な空中線電力は外部アンプを使用し調整した。

表 3-1 実験機の諸元

項目	LoRa 方式	2 値 FSK 方式	4 値 FSK 方式
中心周波数	412.4 ～412.4875 MHz		412.4MHz
空中線電力	10 mW／100 mW／ 500 mW	10 mW／100 mW／ 500 mW／ 1 W／5 W	10 mW／100 mW／ 500 mW／ 1 W／5 W
変調方式	LoRa	2 値 FSK	4 値 FSK
チャンネル間隔	12.5／25.0／37.5／50.0 kHz		6.25／12.5
占有周波数帯幅 (参考値)	7.8／20.8／31.25／41.7 kHz		5.8／8.5 kHz
通信速度 (理論値)	0.018～37.5 kbp※	4.8～19.2 kbps	4.8／9.6 kbps
受信感度	-135～-150 dBm	-118 dBm	-119／-115 dBm
サイズ	40×29×6.2 (mm) (注) モジュールサイズ		160×45×157 (mm)
動作温度	-40℃ to 85℃		-30℃ to 60℃
動作電圧	3.3～5.5 V DC		13.6 V DC ± 15%
外観			

※0.018bps (BW=7.8kHz,SF12) ～37.5kbps (BW=500kHz,SF6)

表 3-2 に空中線の諸元を示す。周波数のくり返し利用を考慮するため、無指向性アンテナを加えて 2 種類使用する。

表 3-2 空中線の諸元

項目	無指向性	指向性
名称	スリーブアンテナ	3 素子八木アンテナ
型番	SV4511	Y3-4511
利得	2.15 dBi	8.15 dBi
半値角	—	E 面±35°，H 面 45°
外観		
指向性特性図		

3.2 ラボ試験

各変調方式の基本特性を確認し、フィールド試験結果と比較するために有線接続による単体試験、干渉試験を実施する。また、LoRa 方式等の消費電力の測定も実施する。

3.2.1 試験項目

表 3-3 にラボ試験における試験項目と内容を示す。単体試験として、受信機入力に対する RSSI、PER（4 値 FSK 方式の場合、BER）、スループットの測定を実施する。各変調方式について帯域幅を変更し、LoRa 方式においては、拡散率（以下 SF）を変更した場合のデータを取得する。干渉試験として、希望波と妨害波の各種組合せにおいて同一チャネル、隣接チャネル干渉の測定を行う。また、LoRa 方式等の送受信機における消費電力を測定する。なお、LoRa 方式および 2 値 FSK 方式における PER の測定では、データサイズを 5 バイトとし、誤り検出に CRC 符号を入れている。CRC に関しては、チップ内蔵の CRC と無線電文に独自の CRC を組み込んでチェックを行い、LoRa 方式では、チップ内蔵のエラー訂正を使用している。

表 3-3 試験項目

章番号	試験項目	内容
3.2.2	各変調方式の単体試験	受信機入力対 RSSI、PER（4 値 FSK 方式の場合、BER）、スループットの測定
3.2.3	各変調方式の干渉試験	希望波に対する妨害波のレベルを変化させた場合の PER（BER）の測定
3.2.4	消費電力	送受信機における消費電力の測定

3.2.2 単体試験

（1）試験構成

図 3-1 に単体試験構成図を示す。各方式の無線機間を有線ケーブルにて接続し、その間に可変アッテネータ（Step ATT）を挿入し、アッテネータ値を変化させさせて PER と受信感度、スループットを測定した。



図 3-1 単体試験構成図

パラメータの組合せを表 3-4 に示す。

表 3-4 パラメータの組合せ

変調方式	占有周波数帯幅[kHz]	SF (拡散率)
LoRa	7.8/20.8/31.25/41.7	7/8/9/10/11/12
2 値 FSK	7.8/20.8/31.25/41.7	—
4 値 FSK	5.8/8.5	—

チャンネルの結束イメージを図 3-2 に示す。4 値 FSK 方式については、狭帯域化による周波数の有効利用の可能性を探るためにチャンネル間隔 6.25kHz の狭帯域についても検討を行った。

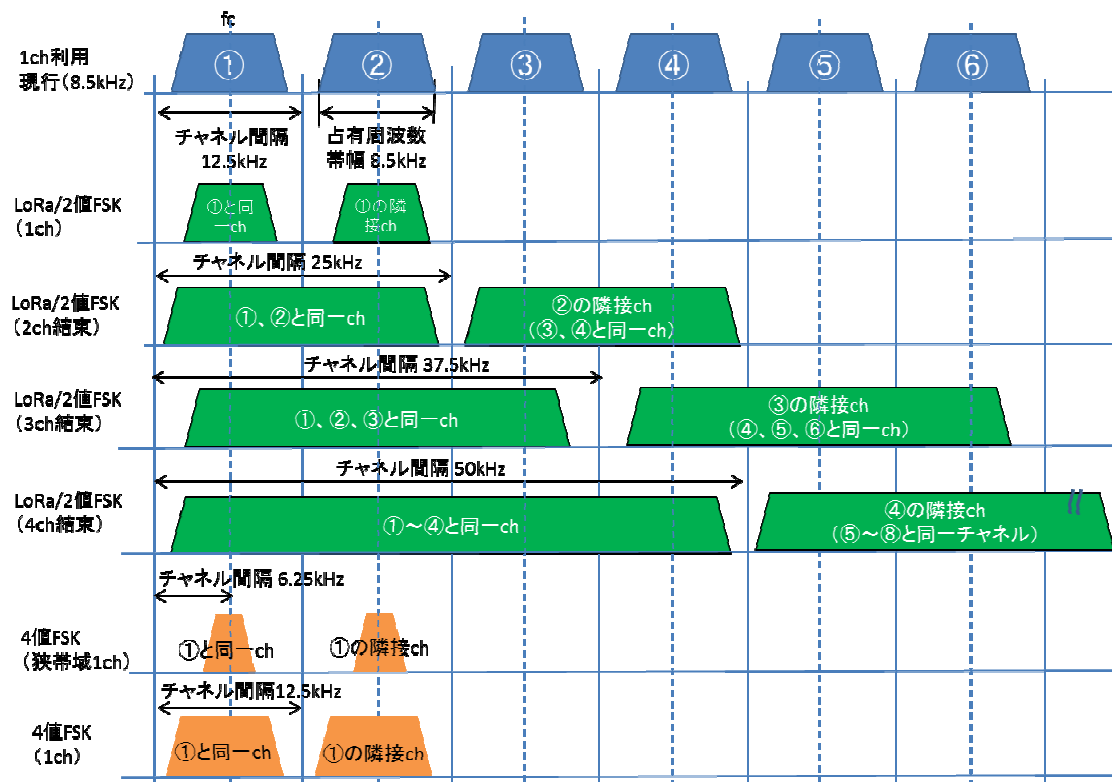
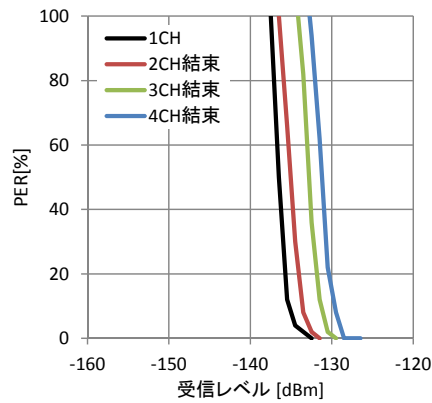


図 3-2 チャンネルの結束イメージ

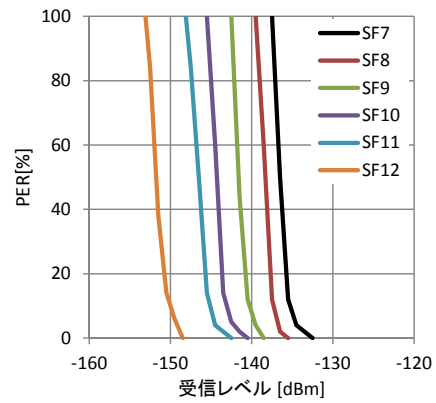
(2) 測定結果

LoRa 方式の単体測定結果を図 3-3、FSK 方式の単体測定結果を図 3-4 に示す。

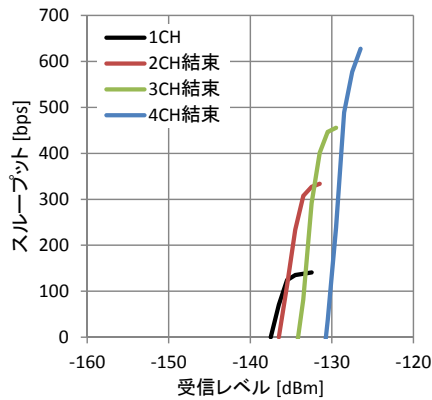
LoRa 方式では、チャンネル結束と拡散率を変えた場合の受信レベルと PER、受信レベルとスループットの関係を示し、FSK 方式ではチャンネル結束した場合の受信レベルと PER、受信レベルとスループットの関係を示す。



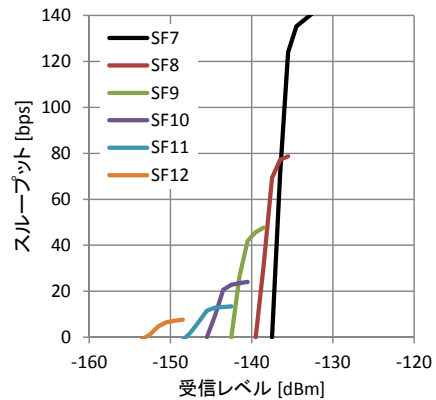
(a) 受信レベルーPER (SF7)



(b) 受信レベルーPER (1CH)

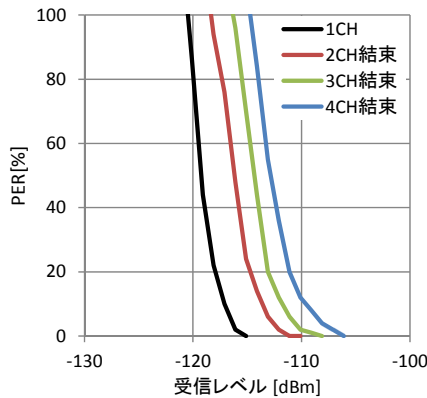


(c) 受信レベルースループット (SF7)

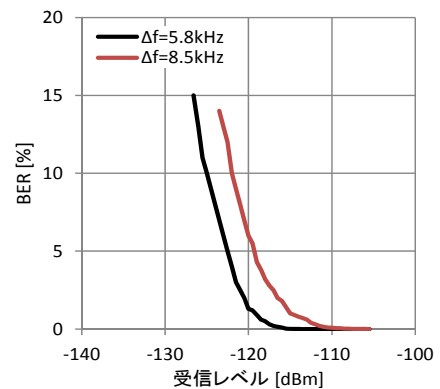


(d) 受信レベルースループット (1CH)

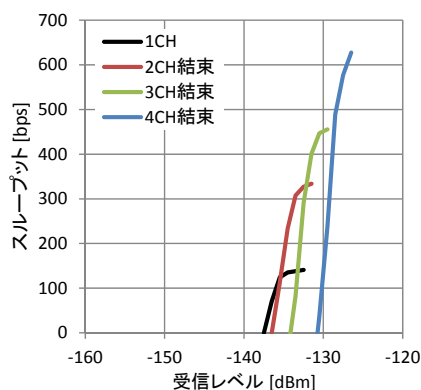
図 3-3 単体試験結果 (LoRa 方式)



(a) 受信レベルーPER (2 値 FSK 方式)



(b) 受信レベルーBER (4 値 FSK 方式)



(c) 受信レベルスループット (2 値 FSK 方式)

図 3-4 単体試験結果 (FSK 方式)

(3) まとめ

各変調方式における受信感度を表 3-5 に示す。受信感度は PER (BER) が 1% の場合における受信レベルで規定する。FSK 方式と比較し、LoRa 方式の受信感度は 16dB も低いことが確認できた。LoRa 方式においては、チャンネル結束数が少なく、SF 値が大きいと受信感度は低くなる傾向にあることが確認できた。各方式共通で、チャンネル結束により帯域幅が広がると受信感度は悪化する傾向にある。

表 3-5 受信感度

LoRa 方式				2 値 FSK 方式		4 値 FSK 方式	
結束 (SF7 時)	受信感度 [dBm]	SF (1CH 時)	受信感度 [dBm]	結束	受信感度 [dBm]	Δf	受信感度 [dBm]
1CH	-134	SF8	-136	1CH	-116	5.8kHz	-119
2CH	-132	SF9	-138	2CH	-112	8.5kHz	-115
3CH	-130	SF10	-141	3CH	-109	—	—
4CH	-128	SF11	-143	4CH	-107	—	—
—	—	SF12	-148	—	—	—	—

LoRa 方式のチャンネル結束数や拡散率を変更した場合における最大スループットを表 3-6 に示す。スループットは参考として 2 値 FSK 方式の測定値を示す。

LoRa 方式は、チャンネル結束数が増えるほど（帯域幅が大きい）、スループットは高くなり、一般的な方式と同じ傾向にあるが、LoRa 方式の特徴である拡散率 SF が大きくなるほど、スループットは低くなることが確認できた。これは、理論値と同じ傾向にある。

なお、実験機の制約があり、2 値 FSK 方式の 3 チャンネル結束以上でスループットが上限となっているが、理論上は、チャンネル結束によりスループットは大きくなる。

表 3-6 各設定における最大スループット

方式	拡散率 SF	スループット[bps]			
		1CH	2CH 結束	3CH 結束	4CH 結束
LoRa	SF7	227.4	587.2	856.5	1106.8
	SF8	137.0	357.3	527.7	691.1
	SF9	79.7	209.5	312.6	411.4
	SF10	45.3	120.0	178.9	237.3
	SF11	25.3	67.4	100.7	133.7
	SF12	14.1	37.5	56.2	74.7
2 値 FSK	—	3227.3	6824.3	8309.4	8370.6

LoRa 方式はチャンネルを結束（4 チャンネル）し、拡散率（SF=7）で最大 1.1kbps 程度で、FSK 方式よりも 15dB 以上の遠方までの通信が期待できるが、拡散率を高くすると受信感度が低くなるので、さらに遠方まで通信できるが、スループットは約半分程度になる。

3.2.3 干渉試験

各方式を希望波、干渉波として組合せた場合における D/U 値－PER（BER）特性を取得し、共用検討に使用するデータとした。

(1) 試験構成

図 3-5 に干渉試験構成図を示す。各方式の実験機間を有線ケーブルにて接続して希望波（D）とし、その間に可変アッテネータ（Step ATT）を挿入して希望波を最小受信電力となるように設定する。もう一方の標準信号発生器（SSG）からの信号を妨害波（U）として合成して実験機に入力する。アッテネータを変化させさせて PER が 1% となる D/U 比を測定した。

図 3-6 に D/U のイメージ図を示す。D/U 比は希望波（D：Desired Signal）と妨害波（U：Undesired Signal）の関係を示し、希望波の受信を妨害する妨害波がどの程度の強さであれば混信を与えるのかを示す。

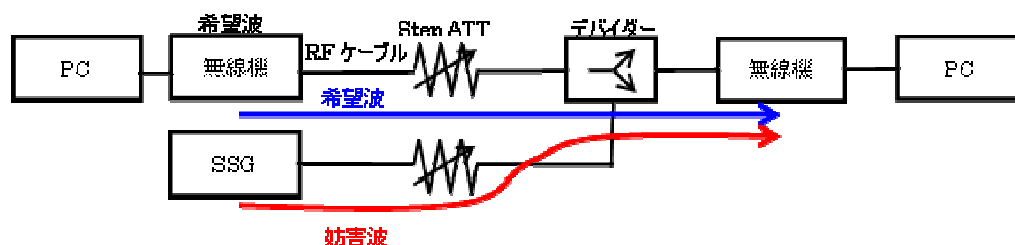


図 3-5 干渉試験構成図

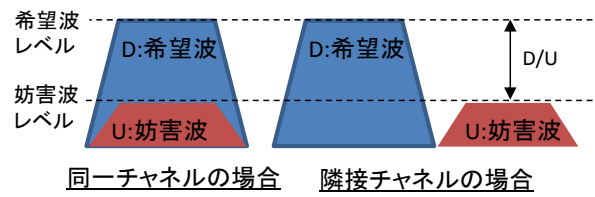


図 3-6 D/U のイメージ

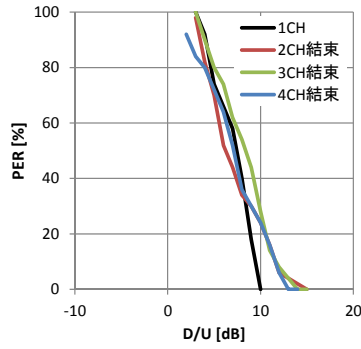
干渉試験の組合せを表 3-7 に示す。2 値 FSK 方式と 2 値 FSK 方式、2 値 FSK 方式と 4 値 FSK 方式の組合せにおいては代表的なパラメータのみを実施した。4 値 FSK 方式と 4 値 FSK 方式の組合せは、実験機の台数に制限があるために未実施である。

表 3-7 干渉試験の組合せ

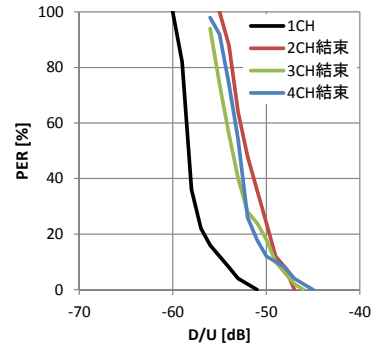
組合せ		希望波		
		LoRa 方式	2 値 FSK 方式	4 値 FSK 方式
妨害波	LoRa 方式	同一／隣接	同一／隣接	同一／隣接
	2 値 FSK 方式	同一／隣接	(同一／隣接)	(同一／隣接)
	4 値 FSK 方式	同一／隣接	(同一／隣接)	—

(2) 測定結果

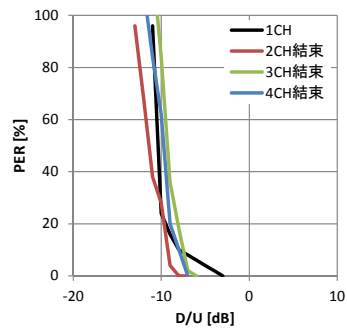
LoRa 方式の干渉試験結果を図 3-7、2 値 FSK 方式の干渉試験結果を図 3-8、4 値 FSK 方式の干渉試験結果を図 3-9 に示す。



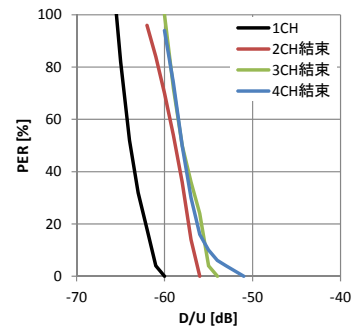
(a) LoRa 方式(SF7) $\leftarrow$ LoRa 方式(SF7) (同一)



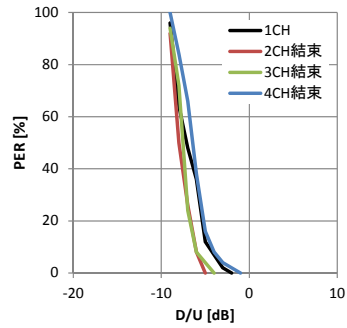
(b) LoRa 方式(SF7) $\leftarrow$ LoRa 方式(SF7) (隣接)



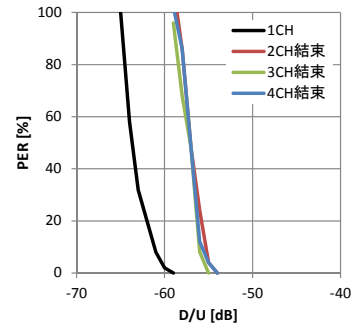
(c) LoRa 方式(SF7) $\leftarrow$ LoRa 方式(SF8) (同一)



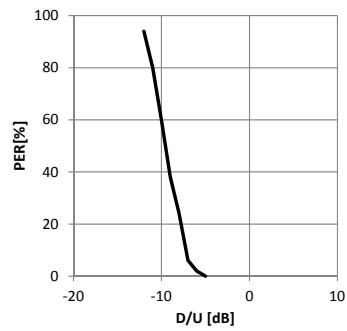
(d) LoRa 方式(SF7) $\leftarrow$ LoRa 方式(SF8) (隣接)



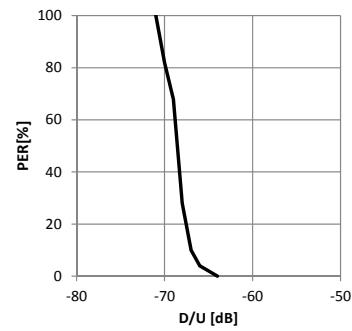
(e) LoRa 方式 $\leftarrow$ 2 値 FSK 方式 (同一)



(f) LoRa 方式 $\leftarrow$ 2 値 FSK 方式 (隣接)

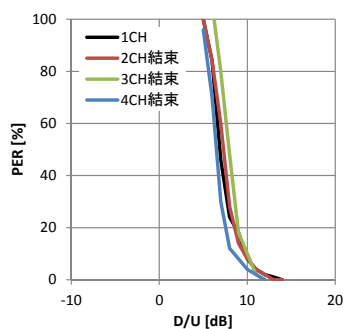


(g) LoRa 方式 $\leftarrow$ 4 値 FSK 方式 (同一)

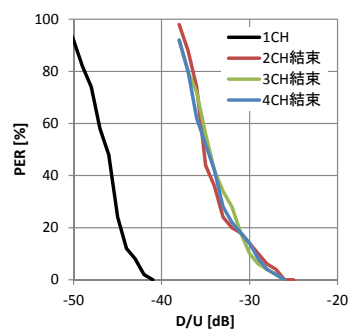


(h) LoRa 方式 $\leftarrow$ 4 値 FSK 方式 (隣接)

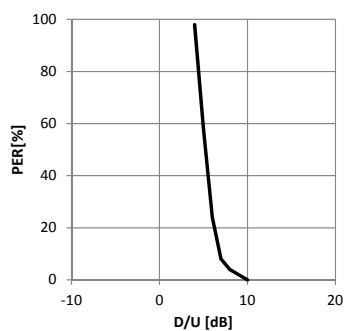
図 3-7 干渉試験結果 (LoRa 方式)



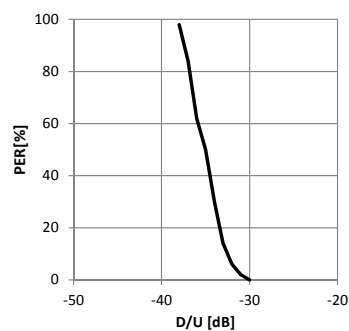
(a) 2 値 FSK 方式←LoRa 方式 (同一)



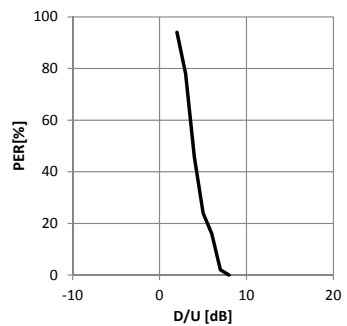
(b) 2 値 FSK 方式←LoRa 方式 (隣接)



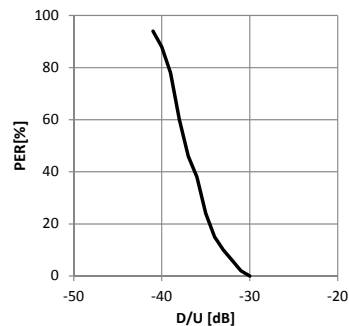
(c) 2 値 FSK 方式←2 値 FSK 方式 (同一)



(d) 2 値 FSK 方式←2 値 FSK 方式 (隣接)

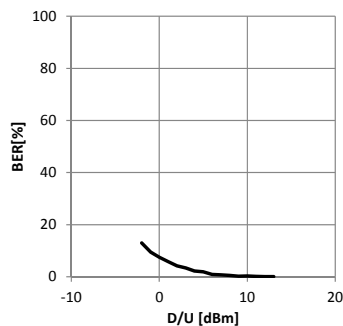


(e) 2 値 FSK 方式←4 値 FSK 方式 (同一)

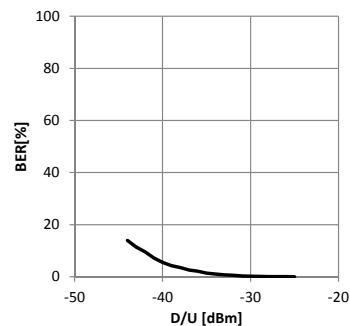


(f) 2 値 FSK 方式←4 値 FSK 方式 (隣接)

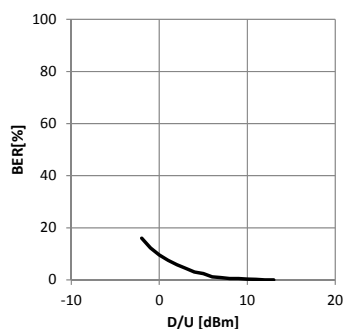
図 3-8 干渉試験結果 (2 値 FSK 方式)



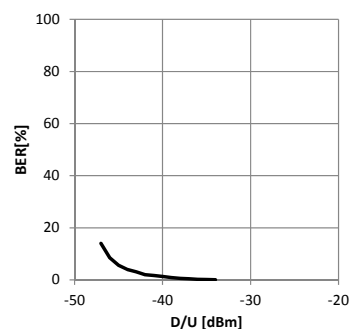
(a) 4 値 FSK 方式←LoRa 方式 (同一)



(b) 4 値 FSK 方式 ←2 値 FSK 方式 (同一)



(c) 4 値 FSK 方式 ←LoRa 方式 (隣接)



(d) 4 値 FSK 方式 ←2 値 FSK 方式 (隣接)

図 3-9 干渉試験結果 (4 値 FSK 方式)

(3) まとめ

各種組合せにおける D/U 値を表 3-8 に示す。

希望波が LoRa 方式の場合、D/U 値はマイナス（希望波より高いレベルの妨害波でも通信ができる）となっており、LoRa 方式が干渉に強いことが確認された。隣接チャネルの特性において、チャネル結束無しは干渉に強い傾向がある。これは、チャネル結束の有無により、隣接チャネルへの漏えい電力に差があると考えられる。

2 値 FSK 方式では、同一チャネルの干渉特性は妨害波のシステムにかかわらず、同じ結果になった。隣接チャネルの干渉特性は LoRa 方式同様にチャネル結束無しの場合には干渉に強い傾向がある。今回の実験機はコマンド制御で LoRa 方式と 2 値 FSK 方式に切替えることが可能なため、同じ結果になったと思われる。

4 値 FSK 方式では、同一チャネル、隣接チャネルそれぞれの干渉特性は妨害波のシステムにかかわらず、同じ結果になった。

表 3-8 D/U 値

組合せ			希望波		
			LoRa 方式(SF7)	2 値 FSK 方式	4 値 FSK 方式
妨害波	LoRa 方式 (SF8)	同一	-3 dB (10dB)	14 dB	14 dB
		隣接	-60 dB (-51dB)	-41 dB	-25 dB
	2 値 FSK 方式	同一	-2 dB	10 dB	12 dB
		隣接	-59 dB	-30 dB	-33 dB
	4 値 FSK 方式	同一	-5 dB	8 dB	—
		隣接	-64 dB	-30 dB	—

※LoRa 方式では、同じ SF の場合 D/U 値が悪化する。カッコ内数値は SF7 同士の測定値。

3.2.4 消費電力測定

消費電力のカタログ値又は実測値を表 3-9 に示す。LoRa 方式は消費電力が小さいことが確認できた。

表 3-9 消費電力

現行システム (FM/PCM/GMSK)	LoRa 方式 (4CH 結束) 41.7kHz 幅 SF=7	4 値 FSK 方式
A 社製 1W 送信時 : 5.4W 以下	1W 送信時 : 1.1W 以下	1W 送信時 : 17.1W
B 社製 100mW 送信時 : 0.6W 以下	100mW 送信時 : 0.44W	

※1 LoRa Calculator (Semtec 社) ¹⁰を用いた計算値 (消費電流) × 3.5V で算出

※2 計算は 100mW まで可能なため、外部アンプを接続することを仮定して算出

※3 音声通話が可能な現用装置 (車載機) を使用しており、消費電力は高くなっている。
専用機を製造すれば、現行システムと同等程度まで低消費電力化は可能と想定される。

¹⁰ LoRa Calculator (Semtec 社)

<http://www.semtech.com/apps/filedown/down.php?file=SX1272LoRaCalculatorSetup1%271.zip>

3.3 フィールド試験

3.3.1 フィールド試験の概要

地震又は火山噴火予知観測用の利用を想定し、実環境（山岳、平地、海上）における、400MHz 帯各種変調方式の伝搬特性を確認するためフィールド試験を実施した。ここでは各変調方式において、空中線電力や占有周波数帯幅を変化させてデータを送信した場合の受信レベル、PER（BER）、伝送速度を取得し、得られた特性結果を伝搬の基礎特性としてまとめる。また、4 値 FSK 方式においては画像伝送試験も実施した。

関東地方及び九州地方の 2 ヶ所において、山岳、平地、海上それぞれの伝搬特性の試験を以下の日程で実施した。表 3-10 に実施場所及びスケジュールを示す。

表 3-10 実施場所及びスケジュール

エリア	伝搬路	実施日	場所	測定項目
関東 試験	山岳	2017/11/27 ～11/28	(送信)神奈川県 小田原市 おだわら諏訪之原公園 (受信) 神奈川県 箱根大観山方向	受信レベル PER (BER) スループット 画像伝送 (4 値 FSK 方式 のみ)
	平地	2017/11/29	(送信)神奈川県 平塚市 平塚市総合公園 (受信)神奈川県 厚木市方向	
	海上	2017/11/14 ～11/15	(送信)神奈川県 横須賀市 下浦海岸 (受信)千葉県 鋸南町周辺	
九州 試験	山岳	2017/12/4 ～12/5	(送信)熊本県 益城町 熊本空港 (受信)熊本県 阿蘇山方向	
	平地	2017/12/6	(送信)熊本県 熊本市 熊本駅周辺 (受信)熊本県 熊本市内北西方向	
	海上	2017/12/7 ～12/8	(送信)長崎県 南島原市 雲仙仁田峠 (受信)熊本県 天草半島周辺	

3.3.1.1 試験場所

関東地方で試験を実施した場所を図 3-10 に、関東地方で送信局を設置した場所の情報を表 3-11 に示す。また、九州地方で試験を実施した場所を図 3-11 に、九州地方で送信局を設置した場所の情報を表 3-12 に示す。なお、図中の赤いポイントは後述する定点測定のために受信局を設置した場所を示す。

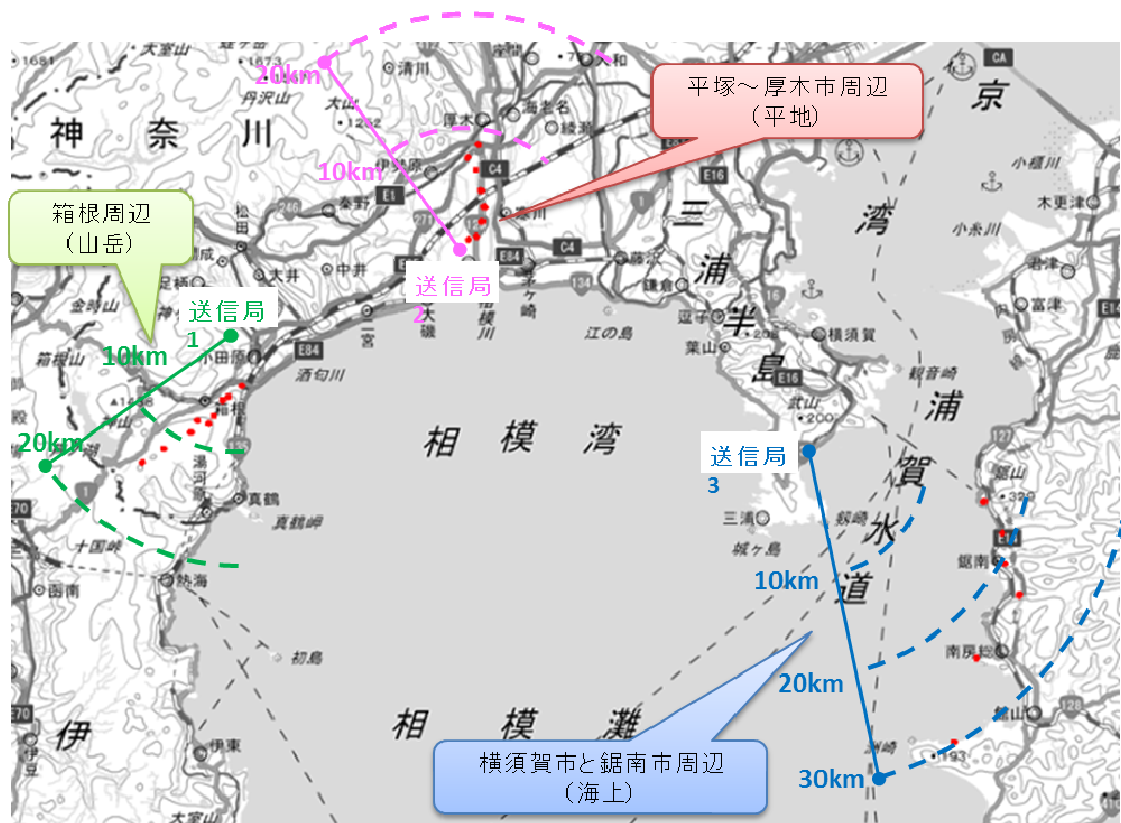


図 3-10 試験場所（関東試験）

表 3-11 関東試験における送信局情報

項番	伝搬路	設置場所	緯度	経度	標高
1	山岳	県立おだわら諏訪の原公園	35°16'48.1"	139°07'52.6"	112m
2	平地	平塚総合公園北駐車場	35°20'42.9"	139°20'38.7"	9m
3	海上	下浦海岸第3駐車場	35°11'38.2"	139°39'53.6"	4m

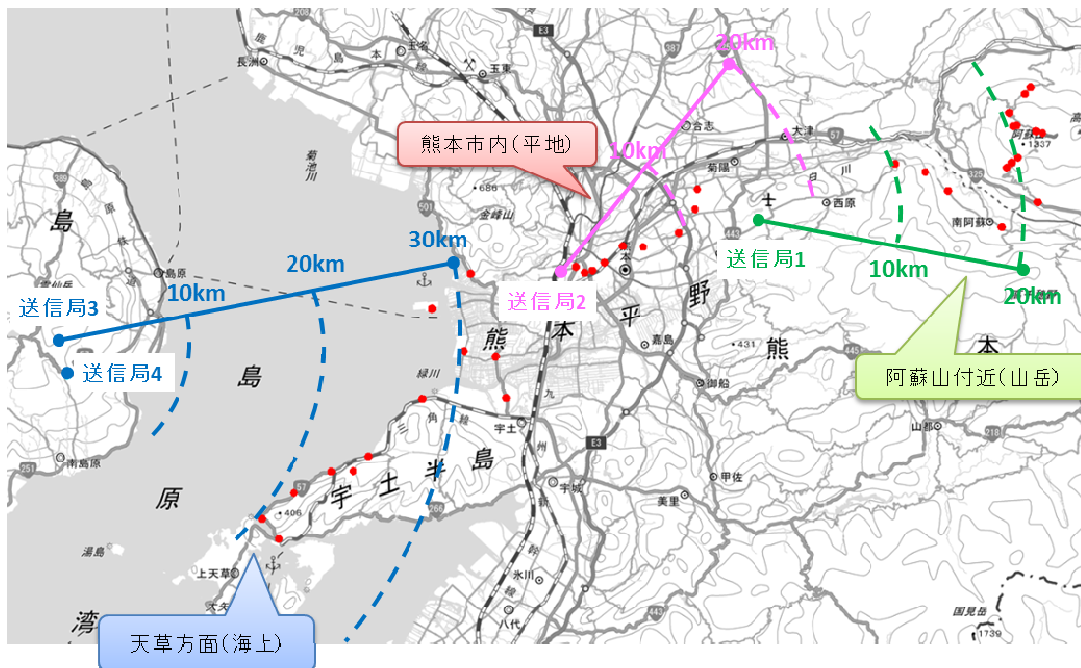


図 3-11 試験場所（九州試験）

表 3-12 九州試験における送信局情報

項番	伝搬路	設置場所	緯度	経度	標高
1	山岳	熊本空港ホテルエミナース	32°49'28.2"	130°50'47.7"	174m
2	平地	熊本駅前駐車場	32°47'17.3"	130°41'20.3"	10m
3	海上	仁田峠第二展望所	32°44'28.1"	130°17'31.9"	1016m
4	海上	俵石展望所	32°43'8.9"	130°17'54.3"	466m

3.3.1.2 試験内容と構成

フィールド試験では、受信レベルの到達状況を把握するための移動測定と通信品質の状況を把握するための定点測定を全ての測定場所で行った。

移動測定は LoRa 方式、2 値 FSK 方式、4 値 FSK 方式を同時に送信し、受信レベルが測定不可となる地点まで移動した。この時、お互いの送信信号が影響しないようにチャンネルを離して実施した。

定点測定は移動測定にて得られた受信レベルの到達範囲内において、送信局との距離を変えて実施した。定点測定においては、空中線電力や周波数帯域幅を変えてデータを取得した。

図 3-12 に試験構成、表 3-13 に移動測定での実験機の設定値、表 3-14 に定点測定での実験機の設定値を示す。

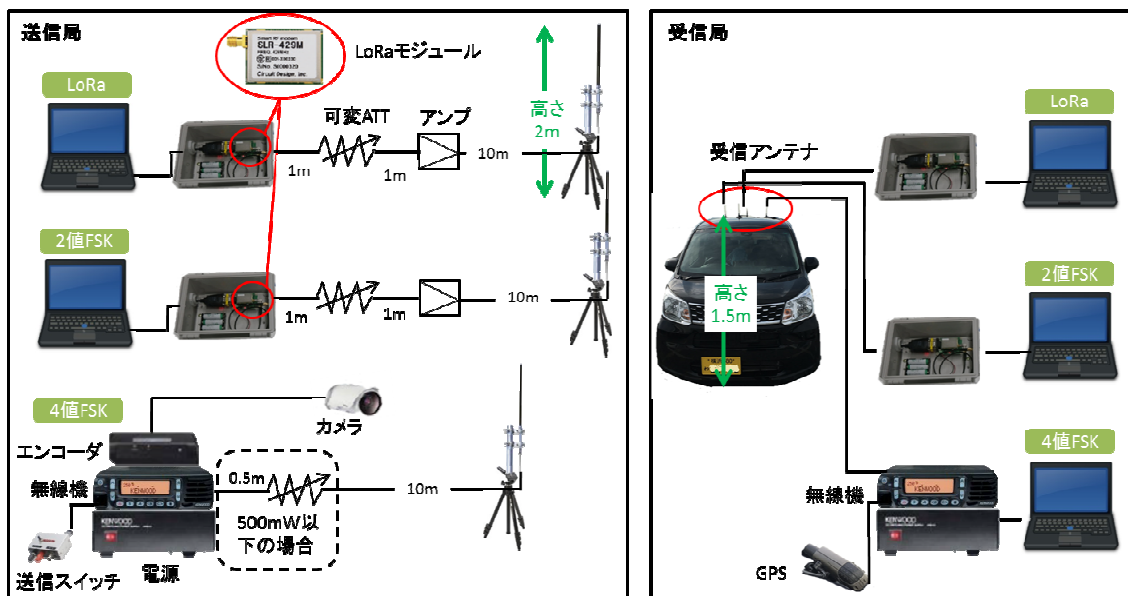


図 3-12 試験構成

表 3-13 設定値（移動測定）

項目	LoRa 方式	2 値 FSK 方式	4 値 FSK 方式	
空中線電力	0.5W	5W	5W	各装置の最大空中線電力
周波数	412.45MHz	412.4875MHz	412.4MHz	
占有周波数帯幅	7.8kHz	7.8kHz	5.8kHz	
空中線	3 素子八木アンテナ（送信局のみ） スリーブアンテナ（送信局・受信局）			送信局は八木アンテナと スリーブアンテナを切り 替えて測定を実施
空中線利得	8.15dBi（八木）／2.15dBi（スリーブ）			※送受信とも
空中線設置高	2.0m（送信局）／1.5m（受信局）			※地上からの高さ
その他損失	ケーブル損として 1dB（送信局側）			

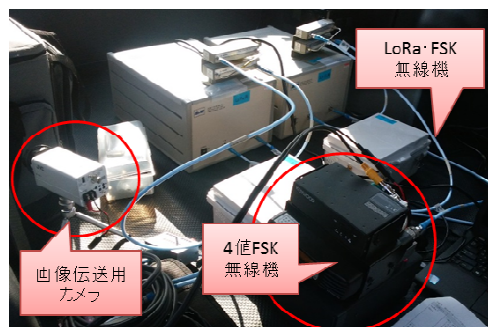
表 3-14 設定値（定点測定）

項目	LoRa 方式	2 値 FSK 方式	4 値 FSK 方式	
空中線電力	0.5W/0.1W/ 0.01W	5W/1W/0.5W, 0.1W/0.01W	5W/1W/0.5W, 0.1W/0.01W	各装置の最大空中線電力 から 0.01W まで変化
占有周波数帯幅	7.8kHz/ 20.8kHz/ 31.25kHz/ 41.7kHz	7.8kHz/ 20.8kHz/ 31.25kHz/ 41.7kHz	5.8kHz/ 8.3kHz	LoRa 方式、2 値 FSK 方 式は 1CH から 4CH 結束
拡散率	SF7/SF12	-	-	LoRa 方式のみ
空中線	スリーブアンテナ（送信局・受信局）			

空中線利得	2.15dBi（スリーブ）	※送受信とも
空中線設置高	2.0m（送信局）／1.5m（受信局）	※地上からの高さ
その他損失	ケーブル損として 1dB（送信局側）	

3.3.1.3 試験環境

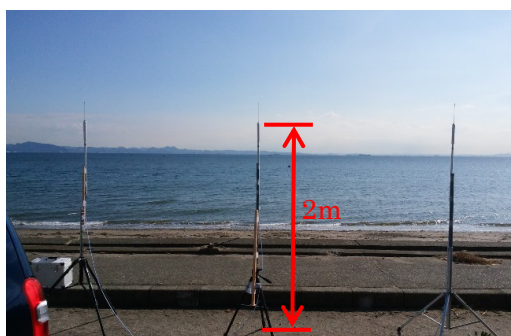
送信側の試験環境を図 3-13 に示し、受信側の試験環境をに図 3-14 示す。



(a)車内機器設置状況



(b)八木アンテナ設置状況（山岳・関東）



(c)スリーブアンテナ設置状況（海上・関東）



(d)海上（九州_仁田峠送信）

図 3-13 試験環境（送信局側）



(a)車内機器設置状況



(b)受信アンテナ設置状況

図 3-14 試験環境（受信局側）

3.3.2 移動測定結果

移動測定における各地点での受信レベルを地図上に色分けして示す。空中線電力は LoRa 方式が 0.5W、2 値 FSK 方式および 4 値 FSK 方式が 5W である。また図における同心円は 5km 間隔である。

3.3.2.1 山岳伝搬路

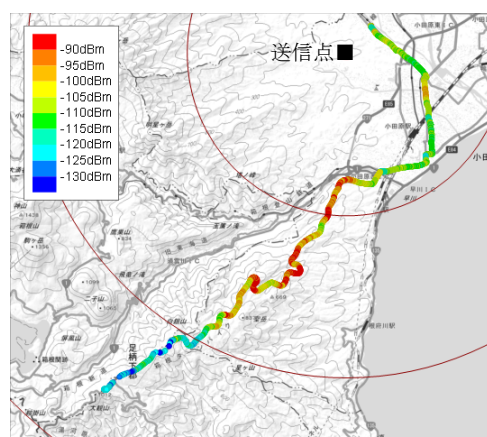
関東地方の山岳環境における受信レベルマップを図 3-15 示す。測定場所は神奈川県で比較的高い山がある箱根山周辺を選択した。ここで送信局は標高 112m であり、受信局は標高 20m～1000m の範囲を移動した。

送信局の空中線に八木アンテナを使用した場合、スリーブアンテナを使用した場合と比べてアンテナの利得分だけ受信レベルが高くなっていることがわかる。

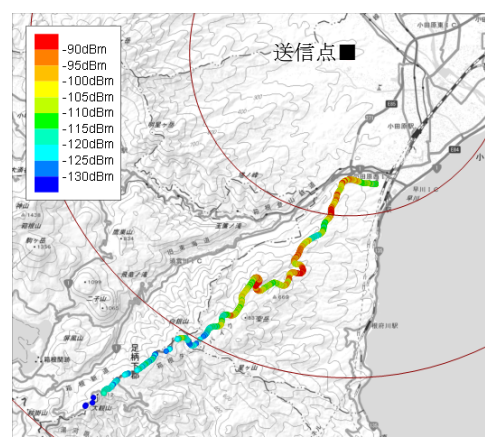
また、ラボ試験の結果から 2 値 FSK 方式の受信感度が -116dBm、4 値 FSK 方式の受信感度が -119dBm であることが確認されており、この受信感度の違いにより 2 値 FSK 方式の方が 4 値 FSK 方式より伝搬距離が短くなっている。これらは他の試験環境でも共通した結果である。

そのほか、今回測定を実施した箱根山付近の環境では、LoRa 方式は約 13km、2 値 FSK 方式は約 11km、4 値 FSK 方式は約 13km まで受信できている。これは 13km 地点までは送信局から離れるにつれて標高が高くなる地形であるが、13km 地点を過ぎると標高が下がり山岳回折等による損失が大きくなったためと考えられる。

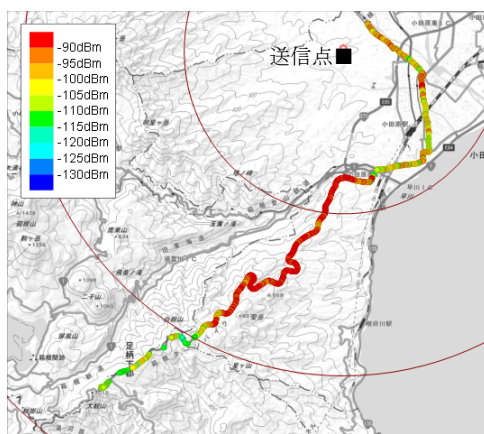
関東地方と九州地方の測定結果において、途切れずに受信できる伝搬距離が 2 倍近く異なるのは、山岳地形の違いによるためであると考えられる。



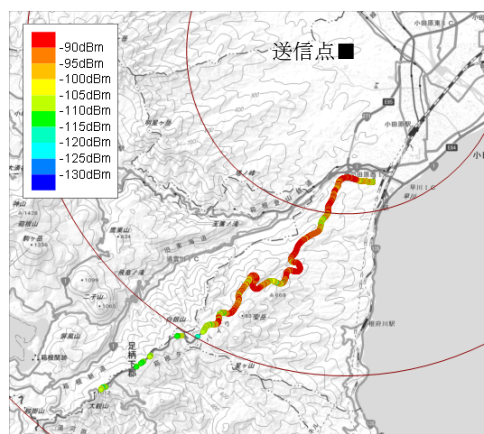
(a) LoRa 方式 八木送信



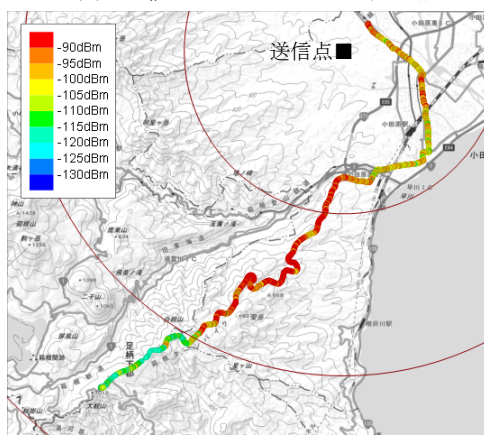
(b) LoRa 方式 スリーブ送信



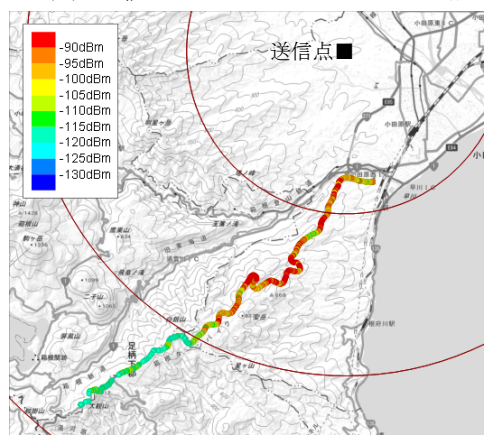
(c) 2 値 FSK 方式 八木送信



(d) 2 値 FSK 方式 スリーブ送信



(e) 4 値 FSK 方式 八木送信

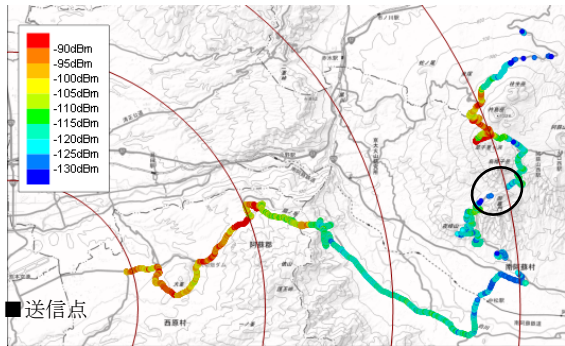


(f) 4 値 FSK 方式 スリーブ送信

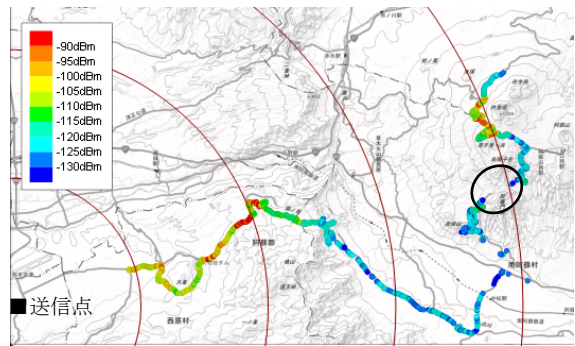
図 3-15 受信レベルマップ (山岳_関東)

次に九州地方の山岳環境における受信レベルマップを図 3-16 に示す。測定場所は熊本県の火山環境である阿蘇山周辺を選択した。送信局は標高 174m であり、受信局は標高 170m ~1100m の範囲を移動した。図中の黒の丸で囲まれた部分はトンネルであり、受信が不可能な場所である。

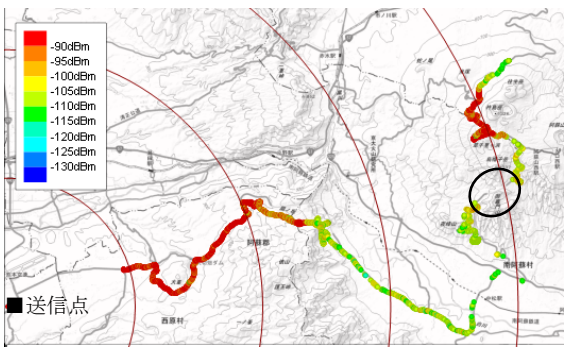
図より、今回測定を実施した阿蘇山付近の環境では、いずれの方式でも約 20km 離れた山頂で受信できた。ここは山岳による遮へいの影響が少ない環境であり、受信レベルは -95dBm と高かった。山岳による遮へいが厳しくなる 15 km 地点や山頂を越えた 24 km 地点では 2 値 FSK 方式では受信できないことがあった。一方で受信感度が良い LoRa 方式では空中線電力が小さいにもかかわらず、受信できる場所があった。



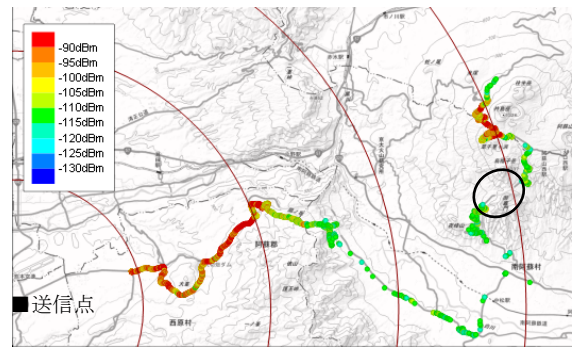
(a) LoRa 方式 八木送信



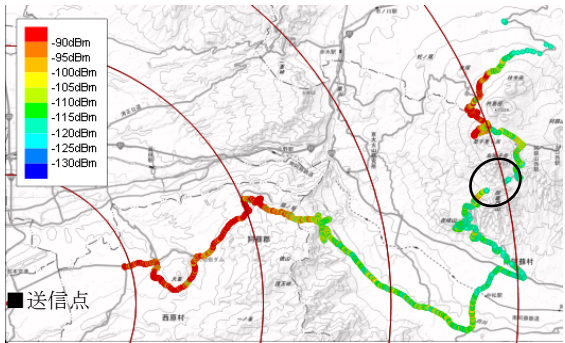
(b) LoRa 方式 スリープ送信



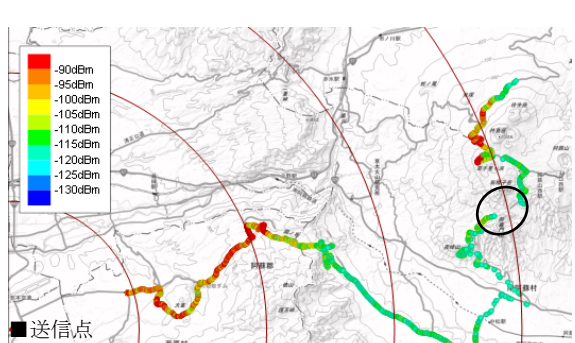
(c) 2 値 FSK 方式 八木送信



(d) 2 値 FSK 方式 スリープ送信



(e) 4 値 FSK 方式 八木送信



(f) 4 値 FSK 方式 スリープ送信

図 3-16 受信レベルマップ (山岳_九州)

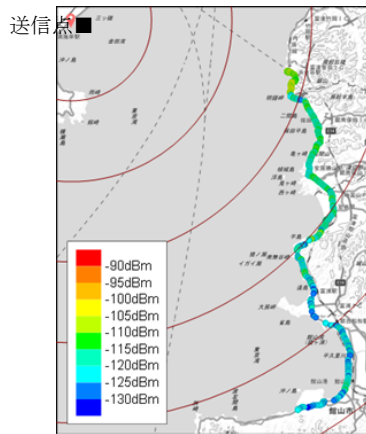
3.3.2.2 海上伝搬路

気象・地象に関するアンケート調査で海上区間を伝搬するケースもあることから、比較的長距離で海上伝搬が可能な試験場所として関東地方では横須賀～千葉区間、九州地方では熊本～島原区間を選択した。

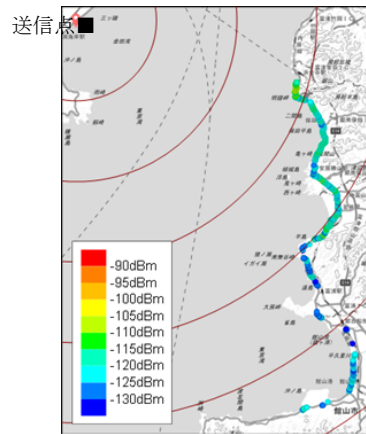
送信局及び受信局のアンテナ高の組合せを海拔から低ー低、中ー低、高ー低となる 3 パターンで試験を実施した。

関東地方の海上伝搬（送信海拔高 4m）における受信レベルマップを図 3-17 に、九州地方の海上伝搬（送信海拔高 1017m）における受信レベルマップを図 3-18 に、九州地方の海上伝搬（送信海拔高 466m）における受信レベルマップを図 3-19 に示す。

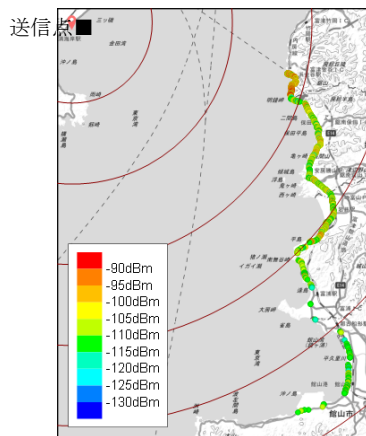
送信の海拔高が 4m の場合は LoRa 方式が約 22km、2 値 FSK 方式が約 20km、4 値 FSK 方式が約 22km まで受信できたことがわかる。九州地方の場合には、送信高が高く見通しがとれているため、いずれの変調方式でも高い受信レベルを確保でき、38 km 程度まで受信レベルを測定することができたことがわかる。



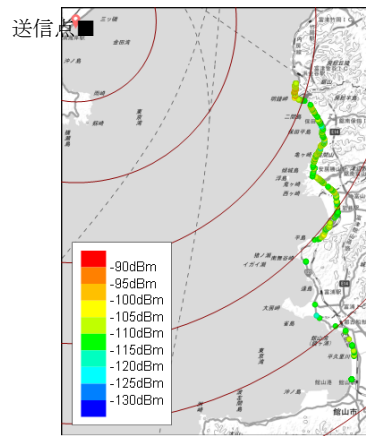
(a) LoRa 方式 八木送信



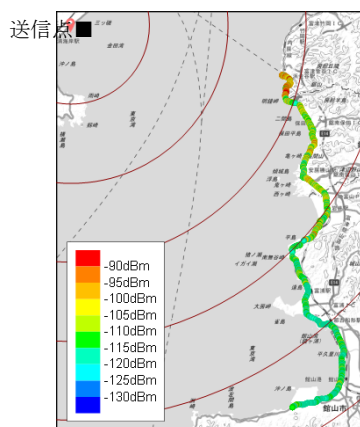
(b) LoRa 方式 スリーブ送信



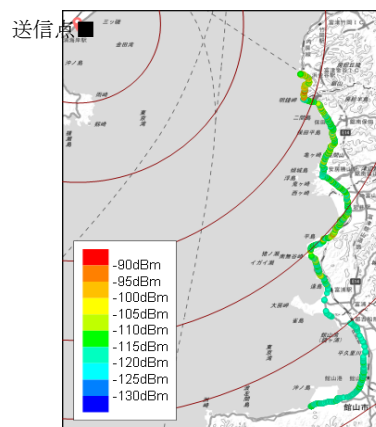
(c) 2 値 FSK 方式 八木送信



(d) 2 値 FSK 方式 スリーブ送信

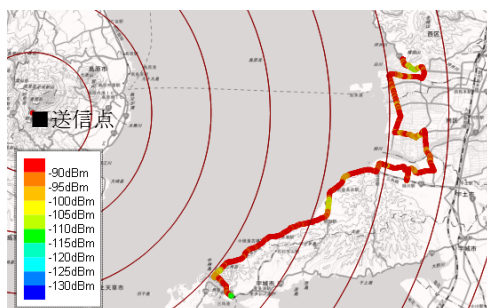


(e) 4 値 FSK 方式 八木送信

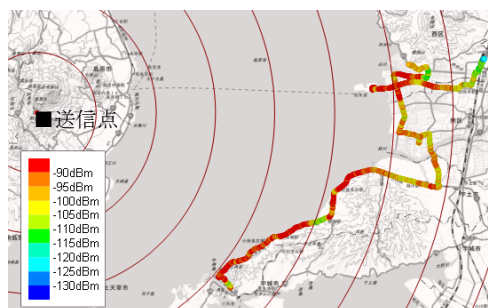


(f) 4 値 FSK 方式 スリーブ送信

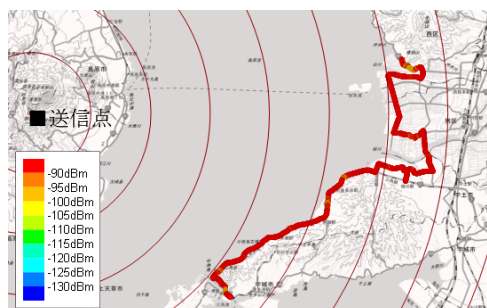
図 3-17 受信レベルマップ (海上_関東_送信海拔高 4m)



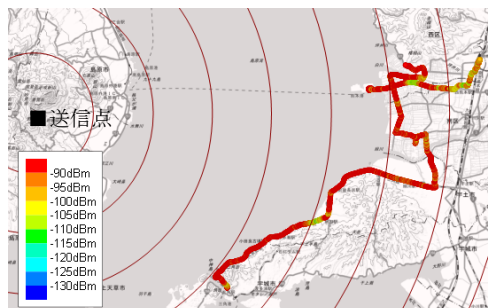
(a) LoRa 方式 八木送信



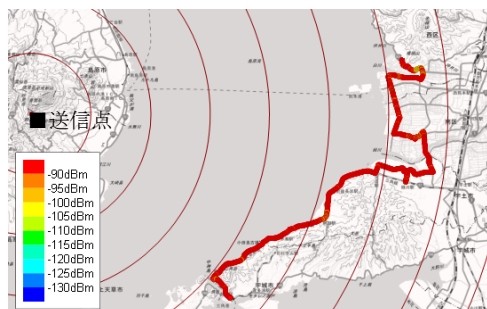
(b) LoRa 方式 スリープ送信



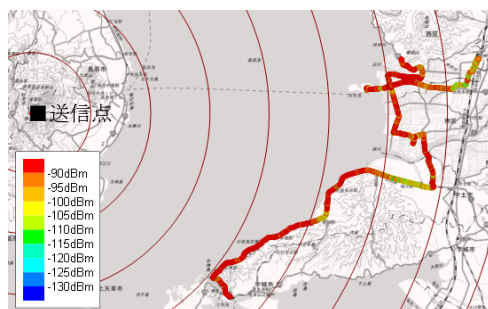
(c) 2 値 FSK 方式 八木送信



(d) 2 値 FSK 方式 スリープ送信

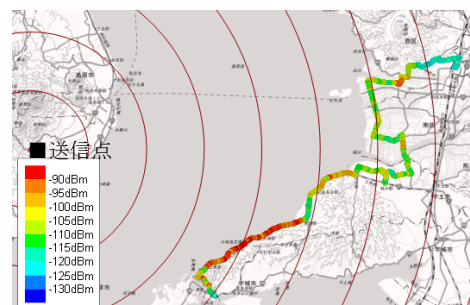


(e) 4 値 FSK 方式 八木送信

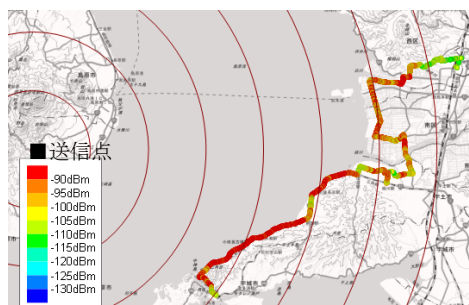


(f) 4 値 FSK 方式 スリープ送信

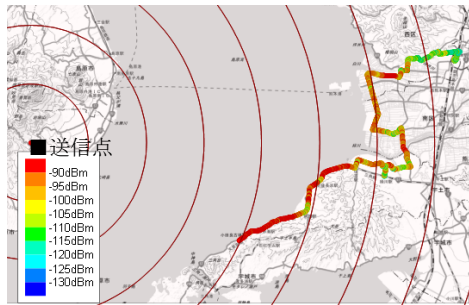
図 3-18 受信レベルマップ (海上_九州_送信海拔高 1017m)



(a) LoRa 方式 スリープ送信



(b) 2 値 FSK 方式 スリープ送信



(c) 4 値 FSK 方式 スリープ送信

図 3-19 受信レベルマップ（海上_九州_送信海拔高 466m）

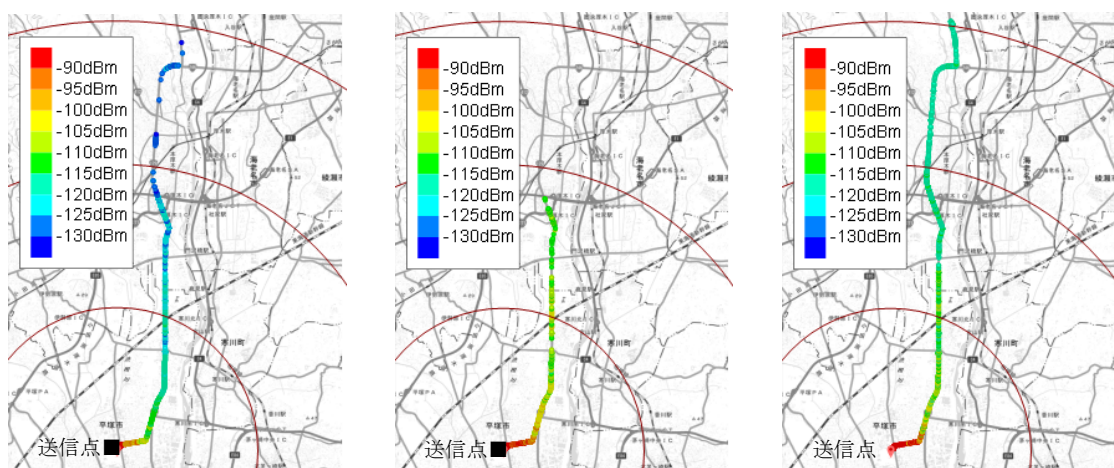
3.3.2.3 平地伝搬路

LoRa 方式等を用いた気象・地象に関する測定装置を市街地で利用することを想定して、比較的長距離で平坦地が続く試験場所として関東地方では平塚市、九州地方では熊本市を選択した。

関東地方の平地環境における受信レベルマップを図 3-20 に、九州地方の平地環境における受信レベルマップを図 3-21 に示す。

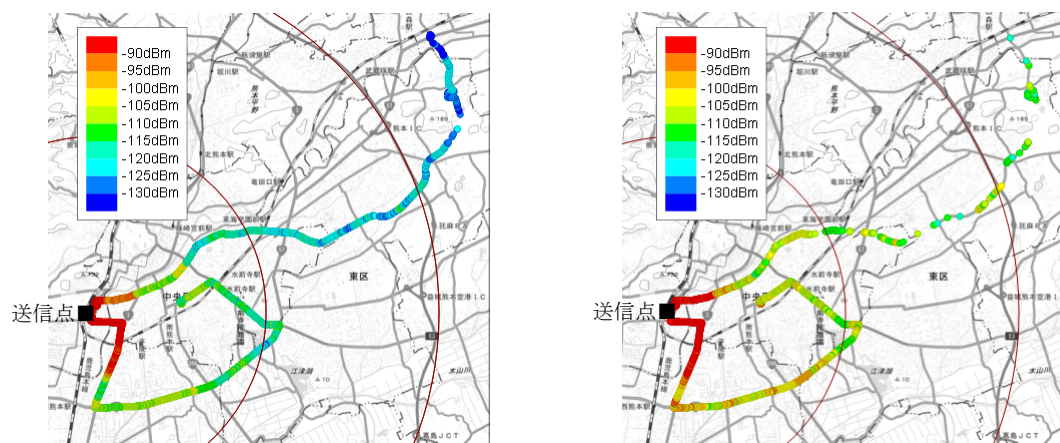
関東の試験では LoRa 方式が約 10km、2 値 FSK 方式が約 6km、4 値 FSK 方式が約 15km まで受信できた。九州の試験では LoRa 方式が約 12km、2 値 FSK 方式が約 6km、4 値 FSK 方式が約 12km まで受信できたことがわかる。

山岳と比べて受信できる伝搬距離が約半分であるのは、アンテナ高よりも伝搬路周辺の建物が高いため、遮へい損失やマルチパスの影響により受信レベルが低下したと考えられる。また、都市部においては、山岳環境に比べると雑音レベルが高いため、受信感度に影響があったと考えられる。



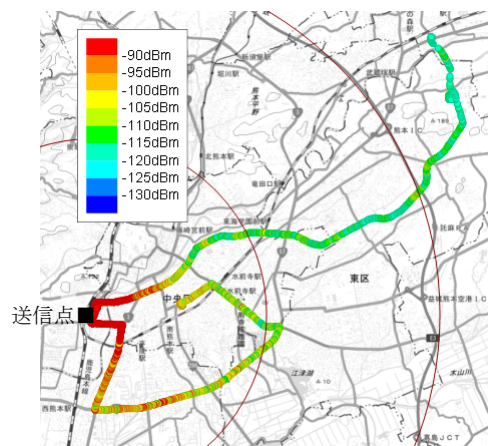
(a)LoRa 方式 スリープ送信 (b)2 値 FSK 方式 スリープ送信 (c)4 値 FSK 方式 スリープ送信

図 3-20 受信レベルマップ (平地_関東)



(a)LoRa 方式 スリープ送信

(b)2 値 FSK 方式 スリープ送信



(c)4 値 FSK 方式 スリープ送信

図 3-21 受信レベルマップ (平地_九州)

3.3.3 伝搬損失モデル

ここではフィールド試験で得られた実測データを用いて各伝搬路における伝搬損失モデルを検討した結果を示す。

3.3.3.1 山岳伝搬路

フィールド試験で得られた位置情報と受信電力を基に、標高を考慮した多重回折損失計算式との比較結果を示す。なお、多重回折計算の詳細は付属資料 8 に示す。図 3-22 に理論計算値と実測値の差分の分布を示す。また、理論計算値と実測値との相関図について図 3-23 に関東、図 3-24 に九州における結果を示す。

多重回折損失による理論計算値と実測値の差分で見ると、関東及び九州の環境において 10dB 以内が測定ポイントの 60%程度であった。山岳環境においては、場所によって周辺状況が変わる上、理論計算式に樹木による影響などを含めることは困難である。しかしながら、そのような状況においても誤差 10dB 程度が 60%程度に及ぶ事が確認できたことにより、山岳環境における理論計算の一つとして、多重回折モデルを用いることができると考えられる。一方で、九州試験では伝搬損失が大きい領域において、推定値が実測値よりも 10dB 以上大きくなっているところもある。これらは変調方式に関わらず同じ測定場所であったため、送受間のプロファイルによっては推定値が大きく計算されるケースもある。

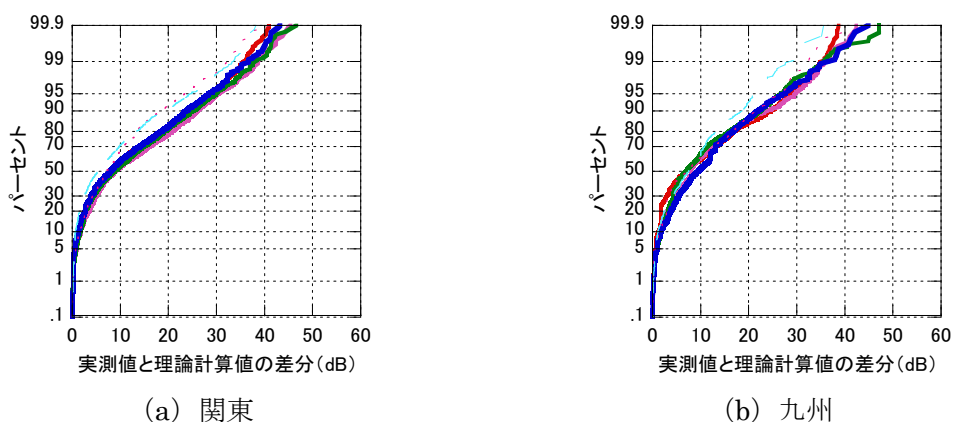
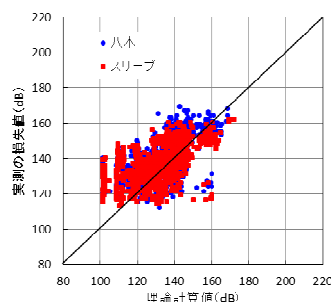
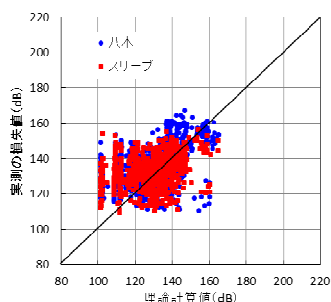


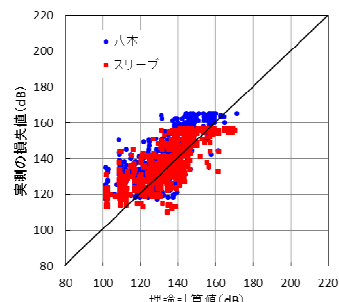
図 3-22 理論計算値と実測値との差分



(a) LoRa 方式

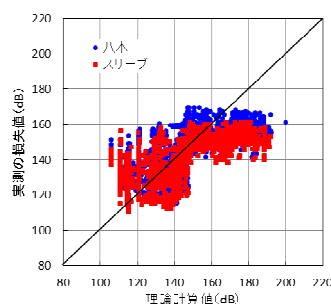


(b) 2 値 FSK 方式

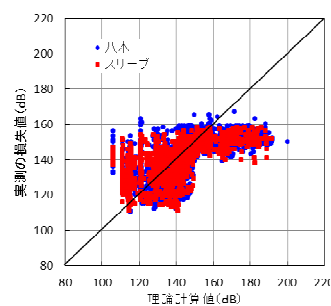


(c) 4 値 FSK 方式

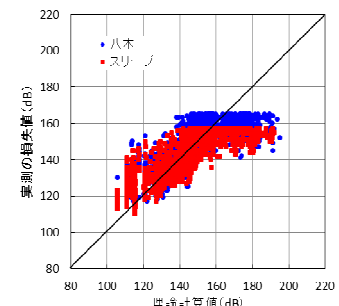
図 3-23 伝搬損失（山岳_関東）



(a) LoRa 方式



(b) 2 値 FSK 方式



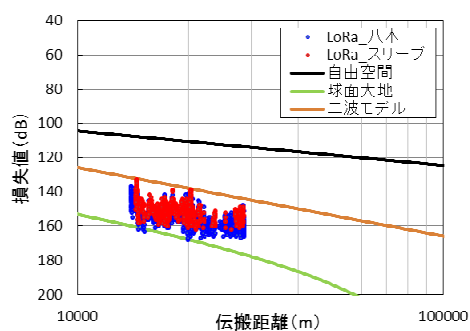
(c) 4 値 FSK 方式

図 3-24 伝搬損失（山岳_九州）

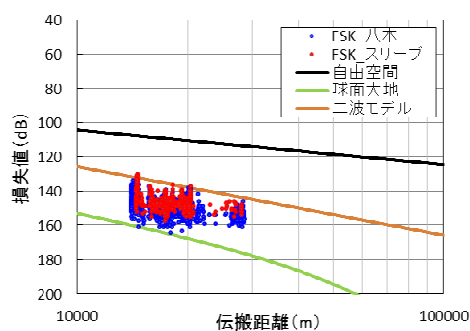
3.3.3.2 海上伝搬路

海上伝搬路は二波モデル及び球面回折付加損失モデルを用いて推定した。なお、関東試験は送信海拔高が低いために受信点が見通し外となっており、九州試験は見通し内となっている。図 3-25 関東における伝搬損失を示し、図 3-26 に九州における伝搬損失で送信海拔高 1017m、図 3-27 は同じ九州でも送信海拔高 466m における結果を示す。

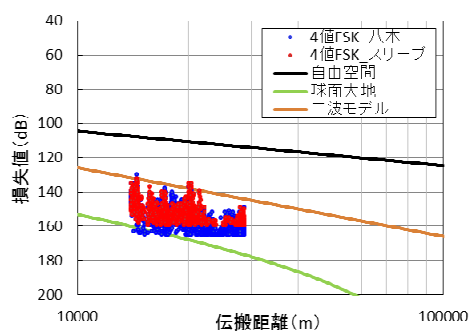
これらの結果から、いずれの方式でも二波モデルを用いて実測値を推定できると考えられる。損失値の小さい部分は推定値によく合っているが、海岸沿いから少し内陸に入ると住宅等の遮へいにより損失が大きくなるために実測値は推定値より大きくなっている。また、関東試験の損失値は九州試験の損失値より全体的に大きい。これは送信海拔高が低く受信点が見通し外となるためである。なお、九州(俵石)において距離が 35km を超えた領域のデータは市街地まで移動した受信データであるため、実測値が推定曲線から外れて大きくなっている。



(a) LoRa 方式

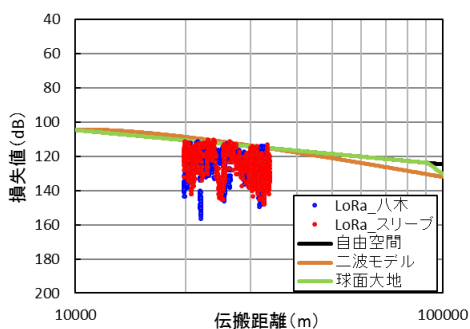


(b) 2 値 FSK 方式

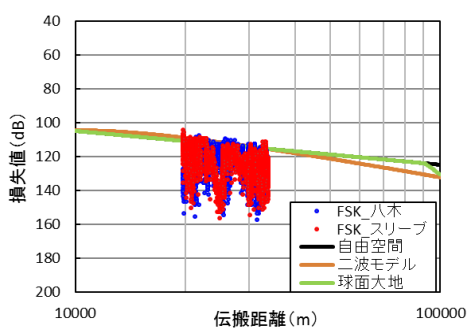


(c) 4 値 FSK 方式

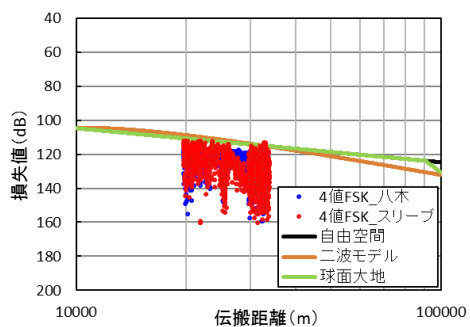
図 3-25 伝搬損失 (海上_関東)



(a) LoRa 方式

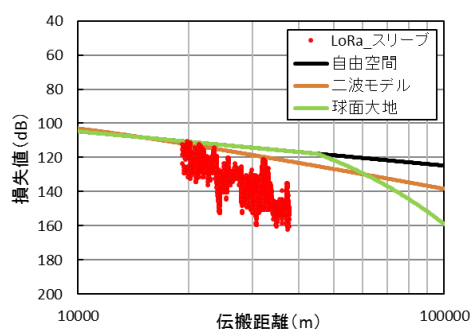


(b) 2 値 FSK 方式

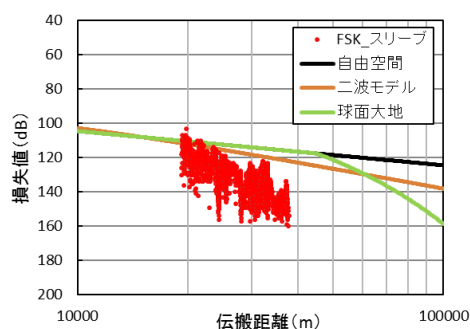


(c) 4 値 FSK 方式

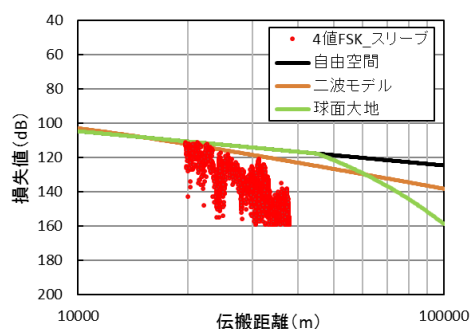
図 3-26 伝搬損失 (海上_九州_送信海拔高 1017m)



(a) LoRa 方式



(b) 2 値 FSK 方式



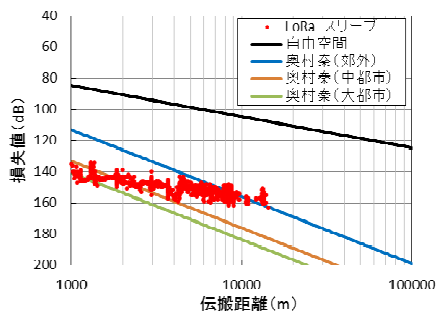
(c) 4 値 FSK 方式

図 3-27 伝搬損失 (海上_九州_送信海拔高 466m)

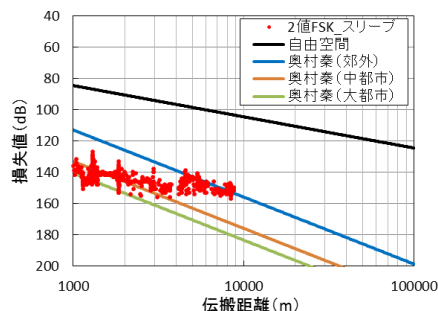
3.3.3.3 平地伝搬路

平地については奥村秦モデルを用いて計算した結果と比較した。図 3-28 に関東における伝搬損失を示し、図 3-29 に九州における伝搬損失を示す。なお、奥村秦モデルにおける伝搬距離の適用範囲は 20km までである。

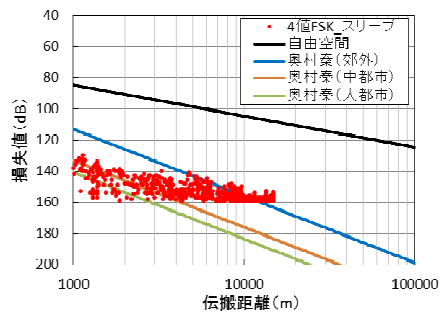
これらの結果から、いずれの変調方式でも奥村秦モデルを用いて実測値を推定できると考えられる。図 3-28 より、関東試験では約 3km までは奥村秦モデル（中都市）に近く、それ以降の距離では奥村秦モデル（郊外）に近づく傾向が見られる。これは約 3km 以降になると周辺に田畑が増えるためである。また図 3-29 より、九州試験では送信点付近で比較的高層ビルが乱立しているため、距離が短い領域において実測値のばらつきが大きい。また、距離に関わらず奥村秦モデル（郊外）と奥村秦モデル（中都市）との中間に位置する傾向がみられる。



(a) LoRa 方式

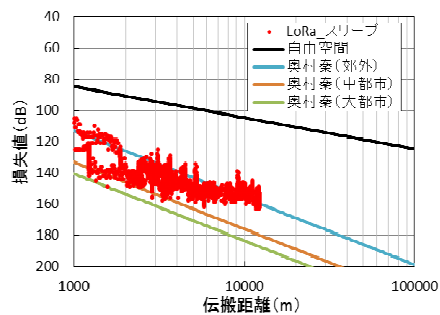


(b) 2 値 FSK 方式

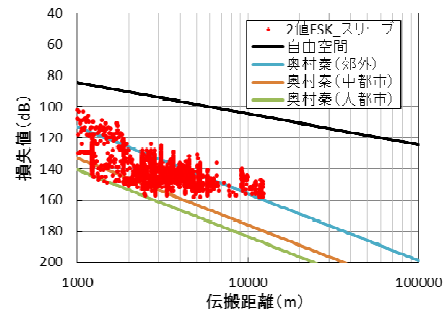


(c) 4 値 FSK 方式

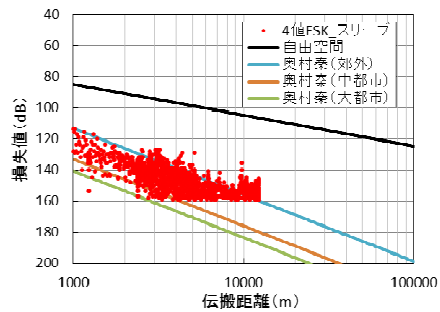
図 3-28 伝搬損失 (平地_関東)



(a) LoRa 方式



(b) 2 値 FSK 方式



(c) 4 値 FSK 方式

図 3-29 伝搬損失 (平地_九州)

3.3.4 定点測定

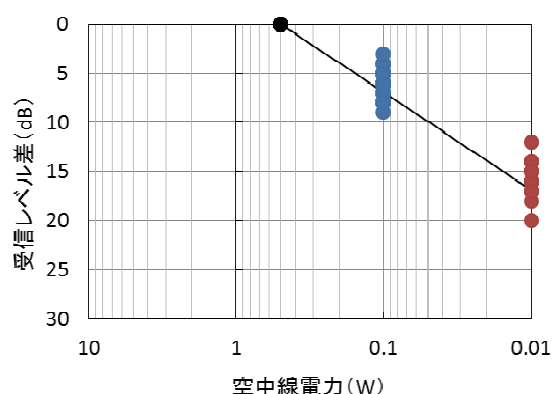
3.3.4.1 空中線電力差

実環境において、無線機の空中線電力を変化させた場合に、受信レベルがどのように変化するかを測定した。

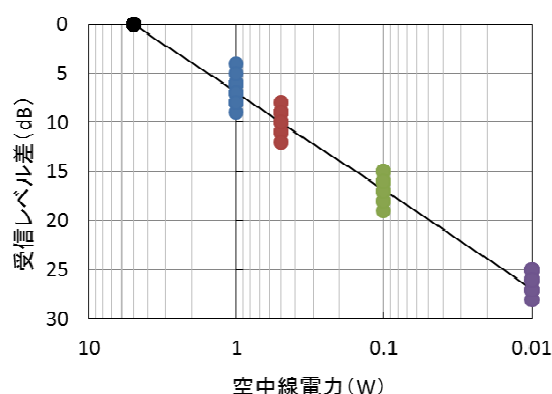
空中線電力差を図 3-30 に示す。各変調方式の最大空中線電力で送信した時の受信レベルを基準値として、空中線電力を低下させた時の受信レベルの低下量を差として示している。つまり、LoRa 方式は 0.5W、2 値 FSK 方式および 4 値 FSK 方式は 5W の時の受信レベル

を基準値としている。また、図中には空中線電力差の理論値を実線で合わせて示している。

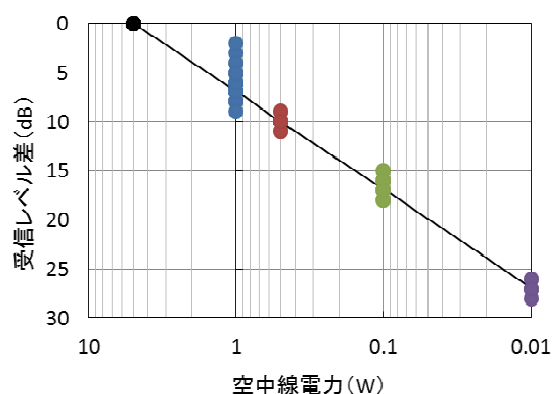
これらの結果から、全ての変調方式において、各装置の空中線電力を低下させた時の受信レベルの低下量は、空中線電力の差がそのまま受信レベルの差として現れていることが確認できた。また、関東及び九州の山岳、海上、平地の環境全てで同じであることが確認できた。このことから、机上計算などによる空中線電力の検討時においては、空中線電力の変化量をそのまま受信レベルの変化量として換算することができると考えられる。



(a) LoRa 方式



(b) 2 値 FSK 方式



(c) 4 値 FSK 方式

図 3-30 空中線電力差

3.3.4.2 受信レベルと PER/BER との関係

図 3-31 に受信レベルと PER/BER との関係を示す。図中の点線にラボ試験で取得したデータを併記し、フィールド試験結果と比較する。実測値は全ての伝搬路について示している。これらの結果から、いずれの変調方式についてもラボ試験結果よりも 5~10dB 高い受信レベルにおいてエラーが発生し始めている。これは実環境ではその他雑音の影響があるためと考えられる。

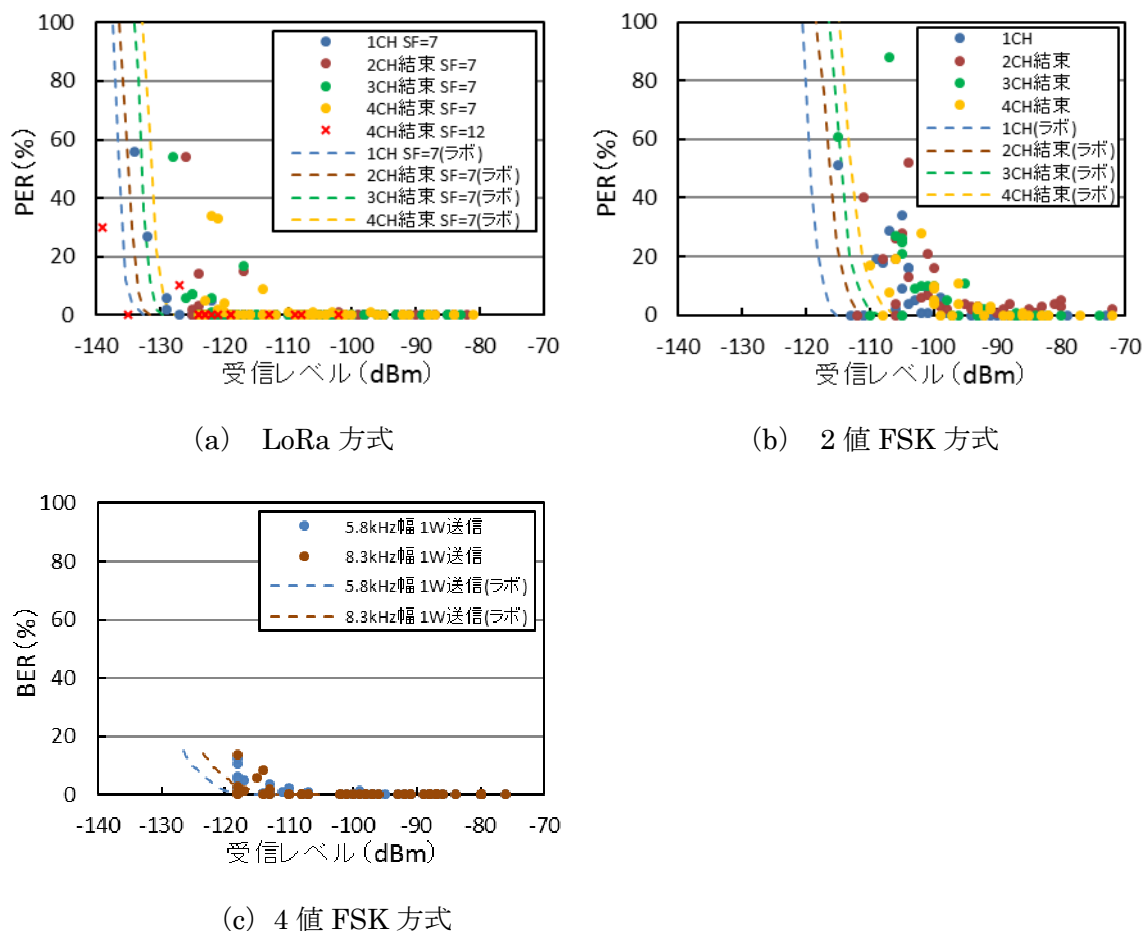
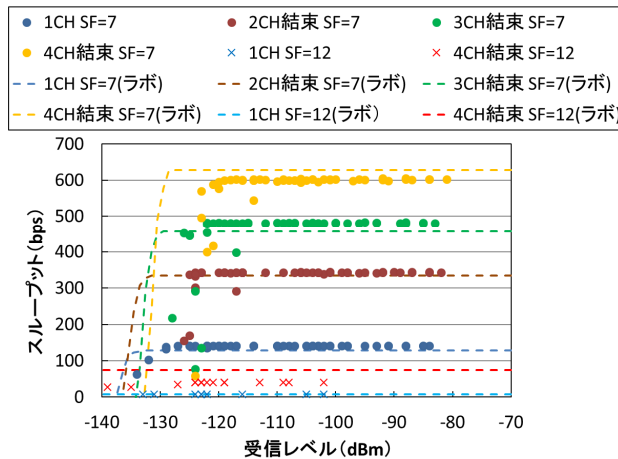


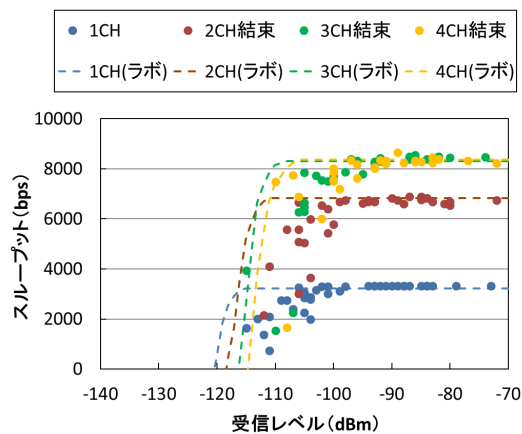
図 3-31 フィールド試験結果とラボ試験結果との比較（受信レベルーPER/BER）

3.3.4.3 受信レベルとスループットとの関係

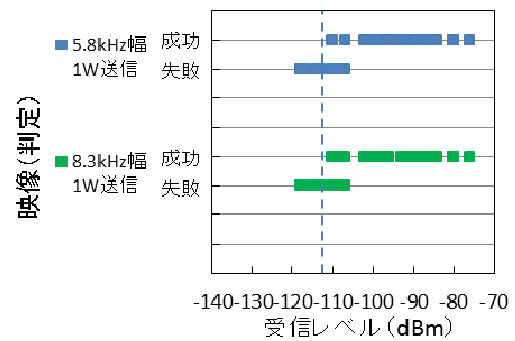
図 3-32 に受信レベルとスループットの関係を示す。但し、4 値 FSK 方式はスループットの測定はできないため、画像伝送の成功／失敗を示す。図中の点線にラボ試験で取得したデータを併記し、フィールド試験結果と比較する。実測値は全ての伝搬路について示している。これらの結果から、LoRa 方式及び 2 値 FSK 方式ともに、最大スループットについてはラボ試験結果とほぼ等しいことがわかる。また、LoRa 方式及び 2 値 FSK 方式ともに、スループットが低下し始める受信レベルがラボ試験より 5dB～10dB 高い結果となった。これは実環境ではその他雑音の影響があるためと考えられる。そのほか、4 値 FSK 方式による画像伝送では、ラボ試験同等の受信レベルで成功することもあったが、ラボ試験よりも 6dB 高いレベルで伝送が失敗することもあった。



(a) LoRa 方式



(b) 2 値 FSK 方式



(c) 4 値 FSK 方式

図 3-32 フィールド試験結果とラボ試験結果との比較 (受信レベル vs スループット)

3.3.5 まとめ

山岳伝搬では、山の谷間や上り下りがある地形では、送受信局間の回折・見通しなどの伝搬環境が変わり、伝搬距離が短くても受信レベルが低い地点や長距離でも受信レベルが高い地点が見られ、環境に大きく依存することが確認できた。フィールド試験では、関東の箱根と九州の阿蘇山では、受信できる伝搬距離が約 2 倍も異なる結果であった。

山越えの場合、FSK 方式では空中線電力が 5W でも受信できない場所があったが、LoRa 方式では 500mW でも受信できる場所が多くあり、受信感度が良いことが検証できた。

山岳伝搬のシミュレーションは、自由空間多重回折で近似する方法が適していると考えられる。

平地伝搬では、アンテナ高に比べ伝搬路周辺の建物による遮へい損失やマルチパスの影響による受信レベルの低下や都市部における雑音レベル(山岳環境に比べると 10dB 程度高い)により、受信感度にばらつきがあった。地形(建物)の変化(都市部から郊外)の影響

響を受けやすく、遠方まで伝搬する経路もあるが奥村秦モデルで近似できる。こちらでも、LoRa 方式が遠距離まで通信できることが検証できた。

海上伝搬では、送信局の海拔高が関東では 4m、九州では 1017m、466m と高さを変えて測定したが、見通し距離以上であっても海岸に近い場所であれば 20km 程度の通信が可能であった。これは、LoRa 方式も FSK 方式も大きな差は無かったが、FSK 方式は空中線電力が 5W であり、LoRa 方式は 500mW のため、LoRa 方式は少ない電力で遠距離まで通信できることが検証できた。海上伝搬のシミュレーションは二波モデルまたは球面回折付加損失モデルで近似できる。

各伝搬環境において途切れることなく受信できた伝搬距離を表 3-15 に示す。但し、安定したスループットを確保できる距離とは異なる。FSK 方式は空中線電力 5W、LoRa 方式は 500mW であるが、距離は同程度である。LoRa 方式は少ない電力で遠距離まで通信できることが検証できた。

表 3-15 途切れず受信できた伝搬距離[km]

伝搬状況	試験場所	LoRa 方式	2 値 FSK 方式	4 値 FSK 方式
山岳	関東	13	11	13
	九州	24	13	24
平地	関東	10	6	15
	九州	12	6	12
海上	関東	22	20	22
	九州	38	38	38

第4章 共用検討

気象援助局及び地震又は火山噴火予知観測用で使用される各周波数帯において、各変調方式（LoRa、2 値 FSK、4 値 FSK）が使用された場合の現行システム及び各変調方式の組合せで共用検討を行い、各変調方式の共用条件を整理する。

共用条件は第 3 章の実証試験で得られた最小受信感度及び D/U 値を用いて検討する。

ラボ試験では、受信したい電波（希望波＝Desired Signal）に対して妨害をする電波（妨害波＝Undesired Signal）がどれだけのレベル（D/U 比）であるか測定しており、機器の諸元と利用シーン（地形やアンテナの指向性）によって同一周波数や隣接周波数の繰り返し利用がどの程度の所要改善量や離隔距離が必要かを机上計算によって示す。

4.1 共用条件の整理

共用検討を行うシステムの諸元の調査、同一周波数、隣接周波数の利用シーンのモデル化、計算手法の整理を行った。

4.1.1 共用検討する機器の諸元

400MHz 帯気象・地象観測用周波数で使用されている無線局の諸元を表 4-1 に示す。

表 4-1 400MHz 帯気象・地象観測用周波数機器の諸元

項目	地震又は火山噴火予知観測用		気象援助局 (ラジオ ロボット用)
	移動系	固定系	
送信周波数	402.6～402.85MHz 403.05～ 403.075MHz	346.6MHz/347.5/363.1/ 364MHz/ 409.025～409.7 MHz	402.875 ～ 403.025MHz 405.9 ～ 405.9875MHz
変調方式	FSK/GMSK		—
合計チャネル数	24	9	21
空中線電力	1W	20W	1W
チャネル間隔	12.5kHz	75kHz	12.5kHz
最小受信感度※	-103～-107dBm		—
伝送速度	9.6kbps	57.6kbps	1.2kbps
占有周波数帯幅（BN）	8.5kHz	50kHz	8.5kHz
帯域外領域におけるスプリ アス発射の強度の許容値	±62.5kHz, 25μW 以下	±125kHz, 2.5μW 以下	±62.5kHz, 25μW 以下
スプリアス領域における不 要発射の強度の許容値	25μW 以下	2.5μW 以下	25μW 以下

※. 現在運用されている機器の値

図 4-1 は 5 素子八木空中線指向特性図で、
空中線アンテナの諸元を以下に示す。

利得：11.15dBi 以上

半値角：E 面 $\pm 27^\circ$ H 面 $\pm 33^\circ$

(半値角時の利得-3dB)

メインローブ以外の利得-11.15dB)

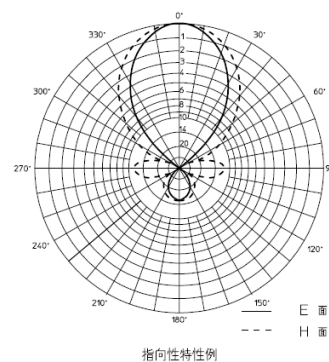


図 4-1 空中線アンテナの指向特性図

気象援助局及び地震又は火山噴火予知観測用で使用する各周波数帯¹¹を図 4-2 に示す。

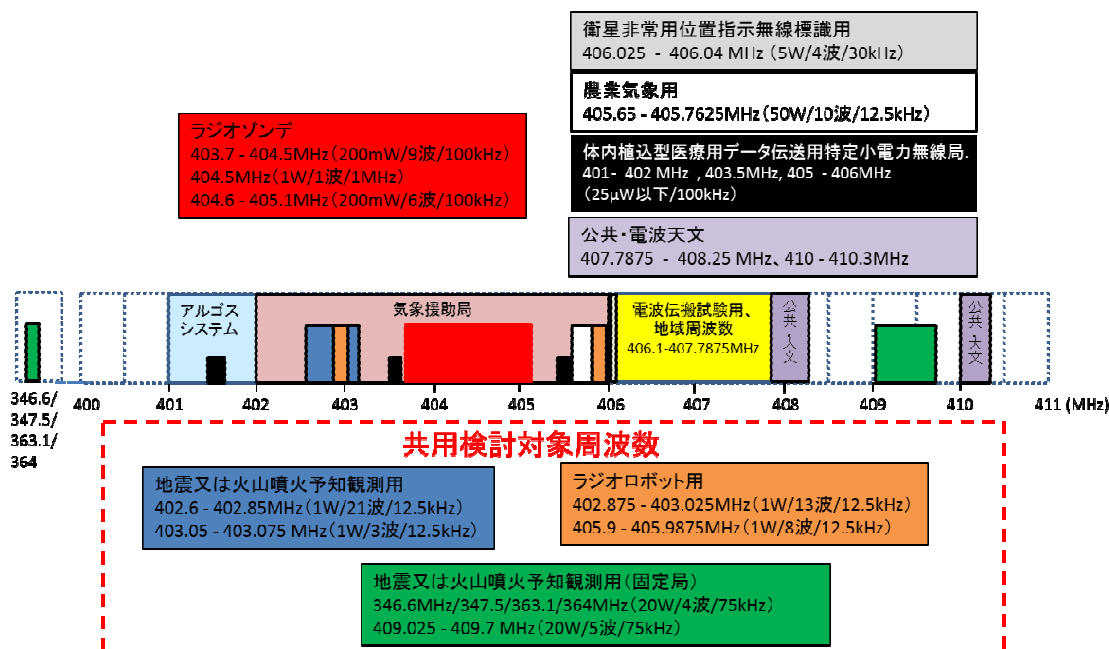


図 4-2 使用周波数帯

(参考) 体内植込型医療用データ伝送用特定小電力無線局への与干渉は情報通信審議会
情報通信技術分科会 小電力無線システム委員会報告 (H20.12.11) を参照すると、ラジオ・
ゾンデからの与干渉は隣接チャネル漏えい電力 40dB 以上、建物侵入損失 20dB から 89.1m
の離隔距離 (離調周波数 200kHz) となっている。地震又は火山噴火予知観測用から体内植
込型医療用データ伝送用特定小電力無線局は 425kHz 離調しておりスプリアス領域となる
ことからさらに離隔距離は短くなる。また、体内植込型医療用データ伝送用特定小電力無
線局はキャリアセンス等の干渉軽減機能を有することになっているため干渉を与える可能
性は非常に低い。

¹¹ 総務省電波利用ホームページ 我が国の電波の使用状況より

地震又は火山噴火予知観測用に導入を検討している変調方式の諸元を表 4-2 に示す。

表 4-2 新しい変調方式の諸元

項目	LoRa 方式	FSK 方式	
送信周波数	400MHz 帯気象・地象観測用周波数		
空中線電力	1W 以下	1W 以下	1W 以下
変調方式	LoRa	2 値 FSK	4 値 FSK
チャンネル間隔	12.5/25.0/37.5/50.0kHz		6.25/12.5kHz
受信感度	-135～-150dBm	-118dBm	-115dBm
占有周波数帯幅（BN）	7.8/20.8/31.25/41.7kHz		5.8/8.5kHz
帯域外領域におけるスプリアス発射の強度の許容値	±62.5kHz/±62.5kHz/±78.125kHz/ ±104.25kHz 25μW		±62.5kHz 25μW
スプリアス領域における不要発射の強度の許容値	25μW		

図 4-3 に示すスプリアス領域と帯域外領域の境界¹²⁾は、現行システム、新しい変調方式のシステムともに同じである。

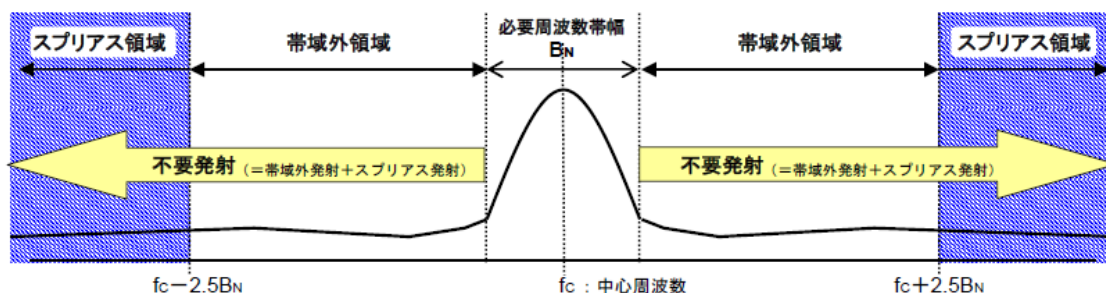


図 4-3 スプリアス領域と帯域外領域の境界

現行システムと新しく導入を検討する変調方式について表 4-3 に示す組合せで所要改善量及び離隔距離を計算し、共用条件について検討を行なう。

表 4-3 対象システムの組合せ

共用対象システム の組合せ		妨害波 (U)			
		現行システム	LoRa	2 値 FSK	4 値 FSK
希望波 (U)	現行システム	○	○	○	○
	LoRa	○	○	○	○
	2 値 FSK	○	○	○	○
	4 値 FSK	○	○	○	○

¹²⁾ 総務省電波利用ホームページ 無線設備のスプリアス発射の強度の許容値より
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/spurious/>

LoRa 及び 2 値 FSK は 1~4 チャンネル結束、4 値 FSK は狭帯域チャンネルも実施する。チャンネル配置は図 3-2 を参照。

4.1.2 共用検討のモデル

共用モデルを図 4-4 のとおり整理した。利用シーンはアンテナの方向や地形による高低差を考慮した。

水平面のモデルはアンテナ指向性特性により利得が異なるケースを 3 パターン示しており、①はアンテナが正対して妨害波が直接希望波の受信側に入力される場合。②はアンテナ指向特性が半値角で向き合った場合。③はアンテナ指向特性のメインローブ外に相互の装置がある場合とした。

垂直面のモデルは利用場所によって異なる地形条件を 3 パターン示した。これらは、地形条件によって電波伝搬モデルが異なるためで、①は平地利用の場合で、奥村秦モデル式を適用。②は山岳利用の場合で、フィールド試験結果から自由空間多重回折モデル式を適用。③は海上利用の場合で、球面回折付加損失モデル式を適用した。

各モデル式は付属資料 9 に示す。

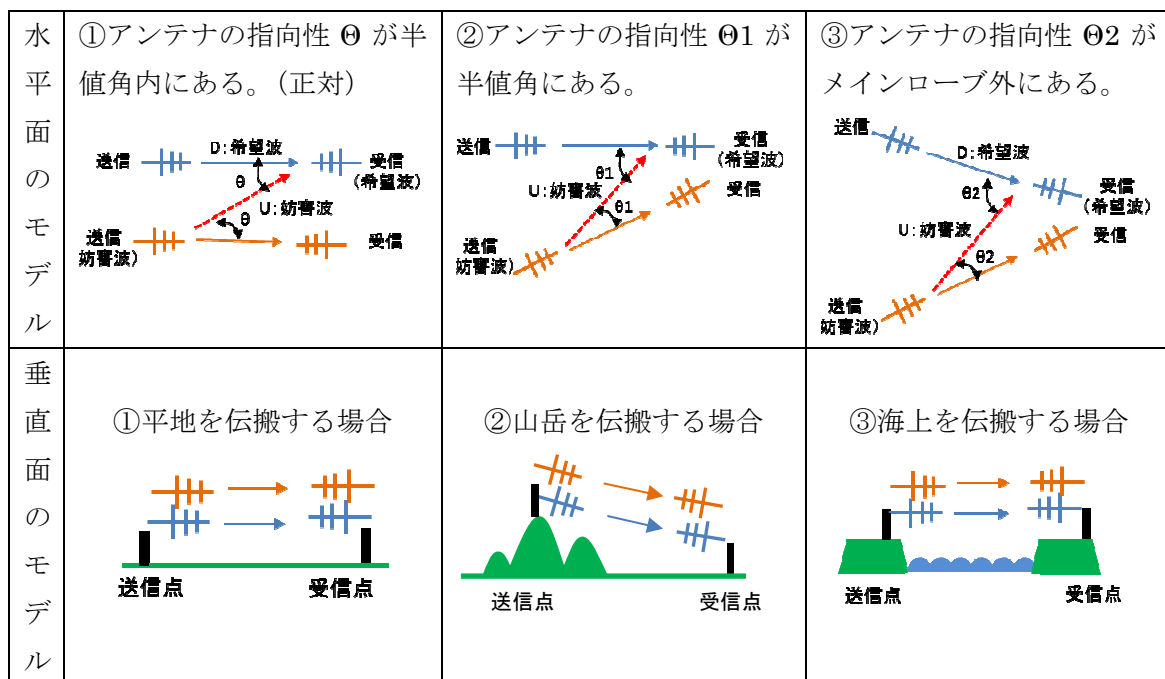


図 4-4 共用モデル

地震又は火山噴火予知観測用の無線局は山頂付近に設置され、平地側の観測所に単方向通信でデータが送信される。観測点は複数存在するケースもあると思われるが、点において同一地点に複数のアンテナを設置することがないと想定し、最低でも基地局は 100m 離して設置すると想定した。D/U の位置関係を図 4-5 に示す。

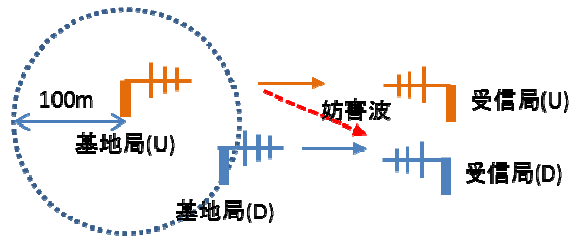


図 4-5 希望波 (D) と妨害波 (U) の位置関係

(1) 共用検討に用いる D/U 値及び最小受信感度

共用検討に必要な D/U 値及び最小受信感度はラボ試験で測定している。実験機の都合で測定できていない項目は過去の情通審で用いられた値を適用した。その結果を一覧としてまとめたのが表 4-4 である。この条件にて、同一チャネル及び隣接チャネルの離隔距離と所要改善量を計算する。

表 4-4 D/U 値と最小受信感度

(D) 希望波	(U) 妨害波	CH 結 束数	(D) 希望波 最小受信感度 (dBm)	同一 CH D/U 値 (dB)	隣接 CH D/U 値 (dB)
現行 システム※1	現行システム LoRa/2 値 FSK /4 値 FSK	—	-107	22	-40
LoRa (SF7)	現行システム	1	-134	0 ※2	-40
	LoRa(SF8)	1	-134	-3	-60
		2	-132	-8	-56
		3	-130	-6	-54
		4	-128	-7	-51
	2 値 FSK	1	-134	-2	-59
		2	-132	-5	-54
		3	-130	-3	-55
		4	-128	-1	-54
	4 値 FSK	1	-134	-5	-64
2 値 FSK	現行システム	1	-116	22 ※3	-40
	LoRa	1	-116	14	-41
		2	-112	13	-26

		3	-109	12	-26
		4	-107	12	-26
	2 値 FSK	1	-116	10	-30
		2	-112	11	-28
		3	-109	10	-27
		4	-107	9	-26
	4 値 FSK	1	-116	8	-30
4 値 FSK	現行システム	1	-115	22 ※3	-40
	LoRa	1	-115	14	-25
	2 値 FSK	1	-115	12	-33
	4 値 FSK	1	-115	22 ※3	-40

※1：最小受信感度はメーカーからの回答。同一チャネルは※3 参照。隣接チャネルは H28.3 東北総合通信局 地域振興周波数帯の有効利用のための技術的条件に関する調査検討で用いられた 4 値 FSK 方式の D/U 値を参照した。

※2：LoRa 方式はフィールド試験及びラボ試験から干渉に強い結果であるので現行システムとの D/U は 0dB とした。隣接チャネルは※1 を参照した。

※3：電波法審査基準の審査値である「同一周波数の場合の受信機入力における所要 D/U は、21dB 以上（4FSK については 22dB 以上）を標準とする。

（2）共用条件の検討

表 4-5 に示す共用計算式から八木アンテナの正対の条件で所要改善量と離隔距離を算出した。

表 4-5 共用計算式例

項目	項番	項目	記号	値	単位	
妨害波（U）	(1)	送信周波数	f	412.4	MHz	
		波長	λ	0.728		
	(2)	送信アンテナ高	hb	30	m	※1：奥村秦モデルは 30～200m
	(3)	空中線電力	Pt	1000	mW	※2：空中線電力
				30	dBm	
		空中線利得		11.15	dB	※3：アンテナ方向
		給電線損失		1.3	dB	
	(4)	占有周波数帯幅	BW	7.8	kHz	※4：占有周波数帯域幅
希望波（D）	(5)	受信アンテナ高	hm	3	m	

	(6)	空中線利得		11.15	dB	
	(7)	給電線損失		2.3	dB	
	(8)	占有帯域幅		12.5	kHz	システムチャネル幅
	(9)	最小受信電力		-134	dBm	表 4-4 より
	(10)	最小受信感度(+16dB)		-118	dBm	(9)+16dB※5
送受信利得	(11)	送受信利得合計		48.7	dB	正対
D/U	(12)	同一チャネルの D/U 比		-3	dB	表 4-4 より
	(13)	隣接チャネルの D/U 比		-60	dB	表 4-4 より
妨害波の許容	(14)	同一チャネル		-115	dBm	正対(10)-(12)
受信電力	(15)	隣接チャネル		-58	dBm	正対(10)-(13)
所要改善量	(16)	同一チャネル		53.9	dB	{(11)-Loss}-(14)※6
	(17)	隣接チャネル		-3.1	dB	{(11)-Loss}-(15)※6
離隔距離	(18)	同一チャネル		51.2	km	山岳（多重回折）
	(19)	隣接チャネル		-	km	山岳（多重回折）

※1：送信アンテナ高は、平地は 30m、海上の場合（離島側）は北海道の離島で使用されている 110m、受信アンテナ高は 3m とした。

※2：空中線電力は以下の組合せとした。現行システムは固定系のみ 20W とした。

(D) 希望波	空中線電力	(U) 妨害波
LoRa	1000/500/100/ 10mW 20W	LoRa/2 値 FSK/4 値 FSK/ 現行システム
2 値 FSK		LoRa/4 値 FSK/現行システム
4 値 FSK		LoRa/2 値 FSK/現行システム
現行システム		LoRa/2 値 FSK/4 値 FSK/ 現行システム

※3：アンテナ方向は以下のとおりとなるが、正対の条件のみ使用した。

アンテナ方向	正対	半値角	メインローブ外
指向性	11.15	8.15	0

※4：占有周波数帯域幅とチャネル幅

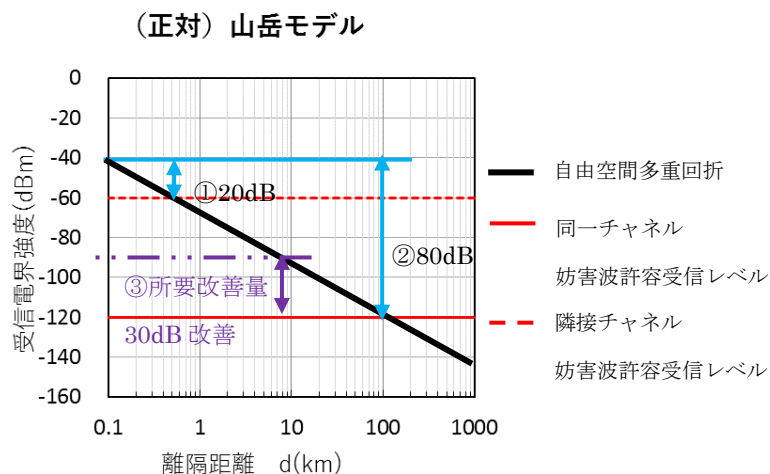
システム チャネル幅 (kHz)	12.5	25	37.5	50
LoRa/FSK 占有帯域幅 (kHz)	7.8/8.5	20.8	31.25	41.7

※5：フィールド試験で約+10dB のレベル低下及び固定劣化等マージン+6dB を考慮して最小受信感度に+16dB とした。

※6：Loss は各モデル式で 100m の損失を計算した値

(3) 所要改善量と離隔距離について

所要改善量と離隔距離について図 4-6 を用いて説明する。



離隔距離 0.1km の受信電力からそれぞれのモデル式で計算した妨害波許容受信電力までの電力差が所要改善量と、離隔距離となる。

妨害波許容受信レベルは、希望波 (D) の通信で PER が 0% になるときの妨害波の電力で、これは D/U から計算される。

赤線は同一チャネル、赤点線は隣接チャネルの妨害波許容受信電力で、それぞれ -120dBm、-60dBm であったとする。所要改善量は、

- ① 隣接チャネル 20dB
- ② 同一チャネル 80dB となる。

このとき、希望波 (D) が干渉を受けずに通信するには、同一チャネルで 100km、隣接チャネル 500m 離す必要がある。

又は、同一チャネルで所要改善量を③30dB（アンテナの指向特性や空中線電力による電力の適正化、山や建物等による遮へい損失など）改善した場合、離隔距離は 9km、に改善される。この離隔距離で希望波 (D) が混信を受けずに通信することができるので、共用可能となる。

隣接チャネルに関しても同様に所要改善量を改善することで共用が可能となる。

4.2 共用検討計算結果

表 4-3 の組合せで共用条件の計算を実施した。

4.2.1 現行システムの結果

希望波 (D) : 現行システム 妨害波 (U) : 現行システム/LoRa/2 値 FSK/4 値 FSK

表 4-6 希望波 (D) : 現行システム 妨害波 (U) : 現行システム/LoRa/2 値 FSK/4 値 FSK

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)										
地形	伝搬モデル		CH 結束	20W		1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	87.9	25.9	74.9	12.9	71.9	9.9	64.9	2.9	54.9	-7.1
				32.5	0.8	14.1	0.5	11.5	0.4	7.4	0.4	4.0	共用可
		郊外	1	95.9	33.9	82.9	20.9	79.9	17.9	72.9	10.9	62.9	0.9
				54.7	1.2	23.6	0.7	19.5	0.6	12.4	0.5	6.6	0.4
		開放地	1	116.0	54.0	102.9	40.9	99.9	37.9	92.9	30.9	82.9	20.9
				201.6	3.7	86.5	1.7	71.4	1.5	45.1	1.0	23.6	0.7
海上	球面回折付加 損失モデル		1	106.9	44.9	93.8	31.8	90.8	28.8	83.8	21.8	73.8	11.8
				79.7	10.9	62.2	5.6	58.3	4.8	49.5	3.3	36.6	2.0
山岳	多重回折 モデル		1	65.2	3.2	52.2	-9.8	49.2	-12.8	42.2	-19.8	32.2	-29.8
				180.6	0.4	40.8	共用可	28.8	共用可	13.1	共用可	4.3	共用可

- 所要改善量の計算結果は、妨害波許容受信電力レベルとなる所要改善量 (dB) と離隔距離 (km) を示しており、必要な離隔距離をとるか、所要改善量を 0 以下又は改善することで共用が可能である。
- 平地、山岳利用で所要改善量を改善する方法として、指向性アンテナのメインローブ外 (23dB) となる設置、空中線電力の適正化 (1W から 10mW で 20dB)、送受信アンテナ高を低く設置する、山や建物の遮へいにより妨害波の損失を大きくする等が考えられる。これらの組合せで、設置場所ごとに所要改善量を改善する必要がある。
- いずれも設置場所を考慮したサイトエンジニアリングが必要であり、所要改善量の改善は可能と考えられる。
- 海上利用においては、遮へい物が無いので離隔距離をとるか、異なるチャネルを利用することで混信を回避する必要がある。

4.2.2 LoRa システムの結果

(1) 希望波 (D) : LoRa 方式 妨害波 (U) : 現行システム

表 4-7 希望波 (D) : LoRa 方式 妨害波 (U) : 現行システム

			上段:所要改善量(dB) 下段:離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	79.9	39.9	76.9	36.9	69.9	29.9	59.9	19.9
				19.3	1.6	16.0	1.4	10.2	1.0	5.4	0.6
			2	77.9	37.9	74.9	34.9	67.9	27.9	57.9	17.9
				17.0	1.5	14.1	1.3	9.0	0.9	4.8	0.6
			3	75.9	35.9	72.9	32.9	65.9	25.9	55.9	15.9
				15.0	1.3	12.3	1.1	7.9	0.8	4.2	0.5
			4	73.9	33.9	70.9	30.9	63.9	23.9	53.9	13.9
				13.2	1.2	10.8	1.0	7.0	0.7	3.7	0.5
		郊外	1	87.9	47.9	84.9	44.9	77.9	37.9	67.9	27.9
				32.5	2.6	26.8	2.2	17.0	1.5	9.0	0.9
			2	85.9	45.9	82.9	42.9	75.9	35.9	65.9	25.9
				28.6	2.3	23.6	2.0	15.0	1.3	7.9	0.8
			3	83.9	43.9	80.9	40.9	73.9	33.9	63.9	23.9
				25.1	2.1	20.8	1.7	13.2	1.2	7.0	0.7
			4	81.9	41.9	78.9	38.9	71.9	31.9	61.9	21.9
				22.1	1.8	18.1	1.6	11.6	1.1	6.2	0.7
		開放地	1	107.9	67.9	104.9	64.9	97.9	57.9	87.9	47.9
				119.4	9.0	98.4	7.4	62.2	4.8	32.5	2.6
			2	105.9	65.9	102.9	62.9	95.9	55.9	85.9	45.9
				105.0	7.9	86.5	6.6	54.7	4.2	28.6	2.3
3	103.9		63.9	100.9	60.9	93.9	53.9	83.9	43.9		
	92.3		7.0	76.1	5.8	48.1	3.7	25.1	2.1		
4	101.9		61.9	98.9	58.9	91.9	51.9	81.9	41.9		
	81.2		6.2	66.3	5.1	42.3	3.3	22.1	1.8		
海上	球面回折付加損失モデル	1	98.8	58.8	95.8	55.8	88.8	48.8	78.8	38.8	
			68.8	21.0	65.1	18.3	55.7	13.3	42.7	8.0	

		2	96.8	56.8	93.8	53.8	86.8	46.8	76.8	36.8
			66.3	19.1	62.2	16.7	53.2	12.1	40.4	7.2
		3	94.8	54.8	91.8	51.8	84.8	44.8	74.8	34.8
			63.9	17.5	60.0	15.2	50.4	10.9	37.9	6.6
		4	92.8	52.8	89.8	49.8	82.8	42.8	72.8	32.8
			61.1	16.0	57.3	13.9	48.1	9.9	35.6	5.9
山岳	多重回折モデル	1	57.2	17.2	54.2	14.2	47.2	7.2	37.2	-2.8
			72.0	1.0	50.8	0.8	22.9	0.5	7.4	共用可
		2	55.2	15.2	52.2	12.2	45.2	5.2	35.2	-4.8
			57.3	0.8	40.4	0.7	18.3	0.4	6.0	共用可
		3	53.2	13.2	50.2	10.2	43.2	3.2	33.2	-6.8
			45.5	0.7	32.2	0.6	14.6	0.4	4.8	共用可
		4	51.2	11.2	48.2	8.2	41.2	1.2	31.2	-8.8
			36.2	0.6	25.6	0.5	11.6	0.4	3.8	共用可

(2) 希望波 (D) : LoRa 方式 妨害波 (U) : LoRa 方式

表 4-8 希望波 (D) : LoRa 方式 妨害波 (U) : LoRa 方式

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	76.9	19.9	73.9	16.9	66.9	9.9	56.9	-0.1
				16.0	0.6	13.2	0.6	8.4	0.4	4.5	共用可
			2	69.9	21.9	66.9	18.9	59.9	11.9	49.9	1.9
				10.2	0.7	8.4	0.6	5.4	0.5	2.9	0.4
		3	69.9	21.9	66.9	18.9	59.9	11.9	49.9	1.9	
			10.2	0.7	8.4	0.6	5.4	0.5	2.9	0.4	
		4	66.9	22.9	63.9	19.9	56.9	12.9	46.9	2.9	
			8.4	0.7	7.0	0.6	4.5	0.5	2.5	0.4	
郊外	1	84.9	27.9	81.9	24.9	74.9	17.9	64.9	7.9		
		26.8	0.9	22.1	0.8	14.1	0.6	7.4	0.4		
2	77.9	29.9	74.9	26.9	67.9	19.9	57.9	9.9			
	17.0	1.0	14.1	0.8	9.0	0.6	4.8	0.4			

			3	77.9	29.9	74.9	26.9	67.9	19.9	57.9	9.9
				17.0	1.0	14.1	0.8	9.0	0.6	4.8	0.4
		開放地	4	74.9	30.9	71.9	27.9	64.9	20.9	54.9	10.9
				14.1	1.0	11.6	0.9	7.4	0.7	4.0	0.5
			1	104.9	47.9	101.9	44.9	94.9	37.9	84.9	27.9
				98.4	2.6	81.2	2.2	51.3	1.5	26.8	0.9
			2	97.9	49.9	94.9	46.9	87.9	39.9	77.9	29.9
				62.2	3.0	51.3	2.5	32.5	1.7	17.2	1.0
			3	97.9	49.9	94.9	46.9	87.9	39.9	77.9	29.9
				62.2	3.0	51.3	2.5	32.5	1.7	17.2	1.0
			4	94.9	50.9	91.9	47.9	84.9	40.9	74.9	30.9
				51.3	3.1	42.3	2.6	26.8	1.7	14.1	1.0
海上	球面回折付加損失モデル	1	1	95.8	38.8	92.8	35.8	85.8	28.8	75.8	18.8
				65.1	8.0	61.1	6.9	51.8	4.8	39.0	2.8
		2	2	88.8	40.8	85.8	37.8	78.8	30.8	68.8	20.8
				55.7	8.9	51.8	7.6	42.7	5.3	31.0	3.1
		3	3	88.8	40.8	85.8	37.8	78.8	30.8	68.8	20.8
				55.7	8.9	51.8	7.6	42.7	5.3	31.0	3.1
		4	4	85.8	41.8	82.8	38.8	75.8	31.8	65.8	21.8
				51.8	9.4	48.1	8.0	39.0	5.6	27.8	3.3
山岳	多重回折モデル	1	1	54.2	-2.8	51.2	-5.8	44.2	-12.8	34.2	-22.8
				51.3	共用可	36.2	共用可	16.4	共用可	5.4	共用可
		2	2	47.2	-0.8	44.2	-3.8	37.2	-10.8	27.2	-20.8
				22.9	共用可	16.2	共用可	7.4	共用可	2.5	共用可
		3	3	47.2	-0.8	44.2	-3.8	37.2	-10.8	27.2	-20.8
				22.9	共用可	16.2	共用可	7.4	共用可	2.5	共用可
		4	4	44.2	0.2	41.2	-2.8	34.2	-9.8	24.2	-19.8
				16.4	0.4	11.6	共用可	5.4	共用可	1.9	共用可

(3) 希望波 (D) : LoRa 方式 妨害波 (U) : 2 値 FSK 方式

表 4-9 希望波 (D) : LoRa 方式 妨害波 (U) : 2 値 FSK 方式

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	77.9	20.9	74.9	17.9	67.9	10.9	57.9	0.9
				17.0	0.7	14.1	0.6	9.0	0.5	4.8	0.4
			2	72.9	23.9	69.9	20.9	62.9	13.9	52.9	3.9
				12.3	0.7	10.2	0.7	6.6	0.5	3.5	0.4
			3	72.9	20.9	69.9	17.9	62.9	10.9	52.9	0.9
				12.3	0.7	10.2	0.6	6.6	0.5	3.5	0.4
			4	72.9	19.9	69.9	16.9	62.9	9.9	52.9	-0.1
				12.3	0.6	10.2	0.6	6.6	0.4	3.5	共用可
		郊外	1	85.9	28.9	82.9	25.9	75.9	18.9	65.9	8.9
				28.6	0.9	23.6	0.8	15.0	0.6	7.9	0.4
			2	80.9	31.9	77.9	28.9	70.9	21.9	60.9	11.9
				20.8	1.1	17.0	0.9	10.9	0.7	5.8	0.5
			3	80.9	28.9	77.9	25.9	70.9	18.9	60.9	8.9
				20.8	0.9	17.0	0.8	10.9	0.6	5.8	0.4
			4	80.9	27.9	77.9	24.9	70.9	17.9	60.9	7.9
				20.8	0.9	17.0	0.8	10.9	0.6	5.8	0.4
		開放地	1	105.9	48.9	102.9	45.9	95.9	38.9	85.9	28.9
				105.0	2.8	86.5	2.3	54.7	1.6	28.6	0.9
			2	100.9	51.9	97.9	48.9	90.9	41.9	80.9	31.9
				76.1	3.3	62.2	2.8	39.7	1.8	20.8	1.1
			3	100.9	48.9	97.9	45.9	90.9	38.9	80.9	28.9
				76.1	2.8	62.2	2.3	39.7	1.6	20.8	0.9
			4	100.9	47.9	97.9	44.9	90.9	37.9	80.9	27.9
				76.1	2.6	62.2	2.2	39.7	1.5	20.8	0.9
海上	球面回折付加 損失モデル		1	96.8	39.8	93.8	36.8	86.8	29.8	76.8	19.8
				66.3	8.5	62.2	7.2	53.2	5.0	40.4	3.0
			2	91.8	42.8	88.8	39.8	81.8	32.8	71.8	22.8

			60.0	9.9	55.7	8.5	46.8	5.9	34.3	3.5
		3	91.8	39.8	88.8	36.8	81.8	29.8	71.8	19.8
			60.0	8.5	55.7	7.2	46.8	5.0	34.3	3.0
		4	91.8	38.8	88.8	35.8	81.8	28.8	71.8	18.8
			60.0	8.0	55.7	6.9	46.8	4.8	34.3	2.8
山岳	多重回折モデル	1	55.2	-1.8	52.2	-4.8	45.2	-11.8	35.2	-21.8
			57.3	共用可	40.4	共用可	18.3	共用可	6.0	共用可
		2	50.2	1.2	47.2	-1.8	40.2	-8.8	30.2	-18.8
			32.5	0.4	22.9	共用可	10.4	共用可	3.5	共用可
		3	50.2	-1.8	47.2	-4.8	40.2	-11.8	30.2	-21.8
			32.5	共用可	22.9	共用可	10.4	共用可	3.5	共用可
		4	50.2	-2.8	47.2	-5.8	40.2	-12.8	30.2	-22.8
			32.5	共用可	22.9	共用可	10.4	共用可	3.5	共用可

(4) 希望波 (D) : LoRa 方式 妨害波 (U) : 4 値 FSK 方式

表 4-10 希望波 (D) : LoRa 方式 妨害波 (U) : 4 値 FSK 方式

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	74.9	15.9	71.9	12.9	64.9	5.9	54.9	-4.1
				14.1	0.5	11.5	0.5	7.4	0.4	4.0	共用可
		郊外	1	82.9	23.9	79.9	20.9	72.9	13.9	62.9	3.9
				23.6	0.7	19.5	0.7	12.4	0.5	6.6	0.4
		開放地	1	102.9	43.9	99.9	40.9	92.9	33.9	82.9	23.9
				86.5	2.1	71.4	1.7	45.1	1.2	23.6	0.7
海上	球面回折付加 損失モデル		1	93.8	34.8	90.8	31.8	83.8	24.8	73.8	14.8
				62.2	6.6	58.3	5.6	49.5	3.9	36.6	2.3
山岳	多重回折モデル		1	52.2	-6.8	49.2	-9.8	42.2	-16.8	32.2	-26.8
				40.8	共用可	28.8	共用可	13.1	共用可	4.3	共用可

希望波 (D) 2 値 FSK 方式及び 4 値 FSK 方式は付属資料 10 に結果を記載する。

4.3 共用条件のまとめ

(1) 所要改善量の改善

現行システム及び新たな方式のシステムの共用条件を整理した。現行システムでも共用されていることを考慮すると、新たな方式が導入されてもサイトエンジニアリングにより共用可能であると考えられる。

- 山岳利用においては、植生や山などの遮へいによる妨害波の軽減を考慮すると、20W でも同一チャネルの利用が可能であると考えられる。
(多重回折損失 45dB を用いた場合であって、すべての山岳に適用されない)
- 海上利用においては、遮へい物が無いので異なるチャネルを利用することで混信を回避する必要がある。
- 平地利用においては、送受信アンテナ高を低くすることや建物による遮へいによる妨害波の軽減を考慮（サイトエンジニアリング）することで共用が可能であると考えられる。
- 表 4-4 の最小受信感度から D/U を減算した値に大きな差はないので、所要改善量と離隔距離は方式による差異は見られなかった。
- いずれも空中線電力は可能な限り必要最小電力に調整し運用することが望ましい。
特に、平地ではフィールド試験の結果のように地形が大都市か開放地によって伝搬距離が大きく異なることが確認できているので、異なるチャネルを利用する等の運用が望まれる。
- チャネル結束することで所要改善量が改善（6～9dB）される。これは、最小受信感度が高くなるからで伝搬距離も短くなることによる。尚、ラボ試験では実験周波数の関係上 LoRa 方式の下側の隣接チャネル漏えい電力の帯域で測定しているが、上側の場合は隣接チャネル漏えい電力が 10dB 悪化するので、所要改善量はさらに 10dB の改善が必要となる。
- 所要改善の方法として、指向性アンテナのメインローブ外（23dB）、空中線電力の適正化（1W から 10mW で 20dB）、送受信アンテナ高を低くする、山や建物の遮へい損失等が考えられる。

(2) キャリアセンスの検討

現状、現行のシステム間においても同一チャネルの繰返し利用は困難である場合も想定される。また、アンケートでは、予備機として保管し臨時の火山観測で利用したい需要もあることから、さらに混信を考慮して設置・運用（連絡体制）が重要となる。

将来的に、この帯域に新しい通信方式の機器が導入される場合も想定されることから、キャリアセンスを導入し、混信を回避する方法を検討した。

無線設備規則¹³を現行とし、400MHz 帯のキャリアセンスは 7 μ V（-96.1dBm）とする

¹³ 設備第 54 条第 2 号、設備・告示平 20 第 467 号を参照

と、現行システムの運用受信レベルは-80dBm（メーカーからの回答）以上であることからほぼ現行機器を検出できる。

キャリアセンスは通信方式やチャネル結束の影響を受けない利点もあり、近くに現行無線局が無い事を確認することが可能になる。

但し、キャリアセンス時間（20ms 以内）により送信時間は短縮される。

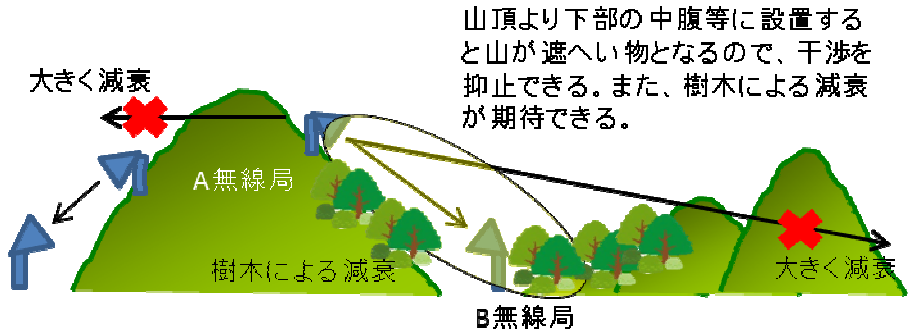


図 4-7 同一周波数の繰り返し利用例

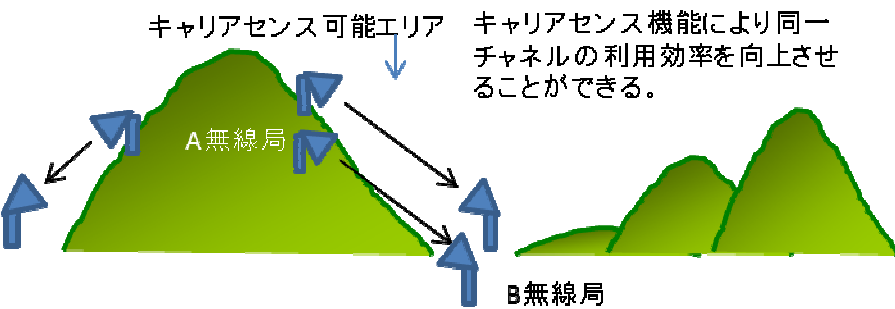


図 4-8 キャリアセンスのイメージ

表 4-11 キャリアセンスの範囲

地形	伝搬モデル		CH 結束	距離(km)				
				20W	1W	0.5W	0.1W	10mW
				同一 CH	同一 CH	同一 CH	同一 CH	同一 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	3.5	1.7	1.34	1.0	0.6
		郊外	1	5.8	2.6	2.2	1.5	0.9
		開放地	1	21.0	9.0	7.5	4.8	2.6
海上	球面回折付加 損失モデル		1	34.3	21.0	18.4	13.3	8.1
山岳	多重回折モデル		1	3.5	1.0	0.8	0.5	検出可

4.4 まとめ

平地利用、山岳利用においてはサイトエンジニアリングにより共用が可能であると考えられる。海上利用においては、遮へい物が無いので異なるチャネルを利用することで混信を回避する必要がある。さらに、同一エリアで異なる免許人も利用することがあるので、混信を考慮して設置・運用（連絡体制）が重要となる。

また、混信を回避する方法としてキャリアセンスの導入が有効である。

キャリアセンスレベルは $7\mu\text{V}$ (-96.1dBm) とした場合、現行のシステムを検出できる。通信方式やチャネル結束の影響を受けない利点もあり、近くに無線局が無い事を確認することが可能になり、混信を避けることが可能となる。

以下にサイトエンジニアリングの例を示す。

- サイトエンジニアリングとして、指向性アンテナのメインローブ外 (23dB)、空中線電力の適正化 (1W から 10mW で 20dB)、送受信アンテナ高を低くする、山や建物の遮へい損失等が考えられ、設置場所を考慮した設計が重要である。
- いずれの利用でも空中線電力は可能な限り必要最小電力に調整し運用することが望ましい。特に、平地では奥村秦モデルの地形による伝搬損失と一致しており、大都市と開放地を伝搬する場合は地形毎に伝搬距離が異なるので注意が必要である。
- チャネル結束することで所要改善量が改善 ($6\sim 9\text{dB}$) される。これは、最小受信感度が高くなるからで伝搬距離も短くなることによる。

第5章 提言

5.1 システム検討

本調査検討会で実施したヒアリング、ニーズ調査の結果及び実証試験の結果を踏まえ、400MHz 帯気象・地象観測用周波数のシステムについての検討結果を以下に示す。

5.1.1 占有周波数帯幅

20 年前と比べ、地震・火山観測データが多項目化し、ニーズ調査の結果から、求められる通信速度は、気象援助局では 9.6kbps が 85.7%であり、2.4kbps は 14.3%である。地震又は火山噴火予知観測用の移動系は 9.6kbps、固定系は 19.2kbps 以上が求められている。

最低でも 9.6kbps 以上のニーズがあることから、通信速度を得るためには、現行の「気象援助局」、及び「地震又は火山噴火予知観測用周波数」の 8.5kHz の占有周波数帯幅を拡張するチャンネルの結束が必要となる。本検討会では 4 値 FSK 方式の狭帯域化による電波の有効利用の可能性についても検討したが、前述のような伝送容量のニーズがあることから 4 値 FSK 方式の狭帯域化は行わないこととする。チャンネルの結束については、現行の「地震又は火山噴火予知観測用周波数」における固定系の 50kHz の占有周波数帯幅と同じとなる 4 チャンネル結束を基準として実証試験を実施し検討を行った。なお、本検討におけるチャンネル結束の定義については、結束数 n のチャンネル間隔を現行の 12.5kHz 間隔で割り当てられているチャンネル間隔の n 倍とし、チャンネル間隔に収まるように占有周波数帯幅を拡張できることとする。チャンネル結束時の周波数配置を図 5-1 に示す。4 チャンネルの占有周波数帯幅については、本試験で用意した LoRa 方式、2 値 FSK 方式では 41.7kHz、4 値 FSK では理論値として通常他の無線機で利用されている 1 チャンネルの占有周波数帯幅 8.5kHz の 4 倍に当たる 34kHz 程度となる。以上のことから 4 チャンネル結束における占有周波数帯幅は 42kHz とすることが望まれる。

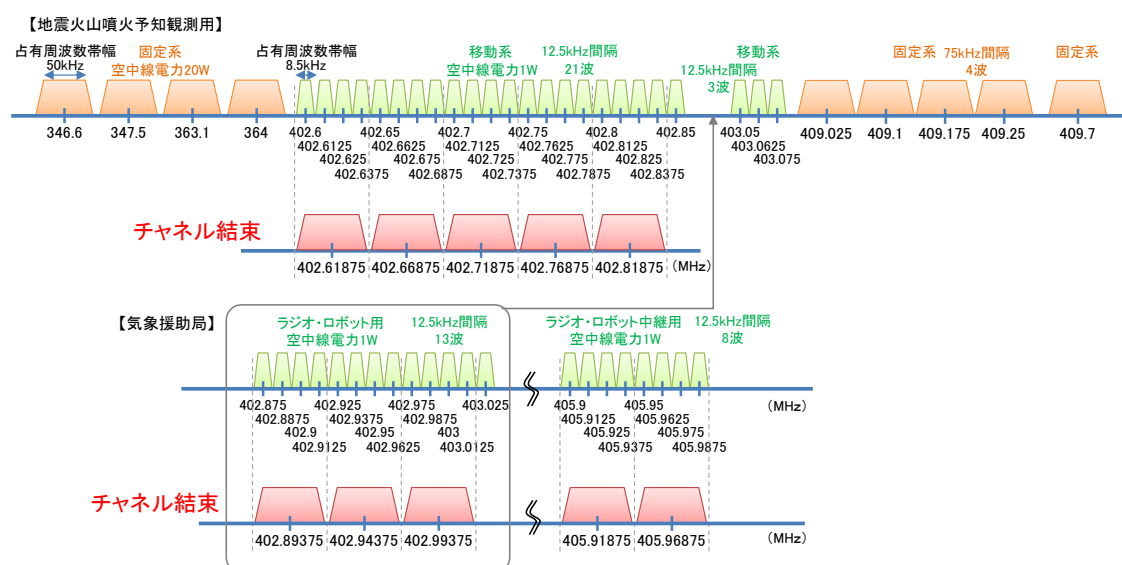


図 5-1 チャンネル結束時の周波数配置

5.1.2 電波型式

本調査検討会においては、LoRa 方式、FSK 方式の実験機を用いて実証試験を実施した。搬送波の周波数を変化させて情報を送る変調は周波数変調（Frequency Modulation）である。LoRa 方式は、図 5-2 に示すように連続した周波数を変化させており、周波数が時間と共に高くなる周波数変調（FM）がかけられている。

LoRa 方式は、伝送容量は小さいが、長距離伝送及び低消費電力に優位性があり、FSK 方式は、LoRa 方式より短距離通信ではあるが、伝送容量が大きく、リアルタイムで画像も伝送可能であると考えられる。一方で、現行の地震又は火山噴火予知観測用無線機には GMSK 方式が利用されている。端末の普及、利用の活性化を考慮すると技術的条件の提言に当たっては、今回、検討した変調方式以外の方式もあり得るが、4 チャンネル結束における技術基準の早期実現は利用活性化につながることから、今回検討に用いた LoRa 方式、FSK 方式の周波数変調方式を定めることとする。

変調信号の性質については、今後の装置製造においてアナログ信号を用いることは皆無と考えられる。よってデジタル信号のみを対象とする。副搬送波については、製造会社による特徴も考えられることから特に規定はしない。

伝送情報については、ニーズ調査などによって把握できた情報を考慮するとデータ伝送となるが、要望として静止画の伝送もあることから、映像伝送も含めて規定する。

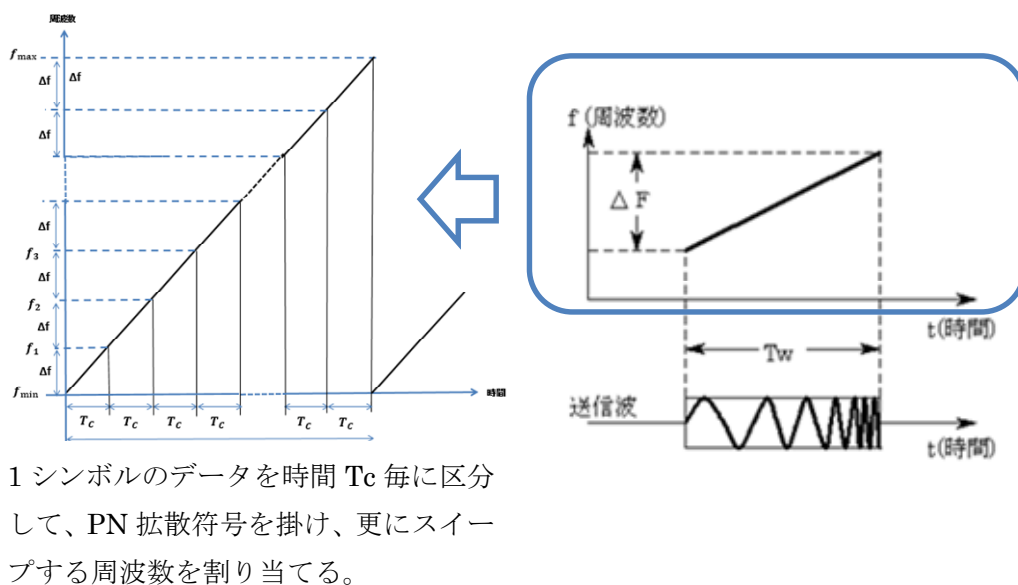


図 5-2 LoRa の送信波形

5.1.3 変調信号の送信速度

表 5-1 に各変調方式の伝送速度の理論値を示す。LoRa 方式は拡散率によって送信速度は

変わるが、拡散率 6 における 4 チャンネル結束時は 3.2kbps となる。2 値 FSK は 4 チャンネル結束時に現行の移動系（9.6kbps）より高速伝送（19.2kbps）の可能性がある。4 値 FSK は 4 チャンネル結束時の送信速度は理論上 38.4kbps となる。

現行の GMSK 方式の地象・気象用固定無線器の送信速度（57.6kbps）よりは若干伝送速度が低いが、観測データの伝送に必要な伝送容量は、必ずしも現行の固定系（最大値 57.6kbps）を必要としないものも多数あることから、4 チャンネル結束までで十分と考えられる。

表 5-1 送信速度（理論値）

結束	変調方式		
	LoRa	2 値 FSK	4 値 FSK
4CH 結束	3127.5 bps	19200 bps	38400 bps

5.1.4 空中線電力

これまでの実証試験で得られた結果とニーズ調査の要望を踏まえて、空中線電力の検討を行う。地震又は火山噴火予知観測用に必要な空中線電力を検討するための諸元は表 5-2 のとおりである。なお、一部の諸元については現行システムの諸元を引用している。

表 5-2 空中線電力の検討諸元

項目	計算諸元	備考
周波数	402.6MHz	400MHz 帯気象・地象観測用周波数のうち、今回の実験機に近い帯域を選定
送信出力	1W	移動系を参考として 1W とする
通信距離	10km～70km	現状調査を参考 移動系は 10km～30km 程度 固定系は 10km～70km
伝搬環境	海上・山岳・平地	フィールド試験と同じ
伝搬モデル	山岳（多重回折モデル） 市街地（奥村秦モデル） 海上（二波モデル、球面回折）	フィールド試験結果より使用環境毎にモデル式を選定 山岳（多重回折）、市街地（奥村秦モデル）、海上（二波モデル、球面回折）
アンテナ利得	送信：11.15dBi 受信：11.15dBi	情報通信審議会 情報通信技術分科会 小電力無線システム委員会報告書に記載の値とする
送信アンテナ標高	平地：30m 海上：110m	平地：奥村秦モデルの適用範囲の最小値とする 海上：北海道の離島で実際に使用されている 110m とする

受信アンテナ 標高	3m	山岳の場合は送信アンテナの標高と同じとする。
山岳回折 損失	45dB	阿蘇山環境における一つの事例を参考として回折損失値を選定
受信感度	LoRa : -118dBm 2 値 FSK : -106dBm 4 値 FSK : -105dBm	フィールド試験の結果より、ラボ試験で得られた受信感度+10dB
機器 マージン	6.0dB	その他の伝搬環境の変動や安全マージンを考慮 ※電波法関連審査基準 無線局の局種別審査基準 (第 4 条関係)
ケーブル 損失	送信側 : 1.3dB 受信側 : 2.3dB	情報通信審議会 情報通信技術分科会 小電力無線システム委員会報告書に記載の値とする

400MHz 帯気象・地象観測用が多く使われている山岳環境における伝搬距離と所要改善量の関係を図 5-3 に示す。所要改善量でグラフを表示したのは、計算を実施した検討諸元に対して、空中線電力、アンテナ利得や山岳回折損失などの値を変更させた時に伝搬距離を導けるようにしたためである。例えば、検討諸元に対して、送受信アンテナを 2.15dBi の無指向性に変化させた場合、送受信合わせて 18dB の減衰が見込まれる。この場合は減衰量となることから所要改善量が-18dB となり、その時の変調方式ごとの傾きとの交点が伝搬距離としてすぐに求めることが可能となる。また、所要の伝搬距離と変調方式ごとの傾きとの交点から導き出される所要改善量が 0 dB 以上となる場合には、諸元値に対して更に何かしらの対策が必要となることが判断できる。なお、他の環境における検討結果は付属資料 7 に示す。

今回の計算条件において最低受信レベルを満足する最長伝搬距離は LoRa 方式 (4 チャンネル結束, SF=7) では 36.1km、2 値 FSK 方式 (1 チャンネル) では 9.1km、4 値 FSK 方式 (1 チャンネル) では 8.1km となった。ニーズ調査で、離島や山間部に観測場所が点在するため 25km 以上の通信距離を望む意見、要望が多いことが判明しており、LoRa 方式では所要改善量が 0dB 以下であることから空中線電力は 1W 以上としなくても条件によって通信が可能と考えられる。また、FSK 方式においては、約 10dB の所要改善量が必要となる。空中線電力を 10dB 上げることで対応は可能となるが、実際の山岳環境における利用を考慮すると、回折損失が 45dB もあるような厳しい場所では無く、回折損失がもっと小さくなるような良好な伝搬環境での設置になることから、1W の空中線電力でも問題ないと考えられる。

通信距離を伸ばすためには空中線電力を上げることで対応も可能であるが、同一周波数帯の他の利用者との共用 (離隔距離) が困難となる。また、搭載可能なバッテリーの容量や太陽光発電による電力は限られていることから、無制限に空中線電力を上げたとしても、使用可能な時間が短くなることから、空中線電力は現行と同じ程度であることが望まれる。

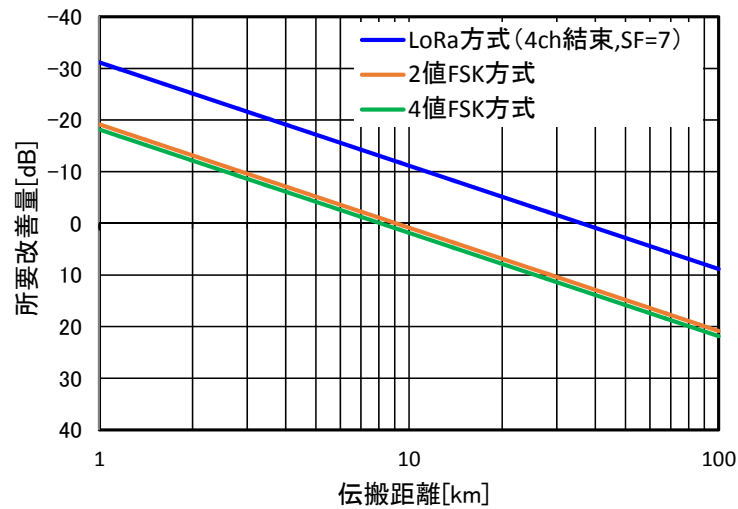


図 5-3 伝搬距離と所要改善量の検討結果

5.1.5 周波数と局種について

400MHz 帯気象・地象観測用周波数に割り当てられている周波数を表 5-3 に示す。ニーズ調査を満足するような伝送速度を得るためには、占有周波数帯幅を広げるチャンネル結束が必要となる。チャンネル結束すると地震又は火山噴火予知観測用周波数の割当てチャンネル数が減少することにより、必要なチャンネルを多く利用するため、地震又は火山噴火予知観測用の固定系（50kHz 帯幅）においても移動系として使用できるようにするために局種を固定／移動に変更することを提言する。ただし、混信を避けるために、現在の固定系に割り当てられている周波数帯で移動系として利用する場合においても、空中線電力は現行と同じ 1W までとする。

表 5-3 400MHz 帯気象・地象観測用周波数

地震又は火山噴火予知観測用		気象援助局 (ラジオロボット用)
移動系	固定系	
402.6～402.85MHz (12.5kHz 間隔・21 波)	346.6MHz/347.5/363.1/ 364MHz/409.7MHz	402.875 ～403.025MHz (12.5kHz 間隔・13 波)
403.05～403.075MHz (12.5kHz 間隔・3 波)	409.025～409.25 MHz (75kHz 間隔・4 波)	405.9 ～ 405.9875MHz (12.5kHz 間隔・8 波)

5.1.6 スプリアス

現実的なスプリアスの値として、一般的な無線設備に適用される、無線設備規則に規定されている値を上限とすることが考えられる。

5.1.7 キャリアセンス

周波数共用のための有効な手段の一つとして、無線装置にキャリアセンス機能が用いられる。ただし、キャリアセンスを設けることにより伝送速度は低下する。特に LoRa 方式においては、もともとの伝送速度が低速であることから、多量のデータ量を送ろうとした場合には該当チャネルの占有時間が長くなり、近隣に設置されている他の LoRa 端末の送信待ち時間も長くなってしまう。

400MHz 帯気象・地象観測用周波数については免許局であり、現行においては利用者間での調整が可能である。新たなシステムを導入しても利用者間での調整は可能であることとリアルタイム伝送のニーズが高いため、伝送速度のニーズまた、機能追加によるコスト増につながることから端末の低廉化のニーズを考慮してキャリアセンスを設けないことが望まれる。

5.1.8 周波数の許容偏差

周波数の許容偏差については表 5-4 に示す。無線設備規則の第 5 条の別表第 1 号に定め(昭 36 郵令 16・全改)を参考とする。固定系及び移動系については現行のままとする。ただし、移動系についてはチャネル結束を行うことよりチャネル間隔によって許容偏差が異なる。

表 5-4 周波数の許容偏差

無線局	許容偏差	備考
固定系	$\pm 3 \times 10^{-6}$	別表第 1 号 追加 6 100MHz を超え 470MHz 以下 1 固定局 (1) 335.4MHz を超え 470MHz 以下のもの ア 1W を超えるもの
移動系 チャネル間隔が 12.5kHz のもの	$\pm 3 \times 10^{-6}$	別表第 1 号 6 100MHz を超え 470MHz 以下 3 移動局 (3) その他の移動局 (注 44) 3 335.4MHz を超え 470MHz 以下 陸上移動局又は携帯局であって、平均電力が 1W 以下のもの
移動系 (上記以外)	$\pm 4 \times 10^{-6}$	別表第 1 号 6 100MHz を超え 470MHz 以下 3 移動局 (3) その他の移動局 エ 335.4MHz を超え 470MHz 以下のもの (ア) 1W 以下のもの

5.1.9 隣接チャネル漏えい電力

ラボ試験より隣接チャネル漏えい電力は、4CH 結束の場合には、LoRa 方式では 37.5dBc、2 値 FSK 方式では 39.3dBc であった。この結果を基にした共用検討では、気象・地象観測用の無線機が多く使われる山岳環境において、植生や山などの遮へいによる妨害波の軽減を考慮すると共用可能である結果が得られている。アンテナ設置などのサイトエンジニアによっては、所要改善量がさらに小さくなることを考慮して、無線機の機器マージンも含め、LoRa 方式および 2 値 FSK 方式の隣接チャネル漏えい電力は 30dBc が望まれる。

4 値 FSK 方式については、変調方式の性質上、占有周波数帯域を広げても隣接チャネルに生じる電力の比は同等になることから、無線設備規則 第 57 条の 3 の 2 を参考に 45dB とする。

5.1.10 受信設備

これまでに定義した電波型式を用いた 400MHz 帯気象・地象観測用周波数に関する受信設備は、電波法¹⁴に定められる受信設備の特性に該当することとなる。

表 5-5 に各変調方式における変調信号の送信速度と基準感度を示す。これらの変調方式では、送信速度は占有周波数帯幅が広がることで向上される。一般的に占有周波数帯幅が倍になると送信速度も倍となる。一方で基準感度は 3dB 悪くなる。このことはラボ試験でも同様の傾向が見られている。現在示されている毎秒 16kbit を超えた場合については、ラボ試験の結果を考慮して毎秒 32kbit までは $2.8\mu\text{V}$ 以下、毎秒 64kbit までは $4\mu\text{V}$ 以下とする。

表 5-5 基準感度

無線局	送信装置の変調信号の送信速度	基準感度
現行	4 キロビット以下の送信装置を使用するもの	$1\mu\text{V}$
	4 キロビットを超え 8 キロビット以下の送信装置を使用するもの	$1.4\mu\text{V}$
	8 キロビットを超え 16 キロビット以下の送信装置を使用するもの	$2\mu\text{V}$
LoRa 方式	3.2 キロビット	$1\mu\text{V}$
2 値 FSK 方式	19.2 キロビット	$2.8\mu\text{V}$
4 値 FSK 方式	38.4 キロビット	$4\mu\text{V}$

隣接チャネル選択度については、3.2.3 項の干渉試験の実験結果を参考とする。各変調方式において、隣接チャネルに妨害波を入れた場合の PER/BER が 1%となる D/U 値を表 5-6 に示す。本実験結果から、隣接チャネル選択度は、LoRa 方式の場合には 40dB、2 値 FSK

¹⁴ 電波法第七条第一項第二号及び第三号の審査に適用する受信設備の特性 昭 61.5.27 告示 第 395 号

方式および4値FSK方式の場合には30dBとすることが望まれる。また、この結果を基にした共用検討では、気象・地象観測用の無線機が多く使われる山岳環境において、共用可能となる結果が得られている。

表 5-6 D/U 値

組合せ			希望波		
			LoRa 方式(SF7)	2 値 FSK 方式	4 値 FSK 方式
妨害波	LoRa 方式(SF7)	1CH	-51 dB	—	—
		4CH 結束	-46 dB	—	—
	LoRa 方式(SF8)	1CH	-60 dB	-42 dB	-34 dB
		4CH 結束	-52 dB		
	2 値 FSK 方式	1CH	-60 dB	-31 dB	-33 dB
	4 値 FSK 方式	1CH	-65 dB	-31 dB	—

スプリアス・レスポンスおよび相互変調特性については、送信速度が変わっても65dBで示されている。このことを踏襲し、4チャンネル結束となる送信速度としても同じ値を用いる。

5.2 技術的条件

アンケート調査結果から地震火山等の観測データの伝送には、携帯電話データ回線、有線回線、無線LAN、衛星携帯電話、国交省は、国交省仕様の70/400MHz帯テレメータ(1200bps)が使用されており、このうち400MHz帯気象・地象観測用周波数帯の利用が進んでいないことが明らかになった。またニーズ調査結果を踏まえ、実証試験及び共用検討の結果をもとに、気象・地象観測用周波数の活性化のため、より大容量、より低消費電力、より遠距離伝送が可能な無線システムの導入を提言する。

400MHz帯気象・地象観測用無線局の技術的条件について次のとおり整理する。

5.2.1 一般条件

(1) 通信方式

単向通信方式、単信方式及び同報通信方式とする。

(2) 電波型式

電波型式は、F1D、F1Fとする。

(3) 使用周波数帯

現行と同じとする。(表 5-3 参照)

5.2.2 送信設備

(1) 空中線電力

現行と同じとする。固定系 20W 以下、移動系 1W 以下とする。

(2) 空中線電力の許容偏差¹⁵

空中線電力の許容偏差（指定又は定格空中線電力からの許容することができる最大の偏差をいう。）は、上限 20%、下限 50%とすること。

(3) 周波数の許容偏差¹⁶

現行と同じとする。周波数の許容偏差（発射によって占有する周波数帯の中央の周波数の割当周波数からの許容することができる最大の偏差をいう。）は、固定系 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 、移動系においてチャンネル間隔が 12.5kHz のもの $\pm 3 \times 10^{-6}$ 、それ以外のもの $\pm 4 \times 10^{-6}$ 、とすること。

(4) 変調方式

変調方式は 5.2.1 (2)に規定する電波型式に適合する変調方式であること。

(5) 周波数偏移

周波数偏移は規定しない。

(6) 変調信号の送信速度

本調査検討会にて得られた送信速度を規定する。表 5-7 に示す。

表 5-7 送信速度

結 束	変調方式		
	LoRa	2 値 FSK	4 値 FSK
4CH 結 束	3127.5 bps	19200 bps	38400 bps

(7) 占有周波数帯幅の許容値

占有周波数帯幅の許容値は、送信速度に応じて、次のとおりとする。なお、4 チャネルを結 束する場合においては、無線設備規則に該当する項目がないことから、これまでの告示（平成 9 年郵政省告示第 108 号）と同様に規定することとする。その際、電波型式、周波数、伝送速度毎に設けることとする。表 5-8 に示す。

¹⁵ 無線設備規則 第 14 条

¹⁶ 無線設備規則 第 5 条

表 5-8 占有周波数帯幅の許容値

無線局	占有周波数帯幅の許容値
F1D 電波を使用し、400MHz 帯気象・地象観測用周波数であって、帯域拡散を行う送信装置（LoRa 方式）を使用するもの	42kHz
F1D 電波を使用し、400MHz 帯気象・地象観測用周波数であって、変調信号の送信速度が毎秒 16 キロビットを超え 32 キロビット以下の送信装置を使用するもの	同 上
F1D 電波、F1F 電波を使用し、400MHz 帯気象・地象観測用周波数であって、変調信号の送信速度が毎秒 32 キロビットを超え 64 キロビット以下の送信装置を使用するもの	同 上

(8) チャネル間隔

(4 値デジタル変調の場合)

時分割多重方式における一の搬送波あたりに多重する数が 4(ただし、時分割複信方式の場合は 2 とする。)の場合、又は時分割多元接続方式の一の搬送波当たりのチャネルの数が 4(ただし、時分割複信方式の場合は 2 とする。)の場合にあつては、50kHz であること。

(9) スプリアス発射又は不要発射の強度の許容値¹⁷

(ア) 帯域外領域におけるスプリアス発射の強度の許容値

帯域外領域におけるスプリアス発射の強度の許容値は固定系 2.5 μ W 以下、移動系 25 μ W 以下とすること。

(イ) スプリアス領域における不要発射の強度の許容値

スプリアス領域における不要発射の強度の許容値は 25 μ W 以下とすること。

(10) 隣接チャネル漏えい電力

LoRa 方式の場合は、次の値であること。

¹⁷ 無線設備規則 第 7 条

搬送波の周波数から 50kHz 離れた周波数の±21kHz の帯域内に輻射される電力が、搬送波電力より 30dB 以上低いものとする。

2 値 FSK 方式の場合は、次の値であること。

搬送波の周波数から 50kHz 離れた周波数の±21kHz の帯域内に輻射される電力が、搬送波電力より 30dB 以上低いものとする。

※実測結果から（付属資料 6 参照）

4 値デジタル変調の場合は、次の値であること。¹⁸

(ア) チャネル間隔が 50kHz のものにあつては、搬送波の周波数から 50kHz 離れた周波数の(±)R(R は、2kHz とする。以下同じ。)の帯域内に輻射される電力が、搬送波電力より 55dB 以上低い値又は $32\mu\text{W}$ 以下の値であること。ただし、1W 以下の無線局の場合は 45dB 以上低い値であること。

5.2.3 受信設備

(1) 受信設備の特性

受信設備の基準感度、実効選択度におけるスプリアス・レスポンス、隣接チャネル選択度、相互変調特性は以下のとおり規定することとする。

※電波法第 7 条第 1 項第 2 号及び第 3 号の審査に適用する受信設備の特性
(昭和 61 年 5 月 27 日郵政省告示第 395 号第 17 項)

LoRa 方式の場合において、送信装置の変調信号の送信速度が毎秒 4 キロビット以下であるもの。表 5-9 に示す。

表 5-9 受信設備の特性（毎秒 4 キロビット以下）

項目		特性
感度		1pV 以下
実効選択度	スプリアス・レスポンス	65dB 以下
	隣接チャネル選択度	40dB 以下
	相互変調特性	65dB 以下

2 値 FSK 方式の場合において、送信装置の変調信号の送信速度が毎秒 16 キロビットを超え 32 キロビット以下であるもの。表 5-10 に示す。

¹⁸ 無線設備規則 第 57 条の 3 の 2

表 5-10 受信設備の特性（毎秒 16 キロビット以下）

項目		特性
感度		2.8 μ V 以下
実効選択度	スプリアス・レスポンス	65dB 以下
	隣接チャネル選択度	30dB 以下
	相互変調特性	65dB 以下

4 値 FSK 方式の場合において、送信装置の変調信号の送信速度が毎秒 32 キロビットを超え 64 キロビット以下であるもの。表 5-11 に示す。

表 5-11 受信設備の特性（毎秒 64 キロビット以下）

項目		特性
感度		4 μ V 以下
実効選択度	スプリアス・レスポンス	65dB 以下
	隣接チャネル選択度	30dB 以下
	相互変調特性	65dB 以下

（2）局部発振器の周波数変動

局部発振器の周波数変動は、周波数の許容偏差と同様とすること。

（3）副次的に発する電波等の限度¹⁹

副次的に発する電波等の限度は、4nW 以下であること。

5.2.4 制御装置

（1）送信時間制御装置

送信時間制御装置の備付けを要しないこと。

（2）キャリアセンス

利用者間での調整は可能であることとリアルタイム伝送のニーズが高いため、伝送速度のニーズまた、機能追加によるコスト増につながることから端末の低廉化のニーズを考慮してキャリアセンスを設けないことが望ましい。

（3）回線接続手順

特に規定しないこと。

¹⁹ 無線設備規則 第 24 条

5.2.5 その他

(1) 空中線の構造

空中線の構造は特に規定しないものとする。

(2) 空中線の利得

通信距離を長くするためには高い指向性と利得の空中線が望まれるが、指向方向によっては、他の利用者との共用が困難となる。通常市販されている八木アンテナの性能が一般的な空中線利得と考えられる。

(3) 附属装置とのインターフェース

附属装置とのインターフェースについては規定しない。

(4) 測定方法

技術的条件に対する適合性を評価するための測定方法は、現在国内で適用されている 4 値 FSK 方式のデジタル簡易無線の測定法を参考にすること。

5.3 実用化・普及に向けて

本調査検討会で検討した LoRa 方式、2 値 FSK 方式及び 4 値 FSK 方式の 4 チャンネル結束を用いるだけで、地象・気象観測の課題・問題点を全てが解決するものではない。チャンネル結束により、現状より大容量伝送、長距離伝送が可能なシステムの提案となる。

5.3.1 低廉化

普及に向けては、装置の低廉化が重要となる。アンケートで、既存の地震又は火山噴火観測用の無線装置は、300 万円程度と高価であり、また、ニーズ調査で、火口等に設置し、災害で破損しても惜しくない程度の低廉な機器へのニーズ（50 万円以下が 50%以上）が高かったことから、新しく導入する装置の低廉化が望まれる。装置の低廉化のため、400MHz 帯気象・地象観測用周波数帯の免許人※に気象・地象観測を行う機関・団体を追記することを提言する。

装置の低廉化はメーカーの努力によるところが大きいですが、本検討における変調方式は既に他のシステムで使われている技術も存在し、技術の転用も可能と考えられる。

※電波法関係審査基準 別表 2（第 3 条）現行

無線局の目的	免許の主体及び開設の理由	通信事項
一般業務用	文部科学省の諮問機関である科学技術・学術審議会 測地学分科会の建議に基づく地震予知又は火山噴	地震又は火山 噴火予知観測

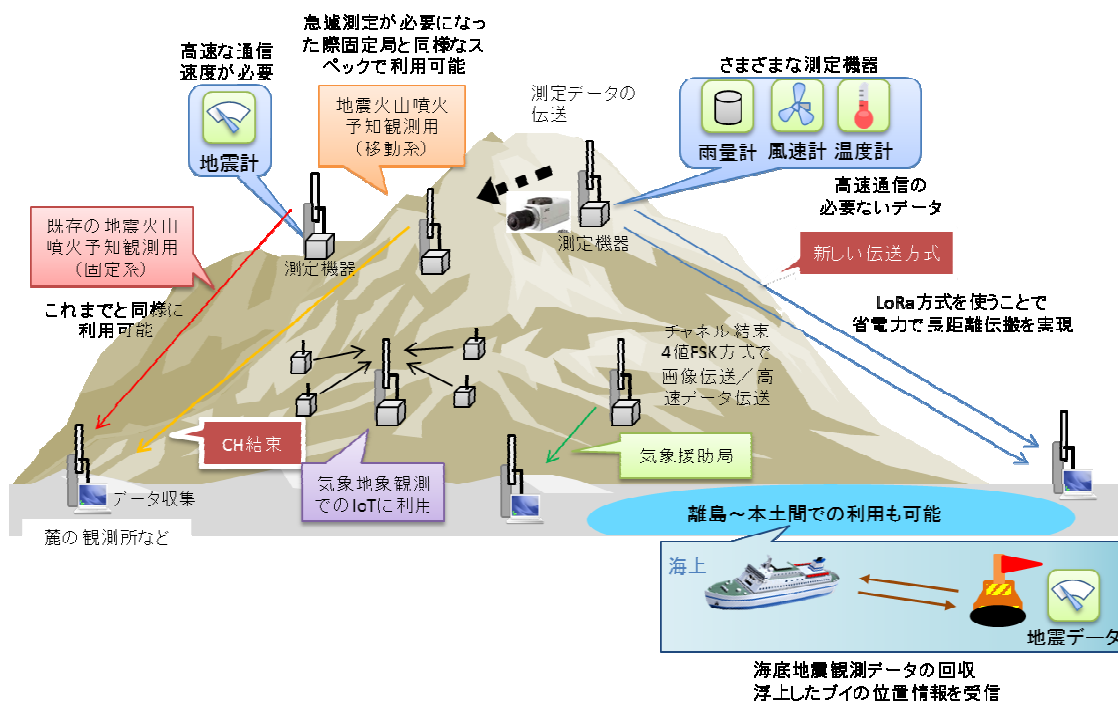
	火予知のための観測を行う機関が、地震予知又は火山噴火予知の観測に必要な通信を行うために開設するものであること。	に関する事項
--	---	--------

改正案

無線局の目的	免許の主体及び開設の理由	通信事項
一般業務用	文部科学省の諮問機関である科学技術・学術審議会測地学分科会の建議に基づく地震予知又は火山噴火予知のための観測を行う機関及びそれに準ずる気象・地象観測を行う機関・団体が、地震予知又は火山噴火予知の観測に必要な通信を行うために開設するものであること。	地震又は火山噴火予知観測に関する事項

5.3.2 利用方法

地震又は火山噴火予知観測用周波数の移動系についてはチャンネル結束を行うことにより固定系に近い伝送速度を実現することができ、陸上移動局であることから、急遽高速な測定が必要になった場合にも対応できるようになる。また、LoRa方式においては高受信感度であるため、低消費電力で長距伝搬を実現でき、気象・地象分野でのIoT的な利用も可能となる。また、海上に浮揚した地震観測データを収納した観測ブイの位置情報伝送や、そのほか高速通信を必要としない測定機器の動作状況確認等にも利用できる。これらの利用により、400MHz帯気象・地象観測用周波数の利用促進が期待される。図 5-4 に利用シーンを示す。



5.3.3 今後の検討課題

(1) 固定系周波数の有効利用

400MHz 帯気象・地象観測用周波数のうち固定系 409.025~409.25MHz は、現在 75kHz 間隔（ガードバンド 25kHz）で利用されているが、この帯域 275kHz を周波数間隔 50kHz に詰めて使用することで、4 波から 5 波の利用が可能となり、さらなる電波の有効利用が期待できる。図 5-5 に固定系周波数の有効利用イメージを示す。

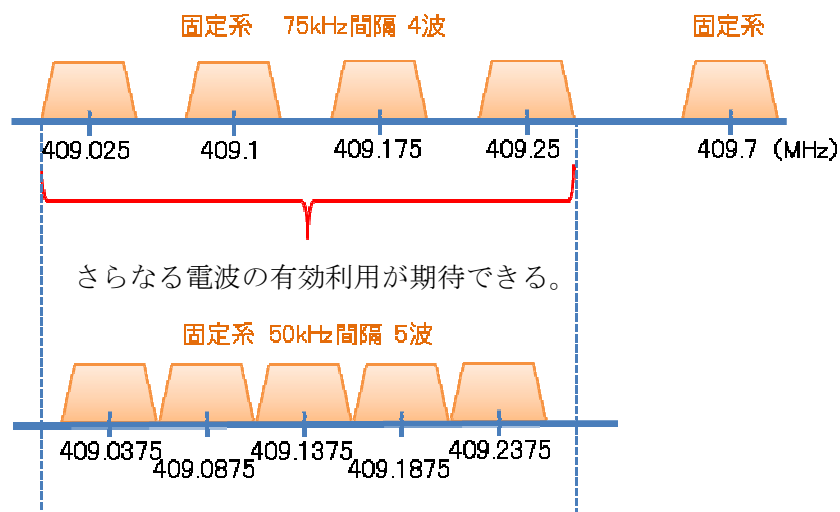


図 5-5 固定系周波数の有効利用

(2) 400MHz 帯気象・地象観測用周波数全体の有効利用

LoRa 方式で、9.6kbps 以上の伝送速度を実現したり、FSK 方式でさらな大容量伝送を実現するためには、400MHz 帯気象・地象観測用周波数全体の有効利用が望まれ、今後の更なる技術開発が期待される。

付 属 資 料

付属資料一覧

付属資料 1	.....	付 1
開催趣旨		
付属資料 2	.....	付 2
設置要綱		
付属資料 3	.....	付 4
構成員名簿		
付属資料 4	.....	付 5
開催経過		
付属資料 5	.....	付 6
アンケート・ニーズ調査結果詳細		
付属資料 6	.....	付 14
ラボ試験実施概要		
付属資料 7	.....	付 16
フィールド試験結果		
付属資料 8	.....	付 25
多重回折計算		
付属資料 9	.....	付 28
伝搬モデル式		
付属資料 10	.....	付 29
共用検討計算結果（2 値 FSK 方式／4 値 FSK 方式）		
付属資料 11	.....	付 36
相互変調干渉について		
付属資料 12	.....	付 39
用語解説		

開催趣旨

九州地方は、例年、台風の通り道となっており、また世界の活火山の 7% が日本に存在し、その内約 16% に当たる 17 の活火山が九州地方に存在し、我が国の中でも自然災害が多い地域であり、最近では阿蘇山、口永良部島、新燃岳や桜島等火山活動が活発化し、さらに昨年の平成 28 年熊本地震では我が国の観測史上、過去に例のない震度 7 が 2 回連続して発生し甚大な被害が生じた。

また、近年の気候変動化に伴い、大型化する台風やゲリラ豪雨による土砂災害や河川氾濫なども多く発生している。

こうした中、九州地方では、自然災害に対する対策が急務であり、被害の最小化のための気象・地象観測の重要性が高まっている。

現在、気象・地象に係る各種観測や種々のセンサー等における計測データの伝送手段としては、70MHz 帯及び 400MHz 帯テレメータ（固定系）、気象援助局、920MHz 帯特定小電力無線、2.4GHz 帯無線 LAN、携帯電話回線、有線回線等が、各々の特長に応じて使い分けがなされている。しかしながら、本来、気象・地象の観測データ用に周波数割当てされている 400MHz 帯の周波数を利用する気象援助局及び地震又は火山噴火予知観測用無線局については、伝送距離や消費電力等の点で利用が進んでいない。

このため、400MHz 帯の周波数を利用する気象援助局及び地震又は火山噴火予知観測用の周波数（以下、「400MHz 帯気象・地象観測用周波数」という）における新しい伝送方式について電波伝搬試験を実施し、導入に必要な技術的検討を行うことにより、これらの周波数の更なる有効利用を図り、もって防災・減災に資することを目的として本調査検討会を実施する。

平成 29 年 6 月

設置要綱

(名 称)

第1条 この調査検討会は「400MHz 帯気象・地象観測用周波数の有効利用に関する調査検討会」(以下「調査検討会」という。)と称する。

(目 的)

第2条 400MHz 帯気象・地象観測用周波数は利用が進んでいないことから、現状と課題を明らかにした上で、本周波数帯の有効利用のため、長距離伝送が可能で、低消費電力のLoRa方式等の新しい伝送方式による伝搬試験を実施し、その有効性、利用方法などについて検討を行い、導入のために必要な技術基準を提言し、周波数の有効利用を図り、もって防災・減災に資することを目的として開催する。

(調査検討事項)

第3条 調査検討会は、前条の目的を達成するために、次の事項について調査検討を行う。

- (1) 400MHz 帯気象・地象観測用周波数の利用の現状と課題に関する事
- (2) 400MHz 帯気象・地象観測用周波数の利用促進に求められるニーズに関する事
- (3) 400MHz 帯気象・地象観測用周波数での新しい伝送方式の技術的条件に関する事
- (4) 上記(2)、(3)で検討した内容を踏まえた実証試験の実施内容・方法に関する事
- (5) 400MHz 帯気象・地象観測用周波数の有効利用のための提言に関する事
- (6) その他、第2条目的の達成に必要な事項

(構 成)

第4条 調査検討会は、九州総合通信局長の委嘱を受けた別紙に掲げる構成員をもって構成する。

(組 織)

第5条 調査検討会には、座長を置く。

- 2 座長は、構成員の互選により選出する。
- 3 座長は、構成員の中から副座長を指名することができる。
- 4 座長は、必要に応じて、構成員以外の関係者の出席を求め、その意見を聴くことができる。
- 5 座長は、調査検討会の審議を促進するため作業部会を設置することができる。
- 6 調査検討会の事務局は、九州総合通信局企画調整課とする。

(運 営)

第6条 調査検討会は座長が召集し、主宰する。なお、座長が不在のときは、副座長がこれを代行する。

- 2 調査検討会を召集するときは、構成員に対しあらかじめ日時、場所及び議題を通知する。
- 3 その他、運営に関する事項は調査検討会において定める。

付属資料 2

（報 告）

第7条 座長は、調査検討会の調査検討が終了したときは、その結果を九州総合通信局長に報告する。

（開催期間）

第8条 調査検討会は、平成29年7月21日（第1回会議開催日）から前条の報告をするまでの期間とする。

（会議の公開）

第9条 調査検討会は、原則として公開とする。ただし、当事者又は第三者の権利、利益や公共の利益を害するおそれがある場合等、座長が必要と認める場合は、その全部又は一部を非公開とすることができる。

附 則

この要綱は平成29年7月21日から施行する。

構成員名簿

(五十音順 敬称略)

氏 名	団 体 名	役 職 等
松島 健 (座長)	国立大学法人九州大学	大学院 理学研究院附属地震火山観測 研究センター 准教授
足立 幸夫	福岡管区気象台	地域火山監視・警報センター 火山調査官
伊形 仁宏	一般社団法人電波産業会	研究開発本部 次長
浦本 拡揮	総務省九州総合通信局	無線通信部長
木村 和夫	大井電気株式会社	SE 本部 本部長付
齋藤 城太郎	セムテック・ジャパン合同会社	LoRa 担当技術課長
佐藤 峰司	白山工業株式会社	防災研究システムユニット ユニット長
澤 純平	国土交通省九州地方整備局	企画部 情報通信技術調整官
豊島 孝郎	日本無線株式会社 九州支社	ソリューションテクノロジーグループ エグゼクティブマネージャー
中里 清行	明星電気株式会社	営業統括部 九州支店長
宮本 正	熊本県 知事公室	危機管理防災課 課長
渡川 洋人	株式会社 JVC ケンウッド	無線システム事業部 国内システム開 発部 シニアマネジャー

以上 12 名

開催経過

1. 第1回会合

日時： 平成 29 年 7 月 21 日（金） 14:00～17:10

場所： 熊本合同庁舎 A 棟 10 階会議室

- 議題： ① 調査検討会の進め方及びスケジュール案
② 調査検討テーマを取り巻く現状等について
③ 調査内容の検討

2. 第2回会合

日時： 平成 29 年 9 月 25 日（月） 13:30～16:00

場所： 熊本合同庁舎 A 棟 10 階会議室

- 議題： ① 第1回検討会の議事録の確認
② 調査検討テーマを取り巻く現状等について
③ アンケート調査結果について
④ 実証試験の実施について

3. 第3回会合

日時： 平成 30 年 1 月 15 日（月） 13:30～16:00

場所： 熊本合同庁舎 A 棟 10 階会議室

- 議題： ① 第2回検討会の議事録確認
② アンケート調査結果について
③ 実証試験結果について
④ 共用検討について
⑤ 公開実験の実施について
⑥ 報告書骨子（案）について

4. セミナーと公開実験

日時： 平成 30 年 2 月 6 日（火） 13:30～16:30

場所： 阿蘇熊本空港ホテル エミナース りんどう B

- 議題： ① 講演
② 公開実験
③ 機器展示見学

5. 第4回会合

日時： 平成 30 年 2 月 22 日（木） 15:00～17:00

場所： 熊本合同庁舎 A 棟 10 階会議室

- 議題： ① 第3回検討会の議事録確認
② セミナー・公開実験の実施報告
③ 報告書（案）について

アンケート・ニーズ調査結果詳細

1. 調査項目

付表 5-1 にアンケート調査項目一覧を示す。なお、アンケート実施時においては、固定局／移動局という名称で調査を行ったが、結果内容においては、固定系／移動系に統一する。

付表 5-1 調査項目

	設問	調査項目
現状把握	1	現在気象・地象観測に使用している回線について
	2	回線／通信機器の所有数(台)と現在の運用数(台)について 所有数と運用数に差異がある場合はその理由について
	3	使用している距離（総距離）／中継段数および中継理由について
	4	通信機器の費用（購入／レンタル・リース）について
	5	現在の観測データを送るのに必要な伝送速度について
	6	観測データの種類について
	7	観測データの実際の大きさについて
	8	観測データの送信周期について
	9	通信機器の電源供給について
	10	回線を使用している場所について
	11	現在使用している回線でお困りになっている点やご要望などについて
ニーズ調査	1	費用の重要性について
	2	消費電力の重要性について
	3	伝送速度の重要性について
	4	通信品質（データ欠損）の重要性について
	5	通信距離の重要性について
	6	通信機器の大きさの重要性について
	7	その他通信機器に求められる条件について
	8	通信機器に求める条件として重要となる項目に望まれる値
	9	現在使用している回線の LoRa による代替に関する意見
	10	防災を始めとする公共業務等における LoRa の利用についての意見
その他	1	400MHz 帯気象・地象観測用周波数の今後の期待すること
	2	その他ご意見・ご要望

1.1 現状把握

本文中に記載してない設問結果を記す。

【設問 3】どの位の距離（総距離）で使用していますか。その際、中継利用している場合は、何段程度で利用されていますか。また、中継する理由について。

結果を付表 5-2 に示す。

付表 5-2 使用している距離（総距離）／中継段数および中継理由

回線種別	総距離[km]			中継 段数	中継理由
	平均	最短	最長		
有線 (一般回線/専用回線/構内回線)	141	1	2,000 _{注1}	0～1	・ネットワーク冗長性を持たせるため ・商用光回線・ADSL 回線が敷設できないため ・火山山麓の基地局でデータを集約するため
携帯電話	334	1	2,000 _{注1}	0～1	・クラウドストレージを利用してデータ収集を行うため
400MHz 帯 気象援助局	17	1	36	0～3	・見通しが取れないため ・中継点でも観測するため
400MHz 帯 地震又は火山噴火 予知観測用	25	1	70	0～1	・地形的に遮へい物があるので迂回のため ・中継点でも観測するため
70/400MHz 帯 テレメータ	33	1	180	0～4	・地形的に遮へい物があるので迂回のため
920MHz 帯特定 小電力テレメータ	7	2	15	0～1	・地形的に遮へい物があるので迂回のため
無線 LAN 装置 (2.4/5GHz 帯)	7	0.1	20	0～2	・地形・植生的に遮へい物があるので迂回のため
衛星携帯電話	1028	10	2,000 _{注1}	0	—
衛星通信回線	634	10	2,000 _{注1}	0～3	・地震データ流通網の枠組みに基づき伝送しているため
その他	21	0.01	100	0～2	・通信距離が長いため

注 1)2000km：与那国～東京

【設問 4】観測に用いている通信機器の、費用（購入／レンタル・リース）について。（通信費含まず）

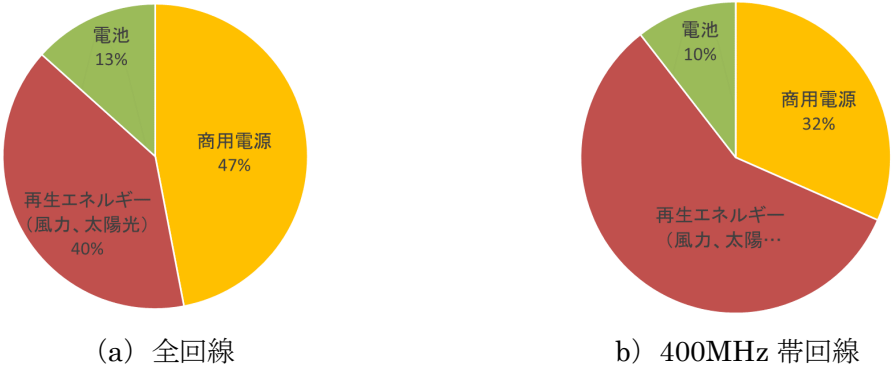
結果を付表 5-3 に示す。

付表 5-3 通信機器の費用

回線種別	平均値[万円]
有線（一般回線/専用回線/構内回線）	157
携帯電話	36
400MHz 帯気象援助局	300
400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用	262
70/400MHz 帯テレメータ	296
920MHz 帯特定小電力テレメータ	無回答
無線 LAN 装置（2.4GHz 帯/5GHz 帯）	24
衛星携帯電話	1.25
衛星通信回線	365
その他	24

【設問 9】通信機器の電源供給について。

結果を付図 5-1 に示す。



付図 5-1 通信機器の電源供給

【設問 10】現在使用している回線の使用場所（具体的）。また、特別な環境条件の下で使用している場合は、詳細をお教えいただけますか。

結果を付表 5-4 に示す。

付表 5-4 回線を使用している場所

回線種別	場所	特異な環境における対策等
有線（一般回線/専用回線/構内回線）	・各自治体、消防署、学校、公民館等の公共施設	・雷サージ対策 ・火山ガス・多湿・寒冷地・

	・火口付近（約 10km に点在）、山頂、山間、ふもと、河川、砂防堰堤付近の自営設備 ・商用電源が利用可能な場所・高感度地震観測網 Hi-net の観測点 ・定常・準定常観測点　・離島、僻地	塩害の対策
携帯電話	・砂丘上（海岸線から約 30m）、崩壊現場・街中、平野部 ・火口、山間、ふもと、砂防堰堤、島嶼部の自営設備 ・有線回線が利用不可能な地点 ・臨時観測点・定常・準定常観測点	・雷サージ対策 ・火山ガス・多湿・寒冷地・塩害の対策 ・積雪による埋設防止対策 ・ステンレス、樹脂製 BOX 等密閉筐体内
400MHz 帯気象援助局	・火口付近を含む火山体及びその周辺の自営設備	・火山ガス・多湿・寒冷地の対策
400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用	・火口近傍や山頂部・山腹部・離島の自営設備 ・商用回線、商用電源が使用不可能な地点	・火山ガスや潮風の腐食防止対策 ・寒冷（-20 度以下）、着氷・着雪、強風や落雷
70/400MHz 帯テレメータ	・県有地、市町村庁舎屋・道路沿い ・火口付近（約 10km に点在）、山間、河川、砂防堰堤付近の自営設備　・雨量・水位観測所	—
920MHz 帯特定小電力テレメータ	・火口付近、山間、ふもとの自営設備 ・FOMA 回線不可能な山中	・火山ガス・多湿・寒冷地・塩害の対策
無線 LAN 装置 (2.4GHz 帯 / 5GHz 帯)	・火口付近、山間、ふもと、公園内の自営設備 ・砂防区域（警戒区域） ・2km 未満で送受信点間の見通しが確保できる地点 ・FOMA 回線が使えない映像回線	・積雪による埋没防止・着雪防止の対策 ・雷サージ対策 ・火山ガス・塩害・多湿・寒冷地・昆虫・熊の対策
衛星携帯電話	・役所、消防署、学校などの公共	・火山ガス・塩害・多湿・

	施設 ・火口付近、山中、ふもと、離島の自営設備 ・高感度地震観測網 Hi-net の観測点	寒冷地の対策
衛星通信回線	・火口付近、中腹、ふもとの自営設備 ・昭和基地 ・離島・僻地	・雷サージ対策

【設問 11】現在使用している回線でお困りになっている点やご要望など。
結果を付表 5-5 に示す。

付表 5-5 各回線の問題点・要望

回線種別	問題点・要望
有線（一般回線/専用回線/構内回線）	・非人口密集地域へのデジタル回線が未整備なこと ・専用回線の回線使用料が高額なこと ・ISDN 回線サービスの提供終了後の代替回線について ・回線を引くため、手続きや工事等で時間がかかる。臨時の地震観測等、迅速な観測点の立ち上げには、不向き。 ・自然災害での寸断の場合、復旧は NTT 次第となり、職員の自助努力では復旧できる可能性が低い 等
携帯電話	・山頂火口原内や山腹の樹林帯などの通話エリア外地域 ・非常時（災害発生時）の安定性、優先回線利用の可否 ・山岳観測点などで尾根を一つまたぐだけで送受信できないこともあるが、人が常住する施設ではないために、増幅器などの設置が認められないことが多い ・常時接続では 1 日 1 回基地局側から切断され再接続が完了するまでデータ断となるが 1 日 1 回の切断を無くして欲しい 等
400MHz 帯気象援助局	・標準仕様書の機器では無いため、数年経つと機器が壊れた場合に修理ができない場合やシステム毎見直しする必要が出てくる
400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用	・最低帯域幅 50kHz の無線機と同等の伝送能力を持ち、加えて移動系として利用できるように法改正（帯域幅の見直し）してほしい。新規格の通信機では「固定系・移動系」という区分無しに運用できると、緊急時対応などを含め無線通信機の効率的な活用ができるため利用しやすい。 ・固定系はよいが、移動系の帯域は不足している。

	・消費電力がやや大きいため、商用電源が利用できない観測点での常時使用はやや困難 ・単向の通信が主であるためパケット落ちなどの対処がやや困難 ・アンテナの設置が大掛かりで、臨時に利用しにくい。見通しがないと通信できないため、森林地帯や建物等が障害物になってしまう。アンテナも大きいため、着雪地帯では冬季にアンテナが破損する場合がある。
400MHz 帯地震又は火山噴火予知観測用	・他の回線で NG な場合でも、400MHz なら何とかできる場合がある。局免及び送信機の管理が煩雑になりやすい。技術適合等の包括になれば助かる。 ・新スプリアス規定に改修不可の機器が多くあり、平成 34 年 11 月 30 日で使用できなくなる。その場合廃局となる。 ・双方向通信ができない。 等
70/400MHz 帯テレメータ	・受信電界が低い ・地形の関係上、中継局を多数要する ・更新費用 等
920MHz 帯特定小電力 テレメータ	・通信帯域・伝送速度に限られる ・技術適合品なので、手続き不要の手軽さが助かる。
無線 LAN 装置 (2.4GHz 帯 / 5GHz 帯)	・消費電力が大きい上、「抜群の」見通しが確保できないと通信品質が極端に低下し、データの欠落が多い。連続的なデータ取得が必要な地震や空振・地殻変動などのリアルタイムデータ伝送には致命的である。 ・回折効果が少ないため、通信状況が地形や植生に通信状況に左右されやすい。 ・アンテナへの着雪・着灰時に通信が不安定 ・電波の干渉、チャンネル数不足 等
衛星携帯電話	・回線使用料が高い、設備が大掛かり ・消費電力が大きい 等
衛星通信回線	・機材が大きい・高額 ・VSAT は消費電力が 20W 程度と大きく、安定した電力確保が必要であり、また周波数が高いため、雨などの影響を受けやすい

1.2 ニーズ把握

【設問 7】気象・地象観測の通信機器に求められる条件として、その他に何かありますか。その条件は選定条件としてどの程度重要でしょうか。

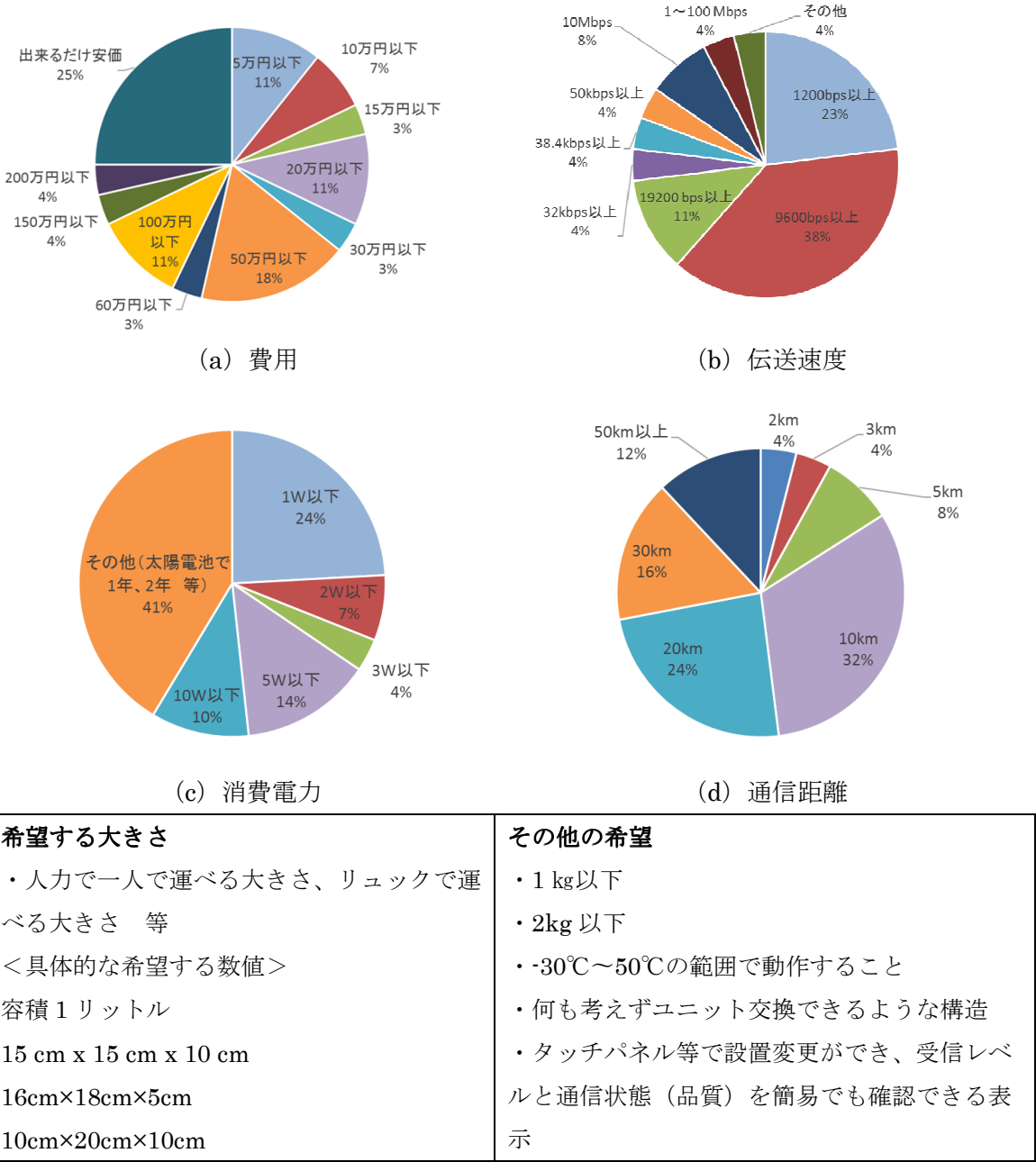
結果を付表 5-6 に示す。

付表 5-6 その他通信機器に求められる条件について

条件	備考
観測機器との インターフェイス	・イーサネット・シリアルなど観測機器にあわせて柔軟に選択できると良い。可能であれば I2C, SPI も利用可能であると便利 ・シリアル接続よりも IP 接続がうれしい ・現行の 400MHz 帯無線通信機（白山工業製，明星電気製など）は，インターフェイスがシリアルポート 1 つであるため，複数の A/D 変換装置を接続する場合には，各装置からのシリアル通信のデータを集約する必要がある。余計な装置が必要となるため故障率も上がり，消費電力も増大する。使い勝手や既存装置との相性が良ければ，インターフェイスの種類や数は問わない。 ・通信機器交換を考えるとインターフェースは汎用の物が必要
安定性・信頼性	・アクセスしづらい場所に設置されるので、ハングアップや故障がなく長期間安定して動作することが必要であるため。
アンテナ設置の容易さ・アンテナの種類の多さ	・豪雪地帯では、アンテナに雪が積もったり、強風でアンテナが曲がったりすると、通信不可となることがあるため、形状や固定方法を柔軟に選べる必要性がある
使用温度範囲・高湿度対応・耐雷性・耐久性	・過酷な環境における設置のため ・空調を備えていない環境で連続使用する必要があるため
保守費用、障害時の支援、部品の供給等、障害復旧の迅速さ	・障害時に早期復旧させる必要があるため ・15 年以上運用するため ・将来的な維持管理の品質に大きく影響するため。 ・山頂では行ける時期や対応時間が限られてしまうため
製品ライフサイクル、別の通信機器で送られてくるデータとのフォーマットの統一	—

【設問 8】 気象・地象観測の通信機器に求める条件として、重要となる項目に望まれる値の回答をお願いいたします。

結果を付図 5-2 に示す。

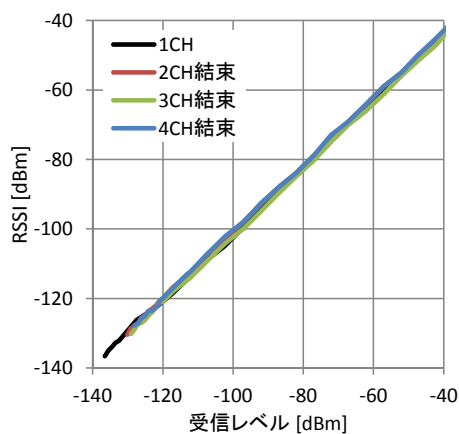


付図 5- 2 希望する具体的な数値について

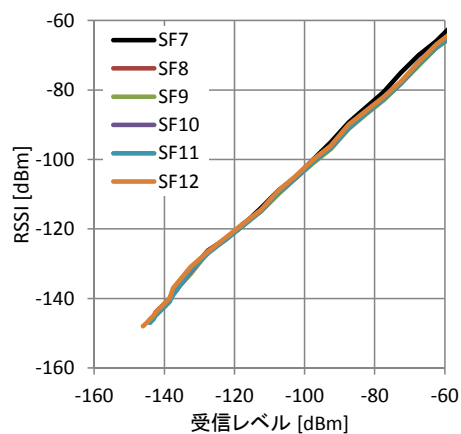
ラボ試験

1. 単体試験結果

受信レベルと RSSI の関係を付図 6-1、付図 6-2 に示す。

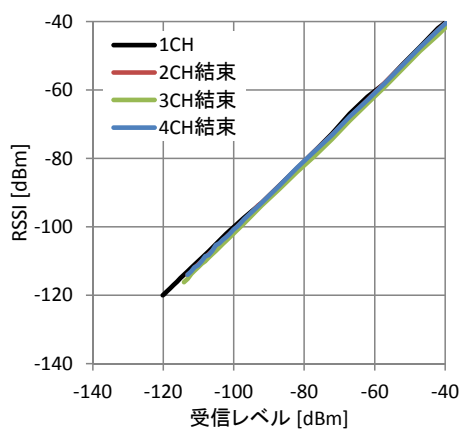


(a) 受信レベルーRSSI
(SF7)

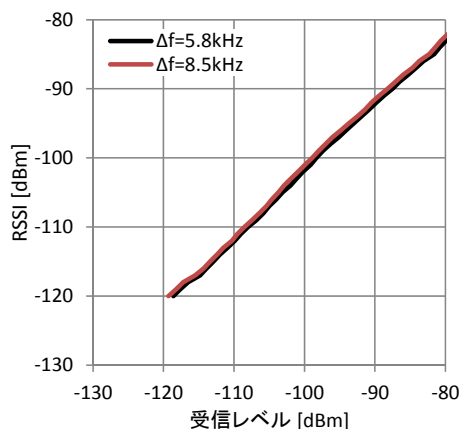


(b) 受信レベルーRSSI (1CH)

付図 6-1 単体試験結果 (LoRa 方式)



(a) 受信レベルーRSSI (2 値 FSK 方式)

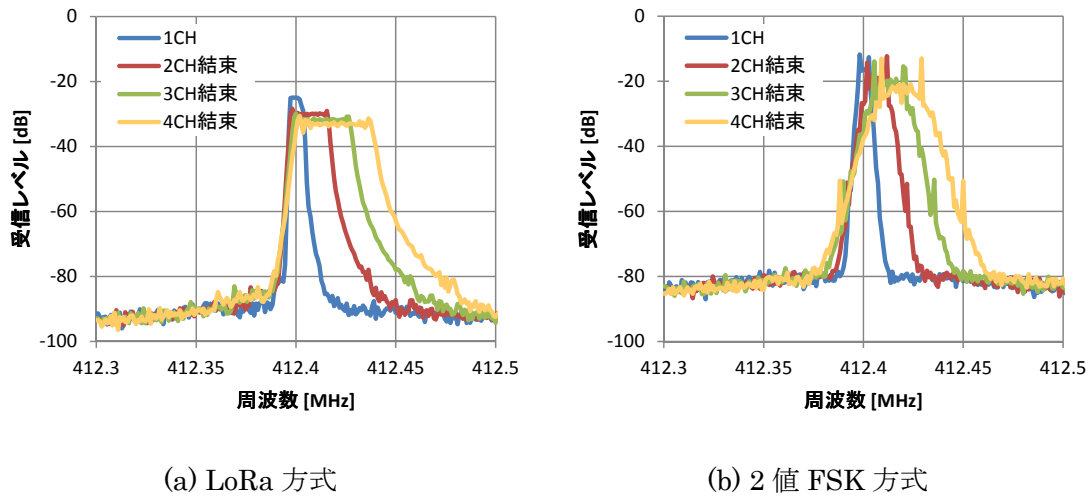


(b) 受信レベルーRSSI (4 値 FSK 方式)

付図 6-2 単体試験結果 (FSK 方式)

2. 隣接チャネルの漏えい電力

LoRa 方式および 2 値 FSK 方式の各結束時におけるスペクトラムを付図 6-3 に示す。



付図 6-3 各結束時における送信スペクトラム

上記スペクトラムから計算した LoRa 方式および 2 値 FSK 方式の各結束時における隣接チャネルの漏えい電力比を付表 6-1 に示す。LoRa 方式の 1CH と 4CH 結束においては、下側と上側周波数の漏えい電力比も示す。LoRa 方式においては、上側周波数の漏えい電力比が小さくなっており、隣接チャネル漏えい電力の技術的条件においては、本試験結果を考慮する必要があると考えられる。

付表 6-1 隣接チャネルの漏えい電力

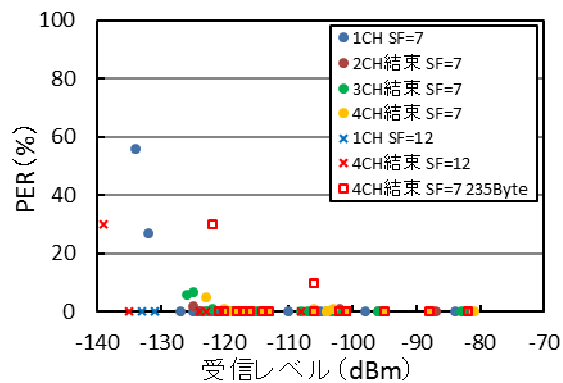
変調方式	LoRa		2 値 FSK
結束	下側漏えい電力	上側漏えい電力	下側漏えい電力
1CH	56.6 dBc	52.0 dBc	42.8 dBc
2CH 結束	45.7 dBc	39.1dBc	40.0 dBc
3CH 結束	45.4 dBc	37.6dBc	38.2 dBc
4CH 結束	47.8 dBc	37.5 dBc	39.3 dBc

フィールド試験結果詳細

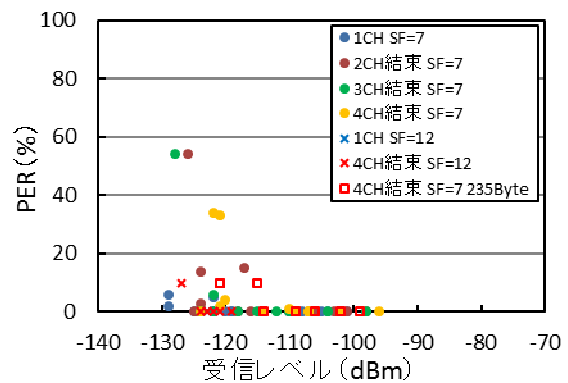
1. 定点測定結果

1.1 受信レベルと PER/BER との関係

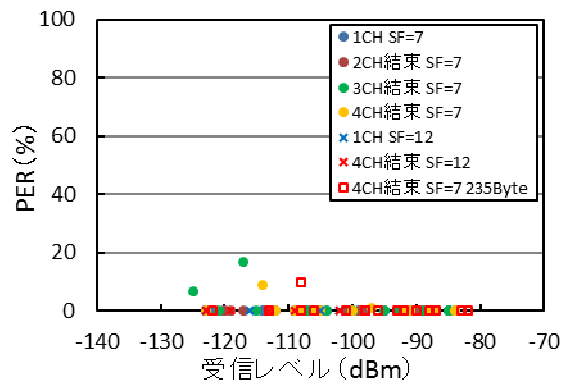
付図 7-1～付図 7-3 に受信レベルと PER/BER との関係を示す。付図 7-1 が LoRa 方式の結果、付図 7-2 が 2 値 FSK 方式の結果、付図 7-3 が 4 値 FSK 方式の結果である。これらの結果から、いずれの変調方式においても平地伝搬路の PER/BER が山岳伝搬路および海上伝搬路に比べて高い結果となった。



(a) 山岳

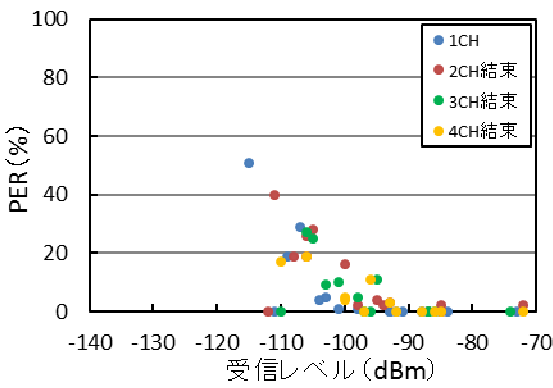


(b) 平地

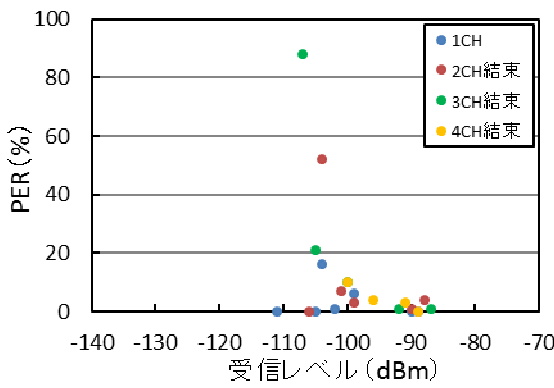


(c) 海上

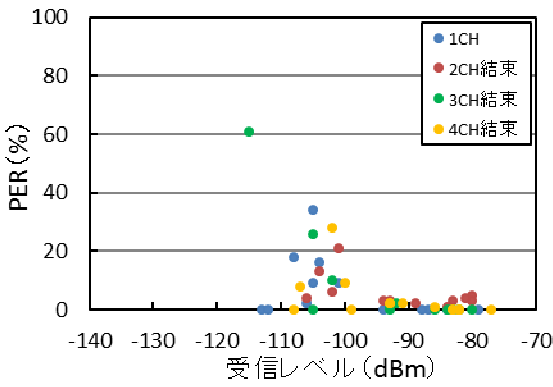
付図 7-1 受信レベルと PER との関係 (LoRa 方式)



(a) 山岳

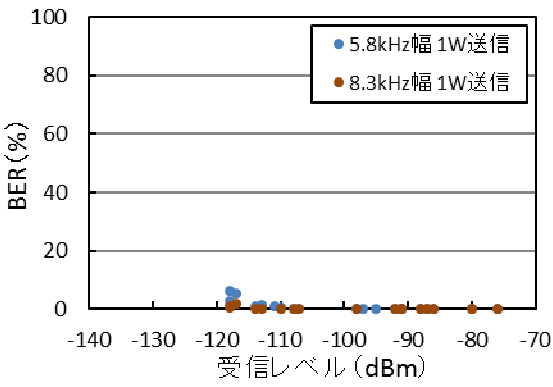


(b) 平地

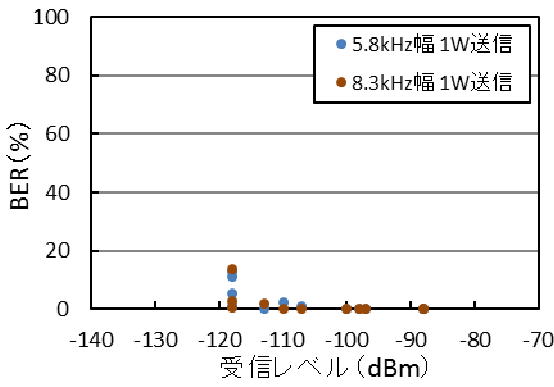


(c) 海上

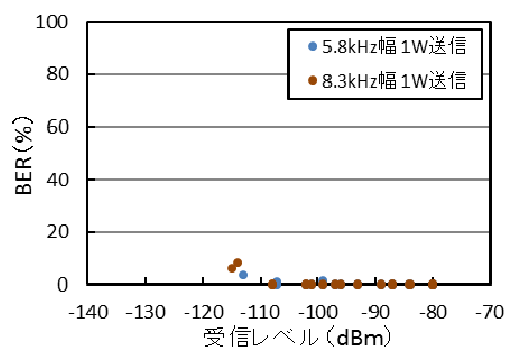
付図 7-2 受信レベルと PER との関係 (2 値 FSK 方式)



(a) 山岳



(b) 平地

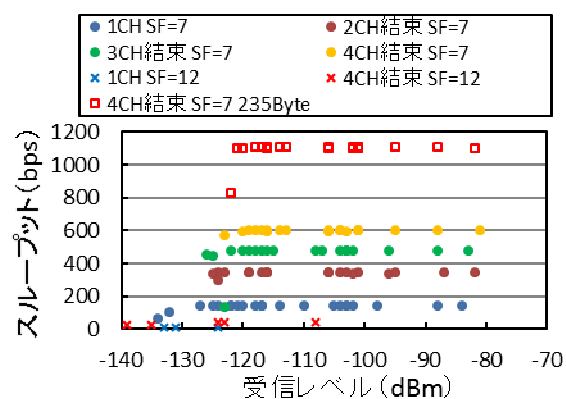


(c) 海上

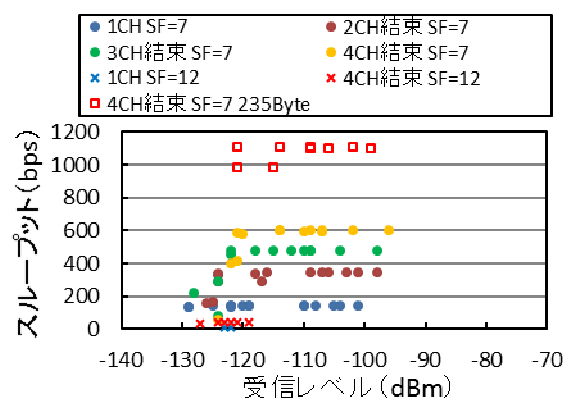
付図 7-3 受信レベルと BER との関係 (4 値 FSK 方式)

1.2 受信レベルとスループットとの関係

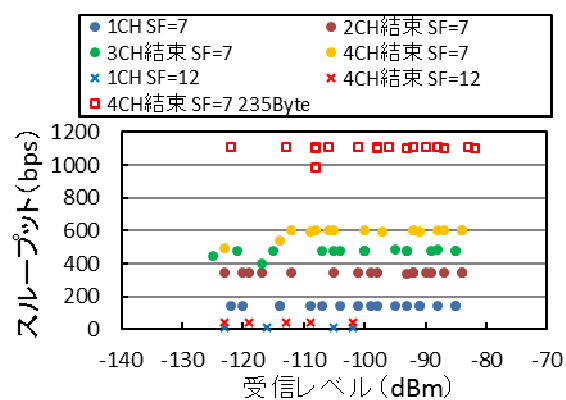
付図 7-4～付図 7-6 に受信レベルとスループットとの関係を示す。ここで付図 7-4 が LoRa 方式の結果、付図 7-5 が 2 値 FSK 方式の結果、付図 7-6 が 4 値 FSK 方式の結果である。



(a) 山岳

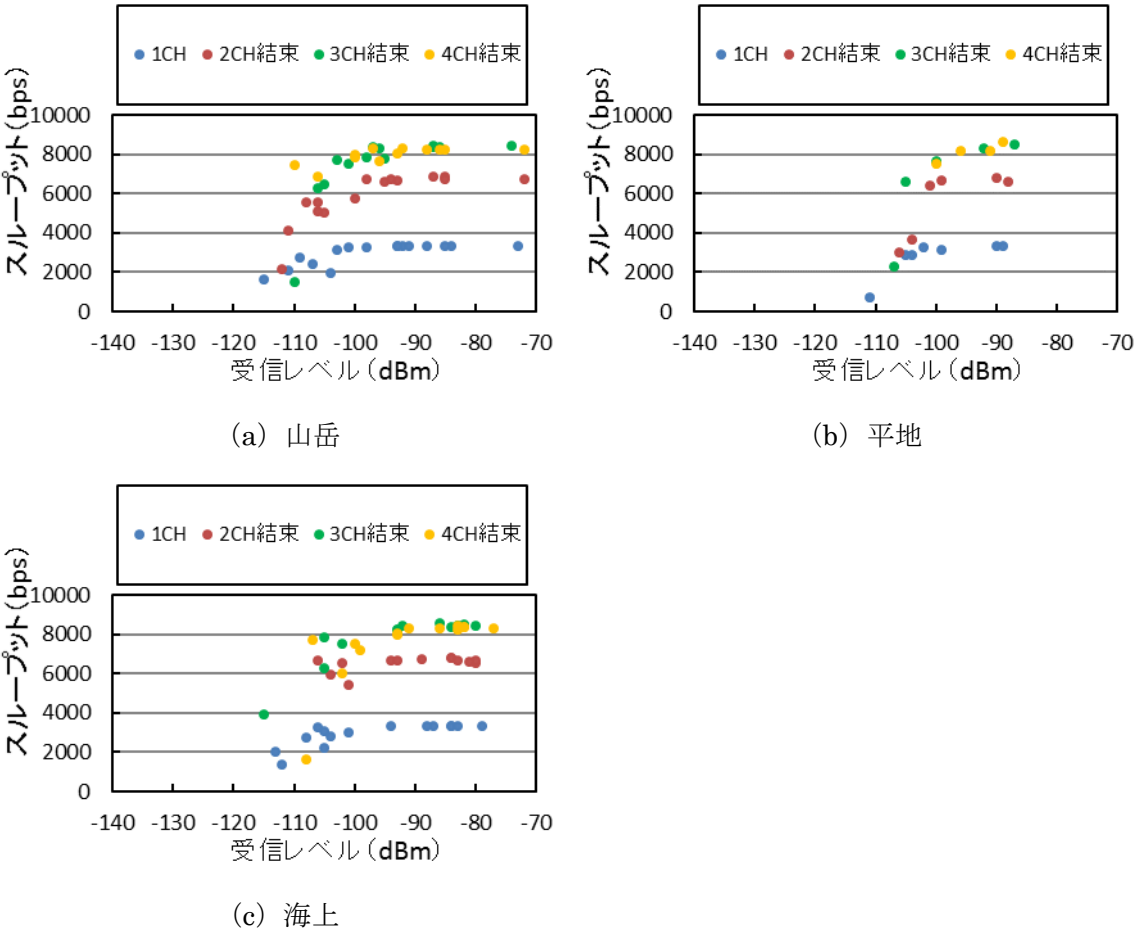


(b) 平地

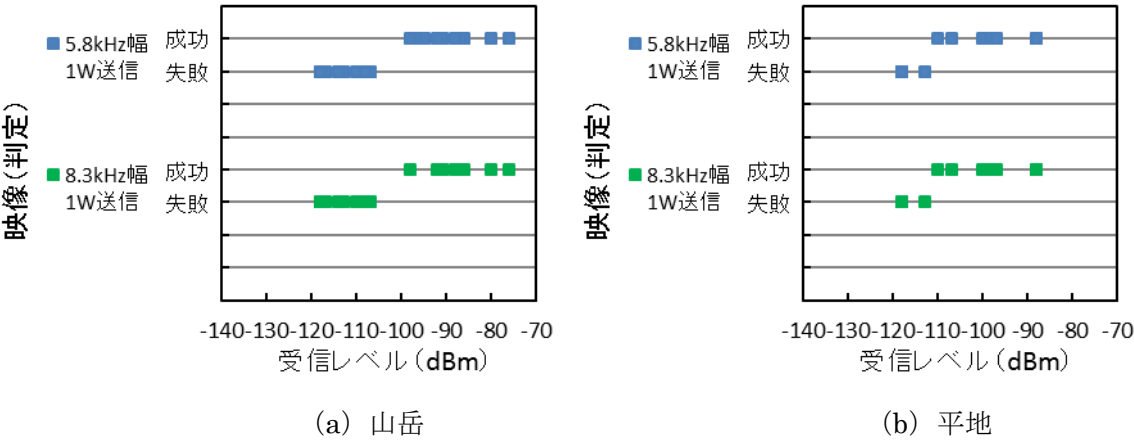


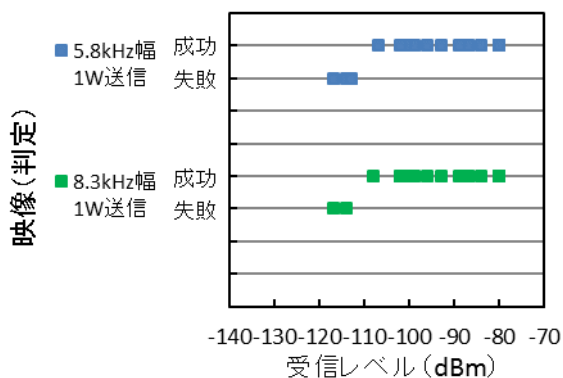
(c) 海上

付図 7-4 受信レベルとスループットとの関係 (LoRa 方式)



付図 7-5 受信レベルとスループットとの関係 (2 値 FSK 方式)





(c) 海上

付図 7-6 受信レベルとスロットとの関係 (4 値 FSK 方式)

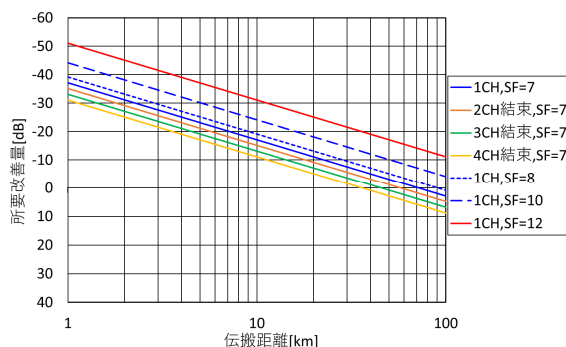
2. 伝搬距離の机上計算

ここではラボ試験およびフィールド試験で得られた結果を踏まえ、各変調方式における伝搬距離について計算した結果を示す。計算条件は 5 章参照。

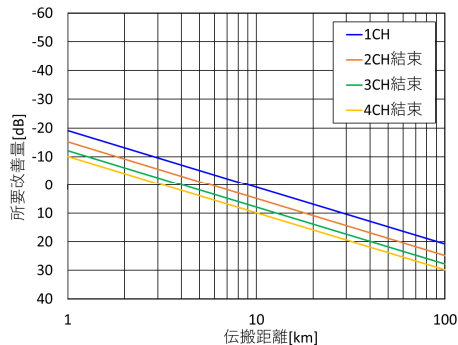
これらの図では縦軸がマイナスの領域は所要の受信感度を満足していることを表し、縦軸が 0 となる伝搬距離が今回の計算条件において到達する最長距離となる。また、縦軸がプラスの領域は送信出力を高くしたり、指向性アンテナを使用する等して改善が必要となることを意味する。

2.1 山岳伝搬路

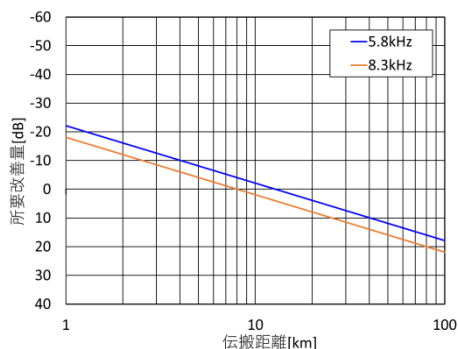
付図 7-7 に山岳伝搬路における所要改善量を示す。これらの結果から、今回の計算条件において最低受信レベルを満足する最長伝搬距離は LoRa 方式 (1CH, SF=7) が 72.1km、2 値 FSK 方式 (1CH) が 9.1km、4 値 FSK 方式 (5.8kHz) が 12.8km、現行システム(A 社) が 6.4km となった。



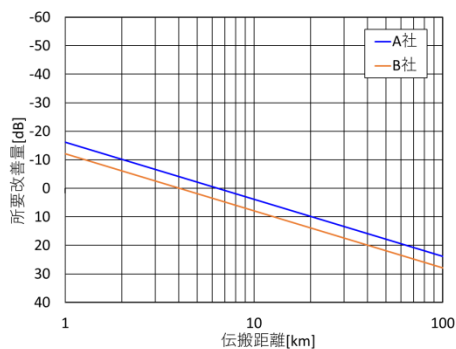
(a) LoRa 方式



(b) 2 値 FSK 方式



(c) 4 値 FSK 方式



(d) 現行システム

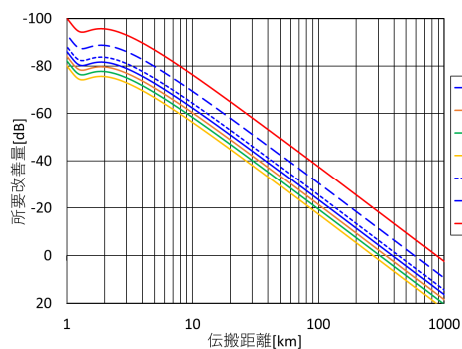
付図 7-7 所要改善量 (山岳)

2.2 海上伝搬路

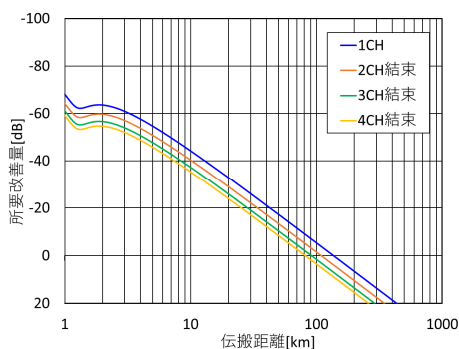
海上伝搬路では二波モデルおよび球面回折付加損失モデルを用いた。付図 7-8 に二波モデルを用いた計算結果を、付図 7-9 に球面回折を用いた計算結果を示す。

付図 7-8 より、二波モデルを用いた場合今回の計算条件において最低受信レベルを満足する最長伝搬距離は LoRa 方式 (1CH, SF=7) が 365km、2 値 FSK 方式 (1CH) が 137km、4 値 FSK 方式 (5.8kHz) が 163km、現行システム (A 社) が 115km となった。

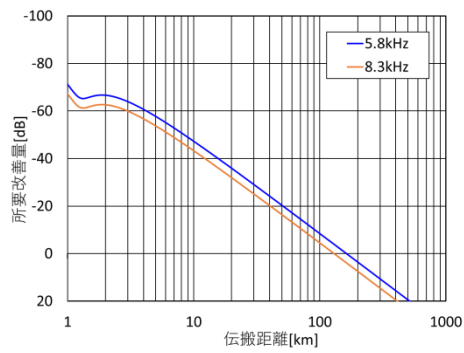
また付図 7-9 より、球面回折を用いた場合は LoRa 方式 (1CH, SF=7) が 69km、2 値 FSK 方式 (1CH) が 45km、4 値 FSK 方式 (5.8kHz) が 49km、現行システム (A 社) が 42km となった。



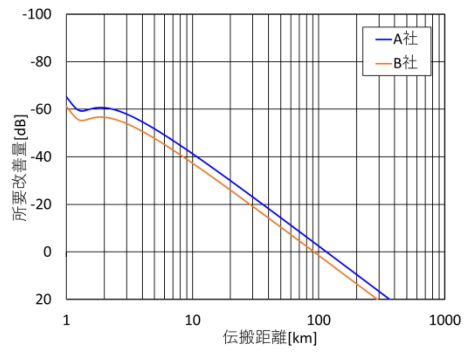
(a) LoRa 方式



(b) 2 値 FSK 方式

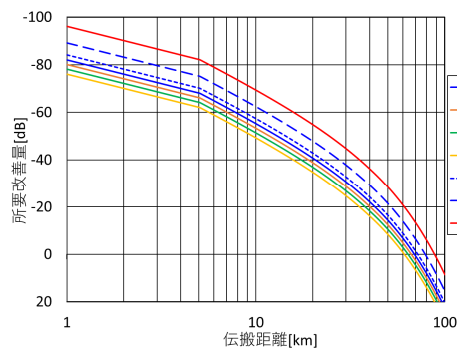


(c) 4 値 FSK 方式

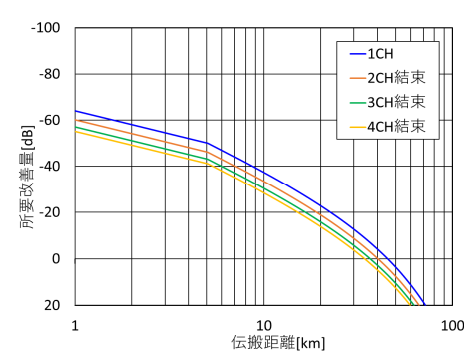


(d) 現行システム

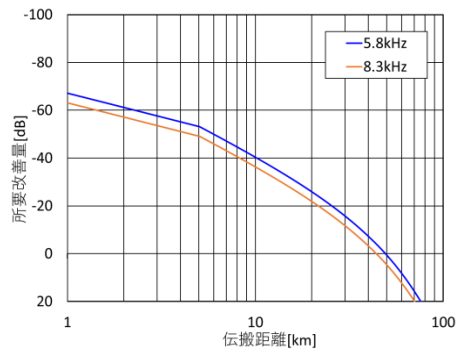
付図 7-8 所要改善量 (海上_二波モデル)



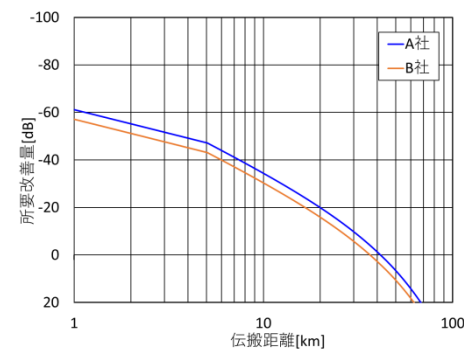
(a) LoRa 方式



(b) 2 値 FSK 方式



(c) 4 値 FSK 方式



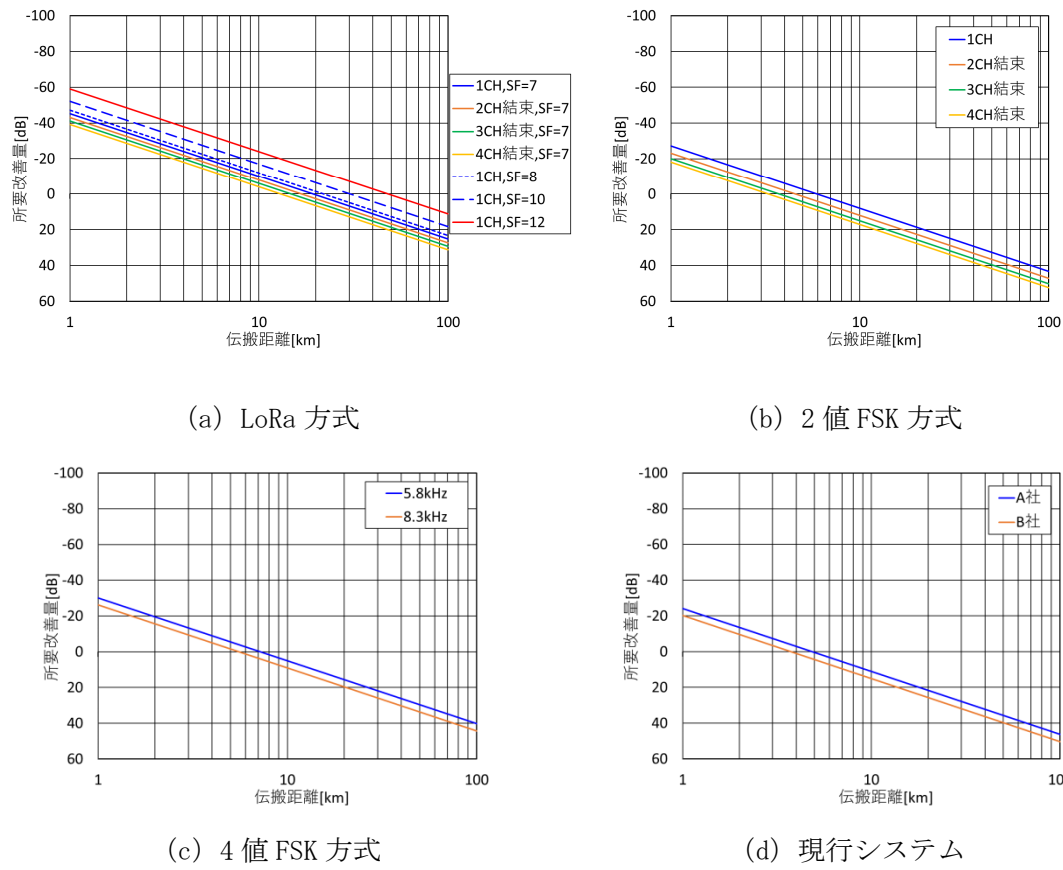
(d) 現行システム

付図 7-9 所要改善量 (海上_球面回折)

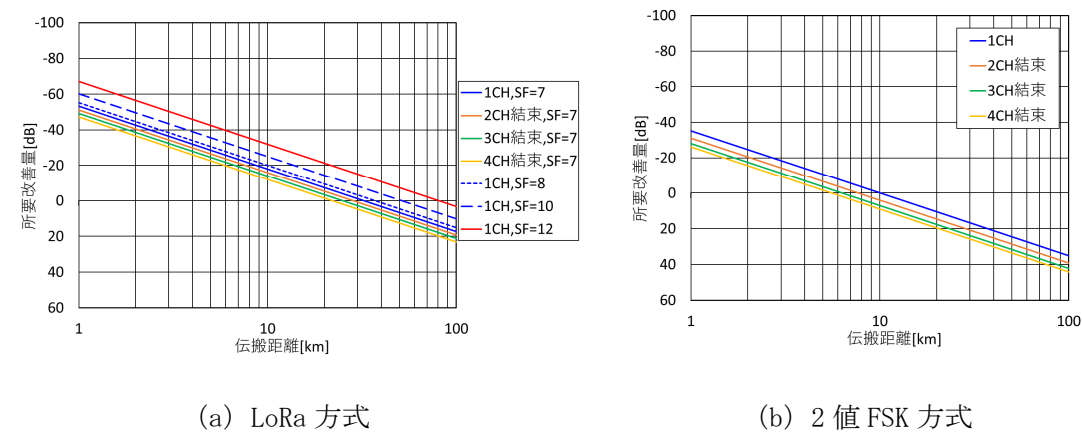
2.3 平地伝搬路

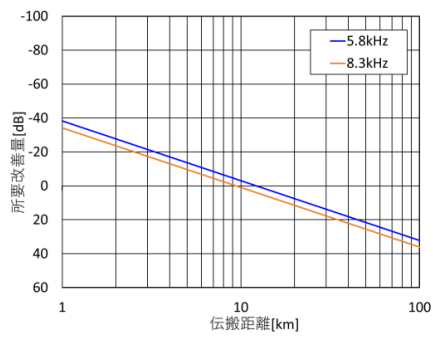
平地伝搬路では奥村泰モデルを用いた。付図 7-10～付図 7-12 に平地伝の伝搬路における計算結果を示す。ここで付図 7-10 が大都市における結果、付図 7-11 が中都市における結果、付図 7-12 が郊外における結果である。また、建物占有率は大都市を 30%、中都市を 15%、郊外を 5% とした。

これらの結果から、今回の計算条件において最低受信レベルを満足する最長伝搬距離は付表 7-1 に示すとおりとなった。

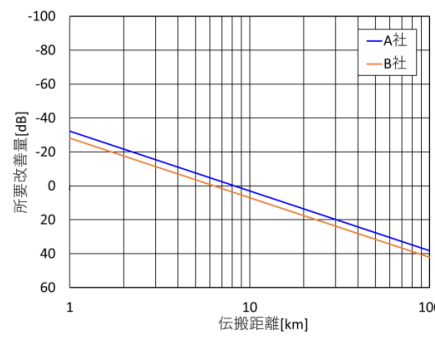


付図 7-10 所要改善量 (平地_大都市)



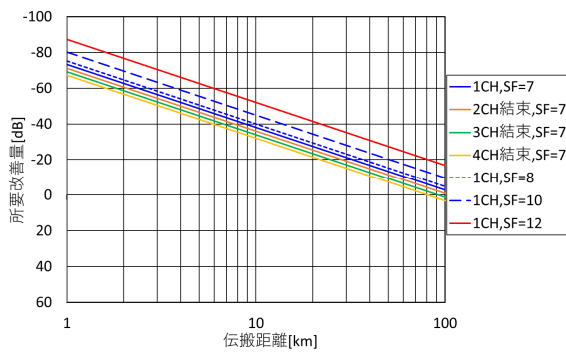


(c) 4 値 FSK 方式

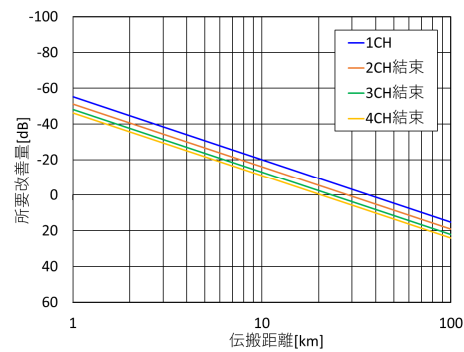


(d) 現行システム

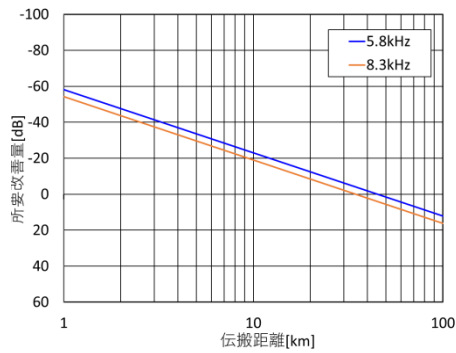
付図 7-11 所要改善量（平地_中都市）



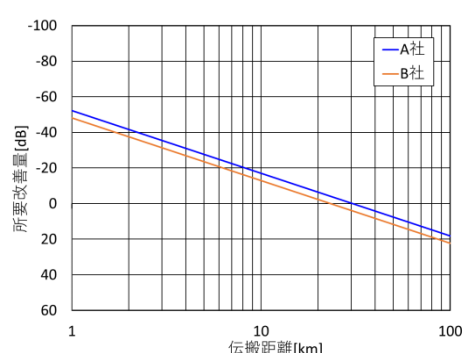
(a) LoRa 方式



(b) 2 値 FSK 方式



(c) 4 値 FSK 方式



(d) 現行システム

付図 7-12 所要改善量（平地_郊外）

付表 7-1 最低受信レベルを満足する最長伝搬距離[km]（平地）

	LoRa 方式 (1CH,SF=7)	2 値 FSK 方式 (1CH)	4 値 FSK 方式 (5.8kHz 幅)	現行システム (A 社)
大都市	19	5.9	7.2	4.8
中都市	32.5	10.0	12.2	8.2
郊外	120	37	45	31

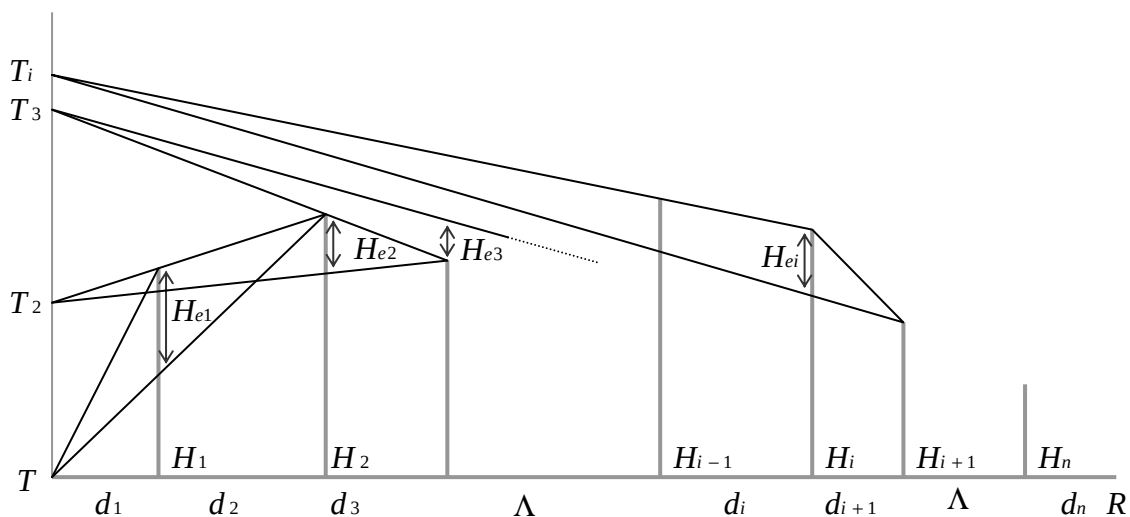
多重回折計算

多重回折計算²⁰²¹は、各リッジでの回折角から求めるため、結果的に第 2 リッジ以後のリッジによる回折損失を第 i リッジ頂点と第 $(i-1)$ リッジ頂点とを結ぶ線と送信点位置との交点を仮送信点として求める方法である。即ち付図 8-1 に示すように、仮送信点から第 i リッジを回折して第 $(i+1)$ リッジ頂点に到達する電波の回折損失を求めることとなり、仮送信点から第 $(i+1)$ リッジ頂点に直接引かれた線からの第 i リッジ高を等価回折高 He_i として回折損失を計算し、第 n リッジまでの回折損失の dB 和から回折損失を計算する。この場合、各リッジでの回折損失を規定する等価回折高 He_i は各リッジ間距離を d_i 、リッジ高を H_i として以下の式(1)で表される。

$$He_i = \frac{(d_1 + \Lambda + d_i)(d_i + d_{i+1})}{d_i(d_1 + \Lambda + d_{i+1})} \cdot \left(H_i - \frac{d_i \cdot H_{i+1} + d_{i+1} \cdot H_{i-1}}{d_i + d_{i+1}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

一方、第 i リッジの回折係数 p_i は以下の式(2)で計算できる。

$$p_i = \sqrt{\frac{2(d_1 + \Lambda + d_{i+1})}{\lambda \cdot d_{i+1}(d_1 + \Lambda + d_i)}} \cdot He_i \dots\dots\dots (2)$$



付図 8-1 電波研法による多重回折計算モデル

ここで伝搬路と周波数とで決まる各リッジの回折係数を t_i 、伝搬路におけるリッジの位置

²⁰ 電波研究所季報 Vol.3 No.11 April 1957 VHF 山岳回折波電界強度の計算法 上杉弥兵衛
²¹ 電波伝ぱん 柿田潔著 昭和 34 年 9 月発行 (社)電気通信学会発行 (株)コロナ社販売

で決まるパラメータを m_i とすれば、それぞれの値は以下に示す式(3)、(4)より求められる。

$$t_i = \sqrt{\frac{2(d_1 + \Lambda + d_{i+1})}{\lambda \cdot d_{i+1}(d_1 + \Lambda + d_i)}} \cdot H_i \dots\dots\dots (3)$$

$$m_i = \sqrt{\frac{d_{i+1}(d_1 + \Lambda + d_{i-1})}{d_i(d_1 + \Lambda + d_{i+1})}} \dots\dots\dots (4)$$

これら t_i 、 m_i パラメータを用いて式(2)を変形すれば p_i パラメータは以下の式(5)となる。

$$p_i = (1 + m_i^2)t_i - m_{i+1} \cdot t_{i+1} - m_i \cdot t_{i-1} \dots\dots\dots (5)$$

この式を基に n 重回折電界強度は各リッジ回折損失(dB)の和として計算されることを考慮して、真値表現すれば以下の式(6)で表される。ここで具体的な計算にあたっては、伝搬路条件から m_1 、 t_0 、 m_{n+1} 、 $t_{n+1}=0$ と考えてよいことを考慮する。

$$P = \frac{1}{(2\pi^2)^{n/2} \prod_{i=1}^n p_i} \dots\dots\dots (6)$$

ここでは例として三重回折の場合の計算式を、式(5)を基に導出する。第 1～第 3 リッジによる p_1 、 p_2 、 p_3 は t_0 、 t_4 、 $m_1=0$ となることを考慮し最終的に以下の式(7)で求められる。

$$\begin{aligned} p_1 &= (1 + m_1^2)t_1 - m_2 \cdot t_2 - m_1 \cdot t_0 = t_1 - m_2 \cdot t_2 = u_0 - m \cdot v_0 \\ p_2 &= (1 + m_2^2)t_2 - m_3 \cdot t_3 - m_2 \cdot t_1 = (1 + m^2)v_0 - n \cdot w_0 - m \cdot u_0 \dots\dots\dots (7) \\ p_3 &= (1 + m_3^2)t_3 - m_4 \cdot t_4 - m_3 \cdot t_2 = (1 + m^2)t_3 - m_3 \cdot t_2 = (1 + n^2)w_0 - n \cdot v_0 \end{aligned}$$

ここで三重回折各リッジ間の距離とリッジ高とを d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 H_1 、 H_2 、 H_3 とすれば、積分領域を規定する u_0 、 v_0 、 w_0 、 m 、 n の各パラメータは以下の式(8)となる。

$$\begin{aligned}
 u_0 &= \sqrt{\frac{2(d_1+d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} \cdot H_1, & v_0 &= \sqrt{\frac{2(d_1+d_2+d_3)}{\lambda \cdot (d_1+d_2) \cdot d_3}} \cdot H_2 \\
 w_0 &= \sqrt{\frac{2(d_1+d_2+d_3+d_4)}{\lambda \cdot (d_1+d_2+d_3) \cdot d_4}} \cdot H_3 & & \dots\dots\dots (8) \\
 n &= \sqrt{\frac{(d_1+d_2) \cdot d_4}{(d_1+d_2+d_3+d_4) \cdot d_3}}, & m &= \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_3}{(d_1+d_2+d_3) \cdot d_2}}
 \end{aligned}$$

これらを基に三重回折電界強度を計算すれば式(7)より以下の式(9)で表される。

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{(\sqrt{2})^3 \pi^3 p_1 p_2 p_3} \\
 &= \frac{1}{(\sqrt{2})^3 \pi^3 (1+m^2)(1+n^2)(u_0 - m \cdot v_0)[v_0 - \{(n \cdot w_0 + m \cdot u_0)/(1+m^2)\}][w_0 - \{n \cdot v_0/(1+m^2)\}]} \\
 &\dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

伝搬モデル式

(1) 奥村泰モデル

平地利用シーンで使用した。

基地局アンテナ高 30-200m、受信アンテナ高 1-10m、伝搬距離 20km を想定したモデル式。

$$L_{CH}=A+B\log(d)-a(hm)+C$$

$$A=69.55+26.16\log(f)-13.82\log(hb) \quad B=44.9-6.55\log(hb)$$

<大都市>

$$a(hm)=8.29(\log(1.54hm))^2-1.1 \quad f \leq 400\text{MHz}$$

$$a(hm)=3.2(\log(11.75hm))^2-4.97 \quad f \geq 400\text{MHz}$$

$$C=0$$

<郊外>

$$a(hm)=(1.1\log(f)-0.7)hm-(1.56\log(f)-0.8)$$

$$C=-2(\log(f/28))^2-5.4$$

<開放地>

$$a(hm)=(1.1\log(f)-0.7)hm-(1.56\log(f)-0.8)$$

$$C=-4.78(\log(f))^2+18.33\log(f)-40.94$$

(2) 球面回折付加損失モデル

海上利用シーンで利用した。海上は二波モデルに近似できるが、遠方となる離隔距離を計算する場合は地球の丸みを考慮できる式とした。

自由空間の電界強度 E_0 に対する回折波の電界強度を E とすると、

$$20\log(E/E_0) = F(X) + G(Y1) + G(Y2)$$

ここで X および Y は、それぞれ伝搬距離 $d(\text{km})$ および送受アンテナ高 $h1, 2(\text{m})$ を正規化したものである。

※電波伝搬ハンドブック（細矢良雄監修 1999 リアライズ社）より

(3) 多重回折モデル

本計算式はフィールド試験結果から多重回折損失として 45dB を付加した。多重回折損失はフィールドによって異なる。

$$L(\text{dB}) = (20\log(4\pi d/\lambda)) + 45$$

(4) 各計算式のパラメータ

λ : 波長(m) hb : 基地局アンテナ高(m) hm : 端末アンテナ高(m)

共用検討計算結果（2 値 FSK 方式/4 値 FSK 方式）

1. 共用検討結果

1.1 2 値 FSK システム（希望波）の結果

（1）希望波（D）：2 値 FSK 方式 妨害波（U）：現行システム

付表 10-1 希望波（D）：2 値 FSK 方式 妨害波（U）：現行システム

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	83.9	21.9	80.9	18.9	73.9	11.9	63.9	1.9
				25.1	0.7	20.6	0.6	13.2	0.5	7.0	0.4
			2	83.9	21.9	80.9	18.9	73.9	11.9	63.9	1.9
				25.1	0.7	20.6	0.6	13.2	0.5	7.0	0.4
			3	83.9	21.9	80.9	18.9	73.9	11.9	63.9	1.9
				25.1	0.7	20.6	0.6	13.2	0.5	7.0	0.4
			4	83.9	21.9	80.9	18.9	73.9	11.9	63.9	1.9
				25.1	0.7	20.6	0.6	13.2	0.5	7.0	0.4
		中小 都市	1	91.9	29.9	88.9	26.9	81.9	19.9	71.9	9.9
				42.3	1.0	34.6	0.8	22.1	0.6	11.6	0.4
			2	91.9	29.9	88.9	26.9	81.9	19.9	71.9	9.9
				42.3	1.0	34.6	0.8	22.1	0.6	11.6	0.4
			3	91.9	29.9	88.9	26.9	81.9	19.9	71.9	9.9
				42.3	1.0	34.6	0.8	22.1	0.6	11.6	0.4
			4	91.9	29.9	88.9	26.9	81.9	19.9	71.9	9.9
				42.3	1.0	34.6	0.8	22.1	0.6	11.6	0.4
		開放地	1	111.9	49.9	108.9	46.9	101.9	39.9	91.9	29.9
				155.8	3.0	127.3	2.5	81.2	1.7	42.3	1.0
			2	111.9	49.9	108.9	46.9	101.9	39.9	91.9	29.9
				155.8	3.0	127.3	2.5	81.2	1.7	42.3	1.0
			3	111.9	49.9	108.9	46.9	101.9	39.9	91.9	29.9
				155.8	3.0	127.3	2.5	81.2	1.7	42.3	1.0
			4	111.9	49.9	108.9	46.9	101.9	39.9	91.9	29.9
				155.8	3.0	127.3	2.5	81.2	1.7	42.3	1.0

				155.8	3.0	127.3	2.5	81.2	1.7	42.3	1.0
海上	球面回折付加 損失モデル	1		102.8	40.8	99.8	37.8	92.8	30.8	82.8	20.8
				74.7	8.9	70.1	7.6	61.1	5.3	48.1	3.1
		2		102.8	40.8	99.8	37.8	92.8	30.8	82.8	20.8
				74.7	8.9	70.1	7.6	61.1	5.3	48.1	3.1
		3		102.8	40.8	99.8	37.8	92.8	30.8	82.8	20.8
				74.7	8.9	70.1	7.6	61.1	5.3	48.1	3.1
		4		102.8	40.8	99.8	37.8	92.8	30.8	82.8	20.8
				74.7	8.9	70.1	7.6	61.1	5.3	48.1	3.1
山岳	多重回折モデル	1		61.2	-0.8	58.2	-3.8	51.2	-10.8	41.2	-20.8
				114.0	共用可	80.4	共用可	36.2	共用可	11.6	共用可
		2		61.2	-0.8	58.2	-3.8	51.2	-10.8	41.2	-20.8
				114.0	共用可	80.4	共用可	36.2	共用可	11.6	共用可
		3		61.2	-0.8	58.2	-3.8	51.2	-10.8	41.2	-20.8
				114.0	共用可	80.4	共用可	36.2	共用可	11.6	共用可
		4		61.2	-0.8	58.2	-3.8	51.2	-10.8	41.2	-20.8
				114.0	共用可	80.4	共用可	36.2	共用可	11.6	共用可

(2) 希望波 (D) : 2 値 FSK 方式 妨害波 (U) : LoRa

付表 10-2 希望波 (D) : 2 値 FSK 方式 妨害波 (U) : LoRa 方式

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	78.9	23.9	75.9	20.9	68.9	13.9	58.9	3.9
				18.1	0.7	15.0	0.7	9.5	0.5	5.1	0.4
			2	70.9	31.9	67.9	28.9	60.9	21.9	50.9	11.9
				10.8	1.1	9.0	0.9	5.7	0.7	3.1	0.5
			3	66.9	28.9	63.9	25.9	56.9	18.9	46.9	8.9
				8.4	0.9	7.0	0.8	4.5	0.6	2.5	0.4
			4	64.9	26.9	61.9	23.9	54.9	16.9	44.9	6.9
				7.4	0.8	6.1	0.7	4.0	0.6	2.2	0.4
		中小 都市	1	86.9	31.9	83.9	28.9	76.9	21.9	66.9	11.9
				30.4	1.1	25.1	0.9	16.0	0.7	8.4	0.5
			2	78.9	39.9	75.9	36.9	68.9	29.9	58.9	19.9

				18.3	1.7	15.0	1.4	9.6	1.0	5.1	0.6
			3	74.9	36.9	71.9	33.9	64.9	26.9	54.9	16.9
				14.1	1.4	11.6	1.2	7.4	0.8	4.0	0.6
			4	72.9	34.9	69.9	31.9	62.9	24.9	52.9	14.9
				12.4	1.3	10.2	1.1	6.6	0.8	3.5	0.5
		開放地	1	106.9	51.9	103.9	48.9	96.9	41.9	86.9	31.9
				111.9	3.3	92.3	2.8	58.3	1.8	30.4	1.1
			2	98.9	59.9	95.9	56.9	88.9	49.9	78.9	39.9
				66.9	5.4	54.7	4.5	34.9	3.0	18.3	1.7
			3	94.9	56.9	91.9	53.9	84.9	46.9	74.9	36.9
				51.3	4.5	42.3	3.7	26.8	2.5	14.1	1.4
			4	92.9	54.9	89.9	51.9	82.9	44.9	72.9	34.9
				45.1	4.0	37.2	3.3	23.6	2.2	12.4	1.3
海上	球面回折付加 損失モデル	1		97.8	42.8	94.8	39.8	87.8	32.8	77.8	22.8
				67.5	9.9	63.9	8.5	54.2	5.9	41.6	3.5
		2		89.8	50.8	86.8	47.8	79.8	40.8	69.8	30.8
				57.3	14.6	53.2	12.6	43.9	8.9	32.2	5.3
		3		92.8	54.8	89.8	51.8	82.8	44.8	72.8	34.8
				61.1	17.5	57.3	15.2	48.1	10.9	35.6	6.6
		4		83.8	45.8	80.8	42.8	73.8	35.8	63.8	25.8
				49.5	11.4	45.5	9.9	36.6	6.9	25.6	4.1
山岳	多重回折モデル	1		56.2	1.2	53.2	-1.8	46.2	-8.8	36.2	-18.8
				64.5	0.4	45.5	共用可	20.6	共用可	6.7	共用可
		2		48.2	9.2	45.2	6.2	38.2	-0.8	28.2	-10.8
				25.8	0.5	18.3	0.5	8.3	共用可	2.8	共用可
		3		51.2	13.2	48.2	10.2	41.2	3.2	31.2	-6.8
				36.2	0.7	25.6	0.6	11.6	0.4	3.8	共用可
		4		42.2	4.2	39.2	1.2	32.2	-5.8	22.2	-15.8
				13.1	0.4	9.3	0.4	4.3	共用可	1.5	共用可

(3) 希望波 (D) : 2 値 FSK 方式 妨害波 (U) : 2 値 FSK 方式

付表 10-3 希望波 (D) : 2 値 FSK 方式 妨害波 (U) : 2 値 FSK 方式

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	74.9	34.9	71.9	31.9	64.9	24.9	54.9	14.9
				14.1	1.3	11.5	1.1	7.4	0.8	4.0	0.5
			2	68.9	29.9	65.9	26.9	58.9	19.9	48.9	9.9
				9.5	1.0	7.9	0.8	5.1	0.6	2.8	0.4
			3	64.9	27.9	61.9	24.9	54.9	17.9	44.9	7.9
				7.4	0.9	6.1	0.8	4.0	0.6	2.2	0.4
			4	61.9	26.9	58.9	23.9	51.9	16.9	41.9	6.9
				6.1	0.8	5.1	0.7	3.3	0.6	1.8	0.4
		中小 都市	1	82.9	42.9	79.9	39.9	72.9	32.9	62.9	22.9
				23.6	2.0	19.5	1.7	12.4	1.1	6.6	0.7
			2	76.9	37.9	73.9	34.9	66.9	27.9	56.9	17.9
				16.0	1.5	13.2	1.3	8.4	0.9	4.5	0.6
			3	72.9	35.9	69.9	32.9	62.9	25.9	52.9	15.9
				12.4	1.3	10.2	1.1	6.6	0.8	3.5	0.5
			4	69.9	34.9	66.9	31.9	59.9	24.9	49.9	14.9
				10.2	1.3	8.4	1.1	5.4	0.8	3.0	0.5
開放地	1	102.9	62.9	99.9	59.9	92.9	52.9	82.9	42.9		
		86.5	6.6	71.4	5.4	45.1	3.5	23.6	2.0		
	2	96.9	57.9	93.9	54.9	86.9	47.9	76.9	37.9		
		58.3	4.8	48.1	4.0	30.4	2.6	16.0	1.5		
	3	92.9	55.9	89.9	52.9	82.9	45.9	72.9	35.9		
		45.1	4.2	37.2	3.5	23.6	2.3	12.4	1.3		
	4	89.9	54.9	86.9	51.9	79.9	44.9	69.9	34.9		
		37.2	4.0	30.4	3.3	19.5	2.2	10.2	1.3		
海上	球面回折付加 損失モデル		1	93.8	53.8	90.8	50.8	83.8	43.8	73.8	33.8
				62.2	16.7	58.3	14.6	49.5	10.3	36.6	6.2
			2	87.8	48.8	84.8	45.8	77.8	38.8	67.8	28.8
				54.2	13.3	50.4	11.4	41.6	8.0	29.9	4.8
			3	83.8	46.8	80.8	43.8	73.8	36.8	63.8	26.8

			49.5	12.1	45.5	10.3	36.6	7.2	25.6	4.3
		4	80.8	45.8	77.8	42.8	70.8	35.8	60.8	25.8
山岳	多重回折モデル	1	45.5	11.4	41.6	9.9	33.1	6.9	22.7	4.1
			52.2	12.2	49.2	9.2	42.2	2.2	32.2	-7.8
		2	40.8	0.7	28.8	0.5	13.1	0.4	4.3	共用可
			46.2	7.2	43.2	4.2	36.2	-2.8	26.2	-12.8
		3	20.6	0.5	14.6	0.4	6.7	共用可	2.3	共用可
			42.2	5.2	39.2	2.2	32.2	-4.8	22.2	-14.8
		4	13.1	0.4	9.3	0.4	4.3	共用可	1.5	共用可
			39.2	4.2	36.2	1.2	29.2	-5.8	19.2	-15.8
			9.3	0.4	6.6	0.4	3.1	共用可	1.2	共用可

(4) 希望波 (D) : 2 値 FSK 方式 妨害波 (U) : 4 値 FSK 方式

付表 10-4 希望波 (D) : 2 値 FSK 方式 妨害波 (U) : 4 値 FSK 方式

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	69.9	31.9	66.9	28.9	59.9	21.9	49.9	11.9
				10.2	1.1	8.4	0.9	5.4	0.7	2.9	0.5
		中小 都市	1	77.9	39.9	74.9	36.9	67.9	29.9	57.9	19.9
				17.0	1.7	14.1	1.4	9.0	1.0	4.8	0.6
		開放地	1	97.9	59.9	94.9	56.9	87.9	49.9	77.9	39.9
				62.2	5.4	51.3	4.5	32.5	3.0	17.2	1.7
海上	球面回折付加 損失モデル		1	88.8	50.8	85.8	47.8	78.8	40.8	68.8	30.8
				55.7	14.6	51.8	12.6	42.7	8.9	31.0	5.3
山岳	多重回折モデル		1	47.2	9.2	44.2	6.2	37.2	-0.8	27.2	-10.8
				22.9	0.5	16.2	0.5	7.4	共用可	2.5	共用可

1.2 4 値 FSK システム（希望波）の場合

（５）希望波（D）：4 値 FSK 方式 妨害波（U）：現行システム

付表 10-5 希望波（D）：4 値 FSK 方式 妨害波（U）：現行システム

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	82.9	20.9	79.9	17.9	72.9	10.9	62.9	0.9
				23.4	0.7	19.3	0.6	12.3	0.5	6.6	0.4
		中小 都市	1	90.9	28.9	87.9	25.9	80.9	18.9	70.9	8.9
				39.7	0.9	32.5	0.8	20.8	0.6	10.9	0.4
		開放地	1	110.9	48.9	107.9	45.9	100.9	38.9	90.9	28.9
				146.1	2.8	119.4	2.3	76.1	1.6	39.7	0.9
海上	球面回折付加 損失モデル		1	101.8	39.8	98.8	36.8	91.8	29.8	81.8	19.8
				73.4	8.5	68.8	7.2	60.0	5.0	46.8	3.0
山岳	多重回折モデル		1	60.2	-1.8	57.2	-4.8	50.2	-11.8	40.2	-21.8
				102.1	共用可	72.0	共用可	32.5	共用可	10.4	共用可

（６）希望波（D）：4 値 FSK 方式 妨害波（U）：LoRa 方式

付表 10-6 希望波（D）：4 値 FSK 方式 妨害波（U）：LoRa 方式

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	74.9	35.9	71.9	32.9	64.9	25.9	54.9	15.9
				14.1	1.3	11.5	1.1	7.4	0.8	4.0	0.5
		中小 都市	1	82.9	43.9	79.9	40.9	72.9	33.9	62.9	23.9
				23.6	2.1	19.5	1.7	12.4	1.2	6.6	0.7
		開放地	1	102.9	63.9	99.9	60.9	92.9	53.9	82.9	43.9
				86.5	7.0	71.4	5.8	45.1	3.7	23.6	2.1
海上	球面回折付加 損失モデル		1	93.8	54.8	90.8	51.8	83.8	44.8	73.8	34.8
				62.2	17.5	58.3	15.2	49.5	10.9	36.6	6.6
山岳	多重回折モデル		1	52.2	13.2	49.2	10.2	42.2	3.2	32.2	-6.8
				40.8	0.7	28.8	0.6	13.1	0.4	4.3	共用可

(7) 希望波 (D) : 4 値 FSK 方式 妨害波 (U) : 2 値 FSK 方式

付表 10-7 希望波 (D) : 4 値 FSK 方式 妨害波 (U) : 2 値 FSK 方式

			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	72.9	27.9	69.9	24.9	62.9	17.9	52.9	7.9
				12.3	0.9	10.2	0.8	6.6	0.6	3.5	0.4
		中小 都市	1	80.9	35.9	77.9	32.9	70.9	25.9	60.9	15.9
				20.8	1.3	17.0	1.1	10.9	0.8	5.8	0.5
		開放地	1	100.9	55.9	97.9	52.9	90.9	45.9	80.9	35.9
				76.1	4.2	62.2	3.5	39.7	2.3	20.8	1.3
海上	球面回折付加 損失モデル		1	91.8	46.8	88.8	43.8	81.8	36.8	71.8	26.8
				60.0	12.1	55.7	10.3	46.8	7.2	34.3	4.3
山岳	多重回折モデル		1	50.2	5.2	47.2	2.2	40.2	-4.8	30.2	-14.8
				32.5	0.4	22.9	0.4	10.4	共用可	3.5	共用可

(8) 希望波 (D) : 4 値 FSK 方式 妨害波 (U) : 4 値 FSK 方式

付表 10-8 (4) 希望波 (D) : 4 値 FSK 方式 妨害波 (U) : 4 値 FSK 方式

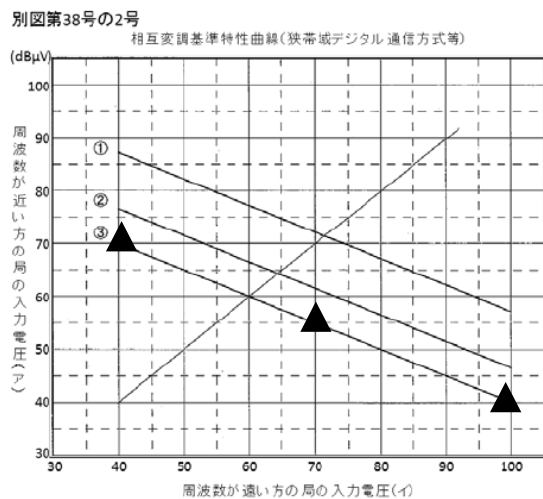
			上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)								
地形	伝搬モデル		CH 結束	1W		0.5W		0.1W		10mW	
				同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH	同一 CH	隣接 CH
平地	奥村秦 モデル	大都市	1	82.9	20.9	79.9	17.9	72.9	10.9	62.9	0.9
				23.4	0.7	19.3	0.6	12.3	0.5	6.6	0.4
		中小 都市	1	90.9	28.9	87.9	25.9	80.9	18.9	70.9	8.9
				39.7	0.9	32.5	0.8	20.8	0.6	10.9	0.4
		開放地	1	110.9	48.9	107.9	45.9	100.9	38.9	90.9	28.9
				146.1	2.8	119.4	2.3	76.1	1.6	39.7	0.9
海上	球面回折付加 損失モデル		1	101.8	39.8	98.8	36.8	91.8	29.8	81.8	19.8
				73.4	8.5	68.8	7.2	60.0	5.0	46.8	3.0
山岳	多重回折モデル		1	60.2	-1.8	57.2	-4.8	50.2	-11.8	40.2	-21.8
				102.1	共用可	72.0	共用可	32.5	共用可	10.4	共用可

相互変調干渉について

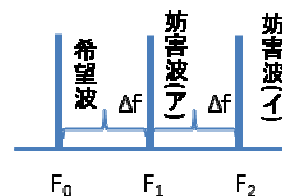
1. 相互干渉について

(1) 相互変調について

電波法関係審査基準では、付図 11-1 にある狭帯域デジタル変調方式の相互変調を図第 38 の 2 で評価する。このグラフは $F=2F_1-F_2$ (F は希望波の周波数、 F_1 は周波数が近い方の妨害波の周波数、 F_2 は周波数が遠い方の妨害波の周波数) の関係で発生する 3 次の相互変調において希望波信号レベルを基準感度+3dB にしたときに BER が 1% となるときの妨害波レベルをプロットしたものである。伝送の質を確保するため、この妨害波レベルを上回らない工事設計を求めている。



- ① : 16QAM (防災) のもの
- ② : $\pi/4$ QPSK (TDMA) 及び 4FSK (TDMA) のもの
- ③ : $\pi/4$ QPSK (SCPC)、4FSK (SCPC) 及び RZSSB のもの



二波によるものの条件 $F_2-F_1=F_1-F_0$

$$2F_1-F_2=2(F_0+\Delta f)\cdot(F_0+2\Delta f)=F_0$$

付図 11-1 電波法関係審査基準の相互変調の評価基準 (図 38 号の 2)

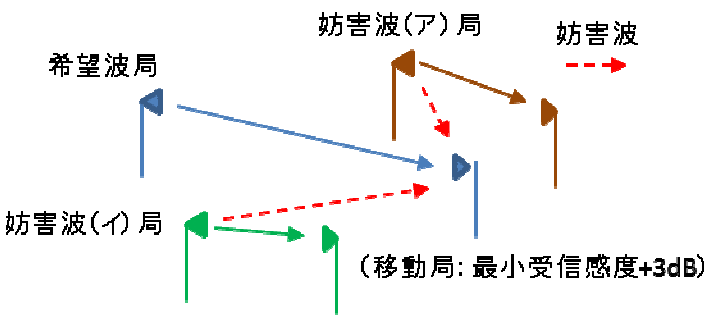
(2) 相互変調の考え方

現行システムは既に運用されており、現行システムの規定以内ならば相互変調は発生しないが、机上検討として最悪の組合せ時の離隔距離を計算し、その値と共用条件から干渉についてまとめる。

(3) 机上検討

最悪条件として、 F_1 の妨害波 (ア) が隣接チャネル、 F_2 の妨害波 (イ) が次隣接チャネルと想定し、付表 11-1 の組合せで離隔距離を各モデル式で計算した。(付図 11-1 の▲は入力電圧の場所を示す。)

妨害波のイメージを付図 11-2 に示す。アンテナは無指向性アンテナとし、赤点線の距離を計算する。



付図 11-2 妨害波のイメージ

付表 11-1 相互変調干渉電圧の組合せ

	F ₁ (周波数が近い方の局の 入力電圧)	F ₂ (周波数が遠い方の局の 入力電圧)
①	70dB μ V	40dB μ V
②	40dB μ V	100dB μ V
③	55dB μ V	70dB μ V

(4) まとめ

希望波が規定の空中線電力で電波を発射し、移動系が最小受信感度+3dB で受信している条件で、妨害波（ア）及び妨害波（イ）の機器が規定の空中線電力で電波を発射した時の所要改善量と離隔距離を付表 11-2 に示す。この条件を満たすには、第 4 章 で検討した同一チャネルの所要改善量と離隔距離を満たす必要がある。さらに、最小受信感度+16dB の条件であるが、付表 11-2 の妨害波（ア）及び妨害波（イ）はいずれも隣接チャネルの共用条件である所要改善量及び離隔距離以下であるので、相互変調干渉が発生しないことを確認できた。

尚、付表 11-2 の所要改善量も共用検討と同じサイトエンジニアリングにより改善が見込まれる。

したがって、第 4 章 の共用条件を満足すれば相互変調干渉は発生しない。

付表 11-2 相互変調干渉の離隔距離

				上段：所要改善量(dB) 下段：離隔距離(km)									
	地形	伝搬モデル		20W		1W		0.5W		0.1W		10mW	
				妨害波(ア)	妨害波(イ)	妨害波(ア)	妨害波(イ)	妨害波(ア)	妨害波(イ)	妨害波(ア)	妨害波(イ)	妨害波(ア)	妨害波(イ)
①	平地	奥村秦 モデル	大都市	16.5	40.4	3.5	27.4	0.4	24.3	-6.5	17.4	-16.5	7.4
				0.08	0.40	0.02	0.17	0.01	0.14	0	0.09	0	0.04
			郊外	24.5	48.4	11.5	35.4	8.5	32.4	1.5	25.4	-8.5	15.4
				0.14	0.68	0.06	0.29	0.04	0.24	0.02	0.15	0	0.08
			開放地	44.5	68.4	31.5	55.4	28.5	52.4	21.5	45.4	11.5	35.4
				0.53	2.51	0.22	1.07	0.18	0.88	0.11	0.56	0.06	0.29
	海上	球面回折付加損 失モデル	18.5	42.4	5.5	29.4	2.5	26.4	-4.5	19.4	-14.5	9.4	
			2.19	8.22	1.04	4.03	0.87	3.39	0.58	2.29	0.32	1.29	
	山岳	多重回折モデル	-5.8	18.1	-18.8	5.1	-21.8	2.1	-28.8	-4.9	-38.8	-14.9	
0			0.08	0	0.02	0	0.01	0	0	0	0		
②	平地	奥村秦 モデル	大都市	40.4	-13.5	27.4	-26.5	24.3	-29.6	17.4	-36.5	7.4	-46.5
				0.40	0	0.17	0	0.14	0	0.09	0	0.04	0
			郊外	48.4	-5.5	35.4	-18.5	32.4	-21.5	25.4	-28.5	15.4	-38.5
				0.68	0	0.29	0	0.24	0	0.15	0	0.08	0
			開放地	68.4	14.5	55.4	1.5	52.4	-1.5	45.4	-8.5	35.4	-18.5
				2.51	0.07	1.07	0.02	0.88	0	0.56	0	0.29	0
	海上	球面回折付加損 失モデル	42.4	-11.5	29.4	-24.5	26.4	-27.5	19.4	-34.5	9.4	-44.5	
			8.22	0.39	4.03	0.17	3.39	0.14	2.29	0.08	1.29	0.03	
	山岳	多重回折モデル	18.1	-35.8	5.1	-48.8	2.1	-51.8	-4.9	-58.8	-14.9	-68.8	
0.08			0	0.02	0	0.01	0	0	0	0	0		
③	平地	奥村秦 モデル	大都市	31.5	16.5	18.5	3.5	15.4	0.4	8.5	-6.5	-1.5	-16.5
				0.22	0.08	0.09	0.02	0.08	0.01	0.04	0	0	0
			郊外	39.5	24.5	26.5	11.5	23.5	8.5	16.5	1.5	6.5	-8.5
				0.38	0.14	0.16	0.06	0.13	0.04	0.08	0.02	0.04	0
			開放地	59.5	44.5	46.5	31.5	43.5	28.5	36.5	21.5	26.5	11.5
				1.40	0.53	0.60	0.22	0.49	0.18	0.31	0.11	0.16	0.06
	海上	球面回折付加損 失モデル	33.5	18.5	20.5	5.5	17.5	2.5	10.5	-4.5	0.5	-14.5	
			5.07	2.19	2.43	1.04	2.07	0.87	1.38	0.58	0.78	0.32	
	山岳	多重回折モデル	9.2	-5.8	-3.8	-18.8	-6.8	-21.8	-13.8	-28.8	-23.8	-38.8	
0.03			0	0	0	0	0	0	0	0	0		

用語解説

FSK (Frequency Shift Keying : 周波数偏移変調方式)

デジタル信号の 1、0 を送信するために使用する周波数変調の一種。1 に割り当てられた周波数と 0 に割り当てられた周波数を切りかえて使用する。伝送速度を上げるためには占有帯域幅が広がる特性がある。振幅が一定となるため、電力増幅器の非直線性の影響は少なく、電力利用効率がよい特性がある。

CRC (Cyclic Redundancy Check : 巡回冗長検査)

誤り検出方式の一つで、データを値とみなしてある定数で割った余り（余剰）を用いて誤りの検知を行うものである。

GNSS (Global Navigation Satellite System : 全地球測位システム)

人工衛星を使用して地上の現在位置を計測する「衛星測位システム」のうち、全地球を測位対象とすることができるシステムのことである。

LoRa

Long Range（長距離）の略。少ない出力で、長い距離での通信ができるという技術。

PER/BER (Packet/Bit Error Rate)

デジタルデータの送受信における通信品質の指標の一つで、受信側で誤ったデータを受信する確率である。誤ったパケット／ビット数を受信した総パケット／ビット数で割ったものである。

RSSI (Received Signal Strength Indication : 受信信号強度)

無線通信機器が受信する信号の強度を測定するための回路または信号のことである。

WIN システム

東京大学地震研究所で開発された多チャンネルの地震波形を取り扱うための処理システム。

キャリアセンス

自分が送信しようとする周波数やチャネルの利用状況を予め検知して、同一周波数で複数の搬送波を送信しないようにする。利用されている場合には一定時間たってから再度通信を試みる機能である。

サイトエンジニアリング

離隔距離を担保するために、所要改善量を改善する設計・調整のこと。

具体的には、適切な空中線電力の計算やアンテナ種別・方向、遮へい損失等を考慮した設計をすること。及び、現地調整すること。

所要改善量

告示により局種及び送信装置ごとに定める最大の空中線電力で運用しようとする場合に、干渉が生じないように無線局間で確保が必要な電力低減量又は減衰量をいう。

周波数の許容偏差

発射によって占有する周波数帯の中央の周波数の割当周波数からの許容することができる最大の偏差又は発射の特性周波数の基準周波数からの許容することができる最大の偏差をいい、百万分率又はヘルツで表わす。

周波数偏移 (Frequency Deviation)

周波数変調における周波数変化の幅を示す。周波数変調においては、変調信号に対応して搬送周波数が変化する。変調信号入力がある場合の搬送周波数は、変調信号入力がない無変調時の搬送周波数からずれる。このずれの幅の周波数が周波数偏移である。周波数偏移を変調信号周波数で割った値を変調指数という。

占有周波数帯幅

搬送波を変調することで生じる電波の幅のこと。発射電波に許容される帯幅の値を占有周波数帯幅の許容偏差といい、ヘルツで表わされる。