

中山間地域に有効な
400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システムの
導入に係る調査検討 報告書

令和6年3月

中山間地域に有効な 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システムの導入に係る調査検討会

LoRa は Semtech Corporation の登録商標である。

目次

第1章 調査検討の概要	1
1. 1 調査検討の目的	1
1. 2 高知県での現状	2
1. 3 調査検討項目	4
1. 4 調査検討の流れ	6
第2章 400MHz 帯狭帯域 LoRa®へのニーズ把握	13
2. 1 ニーズ調査の概要	14
2. 2 ニーズ調査の結果	14
2. 3 ニーズ調査結果の考察	24
2. 4 今後有効とみられるニーズについての調査	28
2. 4. 1 造船業 DX に対するニーズ	28
2. 4. 2 船舶の衝突防止対策に対するニーズ	30
2. 4. 3 林業に対するニーズ	31
2. 4. 4 その他のニーズ	31
第3章 諸元・運用条件案（一次案）作成	32
3. 1 基本コンセプト案	33
3. 2 構成例	33
3. 3 変調方式	34
3. 4 諸元・運用条件案（一次案）	35
3. 5 特に検討が必要な条件	37
3. 5. 1 1システム当たりの局数	37
3. 5. 2 通信頻度	38
3. 5. 3 データ量	38
3. 5. 4 通信方向	39
3. 5. 5 送信時間	41
3. 5. 6 出力	44
3. 5. 7 キャリアセンス	48

3. 5. 8	無線局免許について	5 2
第4章	実証実験	5 3
4. 1	実施内容	5 5
4. 2	使用機器	5 5
4. 3	屋内実証実験結果	5 7
4. 3. 1	受信感度測定	5 7
4. 3. 2	400MHz 帯狭帯域 LoRa®同一チャンネル干渉測定	6 0
4. 3. 3	隣接チャンネル干渉測定 提案システム被干渉	6 4
4. 3. 4	近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉	6 7
4. 3. 5	相互変調 提案システム被干渉	7 7
4. 3. 6	隣接チャンネル干渉測定 提案システム与干渉	8 0
4. 3. 7	近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉	8 3
4. 3. 8	相互変調 提案システム与干渉	9 3
4. 3. 9	屋内実証実験 まとめ	9 7
4. 4	屋外実証実験結果	1 0 5
4. 4. 1	ドライブテスト	1 0 5
4. 4. 1. 1	ドライブテスト概要	1 0 5
4. 4. 1. 2	ドライブテスト測定条件	1 0 6
4. 4. 1. 3	ドライブテスト測定結果	1 0 9
4. 4. 1. 4	ドライブテスト測定結果 考察	1 2 3
4. 4. 2	固定状態での測定結果	1 2 4
4. 4. 2. 1	固定状態での測定概要	1 2 4
4. 4. 2. 2	固定状態での測定条件	1 2 4
4. 4. 2. 3	固定状態での測定結果	1 2 6
4. 4. 2. 4	固定状態での測定結果 考察	1 3 4
4. 4. 3	水位計長期データ取得	1 3 5
4. 4. 3. 1	水位計長期データ取得概要	1 3 5
4. 4. 3. 2	水位計長期データ取得測定条件	1 3 5
4. 4. 3. 3	水位計長期データ取得測定結果	1 3 8

4. 4. 3. 4	水位計長期データ取得 考察	142
4. 4. 4	ドローンでの実験	143
4. 4. 4. 1	ドローンノイズ測定概要	143
4. 4. 4. 2	ドローンノイズ測定条件	143
4. 4. 4. 3	ドローンノイズ測定結果	145
4. 4. 4. 4	ドローンノイズ測定結果 考察	158
4. 4. 4. 5	ドローン通信実験	159
4. 4. 4. 6	ドローン通信実験 測定条件	159
4. 4. 4. 7	ドローン通信実験 測定結果	164
4. 4. 4. 8	ドローン通信実験 測定結果考察	167
第5章	他の無線システムとの共用検討	168
5. 1	400MHz 帯における他の無線システムの諸元等調査	169
5. 1. 1	対象周波数範囲	169
5. 1. 2	候補周波数	170
5. 1. 3	隣接の既存無線システム	171
5. 1. 4	共用検討の組み合わせ	173
5. 1. 5	実証実験周波数	173
5. 2	共用検討	174
5. 2. 1	離隔距離	174
5. 2. 2	到達距離	175
5. 2. 3	同一チャネル干渉	176
5. 2. 4	隣接チャネル干渉	177
5. 2. 5	共用検討（離隔距離）まとめ	179
5. 2. 6	リッジ損失なし時の離隔距離	180
5. 2. 6. 1	同一チャネル干渉（リッジ損失無し）	180
5. 2. 6. 2	隣接チャネル干渉（リッジ損失無し）	181
5. 2. 6. 3	共用検討（離隔距離）まとめ（リッジ損失無し）	183
5. 2. 7	ドローン使用時の離隔距離	184
5. 2. 7. 1	同一チャネル干渉（ドローン使用時）	184

5. 2. 7. 2	隣接チャネル干渉（ドローン使用時）	186
5. 2. 7. 3	共用検討（離隔距離）まとめ（ドローン使用時）	187
5. 2. 8	周波数偏差	189
第6章	諸元・運用条件案（最終案）	197
6. 1	諸元・運用条件案（一次案）の修正	198
6. 1. 1	諸元・運用条件案（一次案）の修正詳細	199
6. 1. 1. 1	出力	199
6. 1. 1. 2	離隔距離	200
6. 1. 1. 3	離隔距離が確保できない場合の諸元・運用条件案	200
6. 1. 1. 4	チャネルの運用方法	204
6. 1. 1. 5	送信時間制限等の運用方法	205
6. 1. 1. 6	キャリアセンスレベル	206
6. 1. 1. 7	LoRa®電波のキャリアセンス	207
6. 1. 1. 8	混信防止機能	209
6. 1. 1. 9	既存システムとの比較	210
6. 2	ドローン使用時の諸元・運用条件案	211
6. 3	端末間通信の適用について	212
6. 4	中山間地域以外での使用について	214
6. 5	諸元・運用条件案の課題	215
第7章	技術的条件案	217
おわりに		222
参考資料1	調査票の詳細	
参考資料2	導入パターン例	
参考資料3	用語解説	
参考資料4	参考資料	

第1章 調査検討の概要

1. 1 調査検討の目的

高知県は、園芸農業生産性日本一を誇る全国屈指の施設園芸産地として知られており、農水省の「次世代施設園芸のモデル拠点（全国で10拠点）」の一つにも選定され、全国に先駆けてオランダの先端技術を取り入れた「次世代型施設園芸システム」（IoP（Internet of Plants））を導入し、農業ハウス内の機器データや、農産物の個々の出荷に関するデータ等を一元的に集約するクラウド型のデータベースシステムを構築・運用を開始している。

特に、中山間地域が多く分布する同県では、農業用水の貯水槽が急な斜面に点在し、その水位管理が社会課題となっていたが、上記のIoPの取組の一環として、400MHz帯（429MHz帯特定小電力LoRa®）を用いた水位管理システムを実現しており、現在、高知県内では、このシステムをベースに、中山間地域に点在する圃場のデータを効率的に収集・集約する「400MHz帯農業用地域インフラ間通信システム（仮）」（以下「提案システム」という。図1-1）の構築を検討している。

このように、中山間地域における無線通信システムでは、低ビットレートであるものの、安価で低消費電力・長距離伝搬が可能な400MHz帯LoRa®の活用に注目が集まっているが、現在使用されている429MHz帯の特定小電力の周波数帯は、既に別のテレメータ/テレコントロールが多数運用されており、LoRa®を利用するための課題となっている。

本調査検討では、特に中山間地域に有効な400MHz帯に狭帯域LoRa®通信システムを導入することを目的として、上記の提案システムの実証試験等を実施し、400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの技術的条件案をとりまとめる。

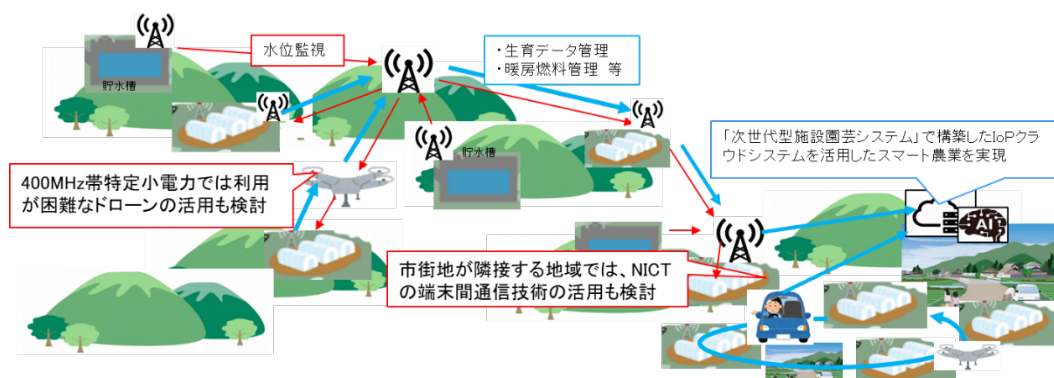


図1-1 「400MHz帯農業用地域インフラ間通信システム（仮）」の概要

1. 2 高知県での現状

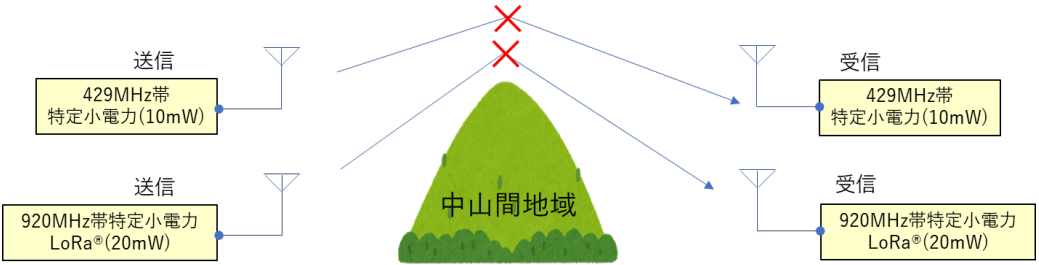
高知県の農業においては、現在、図1-2に示すような429MHz帯特定小電力LoRa[®]を使用した水位計を運用されている。農業において水の管理は重要であり、見回りを行って監視をされているが、貯水槽が遠方の場合もあり、管理に費やす時間が多くなっていた。ここに429MHz帯特定小電力LoRa[®]を使用した水位計を導入することで、見回りの必要が無く水位把握が可能となったため、大幅な時間短縮を可能としている。



図1-2 429MHz帯特定小電力LoRa[®]を使用した水位計

使用されている中で、高知県IoP関係者の方から、表1-1に示すようなニーズやお困りごとが新たに発生している。これらを解決できるシステムとして、400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システムの検討を行っていく。

表 1-1 ニーズやお困りごと

ニーズ、お困りごと
<p>高知県 IoP（Internet of Plants の略、植物のインターネット）関係者様から 農業は、水が大事。まずは、水位計監視を行いたい。見回りに費やす時間が多い。 遠方 2km～、 平野部、山間部。データ収集用の回線が必要。 LTE がエリア外の場合もある。低廉な自営回線が求められる。 現行の 429MHz 帯特定小電力 LoRa[®]、920MHz 帯特定小電力 LoRa[®]では、伝搬距離 が短く、遠隔地や見通し外との通信ができない。別の局との干渉もある。 廉価で飛ぶ無線回線がほしい</p> 

1. 3 調査検討項目

本調査検討の調査検討項目を以下に示す。

(1) 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの諸元・運用条件等の検討

導入検討が進められている現地（高知県内）での聞き取り等により要求条件を整理し、その実現のために必要となる無線システムの諸元・運用条件を検討し、とりまとめる。

中山間地域における長距離伝搬を実現するために、地上で利用する場合の空中線電力、アンテナ利得、アンテナ高等の条件や上空で利用する場合のドローン利用等の条件について検討し、地上で利用する場合及び上空で利用する場合のそれぞれについて、最適な諸元・運用条件等の案をとりまとめる。

あわせて、現行システム等を使用した場合との比較を行い、本システムの導入の有効性、導入・運用コストの最適化、システムの運用方法（免許方式等）についても検討し、とりまとめる。

上記でとりまとめた案が中山間地域以外の地域での利用に適用可能か、地理的な条件による使用目的や使用場所に応じた条件・解決策等もあわせて検討する。

さらに、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の「アドホックネットワークを手軽に形成する端末間通信」について調査し、提案システムへの適用例を検討する。

(2) 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムへのニーズ調査

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムに対するニーズを明確化するため、農業分野以外の用途も含めて利用が想定される者（民間、行政機関他）、無線機器製造業者、関係団体、学識経験者に対して調査票を郵送する等によりニーズ調査を行い、取りまとめた結果について分析を行う。

(3) 他の無線システムとの共用検討

ア 400MHz 帯における他の無線システムの諸元等調査

400MHz 帯において共用検討が必要となる既存の無線システムを選定し、その諸元を調査しとりまとめる。

イ 共用検討（机上検討）

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムと既存の無線システムとの共用検討を実施し、

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムを導入するために必要な共用条件案をとりまとめる。

ウ 提案システムの周波数選定

ア及びイの検討結果を踏まえて、実証試験を高知県内で実施するために、最適な地域割当可能な周波数を選定する。

(4) 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの試作

提案システムの試作システムとして圃場において貯水槽の水位監視を行う水位観測システムの試作を行う。

(5) 実証試験

以下のとおり屋内実証及び屋外実証を実施する。

ア 屋内実証

実験室内（ケーブル接続、減衰器等を利用）にて、以下を実施する。

(ア)試作システムの電波伝搬特性を測定し、設計どおりの性能を有することを確認する。

自システム内の干渉や技術的条件案のとりまとめに必要な諸元等についても測定を行う。

(イ) 既存無線システムの実機を用意して実際の被干渉及び与干渉について測定して共用条件の案に対する確認・分析・評価を実施し、共用条件をとりまとめる。

(ウ)ドローンに搭載した際のノイズレベルを検証する。必要に応じてシールド対策等を実施する。

イ 屋外実証

試作システムにて、高知県内の中山間地域（屋外）を選定して実際に電波を発射し、以下の実証を実施する。

(ア) 地上で利用する場合及び上空で利用する場合それぞれの諸元・運用条件等の案に対応して実証を行い、案に対する確認・分析・評価を実施する。

(イ) 429MHz 帯特定小電力システム及び 920MHz 帯特定小電力システムを用いて実証を行い、試作システムとの比較検証を実施する。

(ウ) 地上又は上空で利用する場合のどちらか最適な方法にて試作システム（水位監視）を

実際に設置した状態で2週間程度運用し、水位監視状況についてデータを取得し、実証後に通信状況の変化等を分析する。

(6) 調査検討会の運営

本調査検討を効果的に実施するため、学識経験者、共用検討を行う既存無線システムを取り扱う通信機器製造者等から10名程度を構成員とする調査検討会を設置する。

調査検討会については3回程度、オンライン又は対面で開催する。

(7) 技術的条件案・報告書案のとりまとめ

第3章から第6章までの結果を踏まえて400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの技術的条件案を作成するとともに、本調査検討において実施した内容について報告書としてとりまとめた。

1. 4 調査検討の流れ

前項に示した調査検討を行うために、図1-3に示す流れで調査検討を実施することとした。

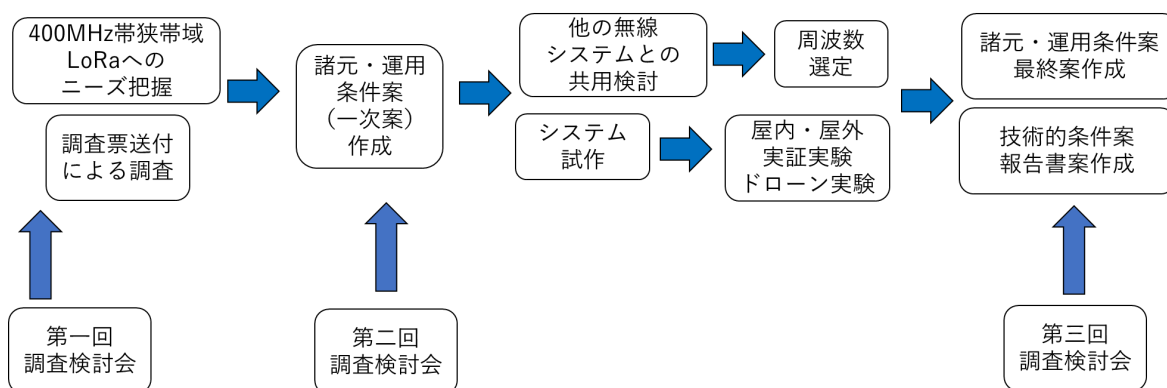


図1-3 調査検討の流れ

(1) 400MHz帯狭帯域LoRa®へのニーズ把握

農業分野以外の用途も含めて利用が想定される民間、行政機関、無線機器製造業者、関係団体、学識経験者に対して調査票を郵送することよりニーズ調査を実施した。取りまとめた結果について分析を行い、諸元・運用条件案(一次案)作成へ反映を行った。

(2) 諸元・運用条件案（一次案）作成

ニーズを実現するために必要となる無線システムの諸元・運用条件を検討し、一次案としてとりまとめを行った。中山間地域における長距離伝搬を実現するために、地上で利用する場合の空中線電力などの条件などについて検討し、とりまとめを行った。

(3) 他の無線システムとの共用検討

400MHz帯における他の無線システムの諸元等調査として、400MHz帯において共用検討が必要となる既存の無線システムを選定し、その諸元を調査し、とりまとめを行った。

共用検討（机上検討）として、400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムと既存の無線システムとの共用検討を実施し、400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムを導入するために必要な共用条件案をとりまとめた。

提案システムの周波数選定として、上記検討結果を踏まえて、実証試験を高知県内で実施するために、最適な地域割当可能な周波数の選定を行った。

(4) システム試作

屋内・屋外実証実験、ドローン実験に使用する400MHz帯狭帯域LoRa®無線機の試作を行った。また、当該無線機を使用して、試作システムとして圃場において貯水槽の水位監視を行う水位観測システムの試作を行った（図1-4）。

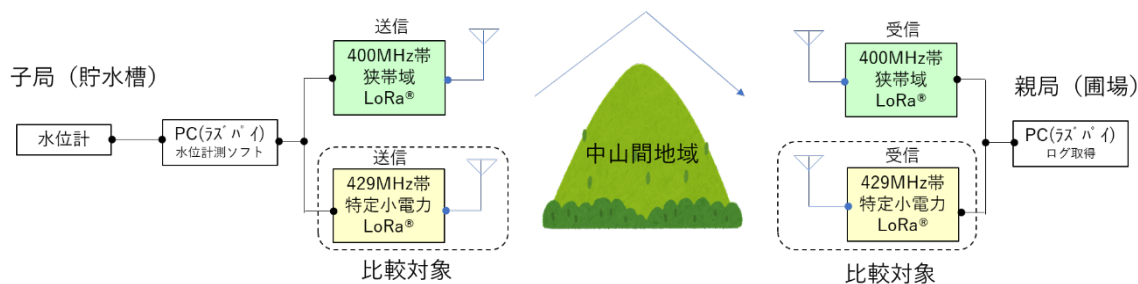


図1-4 400MHz帯狭帯域LoRa®水位監視システム 系統図

(5) 屋内・屋外実証実験、ドローン実験

屋内実証実験として、室内（ケーブル接続、減衰器等を利用）にて、試作システムの電波伝搬特性の測定、既存無線システムの実機を用意して実際の被干渉及び与干渉特性の測定を実施した（図1-5）

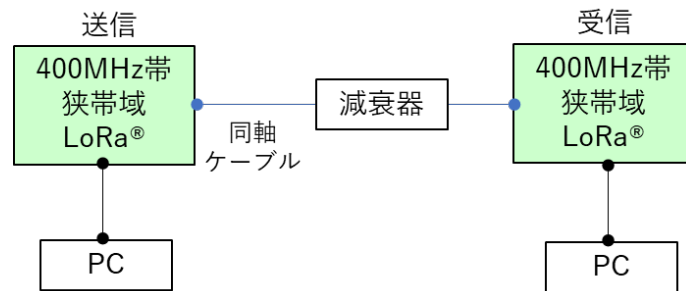


図1-5 屋内実証実験（受信感度測定） 系統図

屋外実証実験として、試作システムにて高知県内の中山間地域（屋外）にて実際に電波を放射し実施した（図1-6、1-7）。

- ・ 地上で利用する場合及び上空（ドローン）で利用する場合それぞれの諸元・運用条件等の案に対応して実証を実施した。
- ・ 429MHz帯特定小電力システム及び920MHz帯特定小電力システムを用いて比較検証を実施した。
- ・ 試作システムを実際に設置した状態で2週間程度運用し、水位監視状況についてデータを取得し、通信状況の変化等の分析を行った（図1-8）。

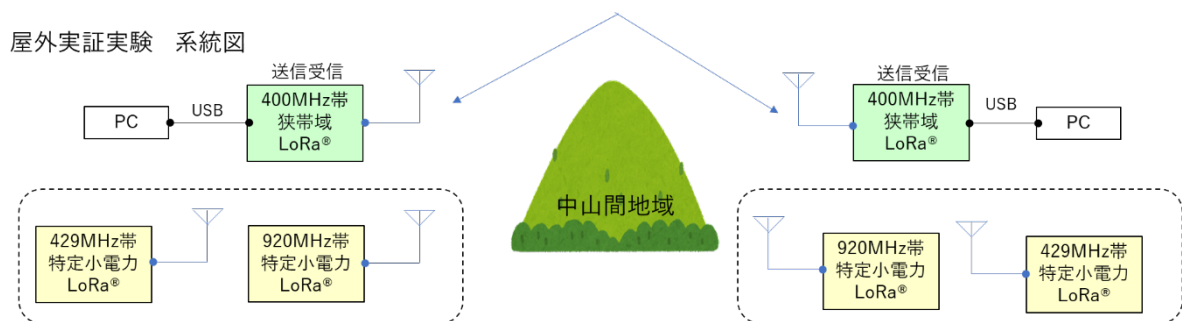


図1-6 屋外実証実験 系統図

ドローンでの実験

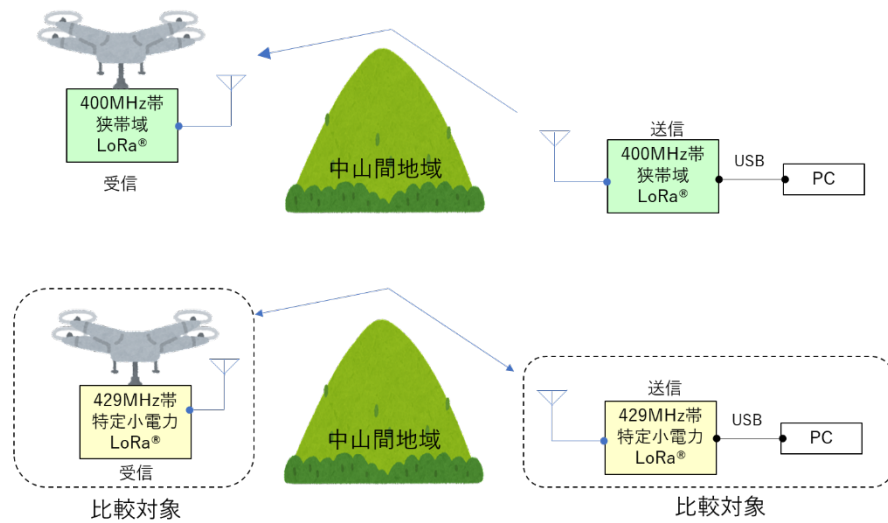


図 1-7 屋外実証実験、ドローン実験 系統図

長期データ取得

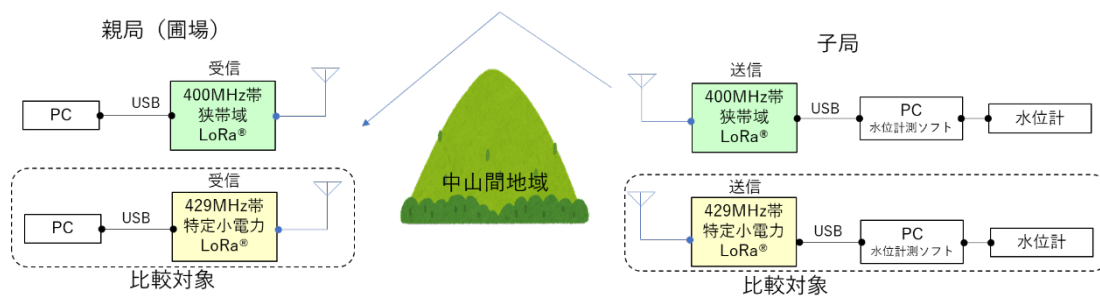


図 1-8 屋外実証実験 長期データ取得 系統図

(6) 諸元・運用条件案最終案作成

諸元・運用条件等の案（一次案）について、他の無線システムとの共用検討や、屋内・屋外実証実験、ドローン実験の結果を反映し、最終案の作成を行った。

(7) 技術的条件案、報告書案作成

技術的条件案を作成し、調査検討での検討事項をまとめた報告書案の作成を行った。

(8) 調査検討会

学識経験者、共用検討を行う既存無線システムを取り扱う通信機器製造者等から 10 名程度を構成員とする調査検討会を設置し、会合を 3 回、オンライン又は対面で開催を行った。調査検討会会合では、各時点での検討結果について報告を行い、御指摘やご助言についてお伺いし、諸元・運用条件案への反映を行った。

調査検討会構成員およびオブザーバーを以下に示す。

構成員

【主査】

福本 昌弘 高知工科大学 情報学群 教授

【副主査】

岩尾 忠重 高知大学 総合科学系複合領域科学部門 教授

【構成員】

揚田 徹 高知県 商工労働部産業デジタル化推進課 課長

大川内 正樹 株式会社オサシ・テクノス 開発部 部長

大崎 充博 株式会社シティネット 技術開発部統括

小池 幸永 株式会社サーキットデザイン 代表取締役社長

河野 靖 愛媛県 農林水産研究所 企画戦略部長

小林 真也 愛媛大学 大学院理工学研究科電子情報工学専攻 教授

吉田 一志 国立研究開発法人情報通信研究機構 戦略的プログラムオフィス

李 還幫 国立研究開発法人情報通信研究機構 ネットワーク研究所

ワイヤレスネットワーク研究センターワイヤレスシステム研究室

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無線システム開発部

シニアマネジャー

オブザーバー

都築 慶剛 農林水産省 中国四国農政局 農村振興部長

佐々木 信行 総務省 四国総合通信局 無線通信部長

※敬称略、五十音順

調査検討会会合は、以下の日時で合計3回開催を行った。また、屋外実証実験公開を1回実施している。

第一回会合 令和5年(2023年)8月8日 14:00~16:00 オンライン開催

- 議事 (1)「中山間地域に有効な400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの導入に係る調査検討」調査検討の進め方について
- (2) ニーズ調査のためのアンケート票の内容、配布先について
- (3) 400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムに対するニーズについて
- (4) その他

第二回会合 令和5年(2023年)10月19日 14:00~16:00 オンライン開催と実地開催を併用 実地 高知工科大学永国寺キャンパス

- 議事 (1) 第一回調査検討会 議事録の確認
- (2) 400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの基本コンセプト、諸元・運用条件案(一次案)について
- (3) ニーズ調査のためのアンケート結果について
- (4) 屋外実証実験内容案について
- (5) 屋内実証実験内容案について
- (6) 屋内実証実験結果について
- (7) その他

第三回会合 令和6年(2024年)2月21日 14:00~16:00 オンライン開催と実地開催を併用 実地 四国総合通信局 会議室

- 議事 (1) 第二回調査検討会 議事録の確認
- (2) 屋内実証実験結果について
- (3) 屋外実証実験結果について
- (4) 400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの諸元・運用条件案について
- (5) 400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの技術的条件案について
- (6) 報告書案について
- (7) その他 今後の予定について

屋外実証実験公開 令和6年（2024年）1月25日 13:00～15:00 実地開催

四万十町窪川運動場野球場

公開内容：ドローンに受信機を搭載して上空へ上げた際の通信状況測定を公開

第2章 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®] へのニーズ把握

400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システムの対するニーズを明確化するため、提案システムと現行の 400MHz 帯/920MHz 帯特定小電力システムや簡易無線システム等の既存システムそれぞれの優位性や課題等を明示した上で、農業分野以外の用途も含めて利用が想定される者（民間、行政機関他）、無線機器製造業者、関係団体、学識経験者に対して調査票を郵送する等によりニーズ調査を行い、取りまとめた結果について分析を行った。

また、アンケート調査では個別聞き取りを要するニーズは出なかったが、調査検討会内での議論や本技術を一般の方々に紹介する等の活動を行い、今後有効とみられるニーズを調査し、特にニーズが期待できるものについて、個別に聞き取り調査等を実施した。

なお、調査票文面の作成、調査票送付先の選定にあたっては、事前に主管課（電波利用企画課）と協議し承認を得た。

2. 1 ニーズ調査の概要

400MHz 帯への狭帯域 LoRa®通信システム導入検討のために、農業分野以外の用途も含めて利用が想定される民間、行政機関、無線機器製造業者、関係団体、学識経験者に対して調査票を郵送することよりニーズ調査を実施した。

調査票の詳細は、参考資料 1 に示す。調査票の送付先は、行政機関、学識経験者、無線機器製造業者、農林業関係者を事務局にて選定し、62 者へ依頼を行った

2. 2 ニーズ調査の結果

調査票については、38 者から回答を得、回収率 61%であった。集計結果を以下に示す。

回答数の最も多かった選択肢に桃色網掛け、次に多かった選択肢へ緑色網掛けを実施している。

1 無線テレメータシステムの使用について

質問 1 貴社・貴団体の製品やサービス、または業務において、無線を使用した「無線テレメータシステム」を使用されていますか。

使用している	使用していない
29	8

質問 2 どのような業種に属する製品やサービス、または業務において無線テレメータシステムを使用されていますか。また、具体的な使用場所や製品やサービスの内容、用途についてお書きください。(複数回答可)

業種

農業	林業	水産	建設業	製造業	サービス業	その他
15	3	3	5	6	3	6

その他（ 自治体、公共事業、電力業、運送業、環境モニタリング、市と連携した河川の安全監視 ）

具体的な使用場所

畑、農業ハウス内、水田、農園、露地全般、牛舎、ため池、人工池、河川、水路、山林、ダム、工事現場（河川）、道路のり面、土砂災害リスクのある斜面、住宅、オフィス、市街地、大学キャンパス、工場、港湾、飲食、水道施設、店舗、トラック、

製品やサービスの内容、用途

各種モニタリング（水位、雨量、温湿度、CO2、日射量、土壌水分、水質、照度、風向、風速、積雪）、水田の水位調整（給水制御）、温室内監視、牛舎内監視、死活（制御システム）、データ伝送、動物わな監視、遠隔制御、呼出し、カメラ撮影、画像伝送、水門監視、水防テレメータ（雨量、水位）、砂防テレメータ（雨量）、放流警報、コミュニティバス位置把握、電圧電流のロギング、バッテリー残量、セキュリティ、防災関連、果樹園の育成環境監視、水位・傾斜等のセンサー→ロガー間のデータ伝送、斜面等における各地点のデータを 1 箇所に集約するデータ伝送および警報伝達等、農道の安全管理、及び農業従事者の安全見守り、音や画像の採取、電力・設備監視

質問3 どのような無線システムを使用されていますか。わかる範囲で周波数帯と通信方式をお答えください。

(複数回答可)

特定小電力無線局

426MHz帯	429MHz帯	920MHz帯	1.2GHz帯	2.4GHz帯	5GHz帯	その他	不明
3	8	18	1	6	0	1	0

その他 (150MHz、808MHz)

通信方式

アナログ FM,AM	FSK	PSK	LoRa®	Sigfox	ELTRES	ZETA	Wi-SUN	Wi-Fi	その他	不明
0	6	0	12	9	2	0	0	5	1	0

その他 (ZigBee)

簡易無線・業務無線

デジタル簡易無線局 (登録局) (350MHz帯)	デジタル簡易無線局 (免許局) (150MHz帯、400MHz帯)	アナログ簡易無線局 (免許局) (150MHz帯、400MHz帯、50GHz帯)	デジタル業務用無線局 (免許局) (150MHz帯、400MHz帯)	アナログ業務用無線局 (免許局) (150MHz帯、400MHz帯)
2	1	0	1	2

キャリア系

LTE (4G)	5G	3G	LTE-M	MCA
13	0	6	5	0

その他 (70MHz・400MHz 固定局 F3E)

質問4 無線での通信距離はどの程度ですか。最も近いものをお選びください。

0～10m	10～100m	100～500m	500m～1000m	1km～3km	3～5km	5～10km	10km以上	その他	不明
1	5	5	1	5	3	3	3	3	1

その他（ 数10m～数km、全範囲、1km～数10km ）

質問5 無線での通信の頻度はどの程度ですか。最も近いものをお選びください。

常時	1分に1回	10分に1回	30分に1回	1時間に1回	6時間に1回	12時間に1回	一日に1回	一週間に1回	半月に1回	ひと月に1回	その他	不明
5	2	10	4	7	1	0	2	0	0	0	1	1

その他（ 無線機製造業者のため不明 ）

質問6 1回の通信あたりのデータ量はどの程度ですか。最も近いものをお選びください。

10Byte	100Byte	1kByte	10kByte	100kByte	1MByte	10MByte	10MByte以上	その他	不明	データ通信ではない
5	17	2	2	0	0	0	0	0	2	0

その他（ 無線機製造業者のため不明 ）

質問7 現在使用されている無線の価格はどの程度ですか。販売されている場合は、どの程度の価格ですか。最も近いものをお選びください。

初期費用（無線機1台あたり）

¥10,000	¥50,000	¥100,000	¥100,000以上	その他
9	3	4	17	4

その他（研究開発用、単体販売無し、計測とセットで10万以上、計測対象により価格差あり、テストのため無料）

通信料（1ヶ月あたり）

¥0	¥1,000	¥5,000	¥10,000以上	その他
16	7	4	2	1

その他（テストのため無料）

年間保守費

¥0	¥10,000	¥50,000	¥100,000以上	その他
19	2	1	5	5

その他（故障時には修繕費が必要、電波利用料400円、テストのため無料、レンタルにつき期間中の保守点検費は無料）

質問 8 現在使用されている無線システムへの不満点がありますか。

(複数回答可)

電波が届かない	チャンネル数が少ない	回線速度が遅い	送信時間制限がある	使用場所に制限がある(上空は使用不可など)	無線局免許の手続きが面倒	免許が必要	電波利用料が高い
9	5	6	6	1	1	1	0

無線機の種類が少ない	無線機が故障しやすい	電池がもたない	無線機の価格が高い	月々の通信料が高い	毎年の保守料が高い	不満はない
1	1	2	2	2	1	4

その他 (基地局から端末 (LPWA) への DownLink があると良い、無線機製造業者のため不明、基地局に対して使用できる子局が限定され、汎用性が無い)

II 中山間地域に有効な 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムについて

質問 11 本調査検討会では、無線テレメータシステムにて使用する無線システムとして、「中山間地域に有効な 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム」の導入検討を行っています。貴社・貴団体の製品やサービス、または業務において、当該システムを採用される可能性がありますか。

ある	ない	わからない
9	6	22

その他（ 無線機製造業者のため不明、保守業者のため不明
即時性と確実性が要求されない接点伝送等の用途があれば ）

質問 12 質問 11 に示した当該システムは、どのような業種に属する製品やサービス、または業務において使用が想定されますか。また、具体的な製品やサービスについて想定される場合は、使用場所や製品やサービスの内容、用途をお書きください。

（複数回答可）

業種

農業	林業	水産	建設業	製造業	サービス業	その他
21	15	7	2	3	2	1

その他（ 地方自治体 ）

具体的な使用場所

水田、畑、中山間地の圃場、山、山林、山岳、ダム、工事現場事務所、自然公園、
海、海岸、海上（養殖場）工場、ビル地下、人里離れた場所、広大な敷地や遠距離
でのデータ通信を必要とする場所

製品やサービスの内容、用途

センシング、水位、雨量、温度、栽培環境モニタリングと遠隔操作、データ伝送、
テレメトリ、潮流、土砂崩れ、地質調査（傾斜、地すべり）、登山者遭難防止、
自然環境データ監視、ウェアラブル、人流データ、トラッキング（海）、鳥獣監視、
わな監視、鳥獣捕獲（ニホンジカ）のためのわなの動作確認、動物追跡、電力・設備
監視

質問 13 質問 11 に示した当該システムの概要の中で、変更すれば採用が促進される項目はありますか。具体的な変更内容があればお書きください。

（複数回答可）

周波数	出力	占有周波数帯域幅	チャンネル数	キャリアセンス	通信時間制限	呼出名称記憶装置	変調方式
1	3	4	4	2	3	0	0

データ量	上空利用	無線局免許	電波利用料	アンテナ利得	アンテナ高	ない	わからない
6	2	6	6	3	1	2	6

具体的な変更内容（ 広帯域、多 CH 化、免許不要化、電波利用料無料が望ましい、
LoRa®は伝送速度が遅いため、有事の通信時間制限緩和案
到達確認・エラー処理、消費電力低減、通信局の拡大、同期スリー
プ付きのメッシュネットワーク、わかりやすい API とサンプルコード、
テレコンとロースシステムと重ならない周波数 ）

質問 14 質問 11 に示した当該システムの無線機は、1 台どの程度の価格であれば使用されますか。販売されている場合、どの程度の価格が見込まれますか。最も近いものをお選びください。

初期費用（無線機 1 台あたり）

¥10,000	¥50,000	¥100,000	¥100,000 以上	その他
7	9	4	1	0

通信料（1 ヶ月あたり）

¥0	¥1,000	¥5,000	¥10,000 以上	その他
12	9	0	0	1

年間保守費

¥0	¥10,000	¥50,000	¥100,000 以上	その他
11	4	2	2	1

質問 15 質問 11 に示した当該システムに限らず、導入を希望される無線システムがあれば、その要件・仕様を自由回答でお書きください。

(例. x x x (場所) で使用できる無線、 x x x bps で x x km 届く無線、
免許不要の無線、 x x x MHz を使用する無線 など)

あり	なし
5	1 2

自然公園など土地に起伏があり、木が多く茂っている場所でも使える
無線技術があれば使いたい。

中山間地域で画像伝送できる無線 (候補: Wi-Fi HaLow)

長距離かつマルチホップ通信できる無線 (候補: プライベート LoRa®)

省電力かつリアルタイム通信できる無線

電池で長期間駆動可能な無線、妨害電波等モニタできる無線モジュール

伝搬実験等にて使用可能な免許不要の無線

遠隔地域で 1Mbps 以上の画像伝送が可能なもの、通信距離 1 k m 以上

既存システムへの影響のない無線

2. 3 ニーズ調査結果の考察

現在使用されているテレメータシステムについて、回答数が多い項目をまとめると表2-1の通りとなった。

表2-1 現在使用されているテレメータシステム アンケート結果

使用業種	農業、製造業、その他
使用システム	920MHz帯 (LoRa®)、LTE (4G)
通信距離	10～100m、100～500m、1～3km
通信頻度	10分に1回、1時間に1回
データ量	100Byte
価格	初期費用¥100,000以上、通信料¥0、年間保守料¥0
不満点	電波が届かない、チャンネル数が少ない、回線速度が遅い、送信時間制限がある、なし、

現在使用されている業種は農業が最も多く、次いで製造業、その他となった。

使用システムは、920MHz帯 (LoRa®) やLTE (4G) の回答が多かった。なお、特定小電力、簡易無線・業務無線、キャリア系で分けて集計した結果を表2-2に示す。

表2-2 使用システムの回答数

特定小電力無線局	簡易無線・業務無線	キャリア系
37	6	24

特定小電力無線局が最も多いが、キャリア系も多く使用されていることが分かる。

通信距離については、10～100m、100～500m、1～3kmが同数となった。100m前後から1km前後の、短中距離での使用が多いと考えられる。

通信頻度については、10分に1回が最も多く、次いで1時間に1回となった。時間をおいての間欠通信での利用が多いと考えられる。

データ量について、100Byteが最も多く、次いで10Byteとなったが、100Byteの回答数の割合が高く、100Byte以下での利用が多いと考えられる。

価格について、初期費用¥100,000以上が最も多く、次いで¥10,000となった。高価格のシステムと、低価格のシステムに分かれていることが考えられる。

通信料については、¥0が最も多く、次いで¥1,000となった。なお、質問3にて使用中の通信方式を質問しているが、通信料が必要なシステムと無料のシステムで仕分けると、表2-3の回答数となる。

表2-3 通信料が必要なシステムと無料のシステムの回答数

通信料が必要なシステム	通信料が無料なシステム
Sigfox、ELTRES、LTE（4G）、5G、3G、LTE-M、MCA	左記以外のシステム
35	30

回答数としては、通信料が必要なシステムの方が多くなっている。質問7の設問が最も近いものを1つ選ぶ形となっているため、¥0が最も多くなった可能性があり、実際には通信料を支払っているシステムが多いと考えられる。

年間保守料について、¥0が最も多く、次いで¥100,000以上、その他となった。公共業務用は、費用をかけて保守を行っているとの回答が見られた。民間用途では、保守費はかけていないことが考えられる。

不満点については、電波が届かないが最も多く、次いで回線速度が遅い、送信時間制限がある、の回答となった。電波が届かないことについては、現行システムの出力では電波が弱

く、到達できないことや、LTE などキャリア系のエリア外のため使用できないことが、多く発生していると想定される。回線速度が遅い、送信時間制限があるについては、大きなデータを通信したり、常時通信したいニーズも一定量あることを示している。

現在検討中の 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムにおいては、これら現在使用中のシステムの仕様にも対応できるようにすることが望ましい。また、不満点についても対応すると、現行システムからの移行需要も見込むことができる。

次に、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムについて、回答数が多い項目をまとめると表 2-4 の通りとなった。

表 2-4 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム アンケート結果

採用可能性		
ある	ない	わからない
9	6	22

想定される使用業種	農業、林業
変更すれば採用が促進される項目	データ量、無線局免許、電波利用料、わからない
価格	初期費用¥50,000、通信料 ¥ 0 ~ ¥ 1,000、 年間保守料 ¥ 0 ~ ¥ 10,000

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの採用可能性について、「わからない」が最も多い回答となった。これは、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムについて、具体像を十分にお伝えすることができなかったことが原因の一つと考えられる。特に、想定される使用業種についての回答で、農業の次に林業が挙げられており、林業関係のニーズについて掘り起こしを行えば、採用可能性が高くなることが考えられる。

変更すれば採用が促進される項目として、データ量の回答が多く、アンケートで提示した「1~数 10 Byte 程度」よりも多いデータ量が求められている。なお、これは、現在使用さ

れているデータ量は 100Byte の回答が多かったことから、1～数10Byte 程度では不足と判断された可能性がある。

また、無線局免許や電波利用料についての回答も多く、これらが導入の際のハードルになると受け止められている。現状、すぐに無線局免許や電波利用料を無しとすることは困難であり、将来的な課題と考えられる。直近では、無線局免許申請書の記入例などをまとめた免許申請の手引きを作成し、免許申請の負担を低減するサポートを行う方法も考えられる。

費用について、特に初期費用は、現在使用中のシステムより安価な¥50,000 の回答が最も多くなった。400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムについては、現行品よりも安価な構成が可能なシステムとすることが求められる。

通信料についても、¥0 が最も多く、次いで¥1,000 の回答となり、安価もしくは無料であることが求められている。

年間保守料は、¥0 が最も多く、次いで¥10,000 の回答となった。こちらについても安価もしくは無料であることが求められている。

アンケート結果から、「中山間地域に有効な 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム」に求められる事項と、求められる事項を実現するために必要な要検討事項をまとめると、表 2-5 に示す内容になると考えられる。

表 2-5 「中山間地域に有効な 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム」に求められる事項と要検討事項

項目	求められる事項	要検討事項
使用業種	農業、林業	特に林業で適用可能な用途の検討
通信距離	10～100m、100～500m、 1～3 km	通信距離を確保するために必要な 空中線電力など仕様の検討
通信頻度	10分に1回～1時間に1回	通信頻度を確保できる仕様の検討
データ量	100 Byte 程度	データ量を確保できる仕様の検討
価格	初期費用¥50,000、 通信料¥0、 年間保守料¥0	初期費用低減が可能なシステム 構成の検討
改善希望	電波が届かない、 回線速度が遅い、 送信時間制限がある、 無線局免許、電波利用料	空中線電力など仕様の検討 必要とされる回線速度や送信時間の把握 と仕様の検討 免許申請負担低減サポートなどの検討

2.4 今後有効とみられるニーズについての調査

アンケート調査では個別聞き取りを要するニーズは出なかったが、調査検討会内での議論や本技術を一般の方々に紹介する等の活動を行い、今後有効とみられるニーズを調査し、特にニーズが期待できるものについて、個別に聞き取り調査等を実施した。

2.4.1 造船業 DX に対するニーズ

新造船建造量で見ると、日本の造船業は 1990 年代には世界の 4 割近くのシェアを占め、現在でも中国、韓国に次いで世界トップシェアを誇っており、その 7 割近くが瀬戸内海地域に集中している。この造船業においては DX 化に注力・物流システムのデジタル化・高度化を進められている。

船体の建造は、一カ所で一度に建造するのではなく、船体を複数の部分（船体ブロック）に分けて離れた工場で作成し、最後に造船所に集めてつなぎ合わせるブロック工法が採用されている。船体ブロックは、陸地や島しょに分散された工場を移動しながら製作されるた

め、陸上間での移動にはトレーラーに、島しょ間での移動にはタグボートに、クレーンによって載せ替えて移動させる。船体の製造工程管理のために、この船体ブロックがどこにあるのか、どのような状態なのか一括管理したいが、船体ブロックは広範囲に離れた工場にて分散しており、船体ブロックを一元管理するための通信技術が課題となっており、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムに期待が持てることが、聞き取り調査により判明した（図2-1）。

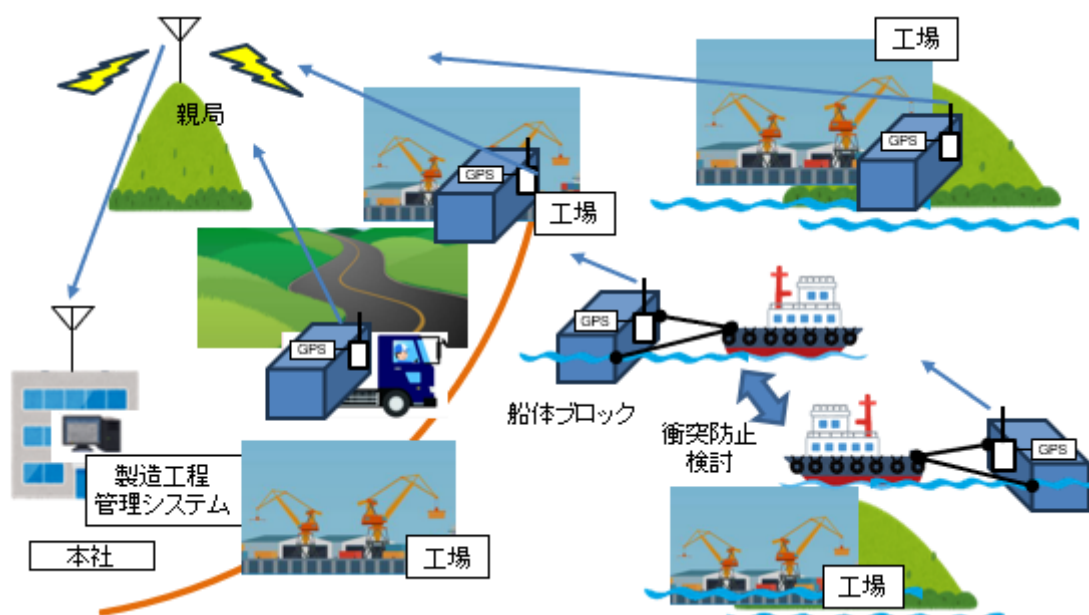


図 2 - 1 船体ブロッケー一元管理システムの概要

瀬戸内海には離島が点在するため、島影になるエリアをカバーするためには電力の増力も有効であると考えられ、本システムの活用が有効な手段として考えられる。一方で、本調査検討では、山間部に囲まれた限定的なエリアの中での利用を想定し、なるべくキャリアセンスを使用しない安価なシステム構築を目指した技術的条件案を取りまとめる方向で検討を進めてきたことから、海上に向けて視野の開けた沿岸部で伝搬距離が大幅に伸び、収容する子局の局数が増加することが見込まれる環境においては、あらためて運用条件を明確にし、実現可能性や効果について検討を行う必要がある。

また、ハードウェアとしても、今回は1Wの出力を出すために、パワーアンプを外付けとして増力を行ったが、今後、こういったニーズに対応するためには、安価で利便性の高いハードウェアの実現が必要となる。パワーアンプなど必要な装置を一体化した高出力無線モ

ジュールを開発し、技適も取得可能とすれば、安価で利便性が高まるため、これらの開発も望まれる（図2-2）。

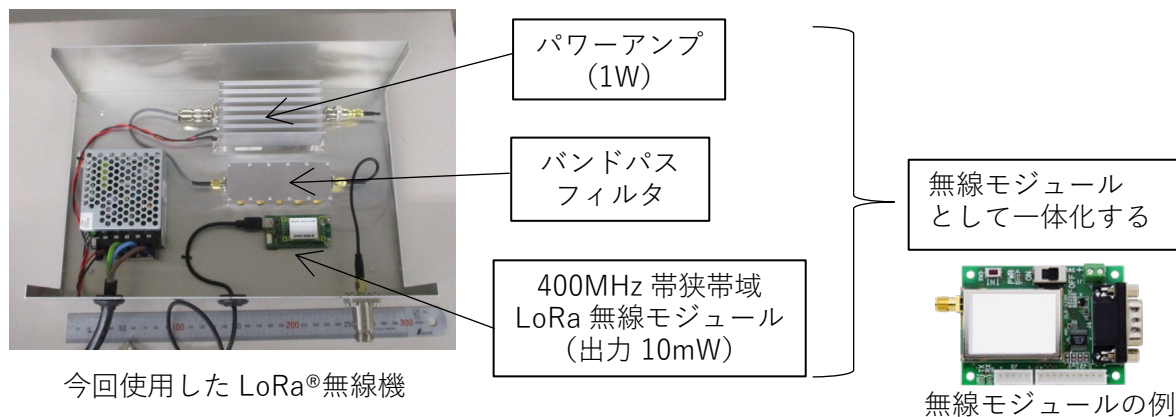
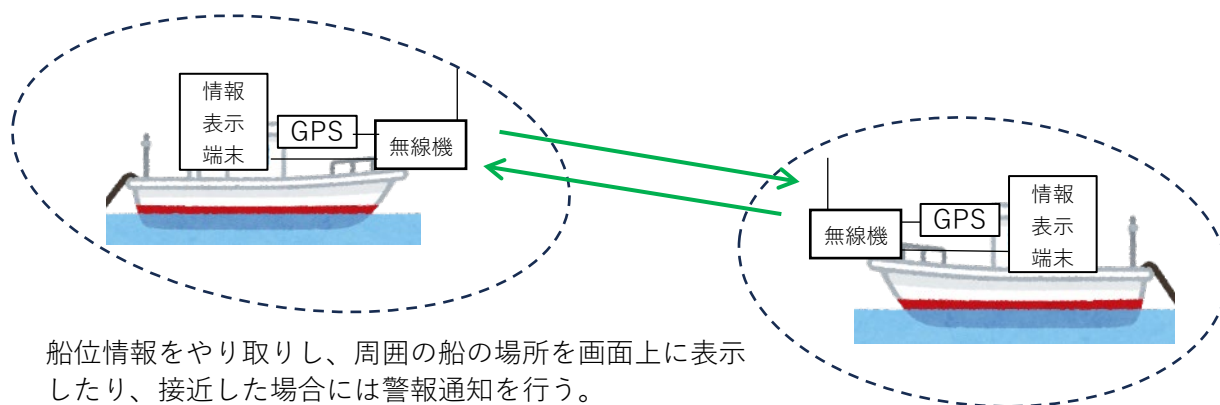


図2-2 開発が望まれる無線モジュールの概要

2. 4. 2 船舶の衝突防止対策に対するニーズ

知床遊覧船沈没事故を契機として、小型船舶の安心・安全の確保は喫緊の課題である中で、瀬戸内海においても小型船舶の衝突事故が多発しており、小型船舶の衝突防止対策として本システムに期待が持てることが、聞き取り調査により判明した（図2-3）。

一方で、2. 4. 1と同様に沿岸部での利用となること、安全確保に関する諸々の条件に適合させる必要があるか等の検討等が必要と考えられることから、今後の導入に向けては、あらためて運用条件を明確にし、実現可能性や効果について検討を行う必要がある。



船位情報をやり取りし、周囲の船の場所を画面上に表示したり、接近した場合には警報通知を行う。

図2-3 小型船舶衝突防止システムの例

2. 4. 3 林業に対するニーズ

本検討成果を四国総合通信局主催のICT技術勉強会（令和6年2月22日、愛媛県松山市）に出展・展示を行ったところ、林業等への活用を目的として現在運用されている山間部での920MHz帯LPWAを活用した通信ネットワークの設備更改に対して、本システムの有効性に関心が寄せられた（図2-4）。今後、具体的なニーズが出てきた場合には、導入に向けた制度化検討が期待される。

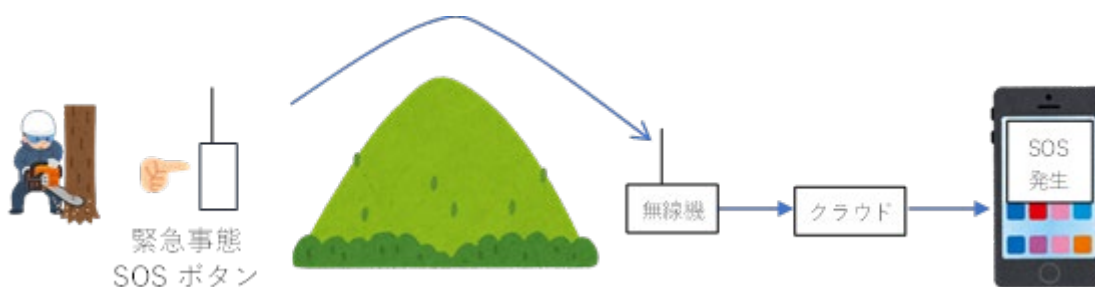


図2-4 林業での緊急通報システムの例

2. 4. 4 その他のニーズ

本調査検討会会合において、構成員・オブザーバーから以下のようなニーズに400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムが使用できるのではないかと御指摘を頂いた。

- 中山間地域の防災、災害対策、防災行政無線の代替、インフラ管理点検
- 人流測定（センサを設置してカウント結果をLoRa®にて送る）
- 水田の水位測定、果樹の水分状態に応じて水を遠隔で与える仕組み
- 狭い中山間道路の対向車表示の信号伝達

第3章 諸元・運用条件案（一次案）作成

本調査検討の実施にあたっては、提案システムについて、導入検討が進められている現地（高知県内）での聞き取りやニーズ調査等により、使用用途、使用目的、使用場所、導入予定時期、サービス利用者、通信距離、通信頻度、送信データ量、送信間隔（時間）、必要チャンネル数、許容遅延量等の要求条件を整理し、その実現のために必要となる無線システムの諸元・運用条件として、空中線電力、電波型式、通信方式、隣接チャンネル漏洩電力、周波数偏差、占有周波数帯幅、不要発射の強度（帯域外領域とスプリアス領域）、空中線利得、給電線損失、アンテナ指向性、アンテナ高、許容干渉電力、許容感度抑圧電力、受信感度（SF値（SpreadingFactor、拡散率）ごとの受信感度の関係を検討すること）、周波数共用技術（キャリアセンス、送信時間制限、1時間あたりの送信時間の緩和）等を検討し、提案システムの諸元・運用条件等の一次案としてとりまとめを行った。

3. 1 基本コンセプト案

ニーズ調査のためのアンケート結果を受けて、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの基本コンセプトを「中山間地域で使用可能な廉価通信システム」と定めた（図3-1）。中山間地域での小規模なデータ収集に好適で、廉価なシステム構成を可能とすることを目指して検討を行った。

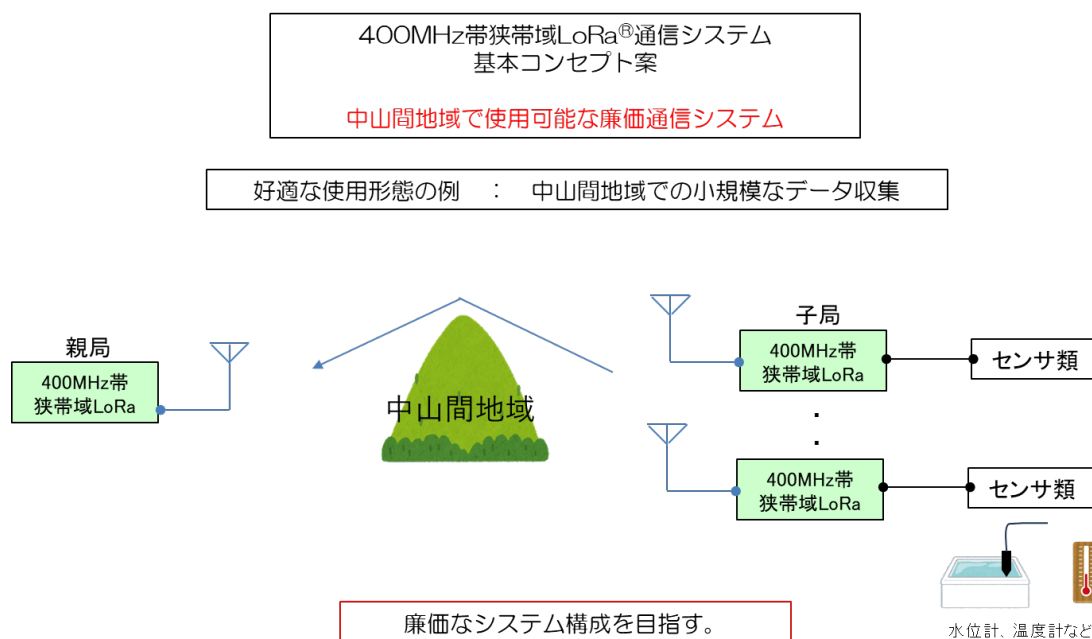


図3-1 基本コンセプト案

3. 2 構成例

基本コンセプトに沿った構成例を図3-2に示す。中山間地域で水位センサや温度センサなどのデータを送るシステムである。使用するセンサの種類については、電圧データやテキストデータが出力されるセンサであれば、水位や温度に限定されずその他のセンサにも対応可能である。ただし、音声や映像など大容量データの伝送には適さないシステムとなる。PCについては、市販の安価なPC（Raspberry Pi）を使用可能であり、市販品を使用した廉価なシステムとする。特殊な部品を使用せず、導入時期についてもすぐに導入可能なシステムとする。

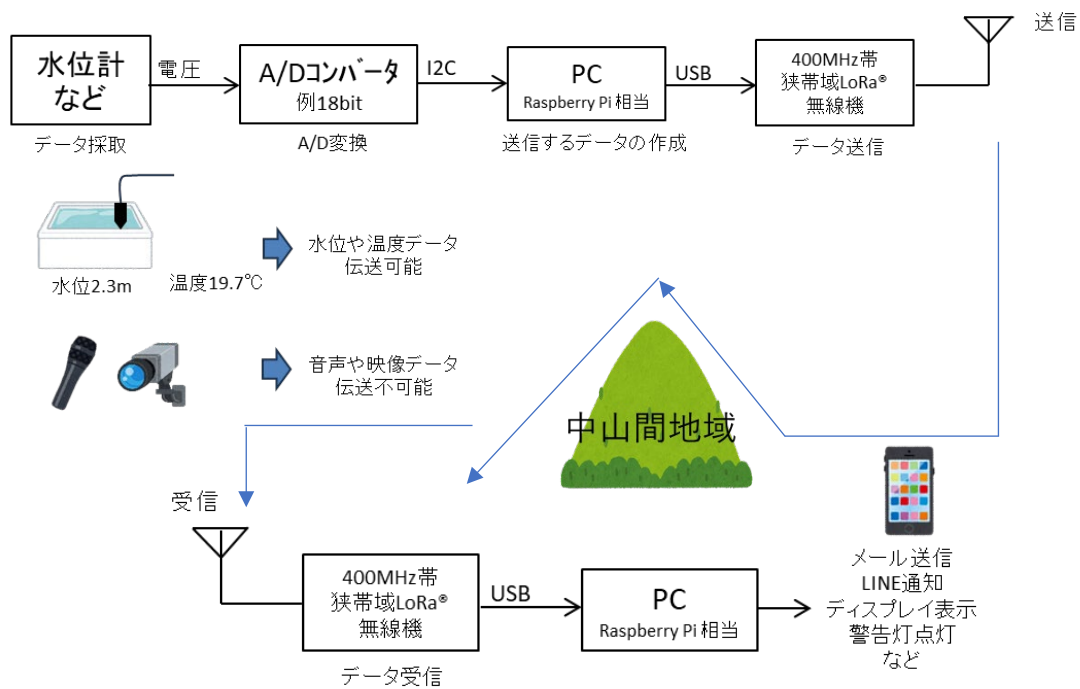


図 3-2 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム 構成例

3.3 変調方式

本システムでは、変調方式に LoRa®を使用する。変調方式とは、電波に情報を載せるための方式を指しており、AM（振幅変調）や FM（周波数変調）などの方式がある。LoRa®は、送信する電波の周波数を連続的に変化（スイープ）させながら通信を行う変調方式であり、送りたい情報に応じて、スイープの開始周波数と終了周波数を変化させている（図 3-3）。IoT 機器において数多く使用されており、第 2 章のニーズ把握においても、通信方式で最も多い回答数となっている。高感度で雑音に強いいため長距離通信が可能とされており、山などで電波が遮られる中山間地域での使用はふさわしいと考えられる。

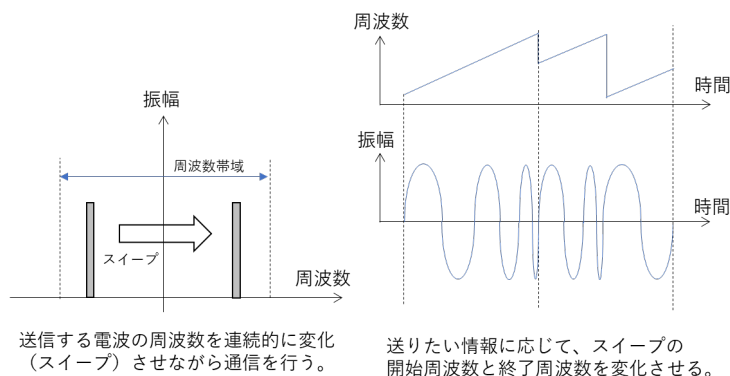


図 3-3 LoRa®変調の原理

3. 4 諸元・運用条件案（一次案）

諸元・運用条件案については、基本コンセプトを満たしつつ、必要とされる機能を実現するための条件と、周波数共用の条件も満たす必要がある。一次案として表3-1の内容で制定を行った。以下、これらの条件の中で、制定に当たって特に検討が必要な条件として、表3-2に示す条件が考えられる。詳細を次項に示す。

表3-1 諸元・運用条件案（一次案）

システム名	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
周波数	400MHz 帯
出力	1W
占有周波数帯域幅	最大 8.5kHz
チャンネル数	未定
キャリアセンス	あり 詳細については要検討
送信時間制限	90 秒以内
呼出名称記憶装置	規定なし
変調方式	LoRa® (429MHz 特定小電力 LoRa®と同じ)
電波の型式	F1D
データ量（1回の通信あたり）	小容量 50~100 B y t e なお 100 B y t e 以上も可能
通信頻度	1日1回~1時間に1回程度 多くとも10分に1回程度
通信方向	単方向を基本とし、双方向も可能とする
上空利用	未定
無線局免許、無線従事者電波利用料	必要 陸上移動局 400 円/年
到達距離	中山間地域で、ひと山を超える距離 1~2km 程度を想定
無線局の目的	一般業務用小容量テレメータシステム 中距離自営回線を想定 親局1局⇄子局1~3局、多くても10局程度

表 3-2 特に検討が必要な条件

	条件	内容
①	1システム当たりの局数	何局の子局からデータ収集を行うのか
②	通信頻度	子局から、何秒・何時間ごとにデータ収集を行うのか
③	データ量(1回の通信あたり)	子局が送るデータの量
④	通信方向	単方向か双方向か
⑤	送信時間	データ量と、設定した LoRa®拡散係数の値から求められる
⑥	出力	中山間地域で通信距離が確保できる値が必要
⑦	キャリアセンス	他局から電波が送信されていないこと確認してから送信する機能 干渉回避のために使用される

3. 5 特に検討が必要な条件

3. 5. 1 1システム当たりの局数

局数を増やすと、多地点のデータ取得が可能になるが、周波数共用のためには1局当たりの通信時間を短くしたり、衝突回避の仕組みを行う必要が出てくる(図3-4)。また、電波利用料も増える。想定される使用例(農業での貯水槽での水位監視)から推定し、1システム当たりの局数を親局1局⇔子局1~3局、多くても10局程度とした。数局程度の小規模システムへの適用が好適と考えられる。

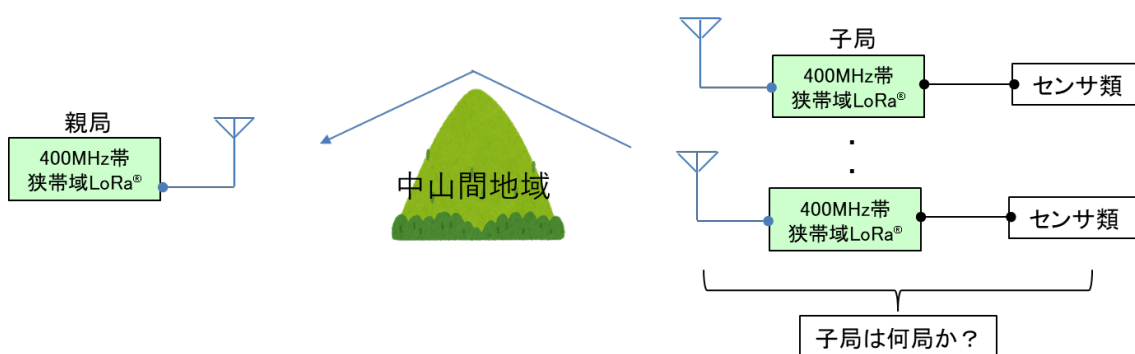


図3-4 1システム当たりの局数

局数が増えると、各子局が同時送信して衝突(干渉)が発生し、通信不能となる可能性が出てくる。干渉を防ぐためには、干渉回避の仕組みを行う必要が出てくる(図3-5)。仕組みの例として、子局の時計を参照し、定められた時刻に送信する、親局から時刻情報を送信し、子局間で同期を取る、定められた時間に順番に子局が送信する、親局からの送信許可を得た子局のみ送信を行う、親局が順番に子局を指定して通信を行うなどの方法がある。今回の基本コンセプトに沿って、複雑な干渉回避を必要とされない、数局程度の小規模システムへの適用が好適と考えられる。

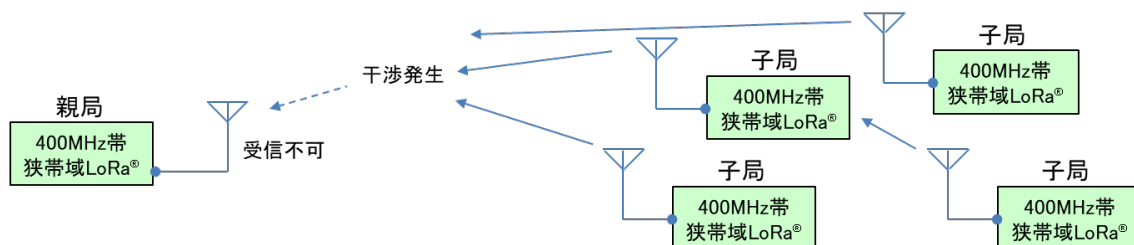


図3-5 同時送信衝突(干渉)

3. 5. 2 通信頻度

通信頻度を増やすと、データ推移の把握が可能となる。変化の時間変化が多い場合は、通信頻度を増やす必要がある。しかし、周波数を他局と共用するため、高頻度の送信の場合、他局と干渉する可能性（他局へ妨害を与えたり、他局から妨害を受ける可能性）が高くなり、常時送信や高頻度の送信は好ましくない場合もあり得る（図3-6）。

想定される使用例（農業での貯水槽での水位監視）から通信頻度を、1日1回～1時間に1回程度 多くとも10分に1回程度とした。

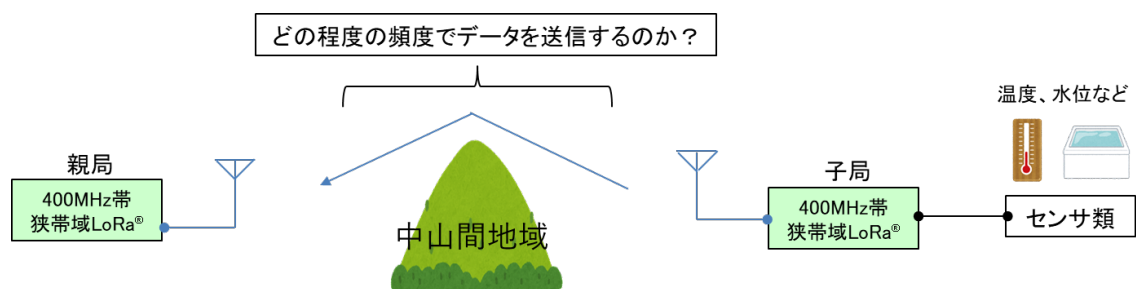


図3-6 通信頻度

3. 5. 3 データ量

データ量を増やすと、詳細なデータ伝送が可能となる。しかし、データ量が多くなると送信時間が長くなる。周波数を他局と共用するため、他局と干渉する可能性が高くなり、常時送信や高頻度の送信は好ましくない場合もあり得る（図3-7）。

想定される使用例（農業での貯水槽での水位監視）から、データ量を50～100Byteとした。なお100Byte以上も送信可能であるが、データ量が多くなる場合は、拡散係数を小さくし、送信時間を短くすることが望ましいと考えられる。このため、データ量が特に大きい画像や静止画、音声の伝送には適さない。また、使用する無線モジュールによっては、1回の送信あたりのデータ量に制限が設けられており（例、235Byteまで）、データ量が多い場合、複数回に分けて送信する必要がある。

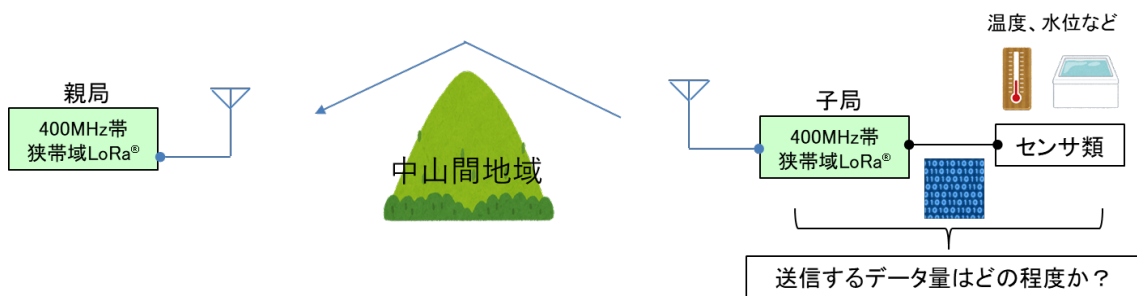


図3-7 データ量

データの例として、水位計の場合を図3-8に示す。水位や温度など、送信するデータの種類や、年月時分、測定場所を示すテキスト文などで構成されており、97Byteで必要な情報が構成されている。なお、年月日時分ではなく送信番号にしたり、測定場所表示を簡略化することなどで、データ長を短くすることは可能となっている。

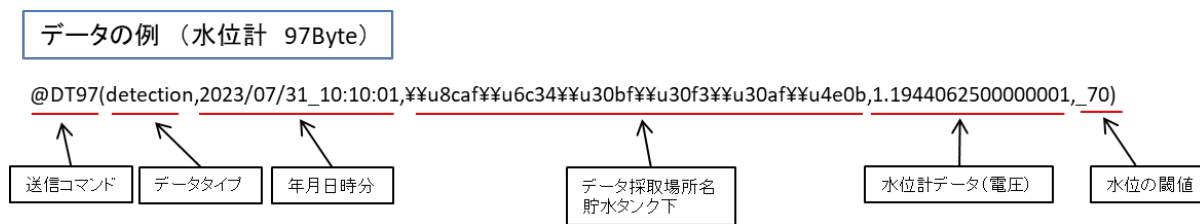


図3-8 水位計データ例

3. 5. 4 通信方向

通信方向には単方向（子局から親局方向）と双方向があるが、子局が少ない場合は、単方向でもデータ収集は可能と考えられる。子局が増えて親局からの送信制御が必要な場合や、親局がACK（確認応答）を返す場合には、双方向とすることで、通信の信頼性が上がる。ただし、双方向になると通信量が増えるため、送信時間が長くなり、周波数共用に影響が出てくる。また、双方向とするとシステムが複雑となり、コストが上昇する可能性が出てくる（図3-9）。

想定される使用例（農業での貯水槽での水位監視）から、通信方向は単方向（子局から親局への送信）を基本とし、双方向も可能とした。

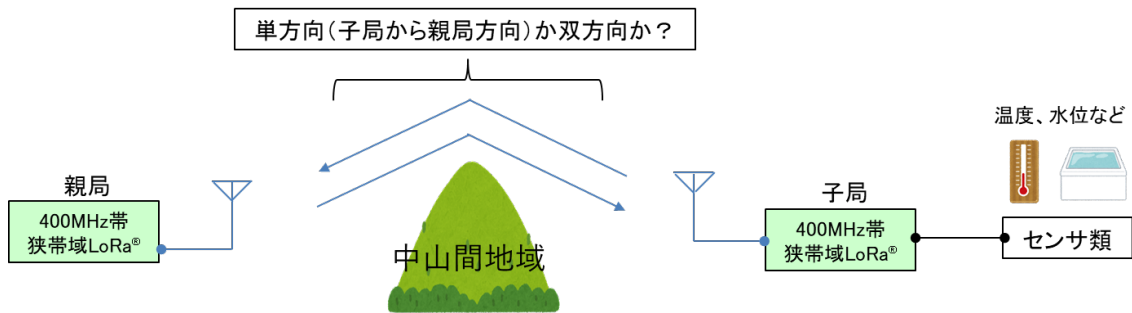


図3-9 通信方向

単方向で通信が失敗する例としては、子局が同時に送信して干渉（衝突）が発生した場合や、親局が受信に失敗して、それを子局が把握できない場合が考えられる（図3-10）。双方向通信とし、親局が子局に対して送信許可を与えてから子局が送信を行う対策が考えられるが、子局数が少ない場合は、同時送信の可能性は低くなる。また、子局側は同じ電文を複数回送信することで、受信失敗の可能性を下げる方法も考えられる。

このため、農業での貯水槽での水位監視など、小規模なシステムを想定し、通信方向は単方向を基本とし、双方向も可能な、低廉なシステムとすることとした。

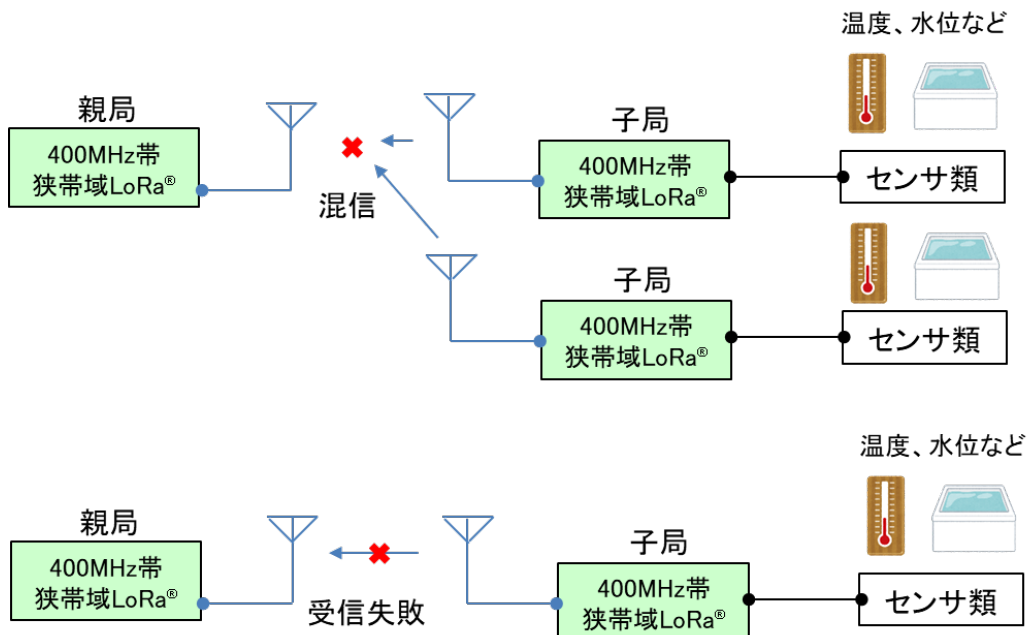


図3-10 通信失敗の例

3. 5. 5 送信時間

送信時間を長くすると、送るデータ量を多くすることができる。しかし、送信時間が長くなると他局と干渉する可能性が高くなる。また、LoRa®特有の問題として、拡散係数を大きくすると送信時間が長くなる（図3-11）。

想定される使用例（農業での貯水槽での水位監視）から推定し、送信時間90秒以内とした。なお、子局数が多い、通信頻度が高い場合は、送信データ長を短くする対策も考えられる。または、拡散係数を小さくして送信時間を短くする対策も考えられる。

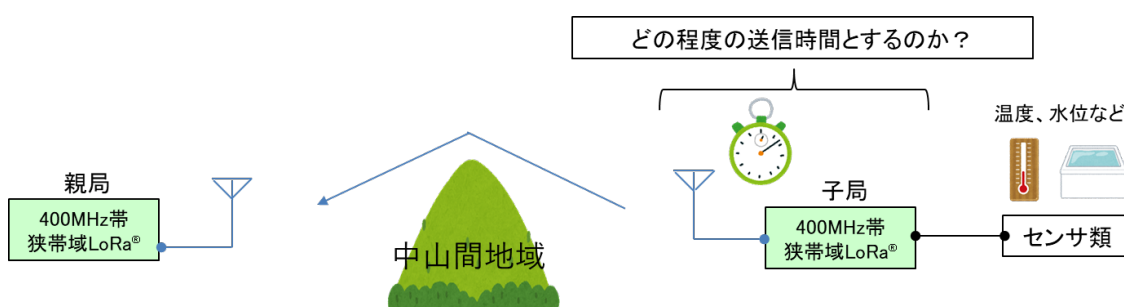


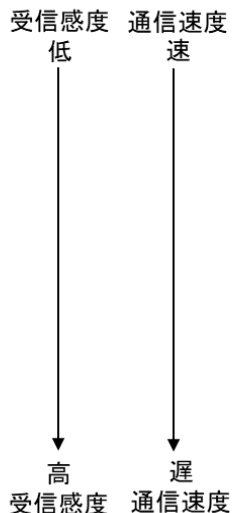
図3-11 送信時間

LoRa®拡散係数と送信時間には、以下の関係がある。LoRa®は拡散係数という設定があり、拡散係数を大きくすると、受信感度がよくなるが、通信時間が長くなるようになる（表3-3）。例えば100Byte送る場合、最も大きい拡散係数12の場合で、78.8秒の送信時間が必要となる。拡散係数を大きくした方が受信感度はよくなるため、中山間地域での通信には有利だが、通信時間がかかる。子局数が1、2局で、通信頻度が1時間に1回程度あれば問題ないが、子局数が多い場合や通信頻度が高い場合は、子局が同時送信して通信が衝突する可能性が出てくる。子局数が多い、通信頻度が高い場合は、送信データ長を短くする対策が必要なことも考えられる。または、拡散係数を小さくして送信時間を短くする対策も考えられる（表3-4）。

表 3 - 3 LoRa®拡散係数と送信時間の関係

送信データ長が100Byteの場合

拡散係数 Chip数	通信速度	電波の送信時間
7 (128chip)	245bps	4.7秒
8 (256chip)	146bps	7.9秒
9 (512chip)	86bps	13.8秒
10 (1024chip)	49bps	24.3秒
11 (2048chip)	27bps	43.3秒
12 (4096chip)	15bps	78.8秒



送信データ長が100Byteの場合、機器識別コードや制御コマンド等で15Byte必要なため、無線区間では115Byteの送信を行う。

拡散係数が大きくなると受信感度がよくなり、遠方との通信が可能となるが、通信時間がかかる。

表 3 - 4 LoRa®拡散係数と送信データ長ごとの送信時間

		送信データ長						
		10Byte	25Byte	50Byte	75Byte	100Byte	150Byte	200Byte
拡散係数	SF=7 chip128	1.7秒	2.2秒	3.0秒	3.9秒	4.7秒	6.3秒	8.0秒
	SF=8 chip256	3.0秒	3.8秒	5.3秒	6.6秒	7.9秒	10.7秒	13.4秒
	SF=9 chip512	5.3秒	6.6秒	9.2秒	11.5秒	13.8秒	18.4秒	23.0秒
	SF=10 chip1024	9.9秒	11.8秒	16.4秒	20.3秒	24.3秒	32.8秒	40.7秒
	SF=11 chip2048	17.1秒	22.3秒	28.9秒	36.8秒	43.3秒	57.7秒	73.5秒
	SF=12 chip4096	31.6秒	39.5秒	52.6秒	65.7秒	78.8秒	105.0秒	131.2秒

上記送信時間には、機器識別コードや制御コマンド等15Byteを送信する時間を含む。

青色網掛け: 90秒を超える

また、参考に既存システムの送信時間の例を表3-5に示す。既存システムにおいて、制限なし（連続送信可能）なシステムもあるが、例えば、429MHz帯特定小電力の一部のチャンネルでは、40秒送信の制限が設けられている。

表3-5 既存システムの送信時間の例

既存システム		送信時間	占有周波数帯幅
426MHz帯特定小電力 (テレメータ、データ伝送用)	ARIB STD T67	40秒送信、2秒休止	5.8kHz、8.5kHz、 16kHz
426MHz帯特定小電力 (テレコントロール、データ伝送用)		5秒送信、2秒休止	
429MHz帯特定小電力の一部の チャンネル		チャンネルによって異なる 40秒送信、2秒休止 制限なし(連続送信可能)	5.8kHz、8.5kHz
429MHz帯特定小電力の周波数 制御チャンネル		0.2秒送信、2秒休止	
920MHz帯特定小電力	ARIB STD T108	4秒送信50m秒休止 0.4秒送信4秒休止 など	200kHz、最大 4MHz
1200MHz帯特定小電力の一部の チャンネル	ARIB STD T67	チャンネルによって異なる 40秒送信、2秒休止 制限なし(連続送信可能)	8.5kHz、16kHz、 32kHz
1200MHz帯特定小電力の周波数 制御チャンネル		0.2秒送信、2秒休止	
デジタル簡易無線登録局	ARIB STD T98	5分送信、1分休止	5.8kHz

さらに、別の考え方（参考）として、高知の農家の皆様がこのシステムを採用された場合に、送信時間が確保できるかという観点もありえる。例として、総農家戸数と中山間地域の面積から、半径1km（3.14km²）あたりの戸数を求めて送信可能な時間を計算した場合、1時間に1回送信するという条件では95.2秒となった。あくまで、計算上の参考値となる（図3-12）。

令和4年度 高知県農業の動向2020年次 総農家数 19,924戸 ←中山間地域以外の農家も含まれる 高知県の中山間地域6,623km ² ←高知県面積の約93% 中山間地域1km ² あたり3.01戸 半径1km(3.14km ²)あたり9.45戸、 半径2km(12.56km ²)あたり37.8戸 半径5km(78.5km ²)あたり236.3戸	半径1km(3.14km ²)あたり9.45戸 (中山間地域では、1km範囲内に山があり、見通し外になると考えられる) 1戸あたり、親局1局+子局3局とすると、全局数は 9.45戸×4局=37.8局 全局が1時間に1回送信するとすると、1回あたりの送信時間は 3600秒÷37.8局=95.2秒 ※あくまで計算上の値。
--	--

図3-12 農家数と面積から求めた計算例（参考）

3. 5. 6 出力

送信出力が小さいと、中山間地域で十分な通信距離が確保できないが、送信出力を大きくすると、他局への干渉が増える。周波数を他局と共用するため、ある程度の制限は必要となる（図3-13）。

想定される使用例（中山間地域で、ひと山を超える距離、1~2km程度を想定）から、送信出力1Wとした。

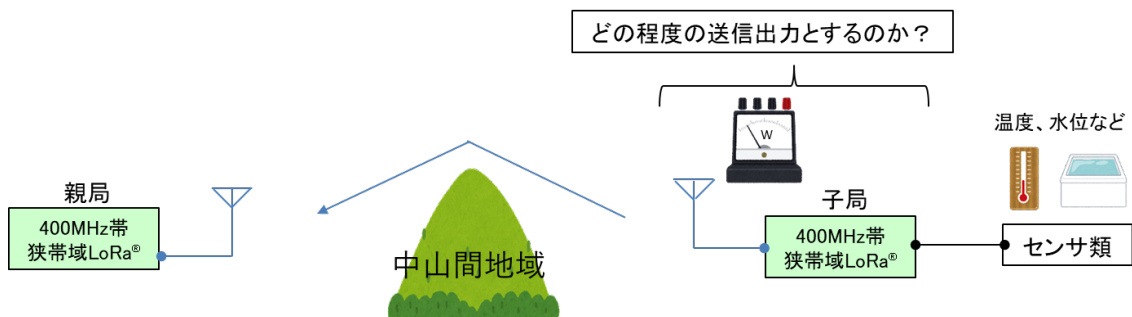


図3-13 出力

送信電力1Wについて、中山間地域で一山を超える場合を想定して、受信可能かどうか計算を実施した。図3-14のようにリッジ（山の尾根）が途中にあるモデルとし、計算式など条件については、過去の情報通信審議会情報通信技術分科会小電力システム委員会の値に準拠して実施した。

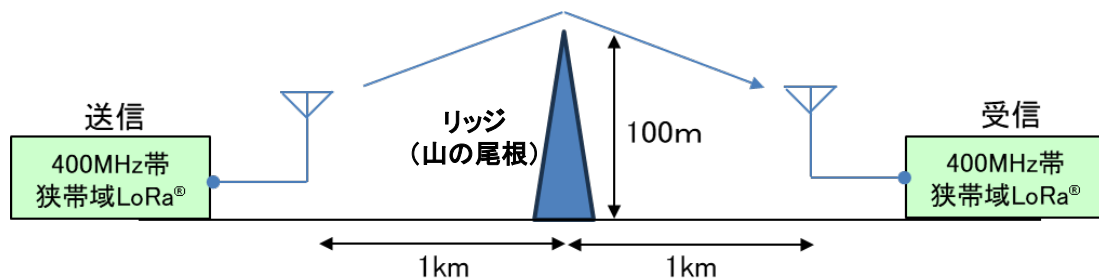


図3-14 計算モデル

自由空間損失の計算式、秦の損失計算式、回折損失の式は、情報通信審議会情報通信技術分科会小電力システム委員会 小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件 平成20年3月 資料集 資料6 P45、47の式を使用した。

周波数は 414.8MHz とし、各種条件は、情報通信審議会情報通信技術分科会 小電力システム委員会 小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件平成 20 年 3 月 資料集 資料 6 P39 の値を使用した。

送信アンテナ利得 2.14dBi、送信アンテナの高さ 30m、給電線損失 3.5dB、アスタ損失 0.6dB、受信アンテナ利得 2.14dBi、受信アンテナの高さ 1.5m、給電線損失 1.0dB、場所率マージン 3.0dB、複局干渉 5.0dB、

まず、比較のためにリッジ（山の尾根）が無い場合（図 3-15）について、受信電力の計算を実施した。結果を表 3-6 に示す。この例では 2 km 離れた場合となるが、400MHz 帯狭帯域 LoRa®や、429MHz 帯特定小電力 LoRa®、既存システムの 4 値デジタル変調すべてで、受信レベルが基準感度以上になっており、通信可能となっている。

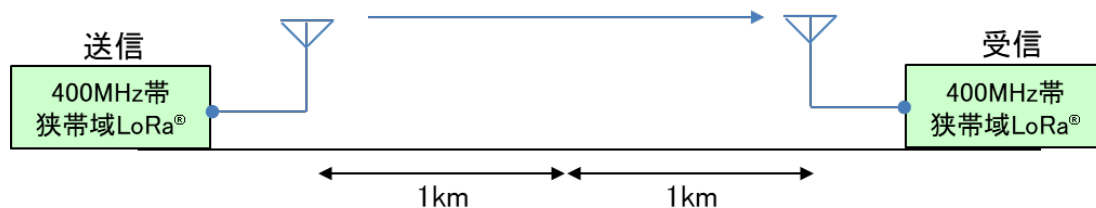


図 3-15 計算モデル（リッジなし）

表 3-6 受信電力（リッジなし）

システム名	基準感度	自由空間損失 にて計算	受信電力		
			秦の損失式にて計算		
			市街地(大都市/ 中小都市)	郊外地	開放地
400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数7	-134dBm	-69.6dBm	-106.8dBm	-100.2dBm	-79.9dBm
429MHz帯特定小電力 LoRa® 10mW 拡散係数7	-134dBm	-89.6dBm	-126.8dBm	-120.2dBm	-99.9dBm
4値デジタル変調 5W	-113dBm	-62.6dBm	-99.8dBm	-93.2dBm	-72.9dBm
4値デジタル変調 1W	-113dBm	-69.6dBm	-106.8dBm	-100.2dBm	-79.9dBm

受信電力は、すべて基準感度以上のため通信可能

次に、山が有る場合（表3-7）、山による損失（リッジ損失）が加算される。この例では中間地点に高さ100mの山が有る例としており、受信電力が基準感度を下回り、通信不能となる条件が出てきている。計算の条件によって、受信電力の値は異なるものの、郊外地の条件では、400MHz帯狭帯域LoRa®では通信できるものの、他のシステムでは通信できない計算結果となっている。このように中山間地でひと山を越えるためには、1W程度は必要と考えられる。

表3-7 受信電力（リッジ損失あり）

システム名	基準感度	自由空間損失 +リッジ損失にて 計算	受信電力		
			案の損失式+リッジ損失にて計算		
			大都市/中小都市	郊外地	開放地
400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数7	-134dBm	-99.9dBm	-137.1dBm	-130.5dBm	-110.2dBm
429MHz帯特定小電力 LoRa® 10mW 拡散係数7	-134dBm	-119.9dBm	-157.1dBm	-150.5dBm	-130.2dBm
4値デジタル変調 5W	-113dBm	-92.9dBm	-130.1dBm	-123.5dBm	-103.2dBm
4値デジタル変調 1W	-113dBm	-99.9dBm	-137.1dBm	-130.5dBm	-110.2dBm

網掛け部分は受信電力が基準感度を下回り、通信不可能

また、参考に既存システムの送信出力の例を表3-8に示す。特定小電力は10mWから20mW程度のシステムが多いものの、デジタル簡易無線では、登録局であるが1W以上のものが見られる。

表 3-8 既存システム送信出力の例

既存システム		送信出力
426MHz帯特定小電力 (テレメータ、データ伝送用)	ARIB STD T67	1mW
426MHz帯特定小電力 (テレコントロール、データ伝送用)		1mW
429MHz帯特定小電力の一部の チャンネル		10mW
429MHz帯特定小電力の周波数 制御チャンネル		10mW
920MHz帯特定小電力	ARIB STD T108	1mW、20mW
920MHz帯陸上移動局(登録局)	ARIB STD T108	250mW
1200MHz帯特定小電力の一部の チャンネル	ARIB STD T67	10mW
1200MHz帯特定小電力の周波数 制御チャンネル		10mW
デジタル 簡易無線登録局	ARIB STD T98	5W(陸上および日本周辺海域) 1W(上空)

なお、送信出力については、他局への干渉についても検討が必要となる。出力を上げると干渉が増えることについても検討が必要となる(図3-16)。

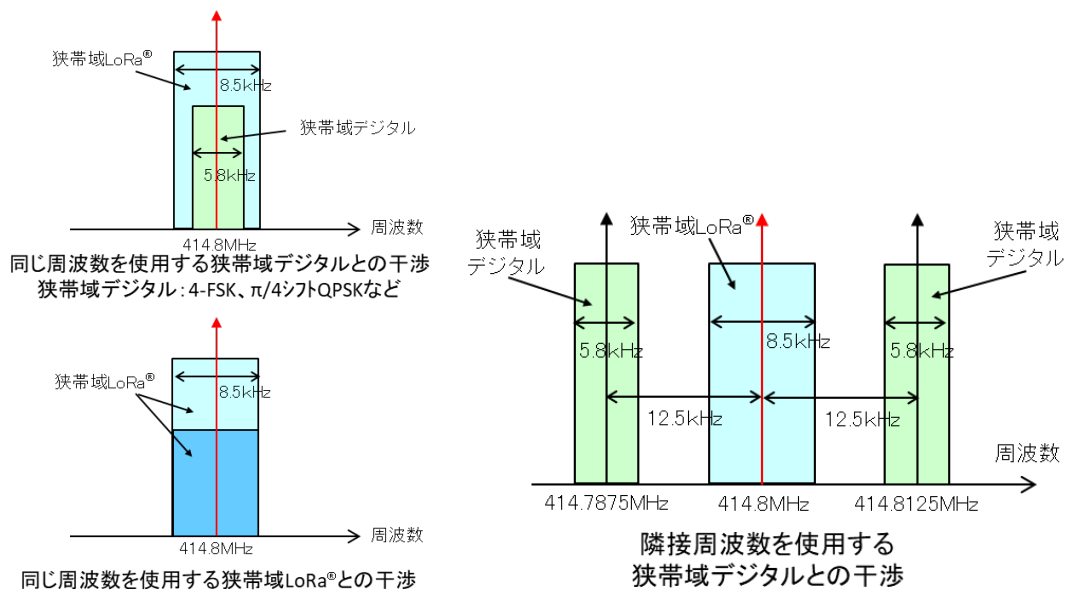


図 3-16 同一周波数、隣接周波数の干渉例

さらに、ドローンに搭載しての上空にて運用することも考えられるが、上空からの送信については、同じ周波数や隣接周波数を使用する他のシステムへの干渉が増えるため、慎重な検討が必要と考えられる（図3-17）。干渉低減のためには、例えば送信出力を下げるなどの対策が必要となる。なお、上空での受信は問題なく、実施は可能である。

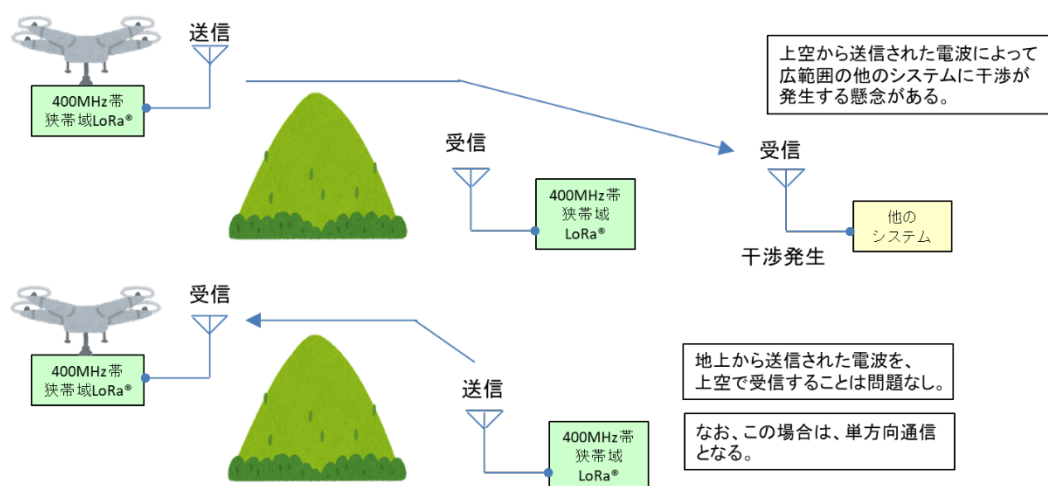


図3-17 ドローンに搭載しての運用

3. 5. 7 キャリアセンス

キャリアセンスとは、送信の前に受信を行って、他局から電波が送信されていないこと確認してから送信する機能であり、同じ周波数を使用する他局との干渉回避を図るための機能となる（図3-18）。干渉回避のために、キャリアセンスの機能を搭載することが望ましいと考えられるが、キャリアセンスレベルをどうするのか、キャリアセンスなしとなる条件を設けるかどうか、LoRa®を考慮したキャリアセンスとするかどうかなど詳細については検討を行うこととした。

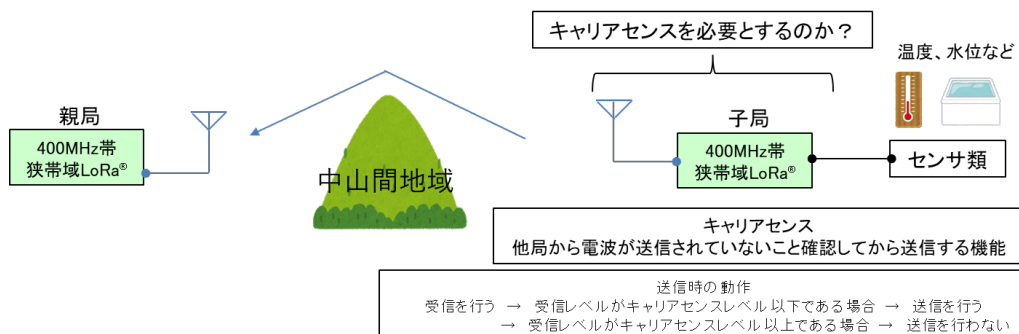


図3-18 キャリアセンス

参考に既存システムのキャリアセンスの例を表3-9に示す。既存システムにおいては、キャリアセンスが必要なシステムが多くなっている。ただし、出力が小さい物や特定の条件を満たす場合は、キャリアセンス不要としたシステムも見られる。

表3-9 既存システム キャリアセンスの例

既存システム		キャリアセンスの要否	キャリアセンスレベル
426MHz帯特定小電力 (テレメータ、データ伝送用)	ARIB STD T67	不要	-
426MHz帯特定小電力 (テレコントロール、データ伝送用)			
429MHz帯特定小電力の一部の チャンネル		必要	-96dBm
429MHz帯特定小電力の周波数 制御チャンネル			
920MHz帯特定小電力	ARIB STD T108	必要	-80dBm
		1mW以下または特定の条件を満たす 場合は不要	
1200MHz帯特定小電力の一部の チャンネル	ARIB STD T67	必要	-100dBm
1200MHz帯特定小電力の周波数 制御チャンネル		必要	-100dBm
デジタル簡易無線登録局	ARIB STD T98	必要	7 μ V(-96.1dBm)

920MHz 特定小電力においては、基本はキャリアセンスが必要だが、1時間当たりの送信時間の総和が短い場合や、周波数ホッピングを行う場合、送信出力が小さい場合は、他局へ与える干渉の影響が小さいため、キャリアセンス不要とすることができる（表3-10）。400MHz 帯狭帯域 LoRa®においても、他局へ与える干渉の影響が小さい条件の場合は、キャリアセンス不要とする方向についても検討を行う。キャリアセンス不要の場合は、使用する無線機の低廉化が可能となる。

表 3-10 920MHz 帯特定小電力 キャリアセンスの例

	空中線電力	1時間当たりの送信時間総和	送信時間	キャリアセンスの要否
920MHz帯 特定小電力 ARIB STD T108	20mW 一部の チャンネルのみ	制限なし	4秒以下	必要
	20mW	360秒以下 (Duty10%)	0.4秒以下	必要
	20mW	36秒以下 (Duty1%)	4秒以下	不要
	20mW 一部の チャンネルのみ	720秒以下 (Duty20%) 周波数ホッピング あり	4秒以下	不要
	1mW	3.6秒以下 (Duty0.1%)	0.1秒以下	不要
	1mW 一部の チャンネルのみ	制限なし	0.05秒以下	不要

キャリアセンス有無での無線機構成の差について、図 3-19 に示す。キャリアセンス無しの場合は、送受切り替えスイッチや受信回路が不要となり、無線機の低廉化が可能となる。

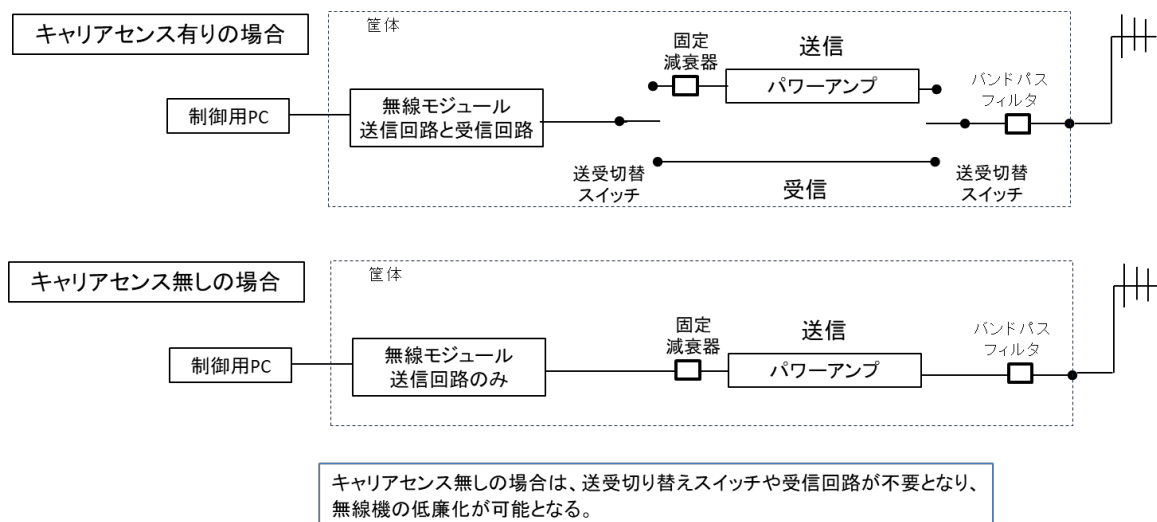


図 3-19 キャリアセンス有無での無線機構成の差

また、LoRa®特有の問題として、LoRa®システムは受信感度がよいため、他局の電波が微弱な場合で、キャリアセンスレベル以下であっても、送信を行うと干渉を引き起こす恐れがある（図3-20）。このため、対策として、キャリアセンスレベルを下げたり、受信レベルでキャリアセンスを判断するのではなく、LoRa®の電波を受信しているか否かで判断を行う機能（相関センス）を追加したり、異なる拡散係数を使用するなどの対策が考えられ、検討を行う（図3-21）。

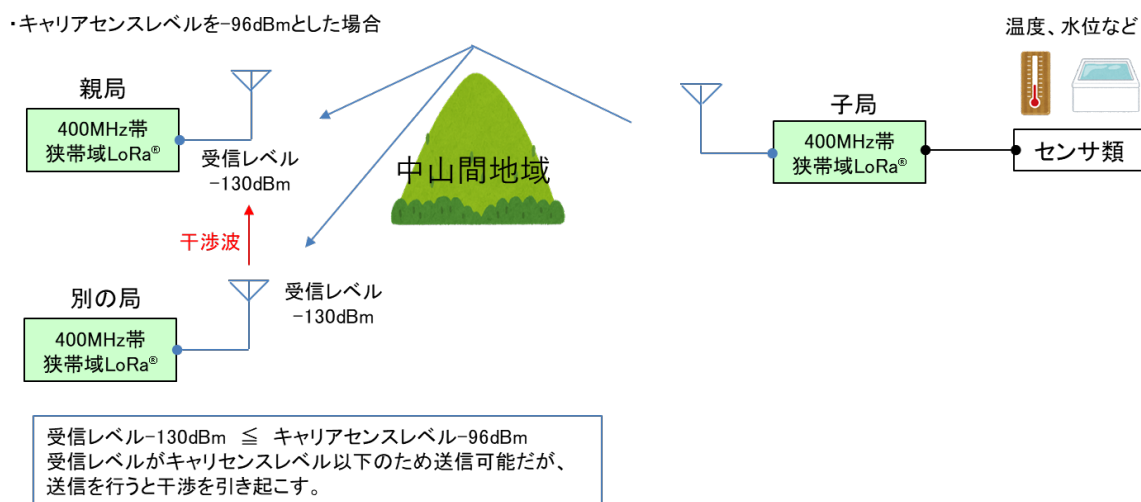


図3-20 LoRa®システム同士のキャリアセンス

通常のキャリアセンスは、電波の受信レベルで判断するが、相関センスは、LoRa®の電波を受信しているか否かで判断を行う。このため、微弱なLoRa®電波であっても検出が可能で、干渉の回避が可能となる。

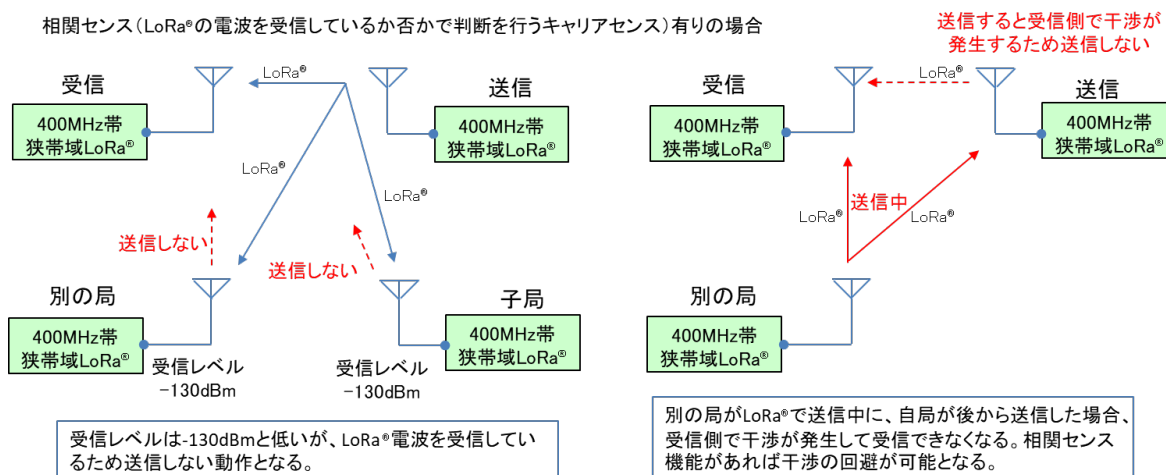


図3-21 相関センス

3. 5. 8 無線局免許について

特に検討が必要な条件以外となるが、無線局免許について、検討中の 400MHz 帯狭帯域 LoRa®は新規システムであり、現行の枠組み内で実施するため、当初は無線局免許が必要となる。また、無線従事者免許も必要となり、電波利用料支払も必要となる（図 3-2 2）。

将来的に当該システムが数多く普及した際となるが、以下に上げるような簡便化の方策が考えられる。いずれも、本調査検討においては実現が困難であるが、将来的な方向性の一例として示す。

1. 技術基準適合証明を受けられる無線局とすることで、簡易な免許手続きを可能とする。
2. 登録局とすることで、簡素な手続きでの開設を可能とする。
3. 特定小電力無線局とすることで、無線局免許、無線従事者免許、電波利用料支払を不要とする。

無線局免許等について

新規システムであり、現行の枠組み内で実施するため、当初は無線局免許が必要となる見込み。無線従事者免許も必要となる。電波利用料支払も必要。



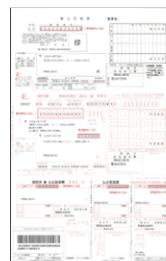
無線局免許

1局当たり
無線局免許申請料 ￥3,550
落成検査手数料 ￥33,900
(登録検査等事業者による
点検実施時は ￥2,550)



無線従事者免許

第三級陸上特殊無線技士の場合
試験手数料 ￥5,600
免許申請手数料 ￥1,750



電波利用料

1局当たり ￥400/年

図 3-2 2 無線局免許について

第4章 実証実験

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの試作

提案システムの試作システムとして圃場において貯水槽の水位監視を行う水位観測システム（通信システムと水位計を接続して水位データを取得・親局に伝送するための子局、子局からのデータを受信・蓄積し、電波伝搬データを取得する親局、それらに必要なログ取得用ソフトウェア等により構成されるものとする。）の試作を行った。試作システムの構成・局数は、実証試験を実施するために必要な構成を満足するものとした。

実証試験

第3章と第5章において検討した結果、また、試作システムを用いた結果を確認・分析・評価するため、以下のとおり屋内実証及び屋外実証を実施した。なお、効率的かつ効果的な実証試験を実施するために、適切な実施体制及び試験環境を構築した。実証を行うために必要な無線局免許の取得、無線局免許の取得に必要な無線機特性の測定・書類作成・申請、実証場所及びその使用交渉、ドローンを利用した実証に必要なドローンの手配・操作・各種手続き、測定に必要な測定機器類（データ取得に必要なログ取得用ソフトウェアの製作を含む）・共用検討に使用する既存無線システム・その他実証に必要となる資材の調達等は請負者にて対応をおこなった。

ア 屋内実証

屋内の実証については、実験室内（ケーブル接続、減衰器等を利用）にて、以下を実施した。

(ア)試作システムの電波伝搬特性を測定し、設計どおりの性能を有することを確認した。なお、測定に際しては第3章において検討した SF 値ごとに受信感度を計測し、自システム内の干渉についても測定を実施した。このほか、技術的条件案のとりまとめに必要な諸元等についても測定を行った。

(イ)試作システムと共用検討を実施した既存無線システムの実機を用意して実際の被干渉及び与干渉について測定して共用条件の案に対する確認・分析・評価を実施し、調査検討会委員の納得が得られる共用条件のとりまとめを行った。

(ウ)ドローンに搭載した際のノイズレベルを検証するため、ドローンを動作させた場合に機体から発生するノイズレベルの測定を、スペクトラムアナライザを用いて行った。また、試作システムが同ノイズ下において正常に動作するかどうか確認を実施した。なお、本実証では問題となるノイズは見られなかったことから、シールド対策は不要であった。さらに、機体によってノイズレベルに差があると考えられたことから、ノイズ発生が多い機体のノイズレベルについても、データを収集を行った。

イ 屋外実証

屋外の実証については、試作システムにて、高知県内の中山間地域（屋外）を選定して実際に電波を発射し、以下の実証を実施した。

(ア) 試作システムを使用して、第3章において検討した地上で利用する場合及び上空で利用する場合それぞれの諸元・運用条件等の案に対応して実証を行い、案に対する確認・分析・評価を実施した。

(イ) 429MHz 帯特定小電力システム及び 900MHz 帯特定小電力システムを用いて実証を行い、試作システムとの比較検証を実施した。特定小電力システムにおいて通信が実現する到達距離等についても確認し、その条件等を取りまとめた。

(ウ) 地上を利用する場合が最適な方法として選定し、地上を利用する場合の試作システム（水位監視）を実際に設置した状態で2週間程度運用し、水位監視状況についてデータを取得し、実証後に通信状況の変化等の分析を行った。また、429MHz 帯特定小電力システムによるシステムでもデータを取得し、通信状況等について比較を行った。

429MHz 帯の特定小電力システムの周波数帯においては、既に別の特定小電力システムが運用されていることから、当該周波数帯において LoRa®を採用した通信システムが当該システムからの影響を受けて運用が困難となることが知られており、本実証においても発生する可能性があるため、発生時には検証を行うこととしていたが、本実証においては発生しなかった。

4. 1 実施内容

400MHz 帯狭帯域 LoRa®の特性を明らかにするために、屋内実証実験と屋外実証実験を実施した。各実証実験での実施内容を表4-1に示す。

表4-1 実証実験 実施内容

	実施内容
屋内実証実験	①受信感度測定 ②同一チャンネル干渉測定 ③隣接チャンネル干渉測定 ④近接チャンネル感度抑圧 ⑤相互変調
屋外実証実験	①ドライブテスト（親局、子局） ②固定状態での測定 ③ドローンでの実験

4. 2 使用機器

本実験で使用するために試作した400MHz 帯狭帯域 LoRa®無線機の諸元を表4-2、外観を図4-1に示す。

表4-2 400MHz 帯狭帯域 LoRa®無線機諸元

項目	諸元
周波数	414.8MHz
空中線電力	1W
変調方式	LoRa® (設定可能拡散係数 7、8、9、10、11、12) (電波の型式 F1D)
占有周波数帯幅	8.5 kHz (実測値 約 7.8kHz)
ビットレート (計算値)	15~244bps
アンテナ	ダイポールアンテナ (利得 2dBi) 5素子八木アンテナ (利得 11dBi)
備考	市販の429MHz 帯特定小電力用モジュールの周波数を変更し、外部アンプを接続して構成している。 実験試験局免許を取得。

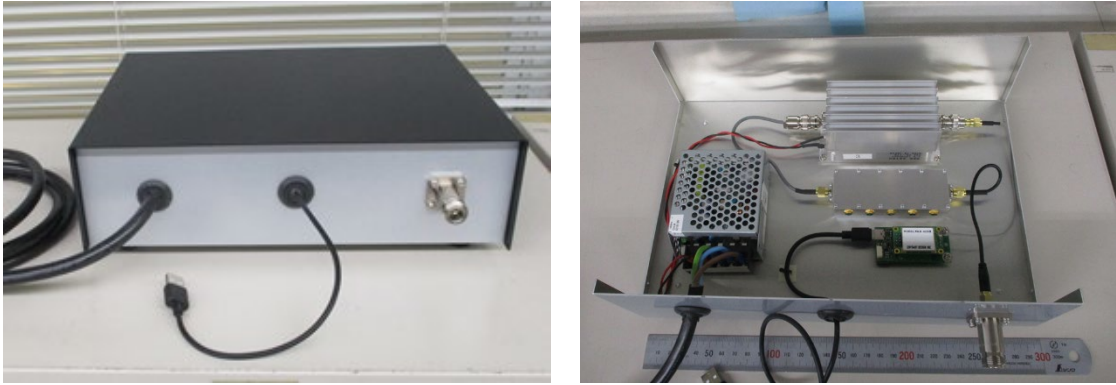


図 4 - 1 400MHz 帯狭帯域 LoRa®無線機 外観

また、干渉検討用の既存システム無線機は、表 4 - 3 に示す 4 - FSK および $\pi/4$ シフト QPSK 無線機を機器提供協力会社から借用し、使用した。

表 4 - 3 既存システム無線機諸元

項目	諸元 4 - FSK	諸元 $\pi/4$ シフト QPSK
周波数	400MHz 帯	454.025MHz
空中線電力	1W	5W 実験時は-10dBm に減力
変調方式	4-FSK (電波の型式 F1D)	$\pi/4$ シフト QPSK (電波の型式 G1D)
占有周波数帯幅	5.8 k Hz	5.8kHz
備考	機器提供協力 株式会社 JVC ケンウッド	機器提供協力 新潟通信機株式会社
外観		

4. 3 屋内実証実験結果

屋内実証実験の結果を以下に示す。

4. 3. 1 受信感度測定

本実験で使用した各無線機に対して、図4-2の構成で受信感度の測定を行った。アッテネータを調整し、送信機からの電波強度を徐々に弱くし、下記の状態となった時の受信レベルを基準感度とした。

400MHz 帯狭帯域 LoRa® : PER (パケットエラーレート) 1%

4-FSK、 $\pi/4$ シフト QPSK : BER (ビットエラーレート) 1%

アナログ FM : SINAD (Signal-to-Noise And Distortion ratio) 12dB

なお、400MHz 帯狭帯域 LoRa®については、拡散係数7、8、9、10、11、12のそれぞれに対して測定を行った。各方式ごとの結果を図4-3～4-6に、表4-4に基準感度をまとめた表を示す。

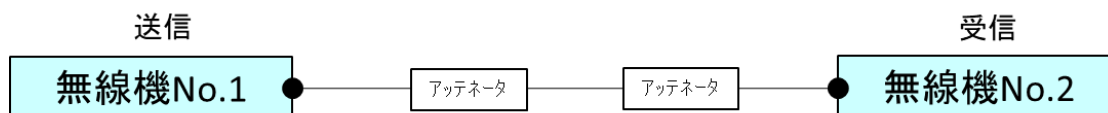


図4-2 受信感度 測定構成

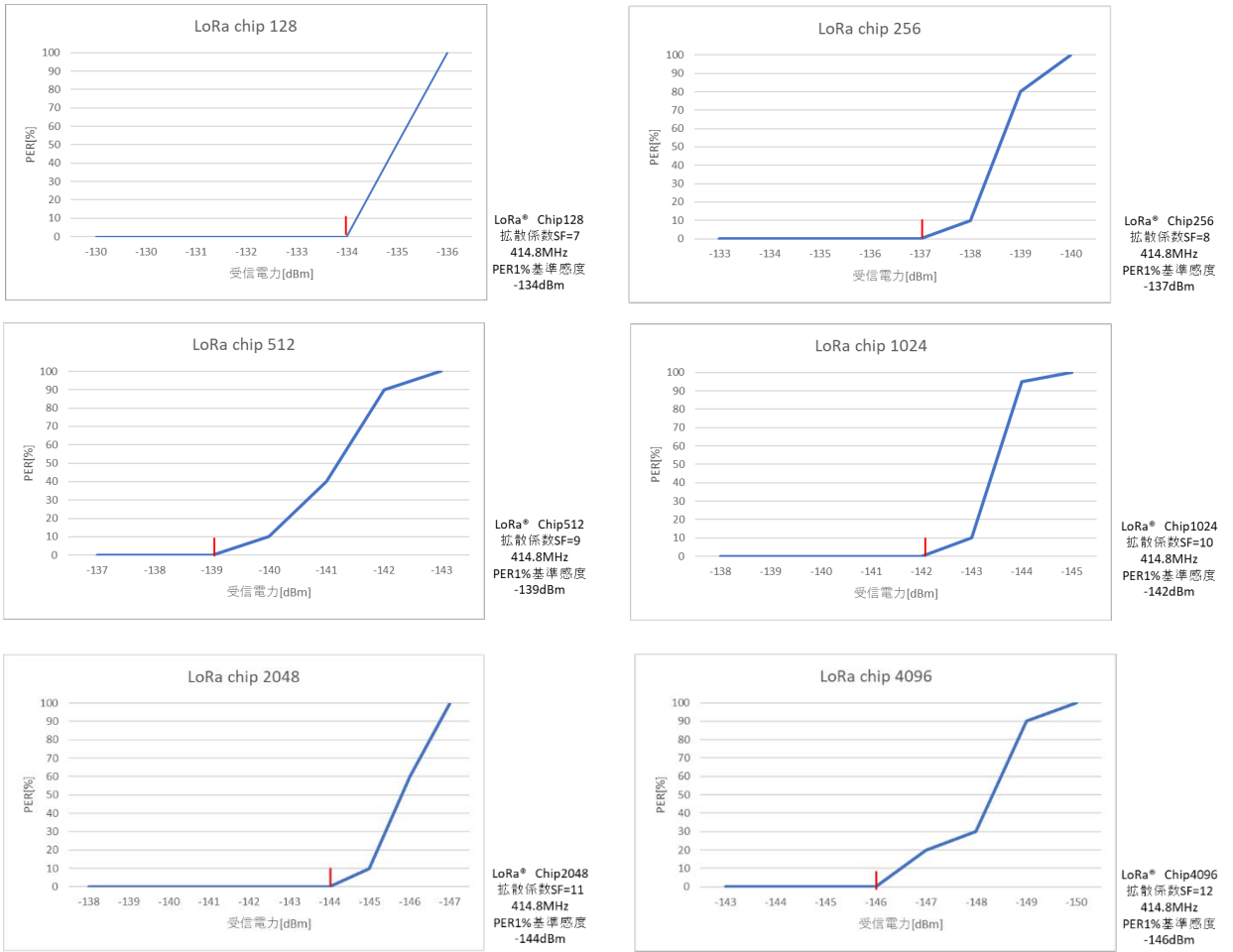


图 4-3 400MHz 带狭带域 LoRa® 受信感度測定結果

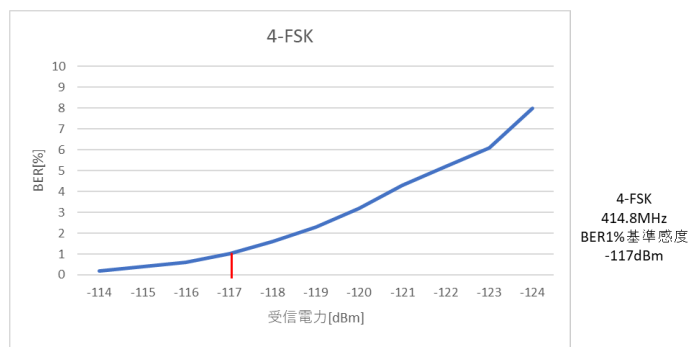


图 4-4 4-FSK 受信感度測定結果

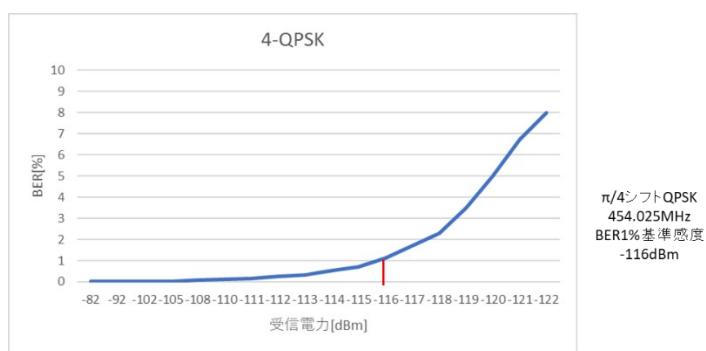


図 4 - 5 $\pi/4$ シフト QPSK 受信感度測定結果

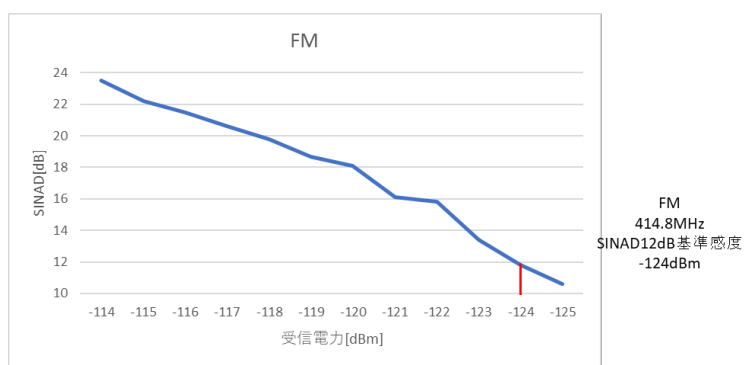


図 4 - 6 アナログ FM 受信感度測定結果

表 4 - 4 基準感度測定結果

変調方式		基準感度
400MHz 帯 狭帯域 LoRa®	拡散係数 SF=7	-134dBm
	拡散係数 SF=8	-137dBm
	拡散係数 SF=9	-139dBm
	拡散係数 SF=10	-142dBm
	拡散係数 SF=11	-144dBm
	拡散係数 SF=12	-146dBm
4 - F S K		-117dBm
$\pi/4$ シフト Q P S K		-116dBm
アナログ F M		-124dBm

400MHz 帯狭帯域 LoRa®については、基準感度レベルが低く、受信電力が小さい場合でも受信可能な傾向が出ている。また、LoRa®の拡散係数を大きくすると、感度がよくなる傾向が出ている。ただし、拡散係数を大きくすると伝送速度が遅くなることに注意が必要である。

4. 3. 2 400MHz 帯狭帯域 LoRa®同一チャネル干渉測定

まず、400MHz 帯狭帯域 LoRa®について、図4-7の構成で同一チャネル干渉の測定を行った。アッテネータを調整し、PER（パケットエラーレート）が1%の状態となった時の希望波電力と妨害波電力から D/U を求めた。

なお、400MHz 帯狭帯域 LoRa®については、拡散係数 7、10、12 のそれぞれに対して測定を行った。希望波信号レベルは、基準感度+30dB とした。また、希望波が先に送信を開始し、後から妨害波を送信する順番にて測定を実施した。結果を表4-5に示す。

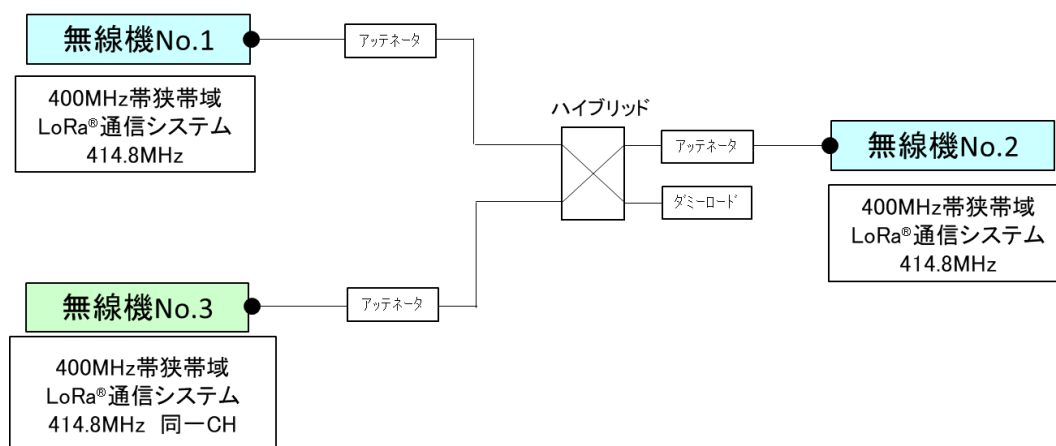


図4-7 同一チャネル干渉 測定構成

表 4 - 5 同一チャネル干渉測定結果 (400MHz 帯狭帯域 LoRa®)

希望波	変調方式	妨害波	変調方式	同一チャネル D/U
400MHz 帯 狭帯域 LoRa® 414.8MHz	拡散係数 SF=7	400MHz 帯 狭帯域 LoRa® 414.8MHz	拡散係数 SF=7	4dB
			拡散係数 SF=10	-9dB
			拡散係数 SF=12	-9dB
	拡散係数 SF=10	400MHz 帯 狭帯域 LoRa® 414.8MHz	拡散係数 SF=7	-14dB
			拡散係数 SF=10	5dB
			拡散係数 SF=12	-14dB
	拡散係数 SF=12	400MHz 帯 狭帯域 LoRa® 414.8MHz	拡散係数 SF=7	-18dB
			拡散係数 SF=10	-18dB
			拡散係数 SF=12	4dB

表 4 - 5 の結果は、希望波が先に送信を開始し、後から妨害波を送信する順番にて測定を実施したが、逆に、妨害波が先に送信を開始し、後から希望波を送信する順番にて測定を実施した結果を表 4 - 6 に示す。

表 4 - 6 同一チャネル干渉測定結果 (400MHz 帯狭帯域 LoRa®)

(妨害波が先に送信を開始し、後から希望波を送信した場合)

希望波	変調方式	妨害波	変調方式	同一チャネル D/U
400MHz 帯 狭帯域 LoRa® 414.8MHz	拡散係数 SF=7	400MHz 帯 狭帯域 LoRa® 414.8MHz	拡散係数 SF=7	30dB 以上
			拡散係数 SF=10	-10dB
			拡散係数 SF=12	-9dB
	拡散係数 SF=10	400MHz 帯 狭帯域 LoRa® 414.8MHz	拡散係数 SF=7	-15dB
			拡散係数 SF=10	30dB 以上
			拡散係数 SF=12	-14dB
	拡散係数 SF=12	400MHz 帯 狭帯域 LoRa® 414.8MHz	拡散係数 SF=7	-18dB
			拡散係数 SF=10	-18dB
			拡散係数 SF=12	30dB 以上

400MHz 帯狭帯域 LoRa®は、既存システムの同一チャンネル D/U（表 4 - 7）と比べて、特に希望波と妨害波の拡散係数が異なる場合は、D/U が小さく、マイナスとなっており、妨害波に対して強い（耐性がある）結果となっている。D/U がマイナスということは、希望波よりも妨害波が強い状況でも通信可能であることを示している。

ただし、希望波と妨害波の拡散係数が同じ場合、D/U は劣化した。また、希望波と妨害波のどちらが先に送信を開始するか（図 4 - 8）でも、測定結果が異なっており、特に、妨害波が先に送信を開始し、後から希望波を送信した場合は、D/U は大きな値となった。このことは、拡散係数が同じ電波が先に送信されている場合は、後から送信した電波は受信されないこととなるため、考慮が必要なことを示している。

表 4 - 7 既存システムの同一チャンネル D/U

希望波 変調方式		妨害波 変調方式		同一チャンネル D/U
4-FSK	チャンネル間隔 6.25kHz	4-FSK	チャンネル間隔 6.25kHz	11.5dB
QPSK	チャンネル間隔 6.25kHz	QPSK	チャンネル間隔 6.25kHz	12dB
FM	チャンネル間隔 12.5kHz	FM	チャンネル間隔 12.5kHz	4dB

平成 20 年 3 月 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「小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件」 資料 3 表 3-2 より抜粋 資料集 P22

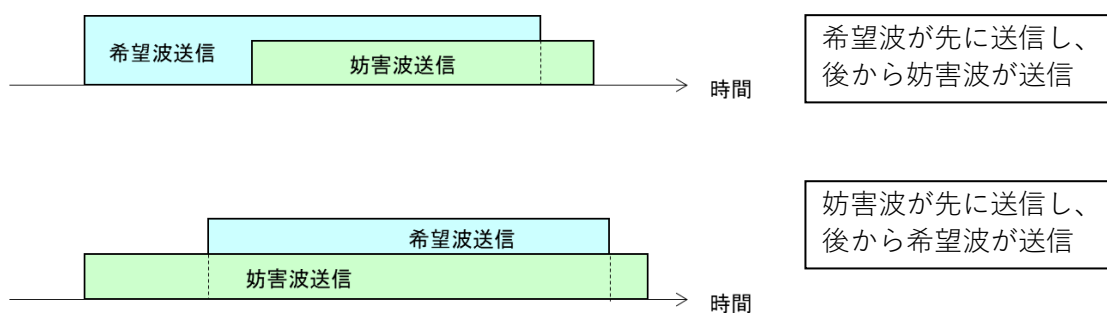


図 4 - 8 送信順番

希望波と妨害波のどちらが先に送信を開始するかで D/U の値が異なった理由について、今回使用した LoRa[®]無線モジュールは、送信時にプリアンブルを送信している（図4-9）。受信側がこのプリアンブルを受信し、同期を取る動作となっている。希望波を先に送信した場合、希望波に対して同期が取れるために、妨害波への耐性が高くなると考えられる。逆に妨害波が先に送信した場合、妨害波に対して同期を取ってしまうため、希望波の受信が困難になっていると考えられる。

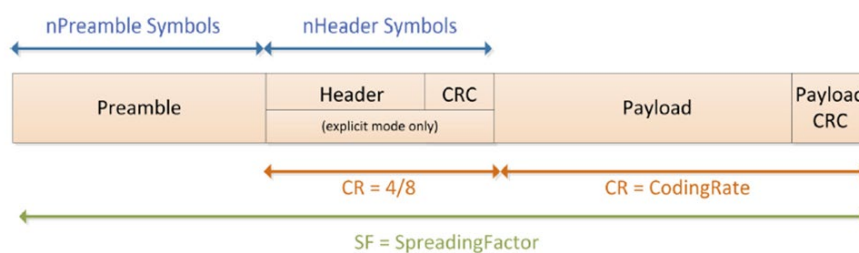


Figure 6. LoRaTM Packet Structure

SX1276/77/78/79 DATASHEET SEMTECH

図4-9 LoRa[®] Packet Structure

なお、これ以降の測定については、希望波が先に送信を開始し、後から妨害波が送信する手順で実施した。

4. 3. 3 隣接チャネル干渉測定 提案システム被干渉

400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]が被干渉の場合について、図4-10の構成で測定を行った。アッテネータを調整し、PER（パケットエラーレート）が1%の状態となった時の希望波電力と妨害波電力から D/U を求めた。

なお、400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]については、拡散係数 7、10、12 のそれぞれに対して測定を行った。希望波信号レベルは、基準感度+30dB とした。また、希望波が先に送信を開始し、後から妨害波を送信する順番にて測定を実施した。結果を図4-11～4-12に示す。

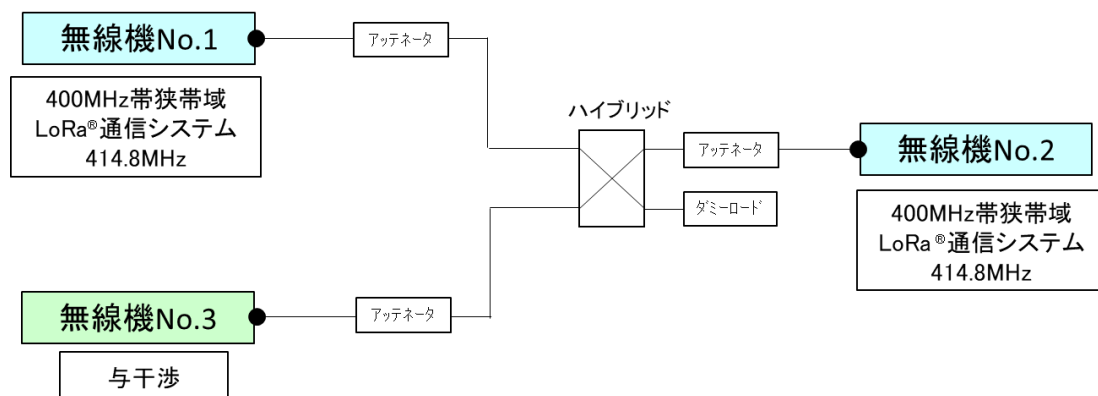


図4-10 隣接チャネル干渉測定 提案システム被干渉 測定構成

図4-11 被干渉（希望波） 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システム
 与干渉（妨害波） 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システム

図4-12 被干渉（希望波） 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システム
 与干渉（妨害波） 4 値 FSK
 被干渉（希望波） 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システム
 与干渉（妨害波） $\pi/4$ シフト QPSK
 被干渉（希望波） 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システム
 与干渉（妨害波） アナログ FM

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

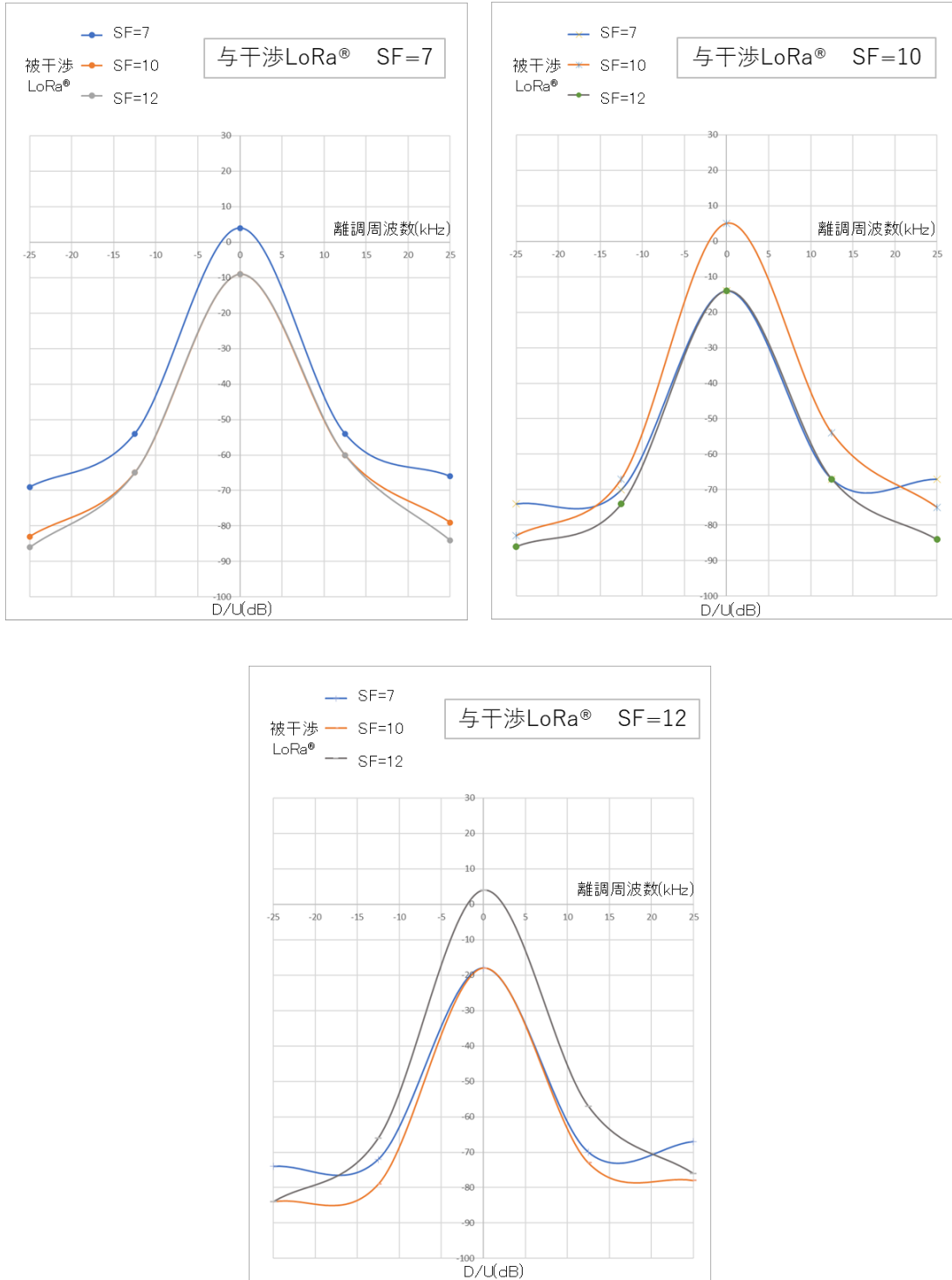
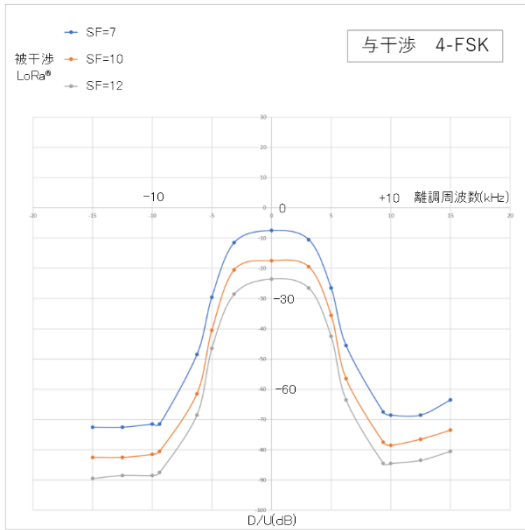
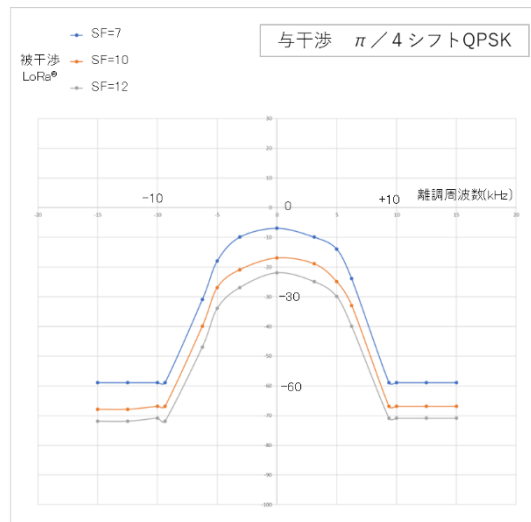


図4-11 隣接チャンネル干渉測定 提案システム被干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	4値FSK



被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	$\pi/4$ シフトQPSK



被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	アナログFM

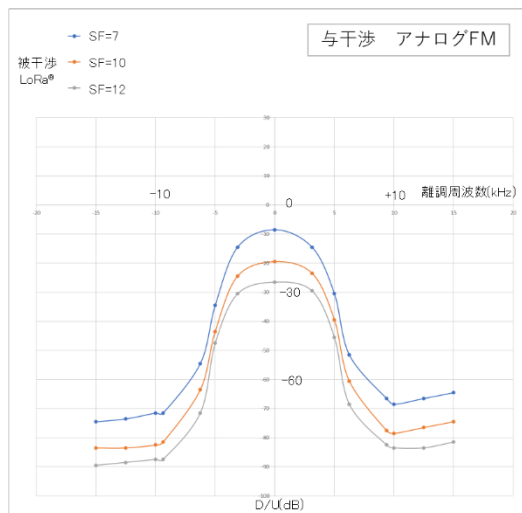


図4-12 隣接チャネル干渉測定 提案システム被干渉 測定結果

4. 3. 4 近接チャネル感度抑圧 提案システム被干渉

400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]が被干渉の場合について、図4-13の構成で測定を行った。アッテネータを調整し、PER（パケットエラーレート）が1%の状態となった時の妨害波電力を求めた。

なお、400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]については、拡散係数 7、10、12 のそれぞれに対して測定を行った。希望波信号レベルは、0、10、20dB μ V（-113、-103、-93dBm）とした。また、希望波が先に送信を開始し、後から妨害波を送信する順番にて測定を実施した。結果を図4-14～4-22に示す。

参考として、電波法関係審査基準別図第37号の2近接波妨害基準特性曲線（与干渉局が狭帯域デジタル通信方式を使用する無線局、60MHz帯の周波数を使用するルーラル加入無線局または54MHzを超え68MHz以下若しくは162.025MHzを超え169MHz以下の周波数の電波を使用するデジタル変調方式の音声放送番組中継を行う固定局の場合）で示される妨害波許容限界強度との比較を行っている。

なお、与干渉400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システムについては、400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システムの周波数が広範囲に変更できないため、測定を実施していない。

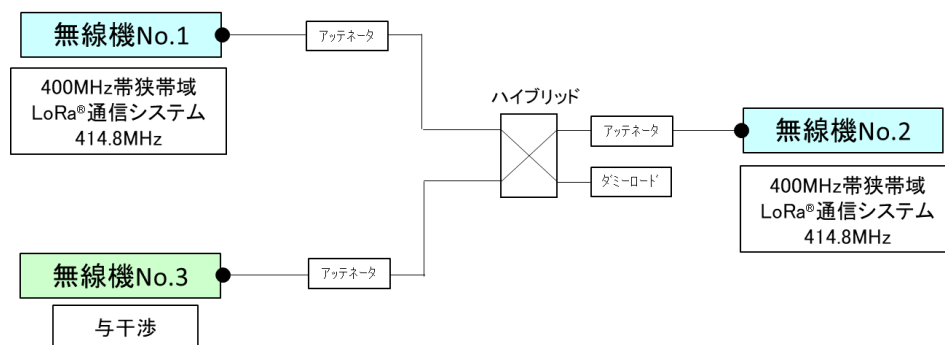


図4-13 近接チャネル感度抑圧 測定構成

- | | | |
|------------|----------|--------------------------------------|
| 図4-14～4-16 | 被干渉（希望波） | 400MHz 帯狭帯域 LoRa [®] 通信システム |
| | 与干渉（妨害波） | 4 値 FSK |
| 図4-17～4-19 | 被干渉（希望波） | 400MHz 帯狭帯域 LoRa [®] 通信システム |
| | 与干渉（妨害波） | $\pi/4$ シフト QPSK |
| 図4-20～4-22 | 被干渉（希望波） | 400MHz 帯狭帯域 LoRa [®] 通信システム |
| | 与干渉（妨害波） | アナログ FM |

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	4値FSK

希望波信号レベル
0dB μ V
(-113dBm)

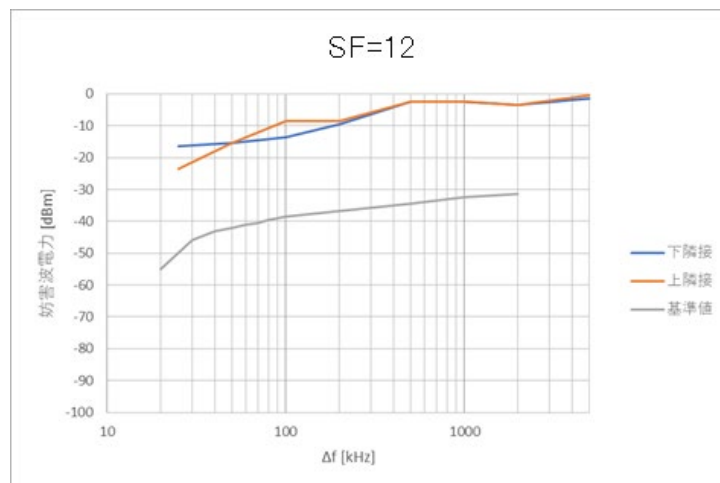
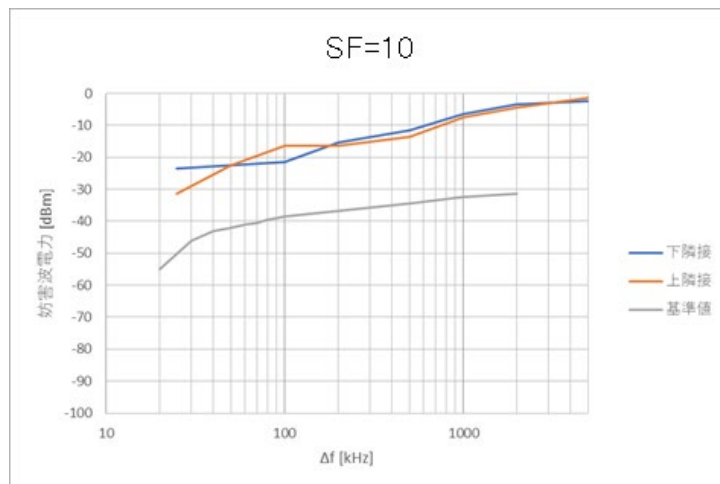
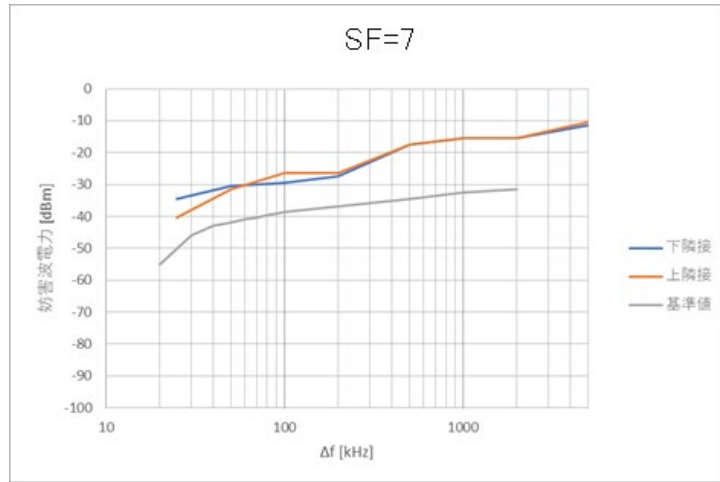


図4-14 近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	4値FSK

希望波信号レベル
10dB μ V
(-103dBm)

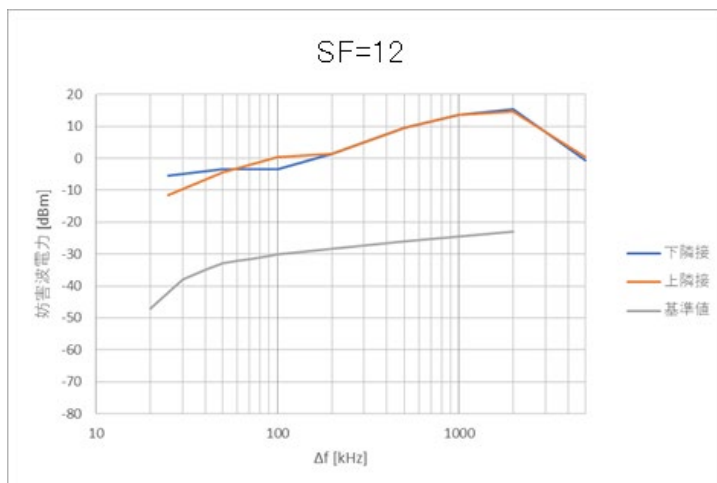
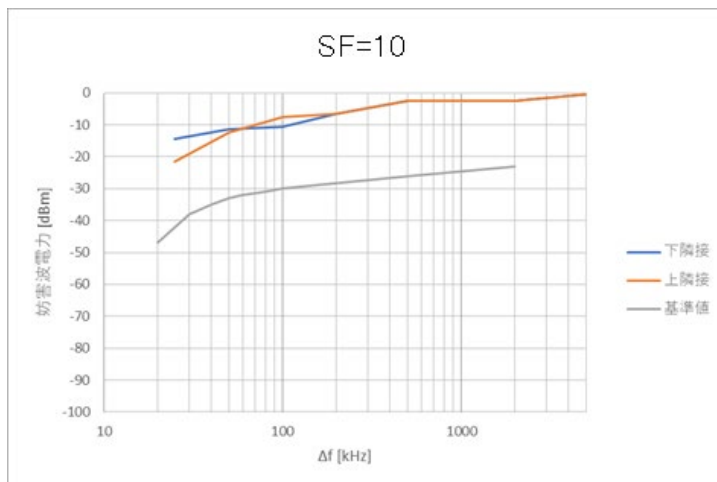
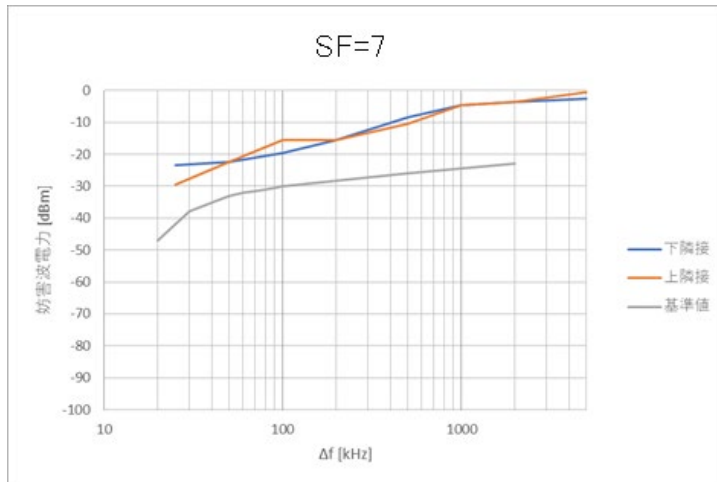


図4-15 近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	4値FSK

希望波信号レベル
20dB μ V
(-93dBm)

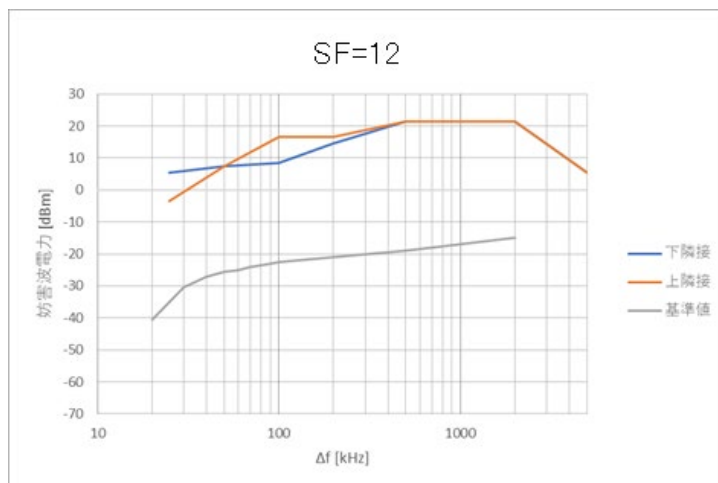
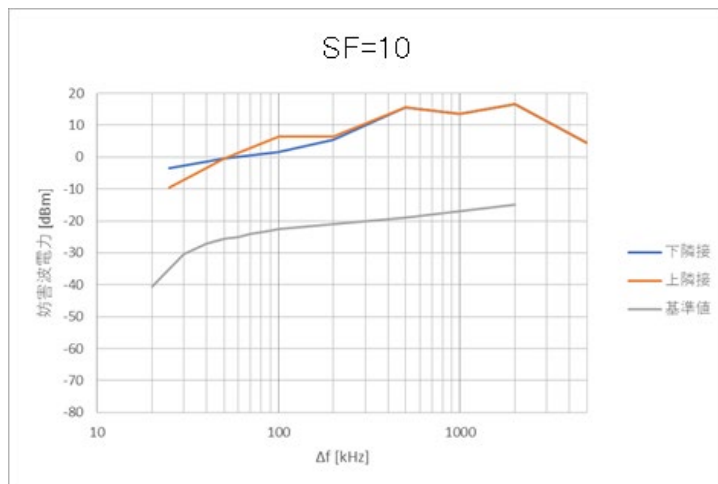
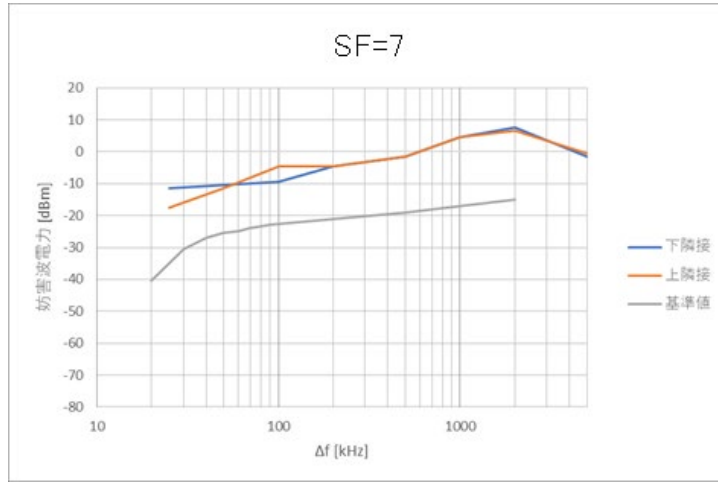


図4-16 近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	$\pi/4$ シフトQPSK

希望波信号レベル
0dB μ V
(-113dBm)

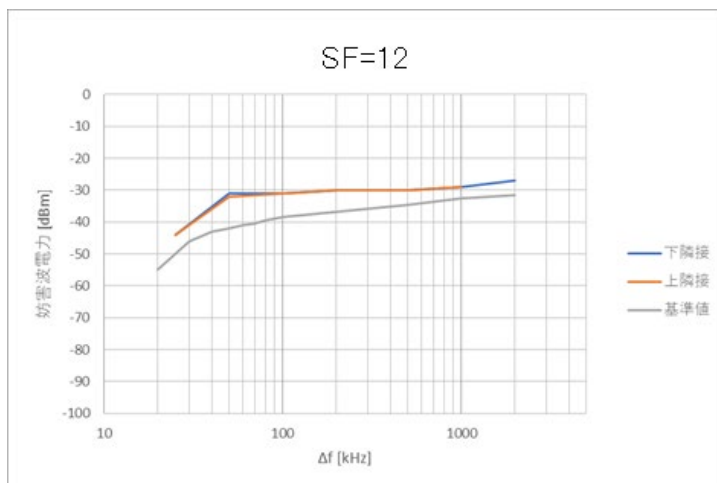
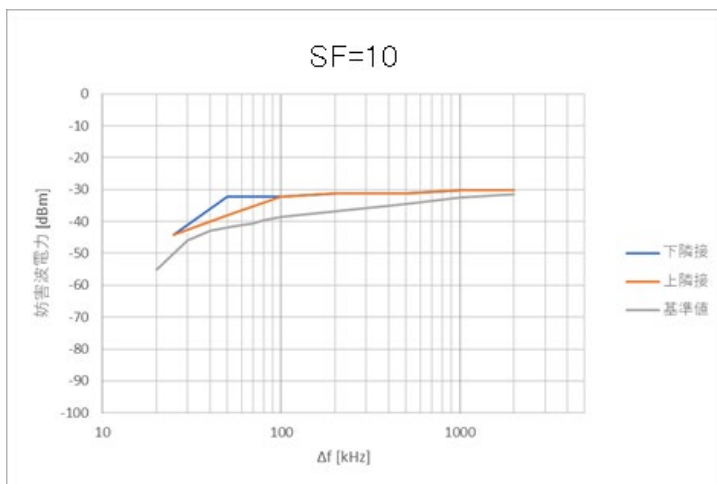
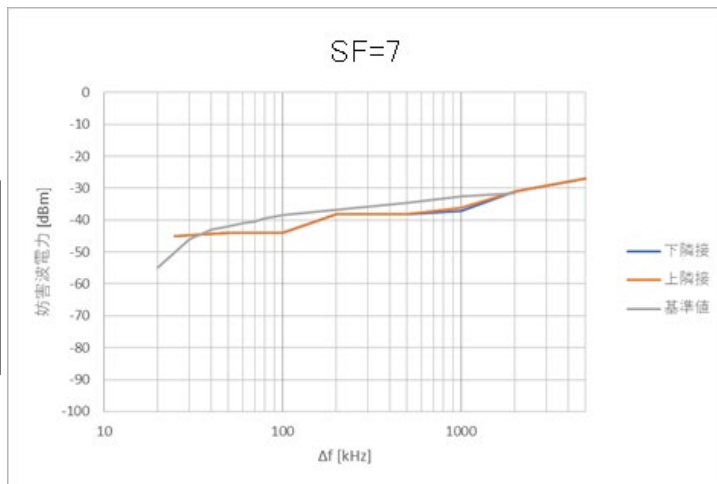


図4-17 近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	$\pi/4$ シフトQPSK

希望波信号レベル
10dB μ V
(-103dBm)

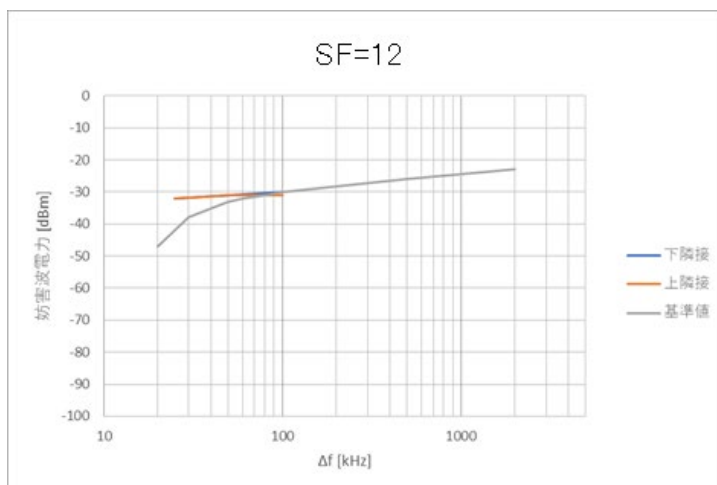
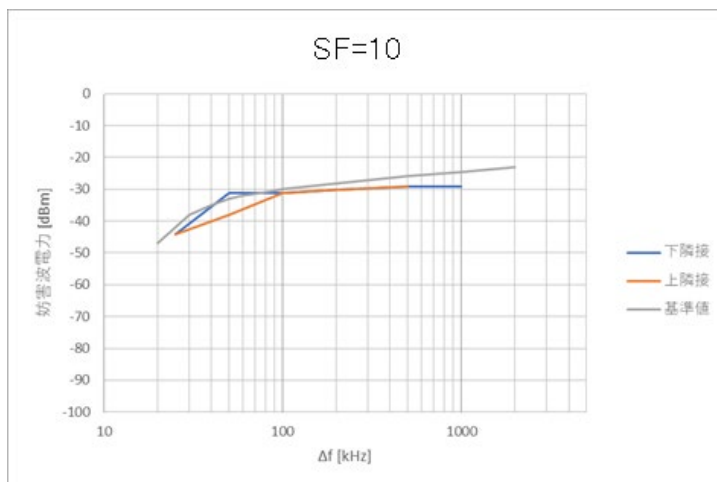
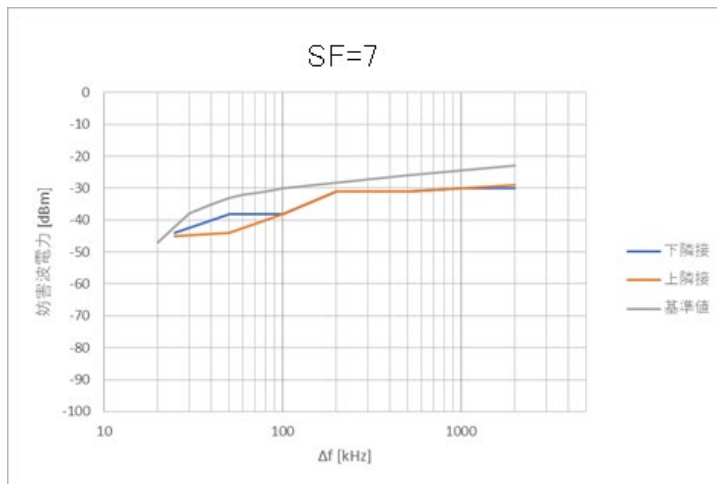
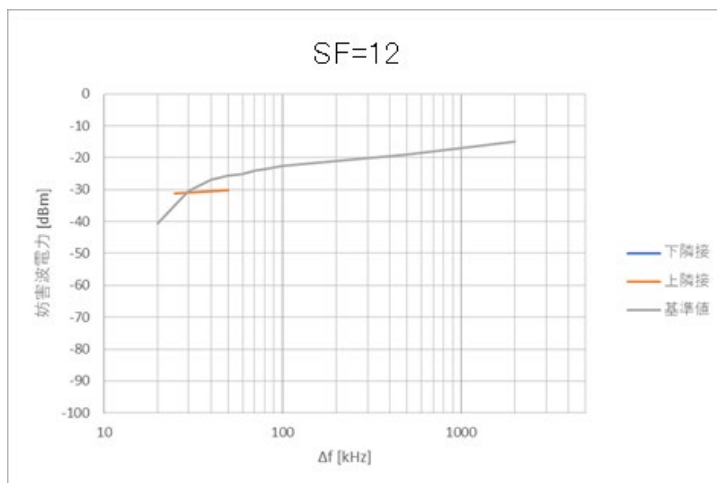
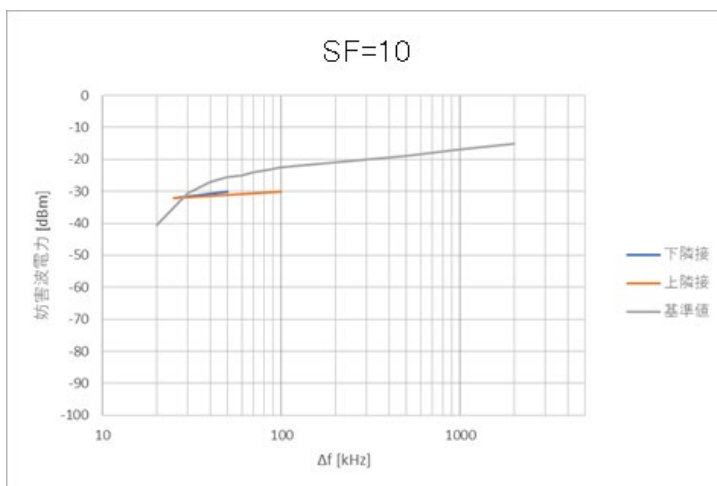
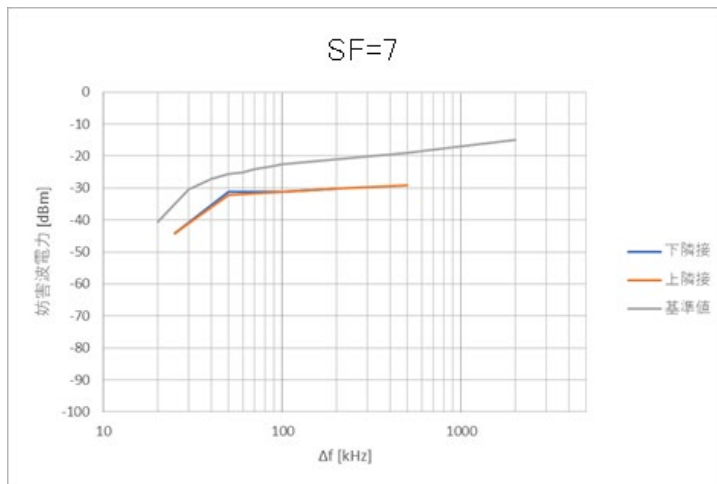


図4-18 近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	$\pi/4$ シフトQPSK

希望波信号レベル
20dB μ V
(-93dBm)



注. 妨害波信号レベル
の上限に制限があり、
一部測定ができてい
ない。

図4-19 近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	アナログFM

希望波信号レベル
0dB μ V
(-113dBm)

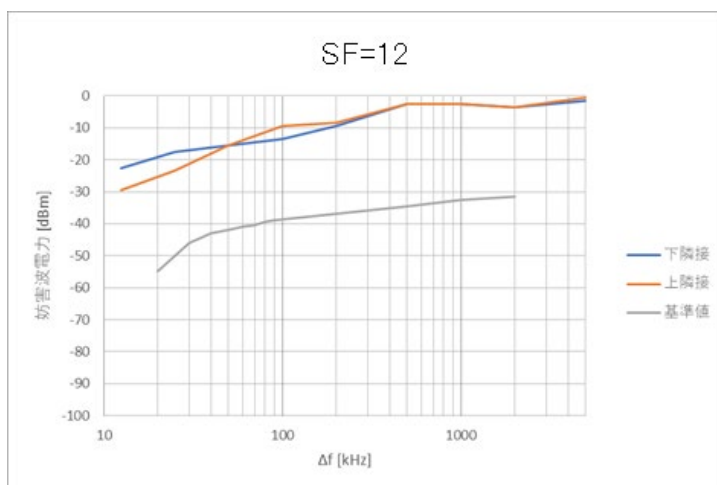
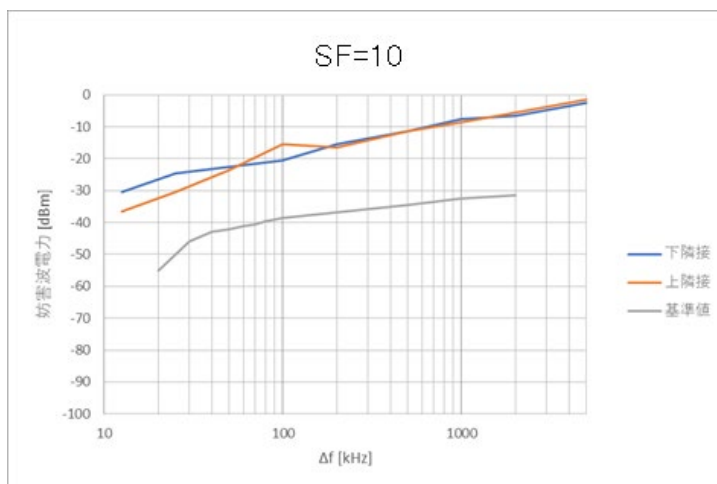
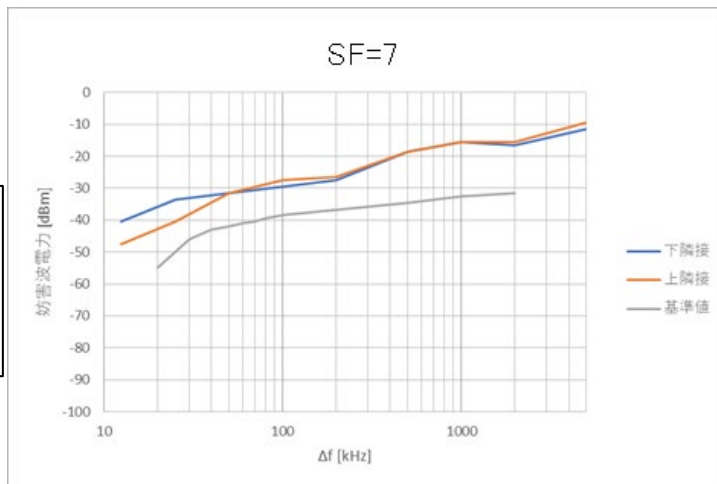


図4-20 近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	アナログFM

希望波信号レベル
10dB μ V
(-103dBm)

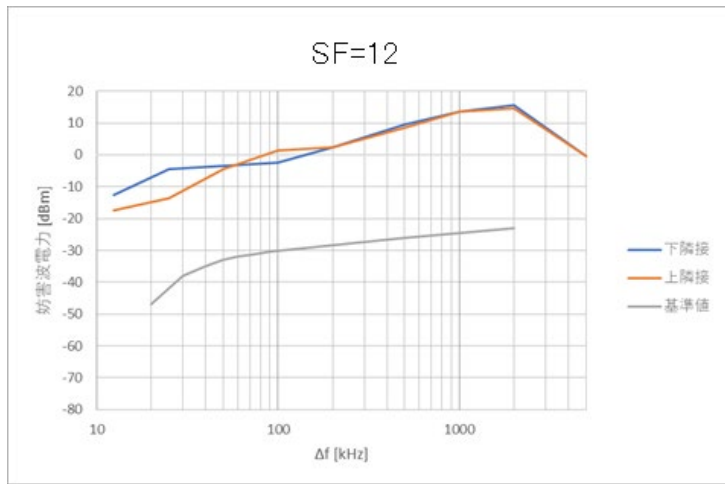
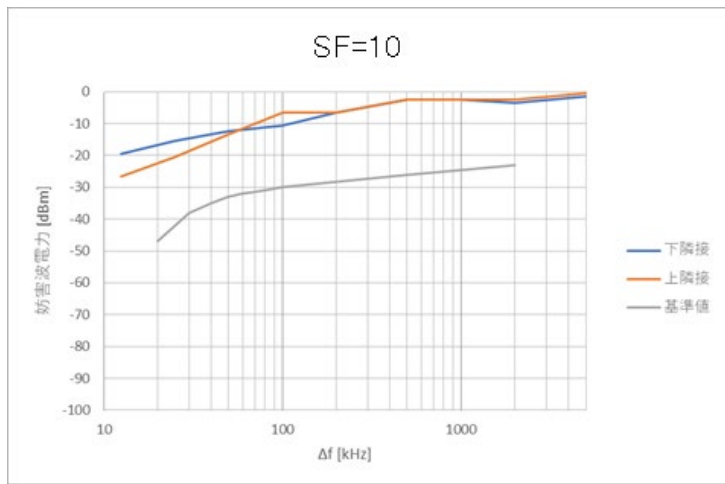
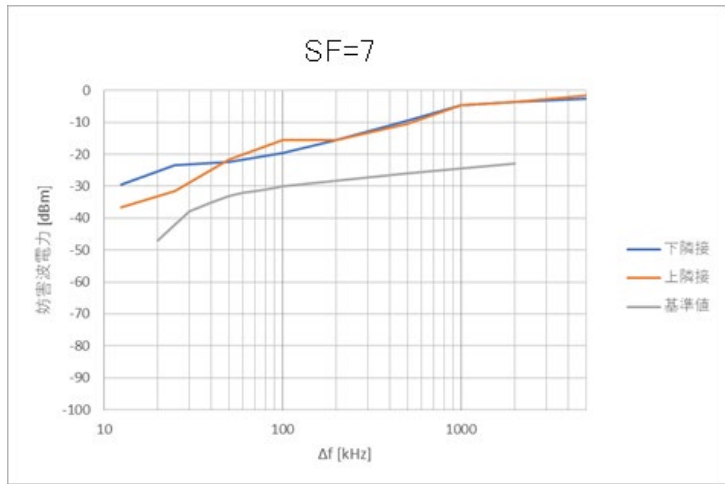


図4-21 近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定結果

被干渉 (希望波)	与干渉 (妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	アナログFM

希望波信号レベル
20dB μ V
(-93dBm)

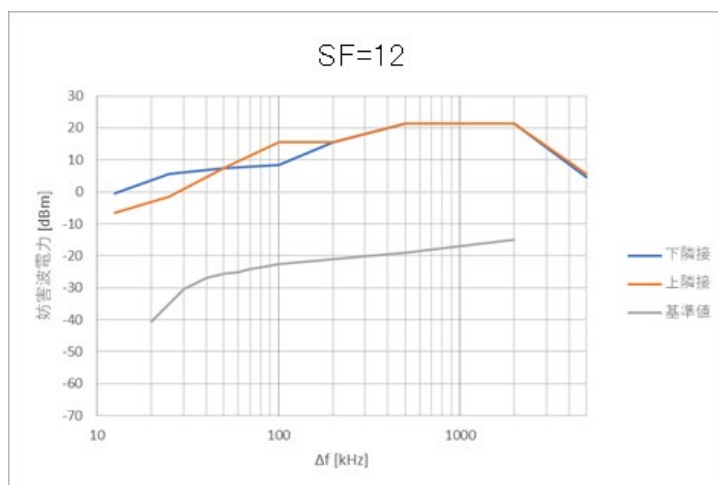
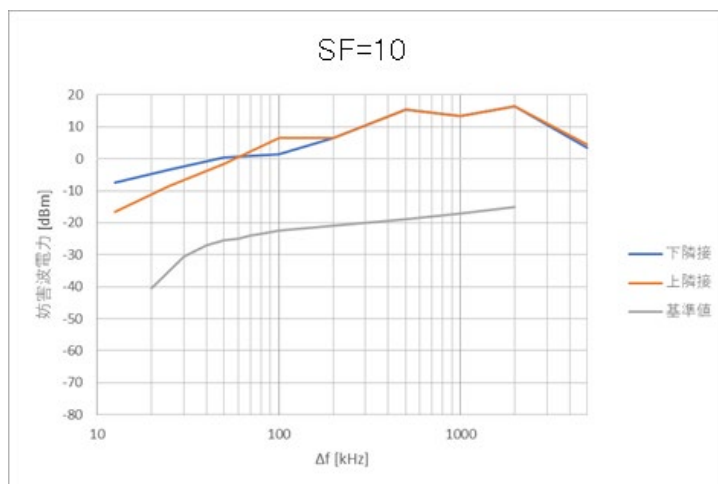
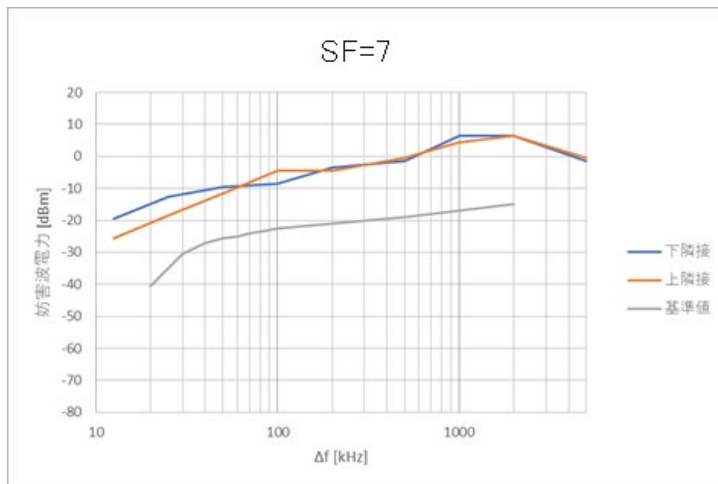


図4-22 近接チャンネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定結果

4. 3. 5 相互変調 提案システム被干渉

400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]が被干渉の場合について、図4-23の構成で測定を行った。アッテネータを調整し、PER（パケットエラーレート）が1%の状態となった時の妨害波入力電圧を求めた。

なお、400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]については、拡散係数 7、10、12 のそれぞれに対して測定を行った。希望波信号レベルは、基準感度+3dB、妨害波イ（周波数が遠い方）のレベルは 40、50、60、70、80、90、100dB μ V とした。また、希望波が先に送信を開始し、後から妨害波を送信する順番にて測定を実施した。結果を図4-24～4-25に示す。

参考として電波法関係審査基準別図第38号の2相互変調基準特性曲線（狭帯域デジタル通信方式等）③ $\pi/4$ QPSK(SCPC)、4FSK(SCPC)および RZ SSB のものとの比較を行っている。

なお、与干渉 $\pi/4$ シフト QPSK については、周波数が広範囲に変更できないため、測定を実施していない。

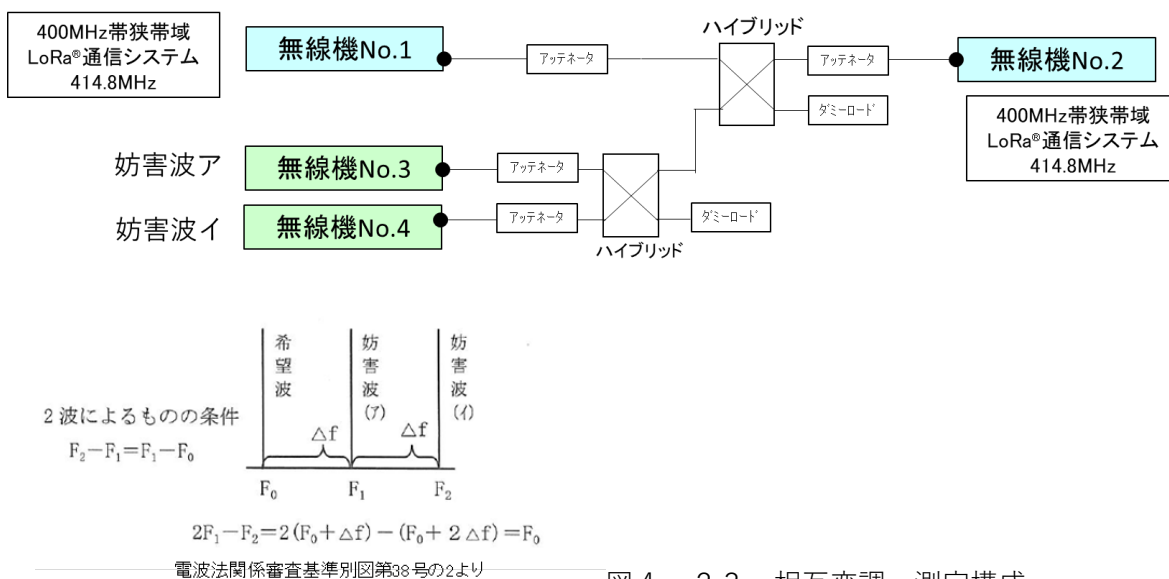
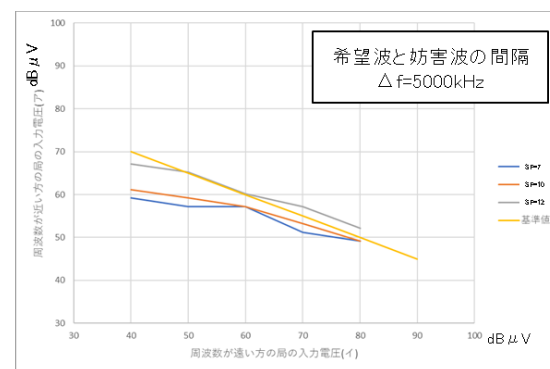
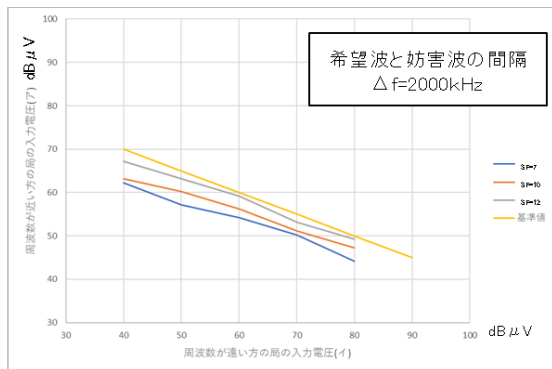
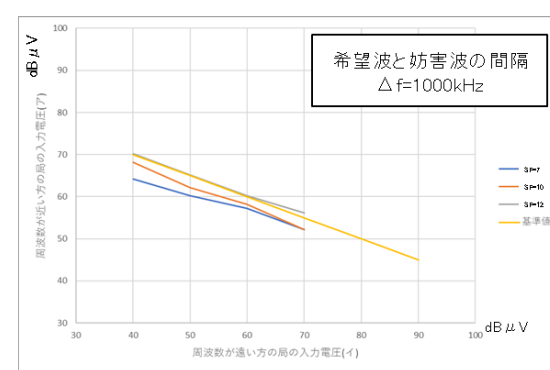
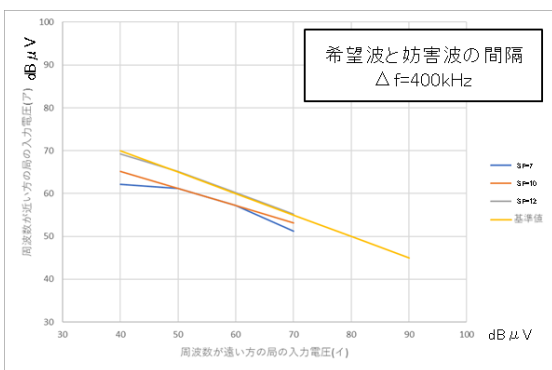
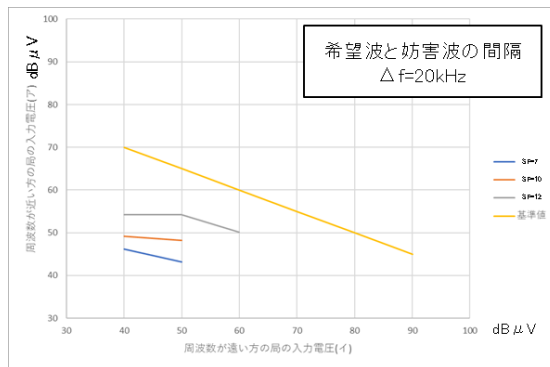
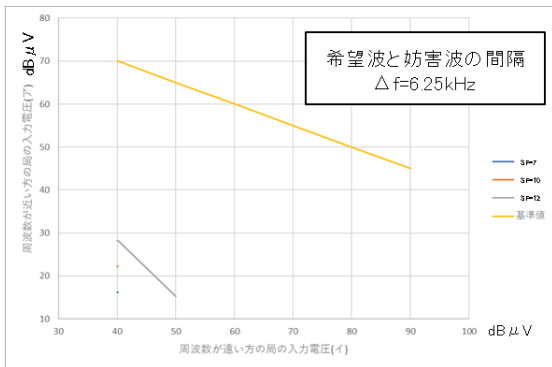


図4-23 相互変調 測定構成

- 図4-24 被干渉（希望波） 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システム
与干渉（妨害波） 4 値 FSK
- 図4-25 被干渉（希望波） 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システム
与干渉（妨害波） アナログ FM

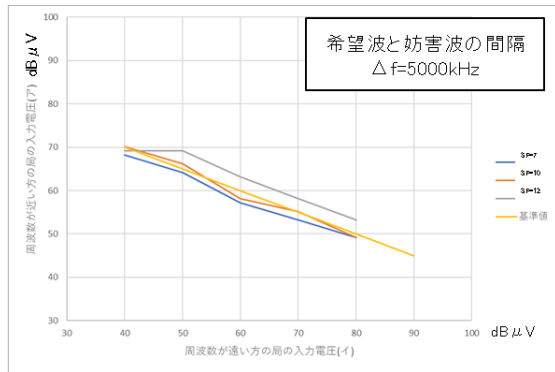
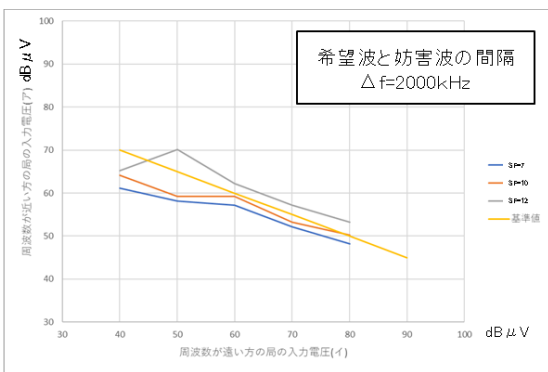
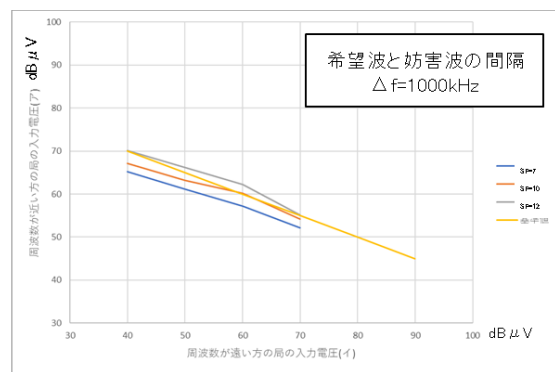
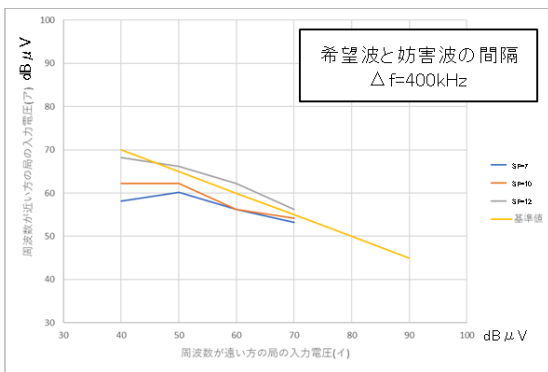
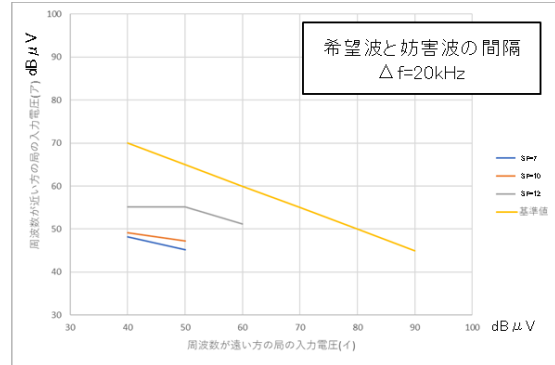
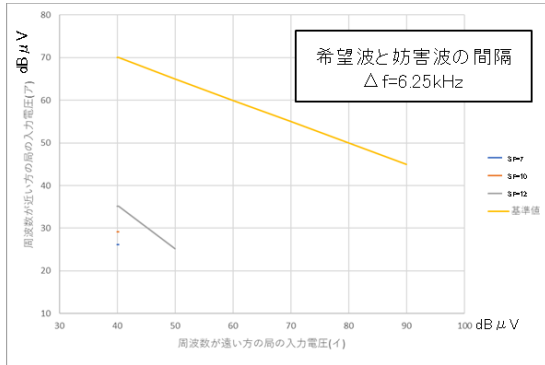
被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	4値FSK



注. 上記グラフにおいて、妨害波イ（周波数が遠い方）を入力した時点で PER が 1% となった測定点は記入していない。

図 4-24 相互変調 提案システム被干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	アナログFM



注. 上記グラフにおいて、妨害波イ（周波数が遠い方）を入力した時点で PER が 1% となった測定点は記入していない。

図 4-25 相互変調 提案システム被干渉 測定結果

4. 3. 6 隣接チャネル干渉測定 提案システム与干渉

400MHz 帯狭帯域 LoRa®が与干渉の場合について、図4-26の構成で測定を行った。アッテネータを調整し、PER（パケットエラーレート）が1%の状態となった時の希望波電力と妨害波電力から D/U を求めた。

なお、400MHz 帯狭帯域 LoRa®については、拡散係数 7、10、12 のそれぞれに対して測定を行った。希望波信号レベルは、基準感度+30dB とした。また、希望波が先に送信を開始し、後から妨害波を送信する順番にて測定を実施した。結果を図4-27～4-28に示す。

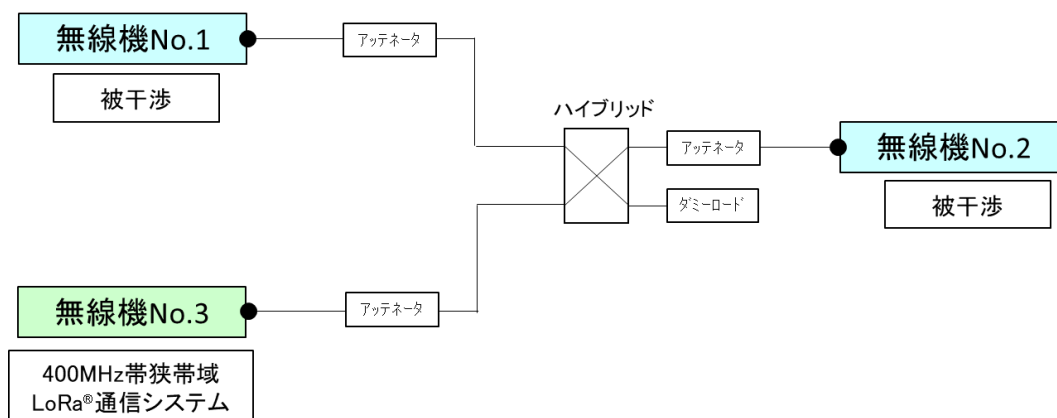
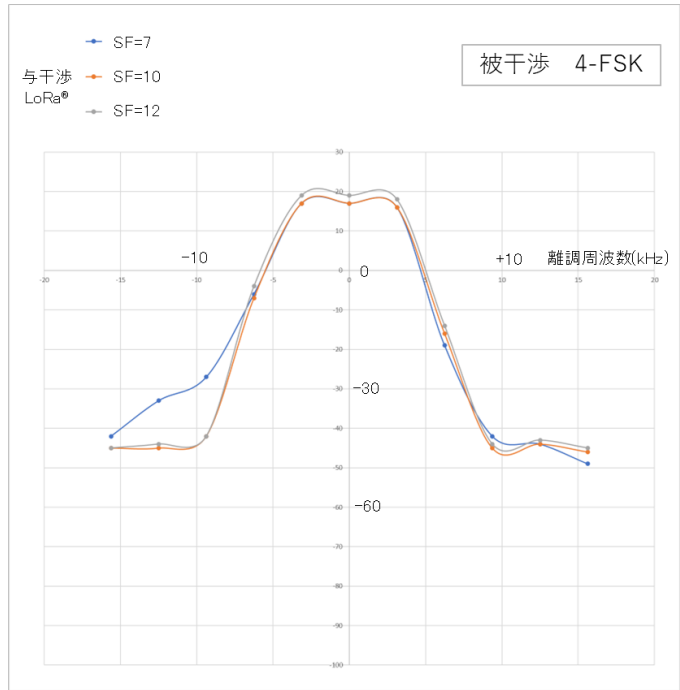


図4-26 隣接チャネル与干渉測定 提案システム与干渉 測定構成

図4-27 被干渉（希望波） 4値FSK
 与干渉（妨害波） 400MHz帯狭帯域LoRa®通信システム
 被干渉（希望波） $\pi/4$ シフトQPSK
 与干渉（妨害波） 400MHz帯狭帯域LoRa®通信システム

図4-28 被干渉（希望波） アナログFM
 与干渉（妨害波） 400MHz帯狭帯域LoRa®通信システム

被干渉 (希望波)	与干渉 (妨害波)
4値FSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム



被干渉 (希望波)	与干渉 (妨害波)
$\pi/4$ シフトQPSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

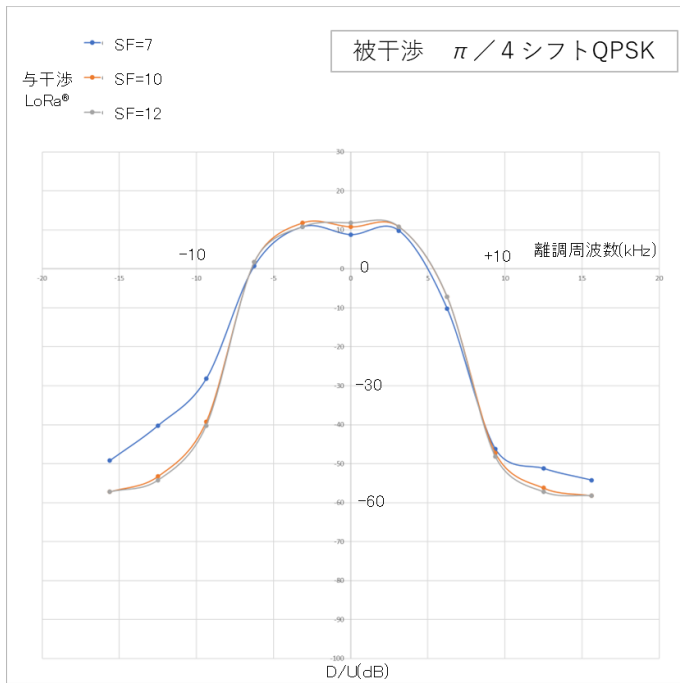


図 4 - 2 7 隣接チャネル与干渉測定 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
アナログFM	400MHz帯狭帯域 LoRa [®] 通信システム

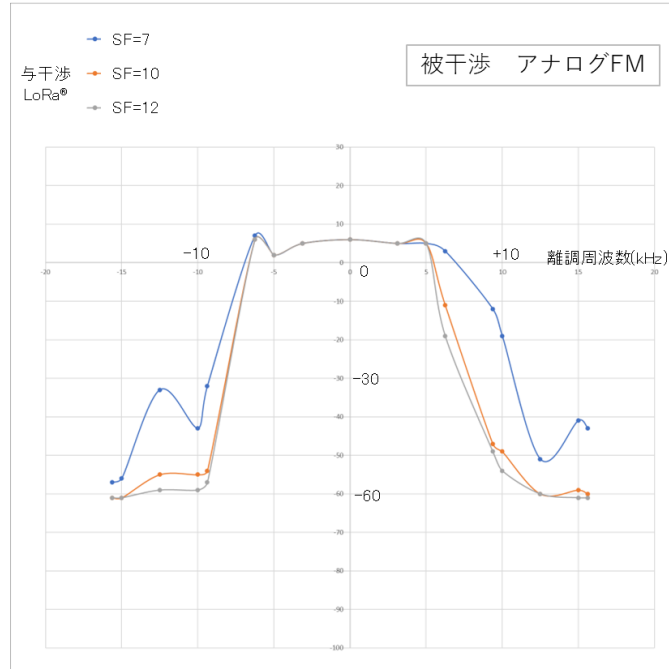


図4-28 隣接チャンネル与干渉測定 提案システム与干渉 測定結果

4. 3. 7 近接チャネル感度抑圧 提案システム与干渉

400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]が与干渉の場合について、図4-29の構成で測定を行った。アッテネータを調整し、PER（パケットエラーレート）が1%の状態となった時の妨害波電力を求めた。

なお、400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]については、拡散係数 7、10、12 のそれぞれに対して測定を行った。希望波信号レベルは、0、10、20dB μ V（-113、-103、-93dBm）とした。また、希望波が先に送信を開始し、後から妨害波を送信する順番にて測定を実施した。結果を図4-30～4-38に示す。

参考として、電波法関係審査基準別図第37号の2近接波妨害基準特性曲線（与干渉局が狭帯域デジタル通信方式を使用する無線局、60MHz帯の周波数を使用するルーラル加入無線局または54MHzを超え68MHz以下若しくは162.025MHzを超え169MHz以下の周波数の電波を使用するデジタル変調方式の音声放送番組中継を行う固定局の場合）で示される妨害波許容限界強度との比較を行っている。

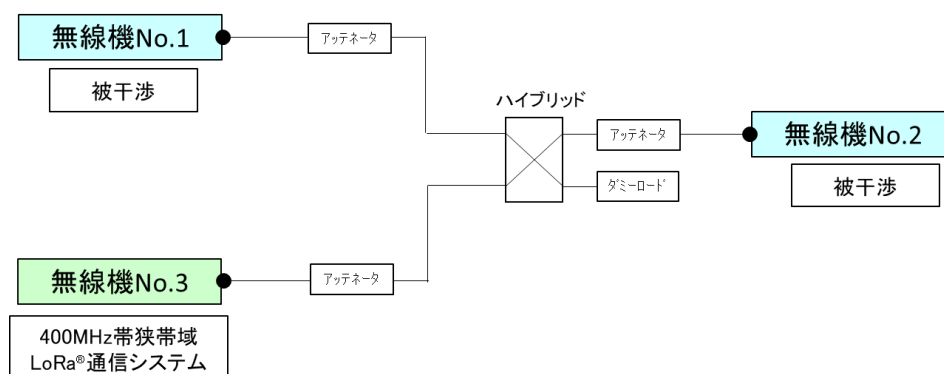


図4-29 近接チャネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定構成

- | | | |
|------------|----------|------------------------------------|
| 図4-30～4-32 | 被干渉（希望波） | 4値FSK |
| | 与干渉（妨害波） | 400MHz帯狭帯域LoRa [®] 通信システム |
| 図4-33～4-35 | 被干渉（希望波） | $\pi/4$ シフトQPSK |
| | 与干渉（妨害波） | 400MHz帯狭帯域LoRa [®] 通信システム |
| 図4-36～4-38 | 被干渉（希望波） | アナログFM |
| | 与干渉（妨害波） | 400MHz帯狭帯域LoRa [®] 通信システム |

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
4値FSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

希望波信号レベル
0dB μ V
(-113dBm)

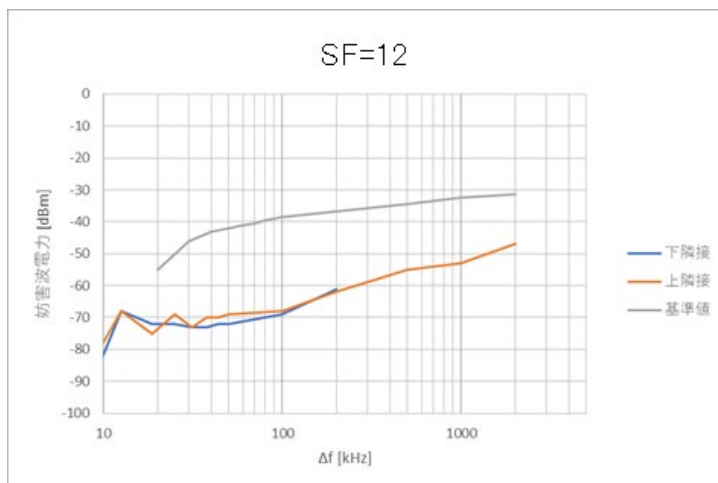
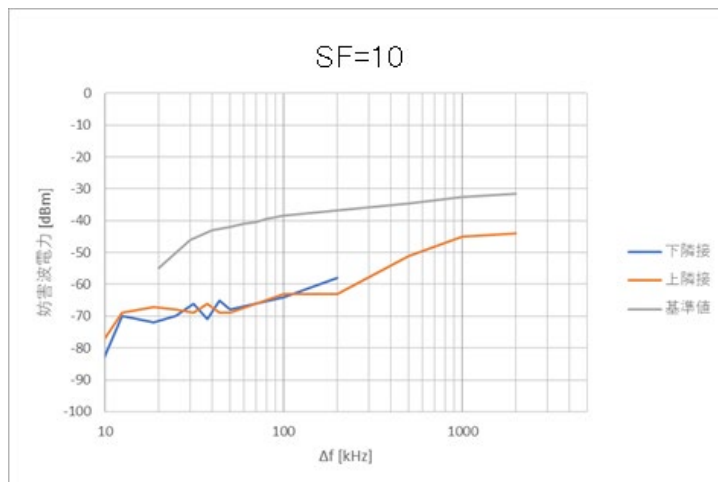
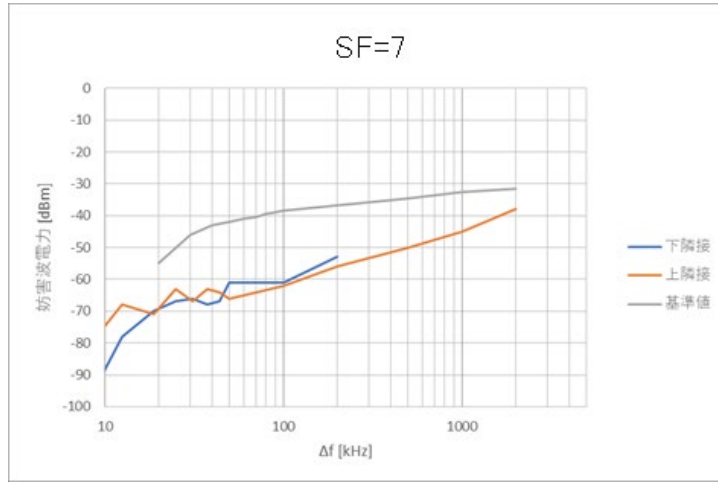


図4-30 近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
4値FSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

希望波信号レベル
10dB μ V
(-103dBm)

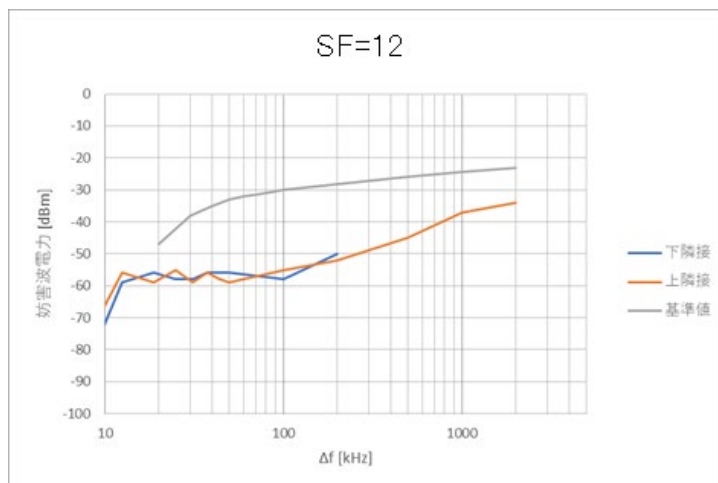
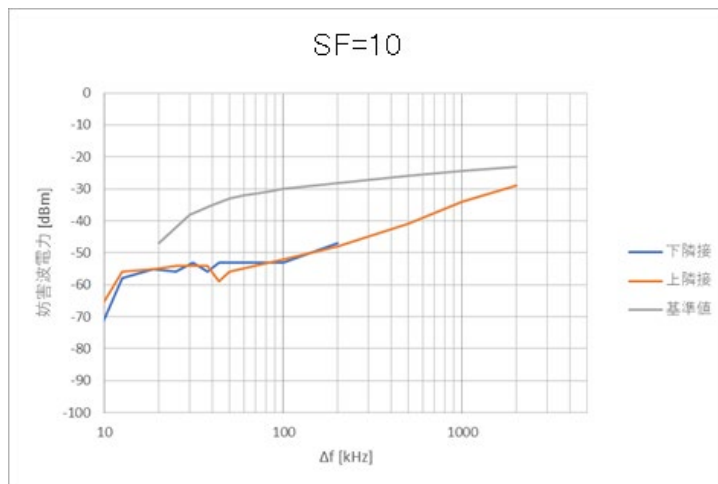
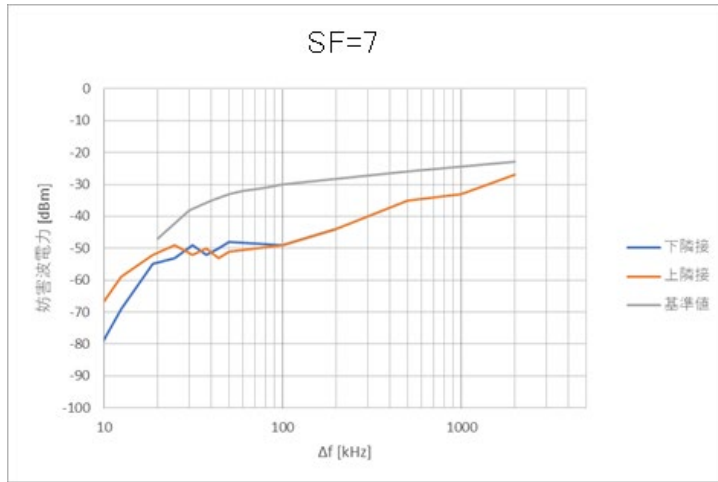


図4-31 近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
4値FSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

希望波信号レベル
20dB μ V
(-93dBm)

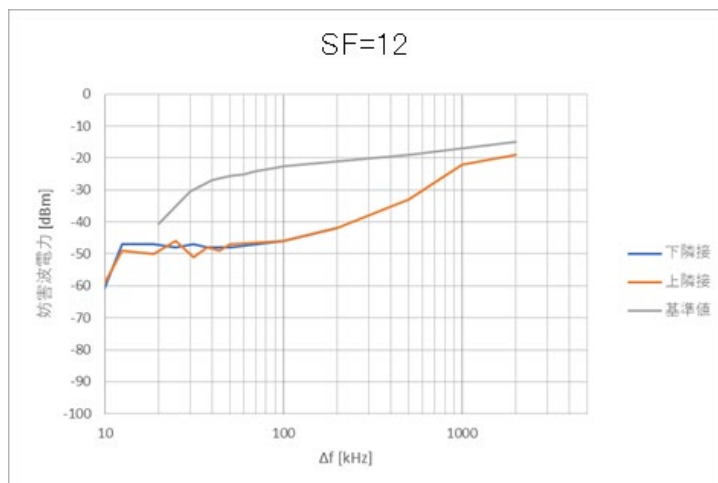
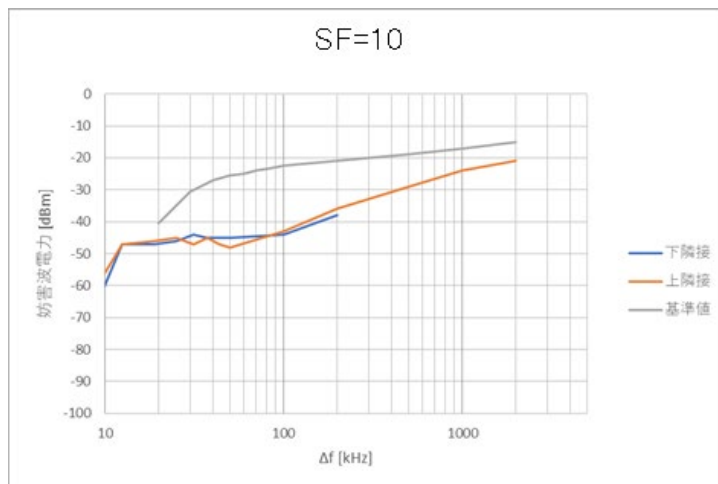
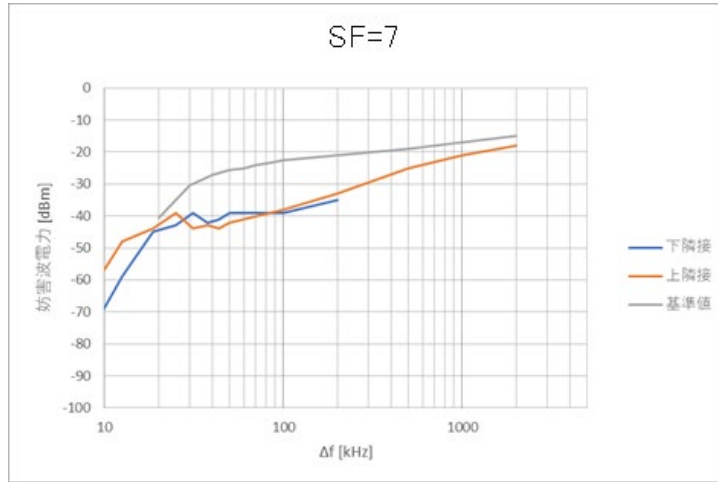


図4-32 近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
$\pi/4$ シフトQPSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

希望波信号レベル
0dB μ V
(-113dBm)

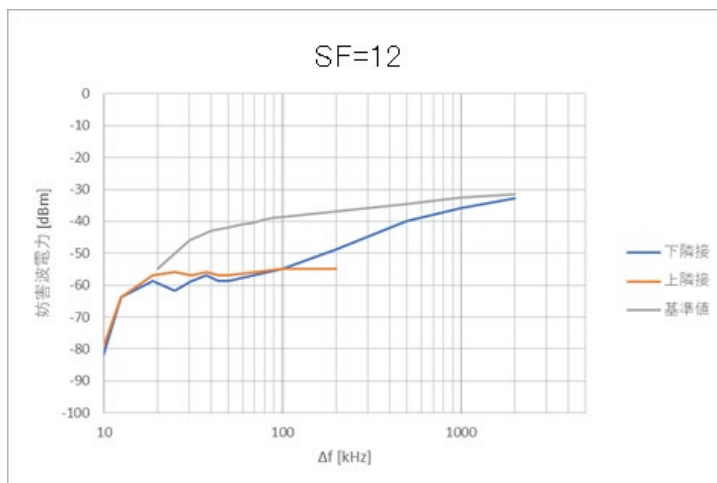
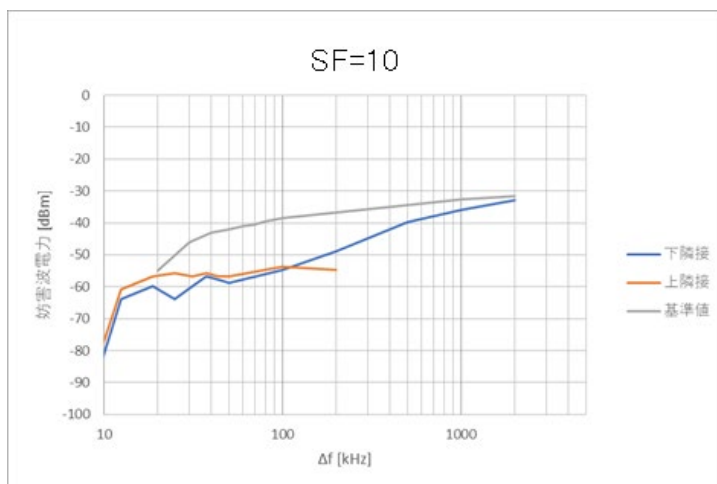
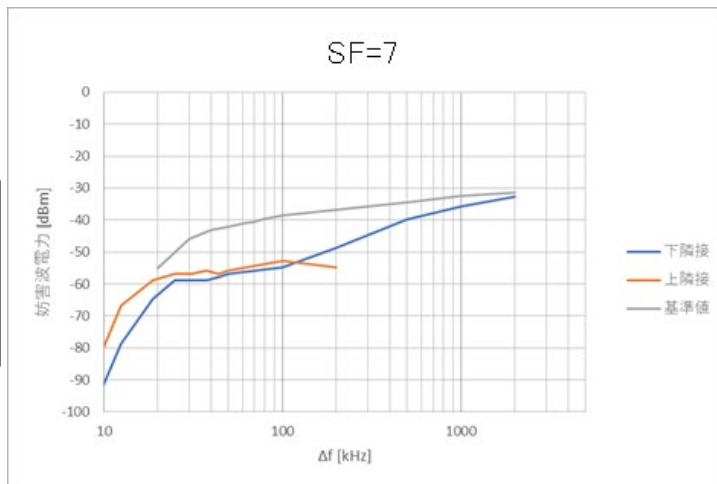


図4-33 近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
$\pi/4$ シフトQPSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

希望波信号レベル
10dB μ V
(-103dBm)

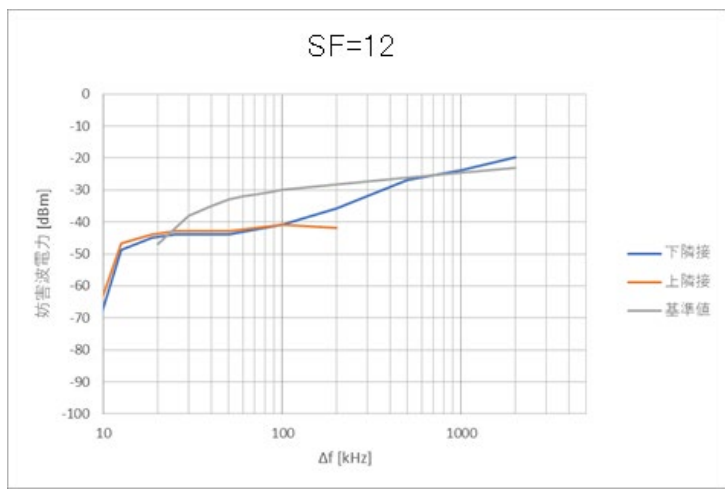
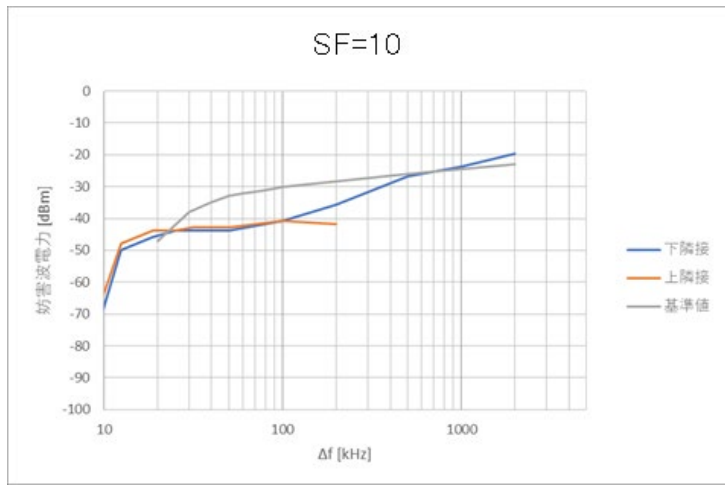
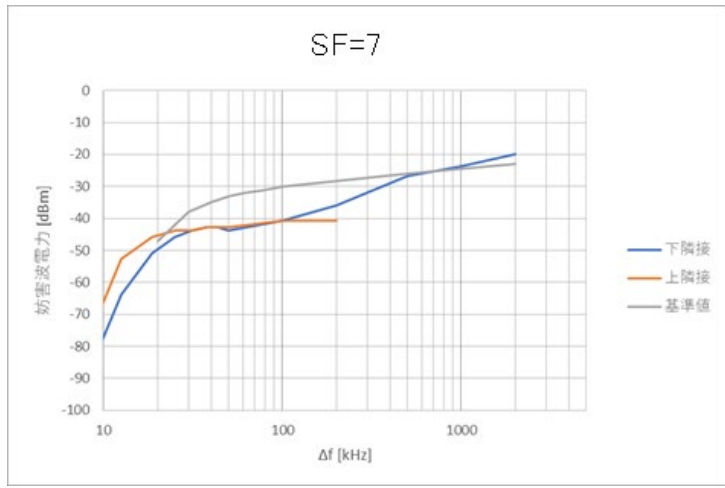


図4-34 近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
$\pi/4$ シフトQPSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

希望波信号レベル
20dB μ V
(-93dBm)

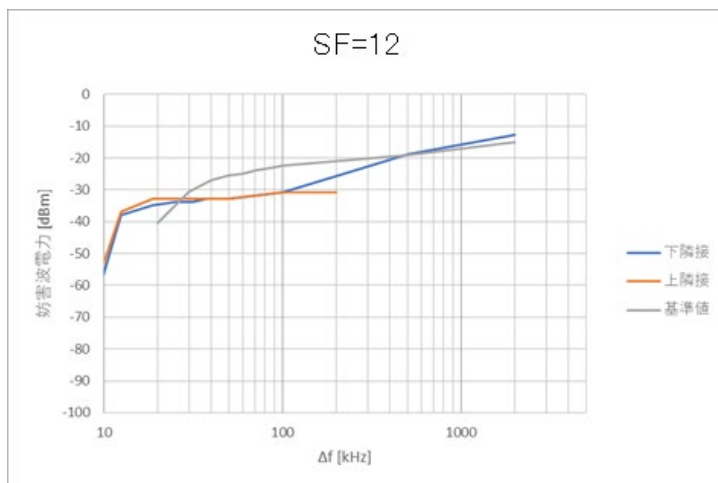
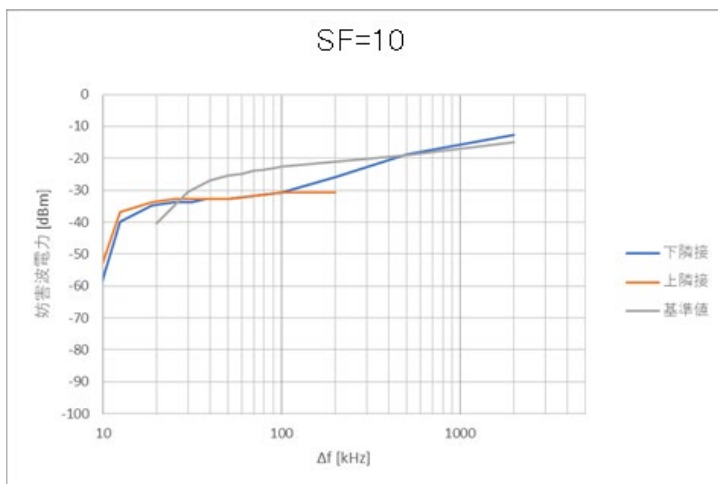
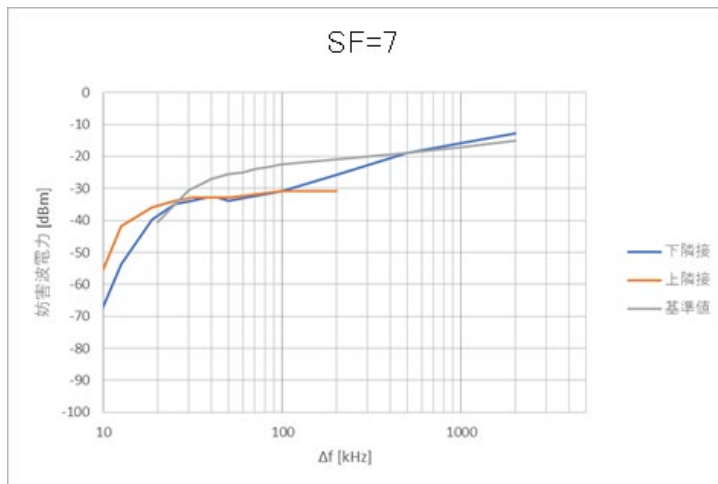


図4-35 近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
アナログFM	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

希望波信号レベル
0dB μ V
(-113dBm)

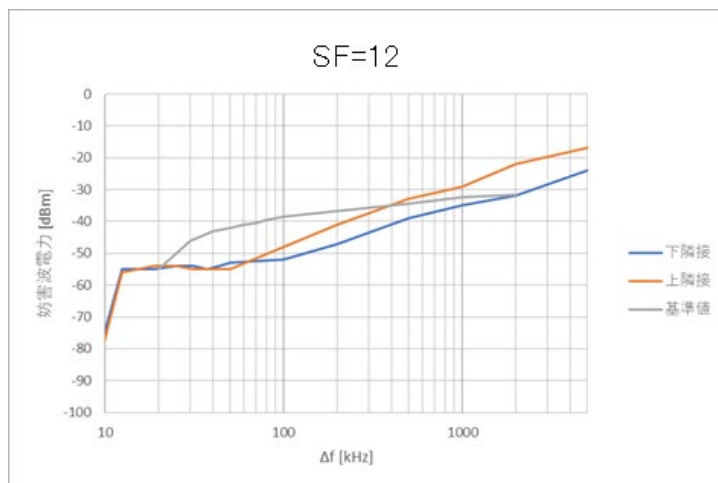
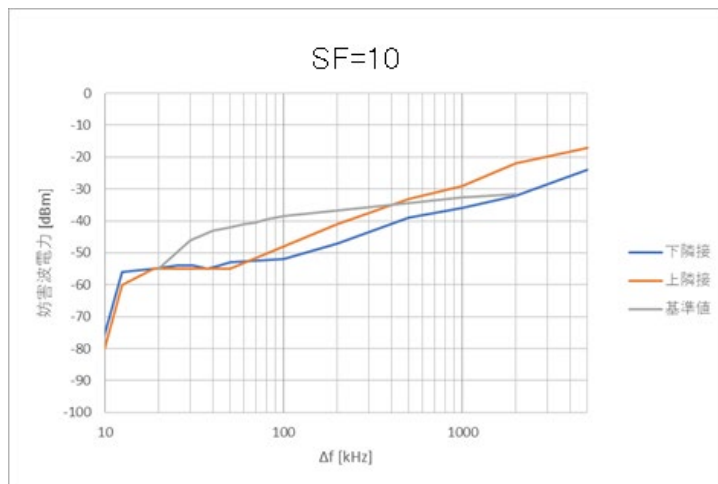
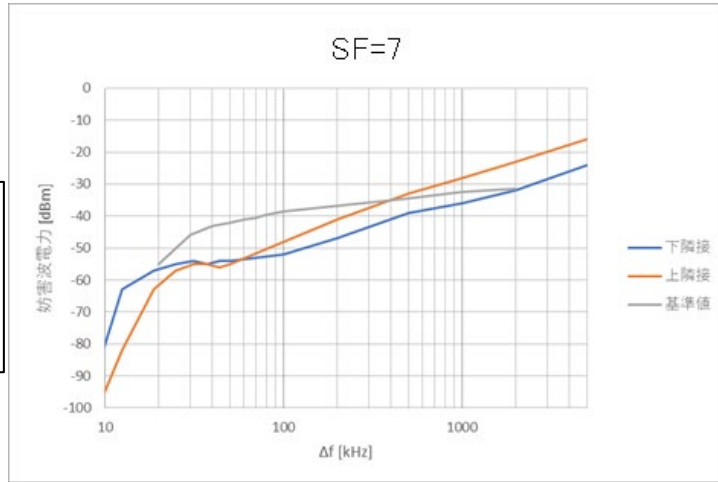


図4-36 近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
アナログFM	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

希望波信号レベル
10dB μ V
(-103dBm)

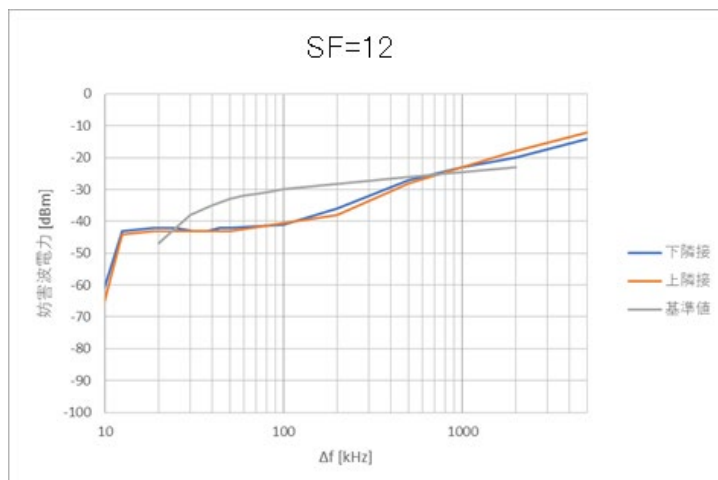
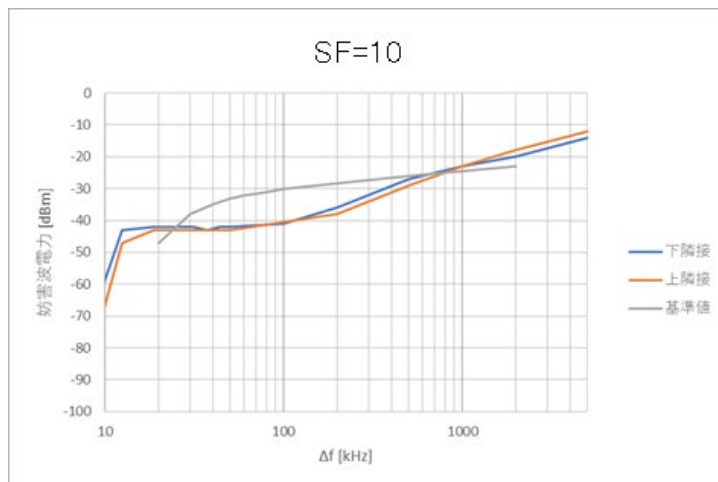
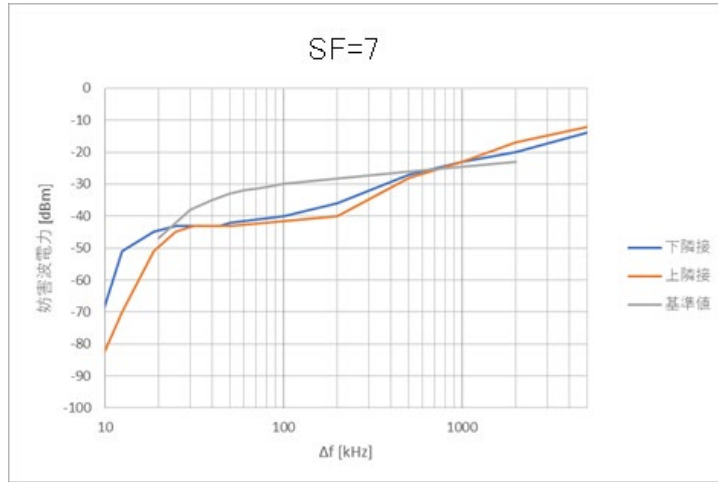


図4-37 近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
アナログFM	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

希望波信号レベル
20dB μ V
(-93dBm)

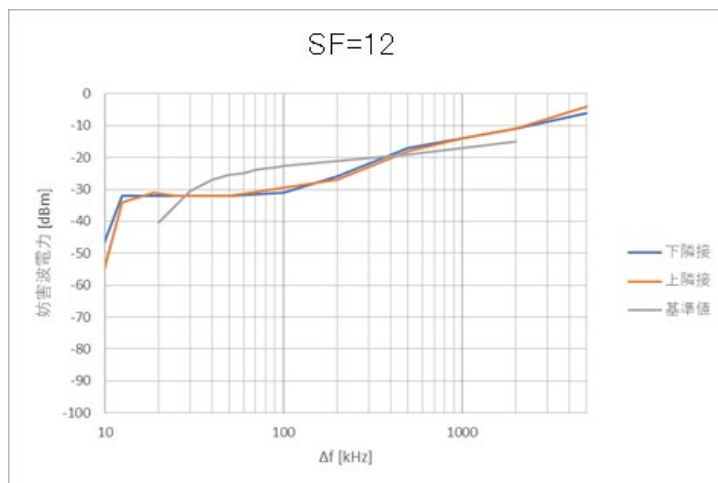
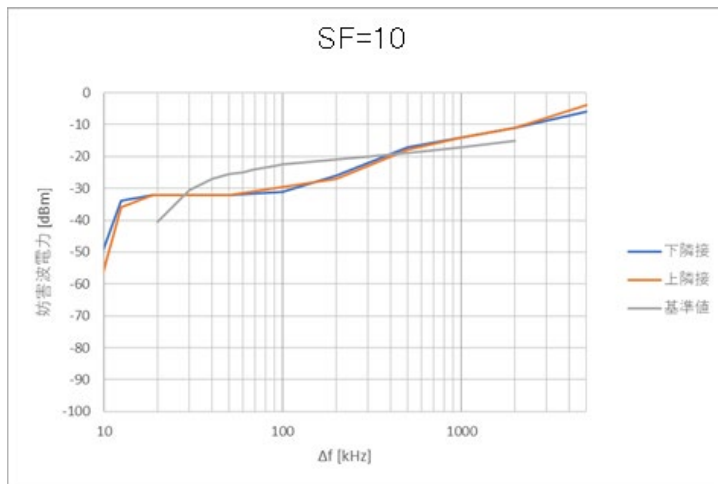
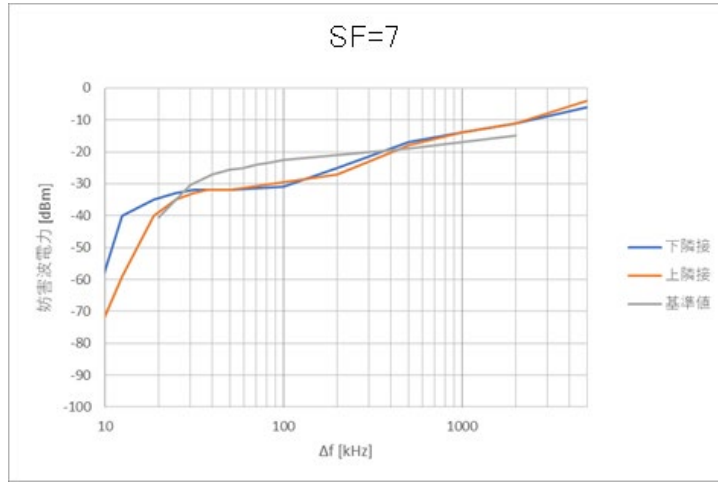


図4-38 近接チャンネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定結果

4. 3. 8 相互変調 提案システム与干渉

400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]が与干渉の場合について、図4-39の構成で測定を行った。アッテネータを調整し、PER（パケットエラーレート）が1%の状態となった時の妨害波入力電圧を求めた。

なお、400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]については、拡散係数 7、10、12 のそれぞれに対して測定を行った。希望波信号レベルは、基準感度+3dB の他に参考のため、基準感度+13dB、+23dB、+33dB についても測定を実施した。妨害波イ（周波数が遠い方）のレベルは 40、50、60、70、80、90、100dB μ V とした。また、希望波が先に送信を開始し、後から妨害波を送信する順番にて測定を実施した。結果を図4-40～4-42に示す。

参考として電波法関係審査基準別図第38号の2相互変調基準特性曲線（狭帯域デジタル通信方式等）③ $\pi/4$ QPSK(SCPC)、4FSK(SCPC)および RZ SSB のものとの比較を行っている。

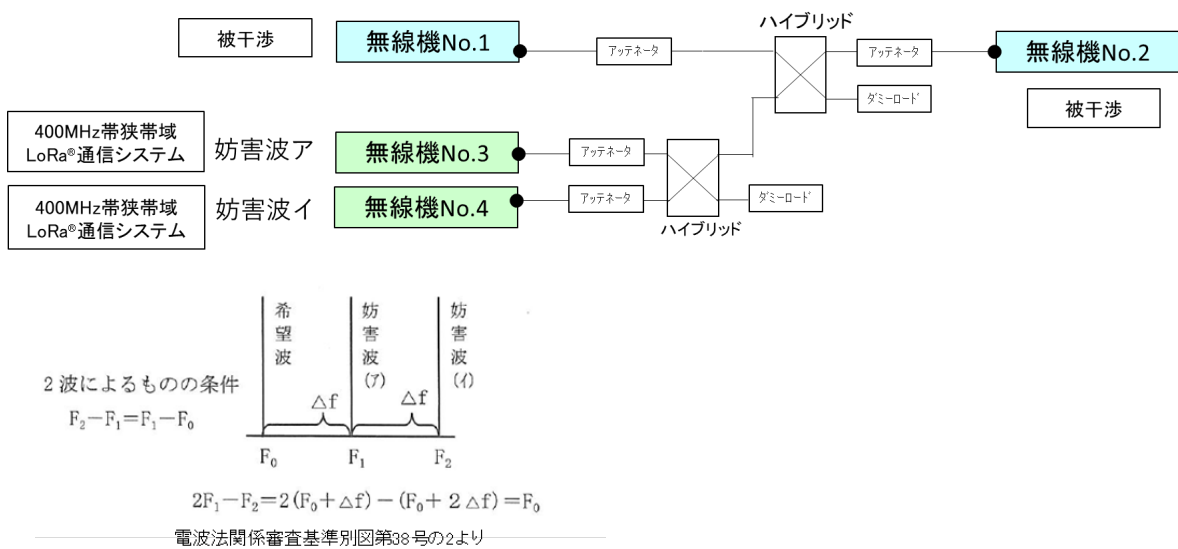


図4-39 相互変調 提案システム与干渉 測定構成

- | | | |
|-------|----------|------------------------------------|
| 図4-40 | 被干渉（希望波） | 4値FSK |
| | 与干渉（妨害波） | 400MHz帯狭帯域LoRa [®] 通信システム |
| 図4-41 | 被干渉（希望波） | $\pi/4$ シフトQPSK |
| | 与干渉（妨害波） | 400MHz帯狭帯域LoRa [®] 通信システム |
| 図4-42 | 被干渉（希望波） | アナログFM |
| | 与干渉（妨害波） | 400MHz帯狭帯域LoRa [®] 通信システム |

注. 各グラフにおいて、妨害波イ（周波数が遠い方）を入力した時点でPERが1%となった測定点は記入していない。

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
4値FSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

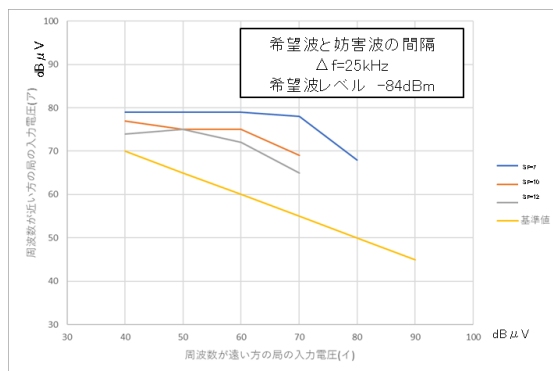
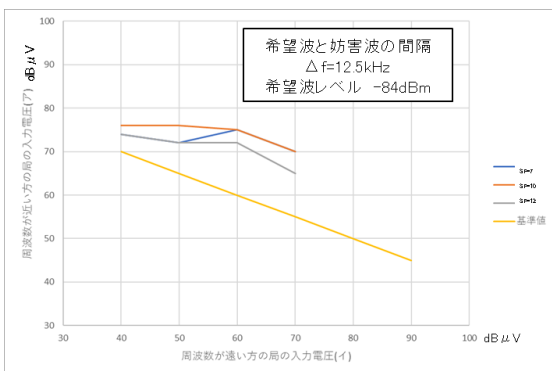
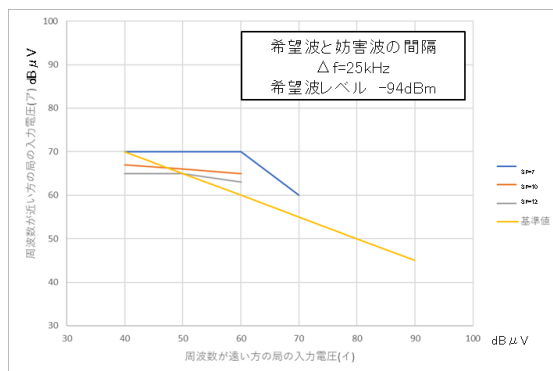
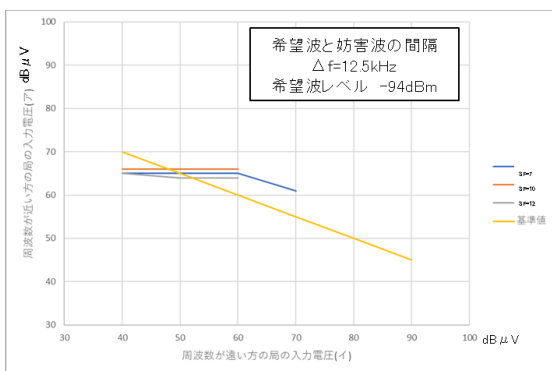
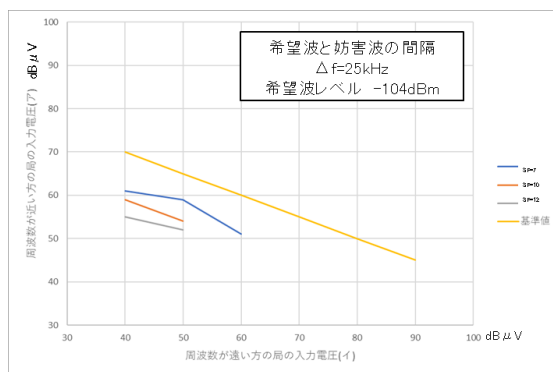
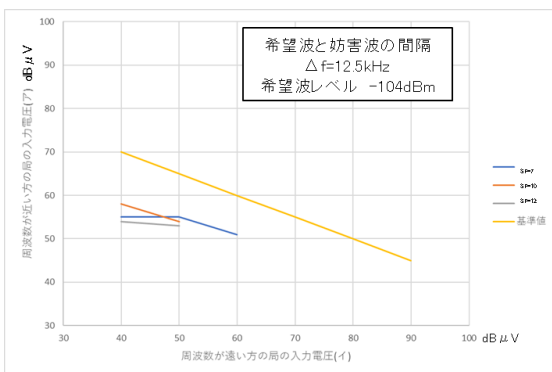
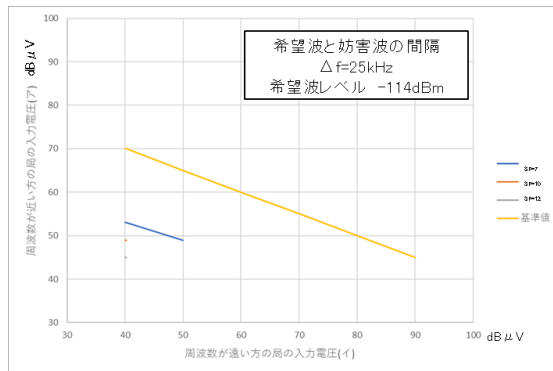
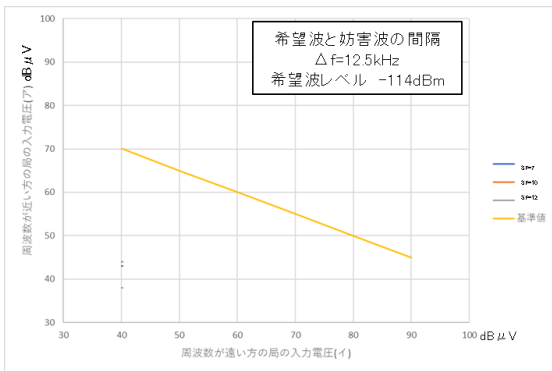


図4-40 相互変調 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
$\pi/4$ シフトQPSK	400MHz帯狭帯域 LoRa [®] 通信システム

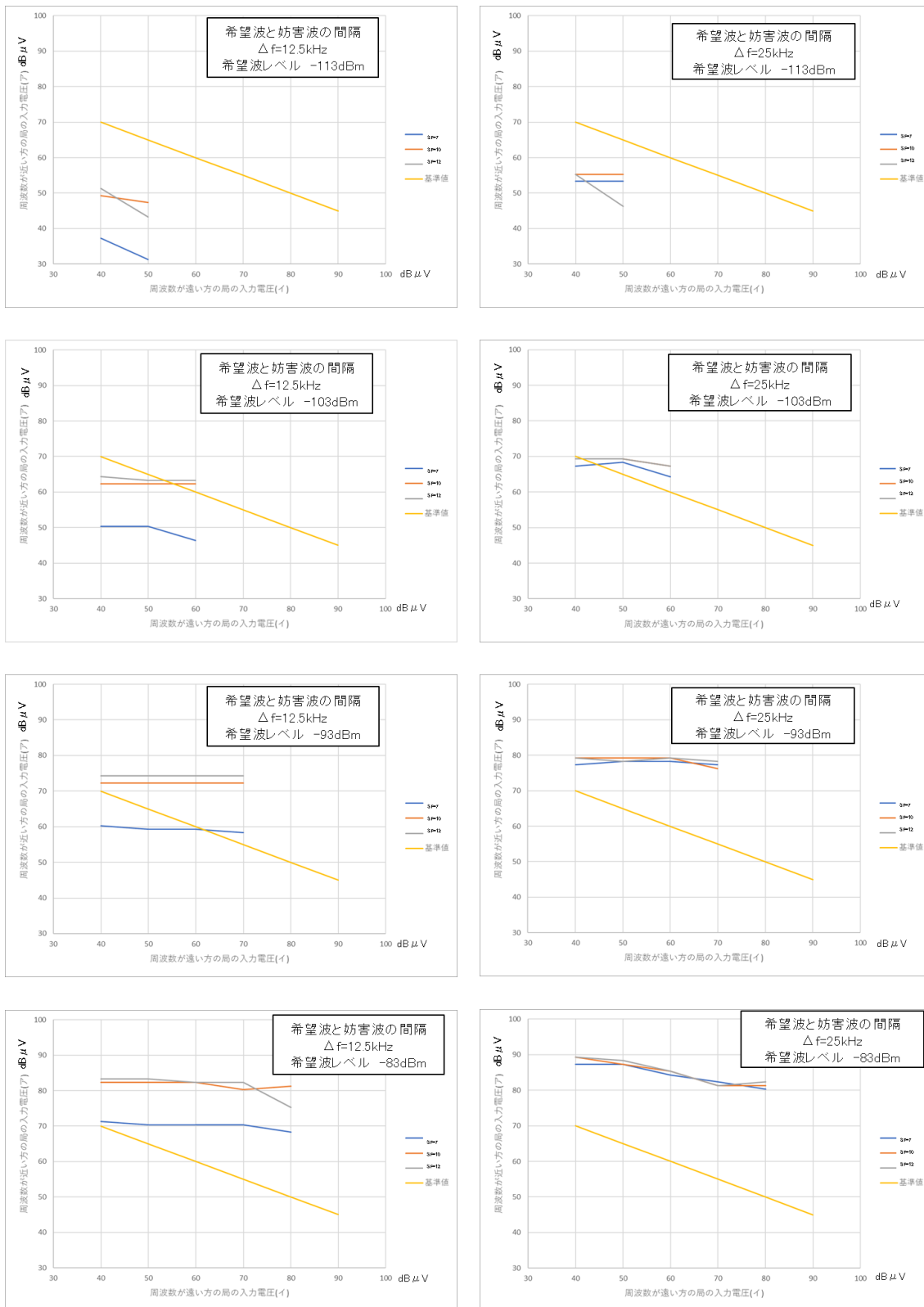


図4-41 相互変調 提案システム与干渉 測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
アナログFM	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

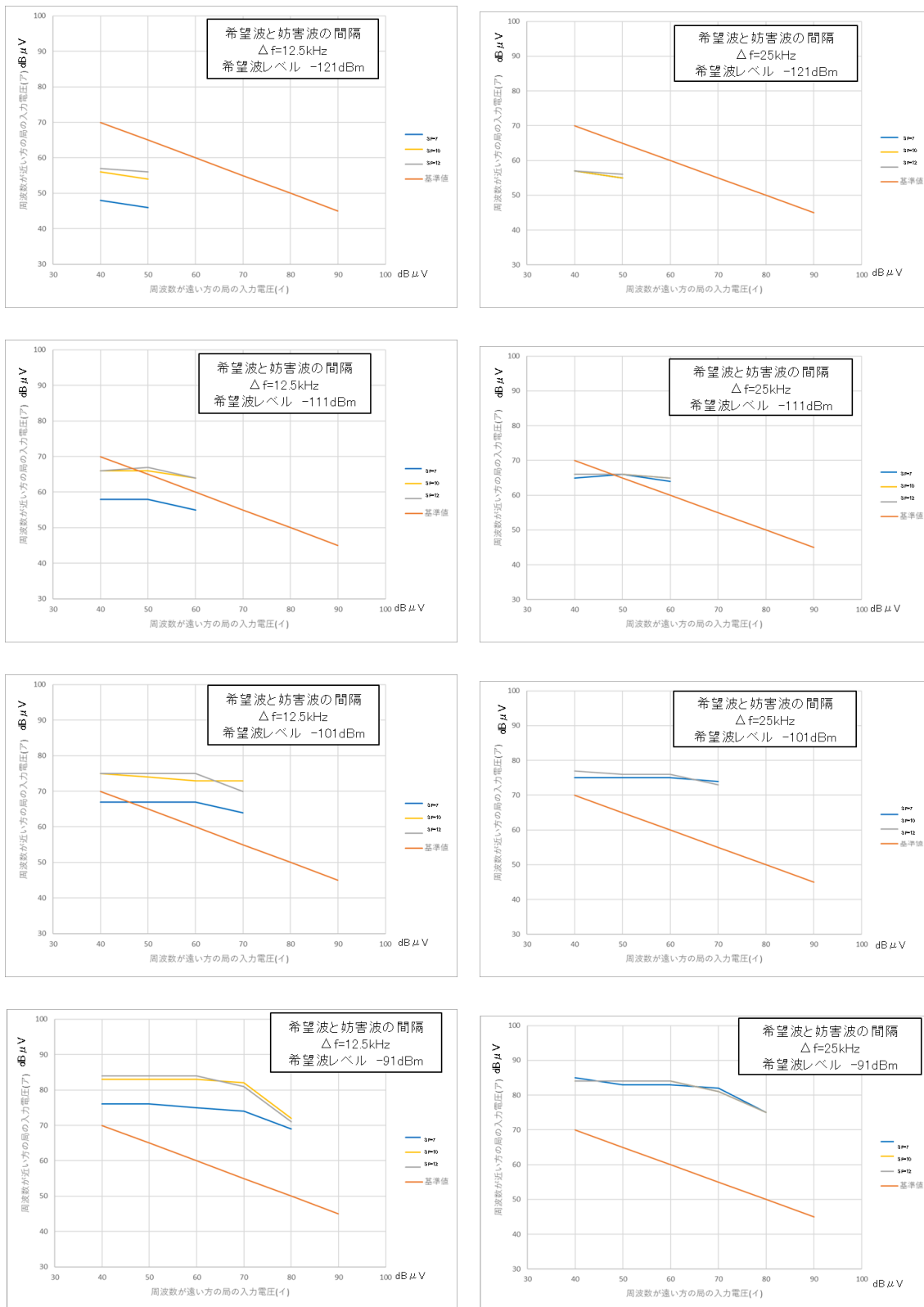


図4-42 相互変調 提案システム与干渉 測定結果

4. 3. 9 屋内実証実験 まとめ

提案システム被干渉の近接チャネル感度抑圧については、電波法関係審査基準別図第 37 号の 2 近接波妨害基準特性曲線で示される、狭帯域デジタル通信方式の妨害波許容限界強度を上回っている（測定例 図 4-4 3）。このため、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムは、十分な耐干渉性能を有していると考えられる。

②干渉測定結果 a.提案システム被干渉

②a-3. 近接チャネル感度抑圧

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	4値FSK

希望波信号レベル
0dB μ V
(-113dBm)

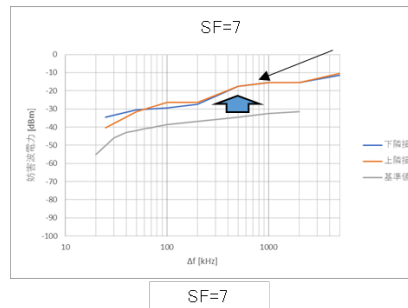


図 4-4 3 近接チャネル感度抑圧 提案システム被干渉 測定例

提案システム被干渉の相互変調については、電波法関係審査基準別図第 38 号の 2 相互変調基準特性曲線で示される、狭帯域デジタル通信方式の値とほぼ同等な結果となっている（周波数差 400kHz 以上にて）（測定例 図 4-4 4）。

②干渉測定結果 a.提案システム被干渉

②a-4. 相互変調

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	4値FSK

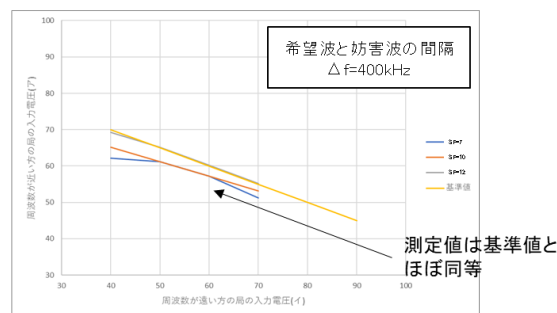


図 4-4 4 相互変調 提案システム被干渉 測定例

提案システム与干渉の近接チャネル感度抑圧については、電波法関係審査基準別図第 37 号の 2 近接波妨害基準特性曲線で示される、狭帯域デジタル通信方式の妨害波許容限界強度を下回っている（測定例 図 4-45）。

②干渉測定結果 b.提案システム与干渉

②b-3. 近接チャネル感度抑圧

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
4値FSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

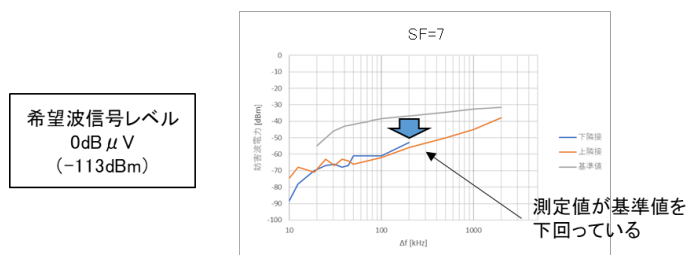


図 4-45 近接チャネル感度抑圧 提案システム与干渉 測定例

また、提案システム与干渉の相互変調については、電波法関係審査基準別図第 38 号の 2 相互変調基準特性曲線で示される、狭帯域デジタル通信方式の値を下回っている（測定例 図 4-46）。

②干渉測定結果 b.提案システム与干渉

②b-4. 相互変調

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
4値FSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

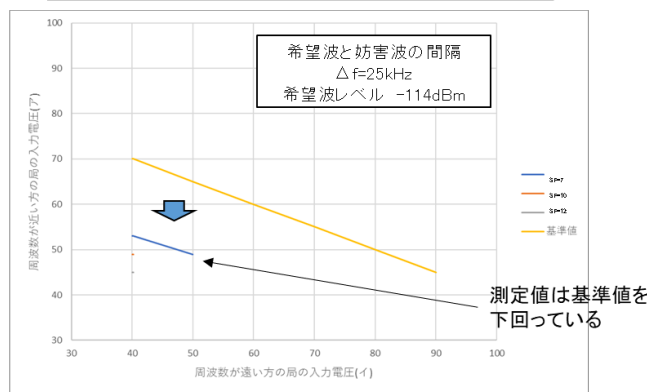
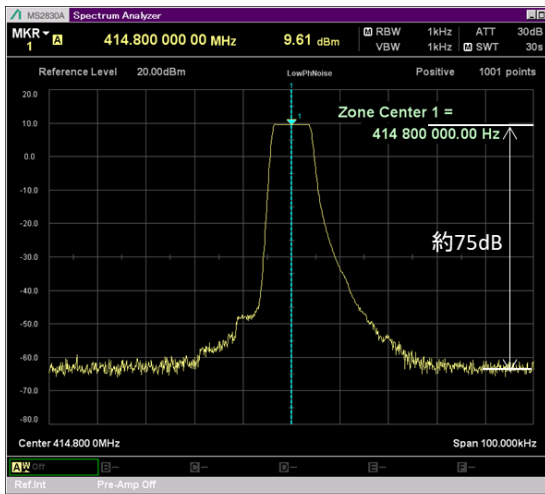


図 4-46 相互変調 提案システム与干渉 測定例

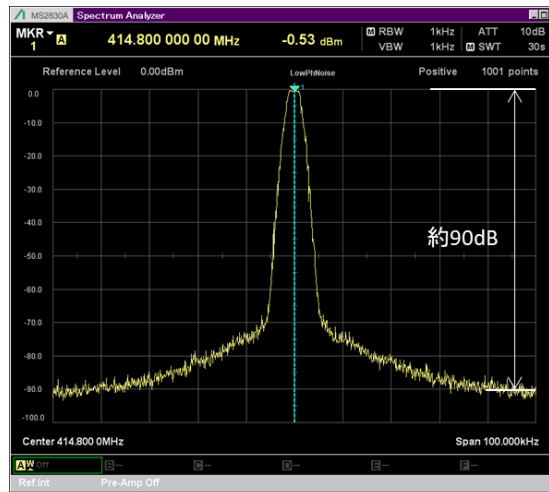
以上から、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムが被干渉の場合は、電波法関係審査基準別図第 37 号の 2 近接波妨害基準特性曲線および電波法関係審査基準別図第 38 号の 2 相互変調基準特性曲線を適用可能で、狭帯域デジタル方式と同等な扱いが可能と考えられる。

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムが与干渉の場合は、電波法関係審査基準別図第 37 号の 2 近接波妨害基準特性曲線および電波法関係審査基準別図第 38 号の 2 相互変調基準特性曲線にて示された値を 10dB 程度下回っており、狭帯域デジタル方式よりも与干渉が大きいため、置局時には、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの値を使用するの扱いが必要と考えられる。必要な離隔距離については、第 5 章にて検討を行っている。

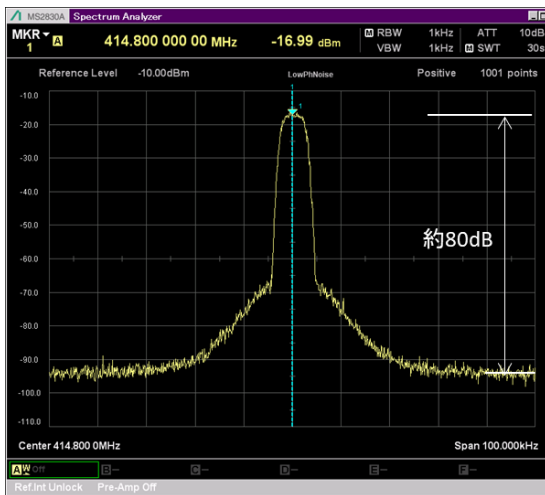
提案システム与干渉の場合、測定値が狭帯域デジタル通信方式の基準値を下回っている原因について、使用した 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムのスプリアス放射レベルが、使用した既存システム無線機（狭帯域デジタル通信方式）よりも高いことが考えられる。今回測定した各方式のスプリアス波形を図 4-47～4-48 に示す。



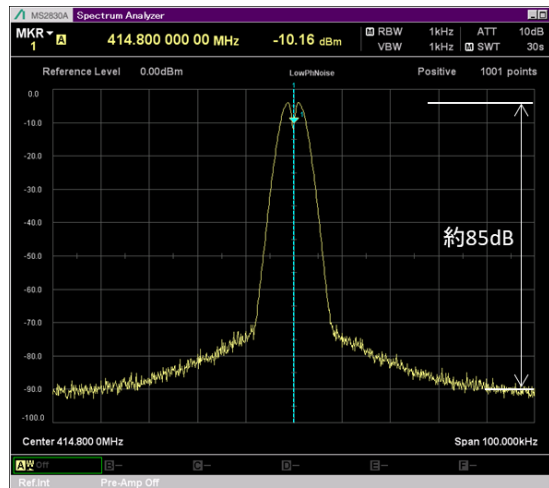
400MHz帯狭帯域LoRa SF=8



4-FSK

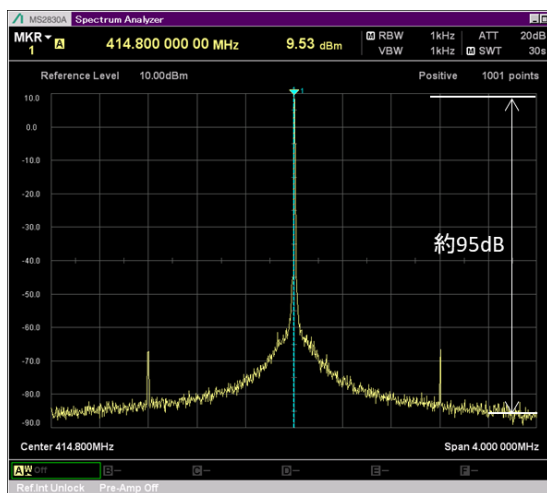


$\pi/4$ QPSK

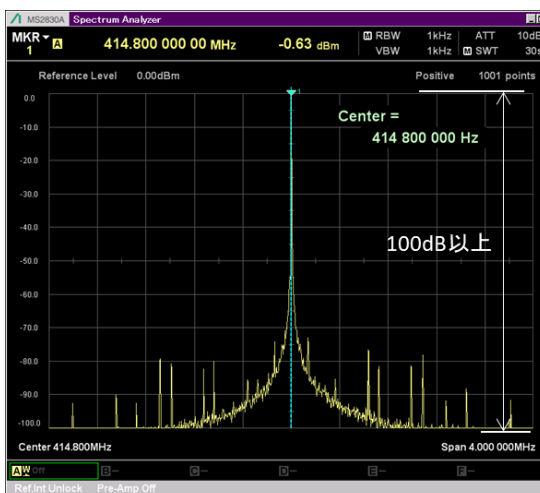


アナログFM 1kHz70%変調

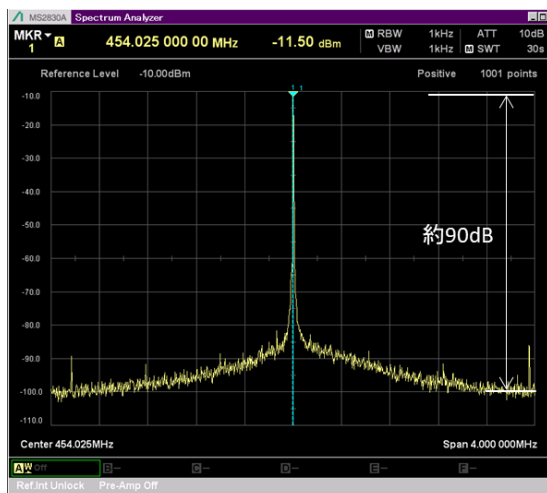
図4-47 各方式のスプリアス波形 (414.8MHz スパン 100kHz)



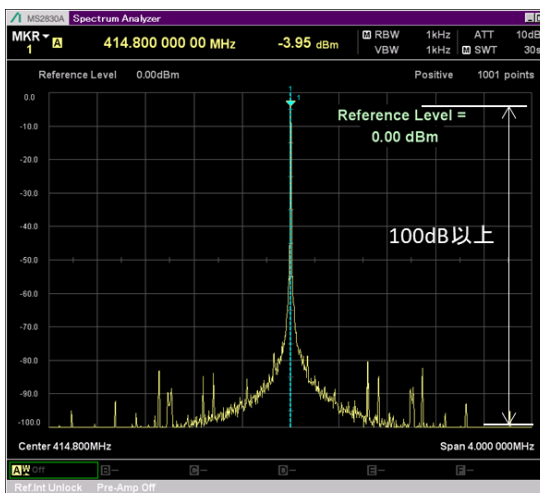
400MHz帯狭帯域LoRa SF=8



4-FSK



$\pi/4$ QPSK

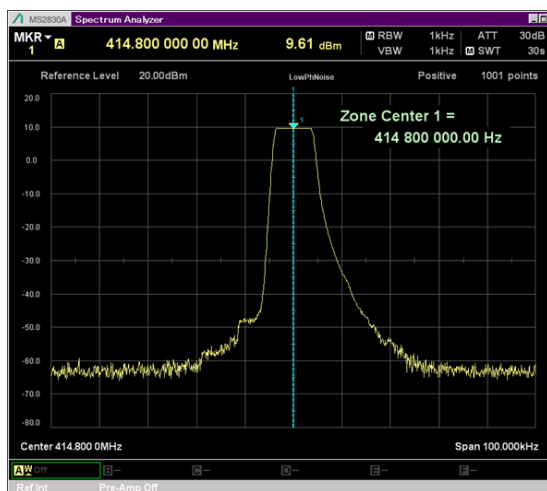


アナログFM 1kHz70%変調

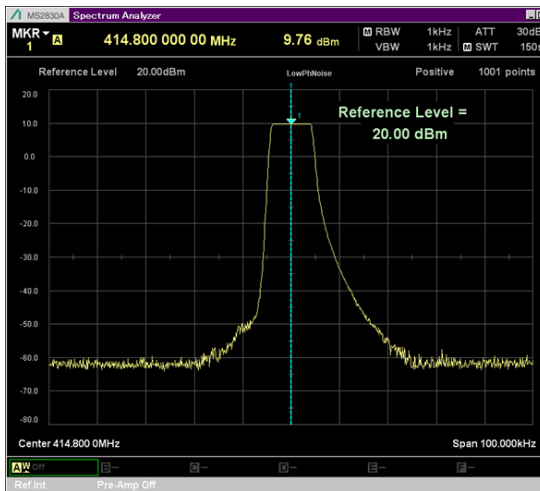
図4-48 各方式のスプリアス波形 (414.8MHz スパン 4MHz)

400MHz 帯狭帯域 LoRa®のスプリアス実測値は、他の既存システム実測値と比べ、5～15dB 高い値となった。特に中心周波数±50kHz 程度の近傍において高い測定結果となっている。このことが400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの与干渉特性に影響を与えている可能性も考えられる。

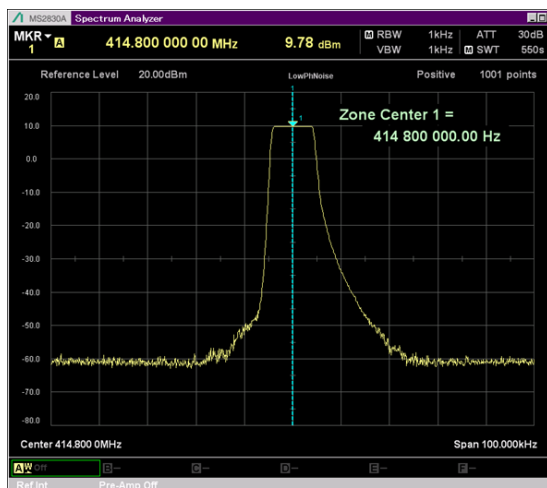
参考として、拡散係数 SF を変化させた場合の400MHz 帯狭帯域 LoRa®のスプリアス実測値を図4-49～4-50に示す。拡散係数 SF による変化はほとんど見られない。



400MHz帯狭帯域LoRa SF=8

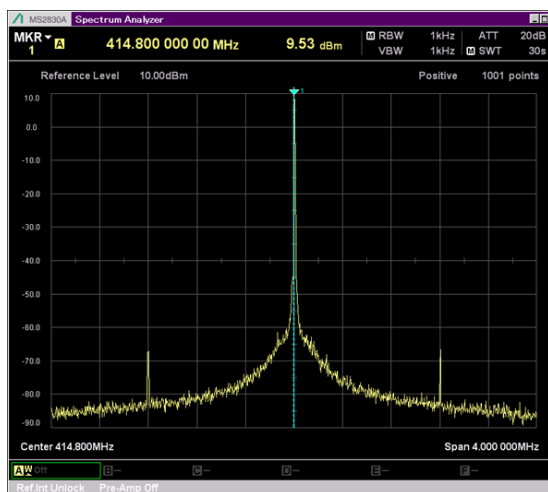


400MHz帯狭帯域LoRa SF=10

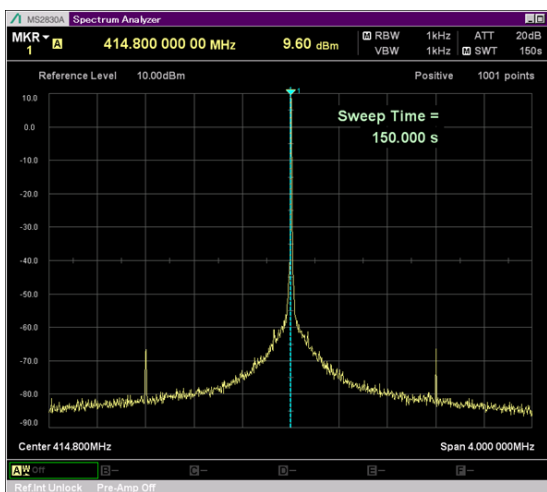


400MHz帯狭帯域LoRa SF=12

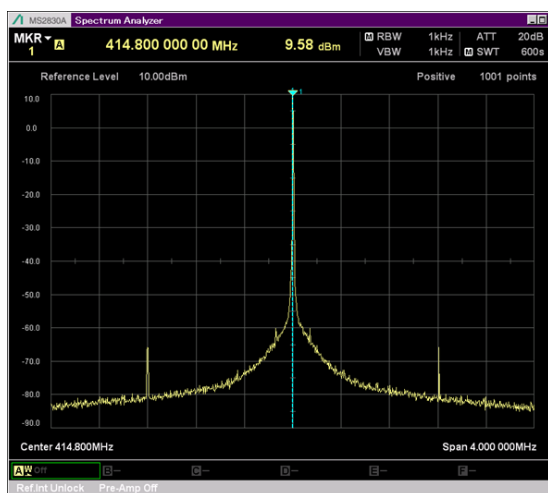
図 4-4-9 400MHz 帯狭帯域 LoRa®のスプリース波形 (414.8MHz スパン 100kHz)



400MHz帯狭帯域LoRa SF=8



400MHz帯狭帯域LoRa SF=10



400MHz帯狭帯域LoRa SF=12

図 4-5 0 400MHz 帯狭帯域 LoRa®のスペリアス波形 (414.8MHz スパン 4MHz)

なお、提案システム与干渉、アナログ FM 被干渉の測定において、拡散係数 SF=7 の場合、他の拡散係数とは異なる傾向が見られた (図 4-5 1)。

②干渉測定結果 b.提案システム与干渉 ②b-1. 同一チャンネル干渉測定
 ②b-2. 隣接チャンネル干渉

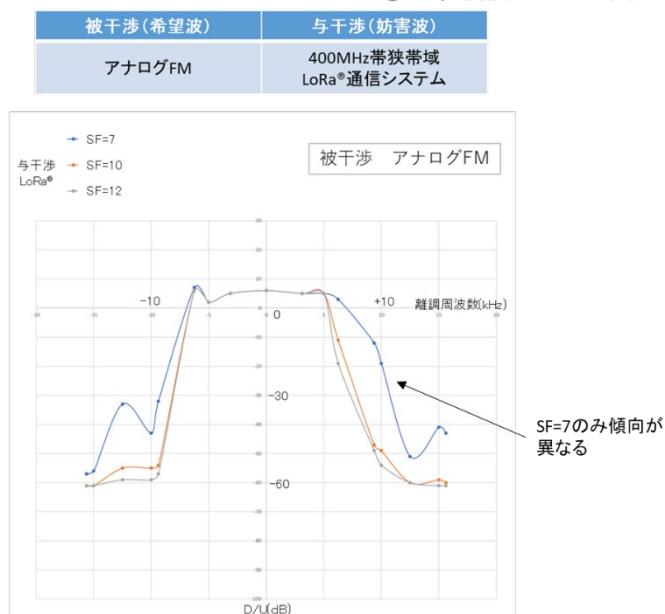


図4-5-1 隣接チャンネル干渉 提案システム与干渉 測定例

調査の結果、測定の際にアナログFMの受信音から、ポツポツという音が短い間隔で連続的に聞こえ、これにより SINAD が劣化していることが分かった。SF=10、12 においては、ポツポツ音の間隔が長いため、SINAD の劣化が見られない（測定されない）結果となっている。

スペクトラムアナライザで観察した結果、ポツポツ音は、LoRa®のチャープ変調波が急激に周波数を変更する際に発生していることが分かった（図4-5-2）。

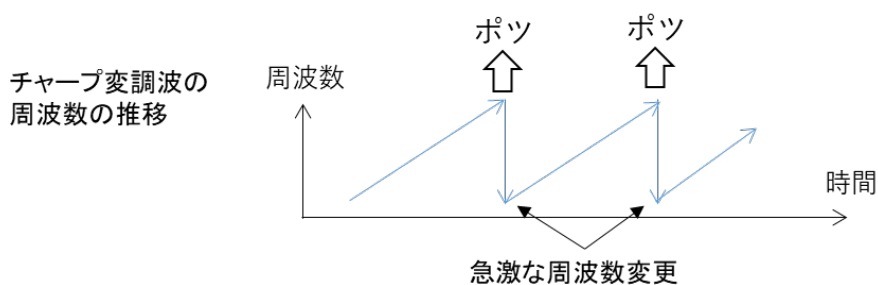


図4-5-2 ポツポツ音の発生タイミング

LoRa®チャープ変調波の急激な周波数変更が、400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの与干渉特性に影響を与えている可能性も考えられるが、本調査検討においては、この検証は未実施となっている。

4. 4 屋外実証実験結果

屋外実証実験の結果を、以下に示す。

4. 4. 1 ドライブテスト

4. 4. 1. 1 ドライブテスト概要

試作システムにて、高知県内の中山間地域（屋外）にて実際に電波を発射し、受信電力やパケットエラーレート（PER）の測定を行う伝搬調査を実施した（図4-53）。広範囲の受信状態を把握するために、送信は固定、受信は車両で移動した状態にて測定（ドライブテスト）を実施した。

また、400MHz帯狭帯域 LoRa®の他に、429MHz帯特定小電力 LoRa®及び920MHz帯特定小電力 LoRa®についても同時に測定を行い、比較検証を実施した。

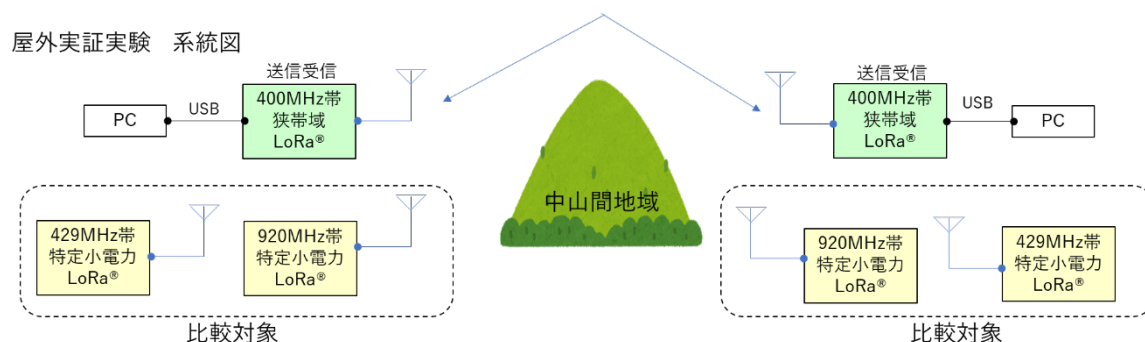


図4-53 伝搬調査 概要図

ドライブテストにおいては、車両を走行しながら、搭載した無線機で受信レベルを測定しながら、同時にGPSからの緯度経度情報を記録する。これによって、各地点の受信レベルを測定することができ、広範囲の伝搬状況の把握が可能となる。

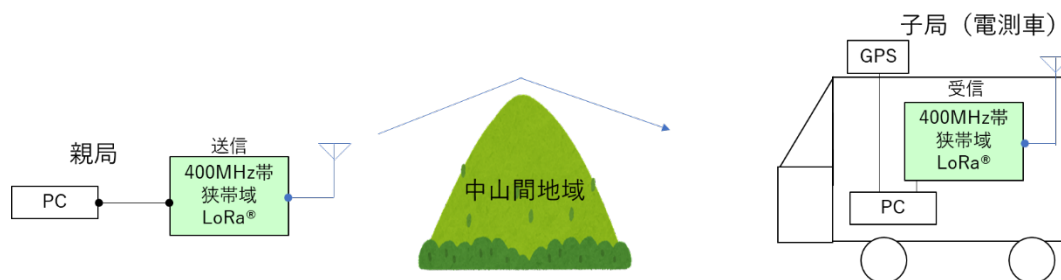


図4-54 ドライブテスト概要

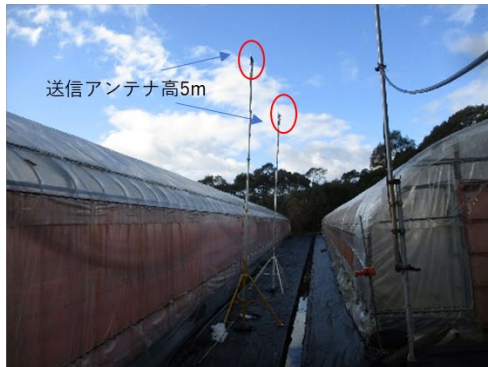
4. 4. 1. 2 ドライブテスト測定条件

ドライブテストでの測定条件を表4-8に、測定状況を図4-55、車両走行ルートを図4-56に示す。

表4-8 ドライブテスト測定条件

周波数	414.8MHz (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 429.5MHz (429MHz 帯特定小電力 LoRa®) 920.6MHz (920MHz 帯特定小電力 LoRa®)
空中線電力	1W (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 10mW (429MHz 帯特定小電力 LoRa®) 20mW (920MHz 帯特定小電力 LoRa®)
送信アンテナ高	5m (圃場から送信時) 2m (打井川駅から送信時)
受信アンテナ高	2m (電測車屋根に設置)
送信アンテナ利得	2dBi (無指向性) 11dBi (八木アンテナ 400MHz 帯狭帯域 LoRa®のみ)
受信アンテナ利得	2dBi
送信ケーブル損失	2.6dB (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 2.6dB (429MHz 帯特定小電力 LoRa®) 8.5dB (920MHz 帯特定小電力 LoRa®)
受信ケーブル損失	1.0dB (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 1.0dB (429MHz 帯特定小電力 LoRa®) 1.6dB (920MHz 帯特定小電力 LoRa®)
偏波面	垂直
電測車走行速度	時速約 40km
送信場所	圃場および打井川駅
測定項目	受信電力

親局（圃場）



親局（打井川駅から送信）



子局（電測車）

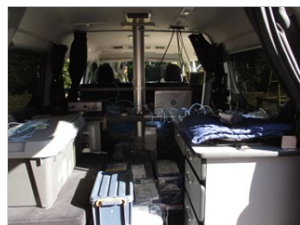
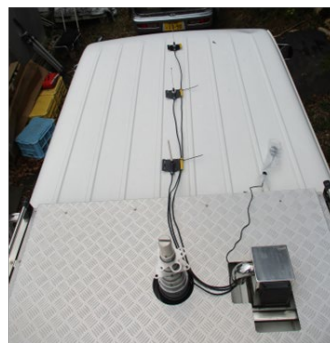
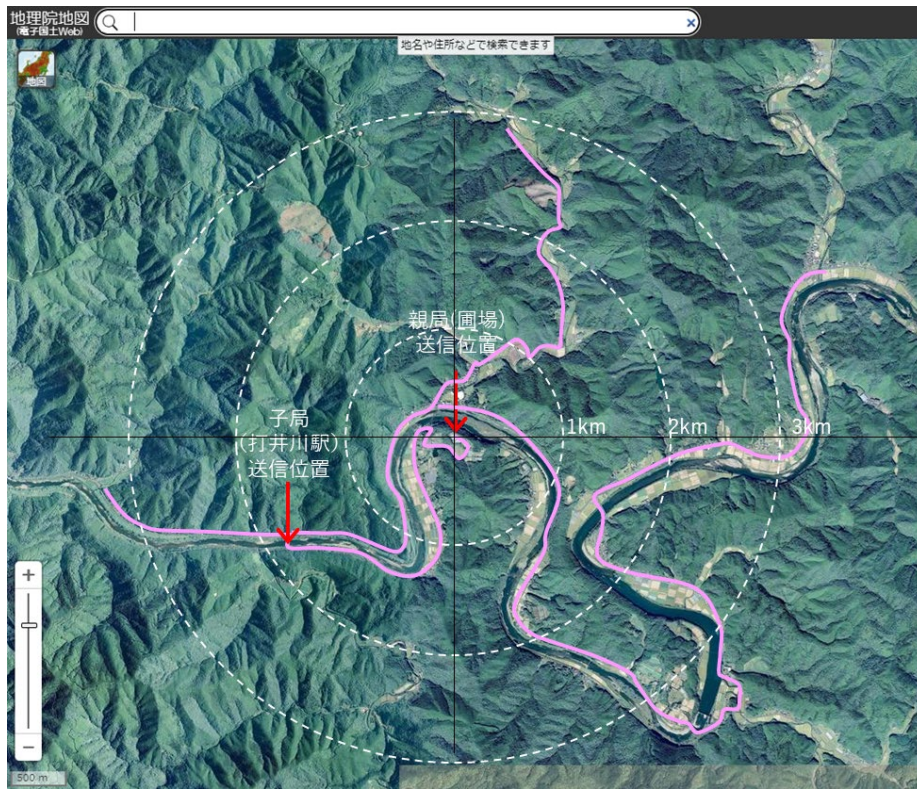
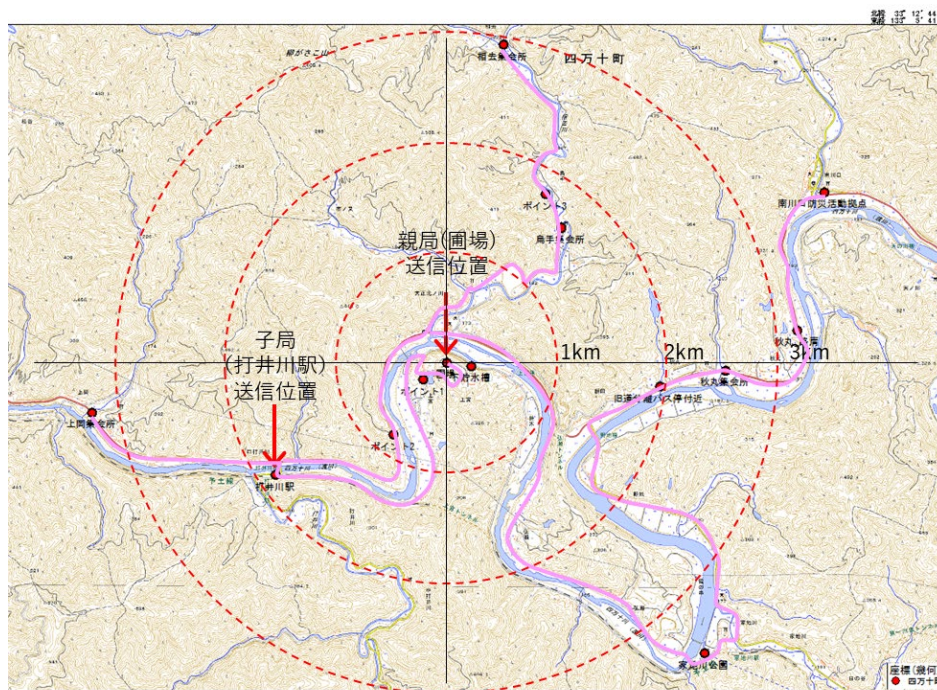


図4-55 ドライブテスト 測定状況



地理院地図（電子国土Web）を加工して作成



電子地形図25000（国土地理院）を加工して作成

図4-56 ドライブテスト 車両走行ルート

4. 4. 1. 3 ドライブテスト測定結果

ドライブテスト測定結果を、図4-57～66に示す。地図上に受信レベルを色分けして表示している。

図4-57 親局（圃場）から送信 400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz1W 拡散係数 SF=7

図4-58 親局（圃場）から送信 429MHz 帯特定小電力 LoRa® 429.5MHz10mW 拡散係数 SF=7

図4-59 親局（圃場）から送信 920MHz 帯特定小電力 LoRa® 920.6MHz20mW 拡散係数 SF=7

図4-60 親局（圃場）から送信 400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz1W 拡散係数 SF=10

図4-61 親局（圃場）から送信 429MHz 帯特定小電力 LoRa® 429.5MHz10mW 拡散係数 SF=10

図4-62 親局（圃場）から送信 920MHz 帯特定小電力 LoRa® 920.6MHz20mW 拡散係数 SF=10

図4-63 子局（打井川駅）から送信 400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz1W 拡散係数 SF=7

図4-64 子局（打井川駅）から送信 429MHz 帯特定小電力 LoRa® 429.5MHz10mW 拡散係数 SF=7

図4-65 子局（打井川駅）から送信 920MHz 帯特定小電力 LoRa® 920.6MHz20mW 拡散係数 SF=7

図4-66 子局（打井川駅）から八木アンテナで送信 400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz1W 拡散係数 SF=7

親局（圃場）から送信

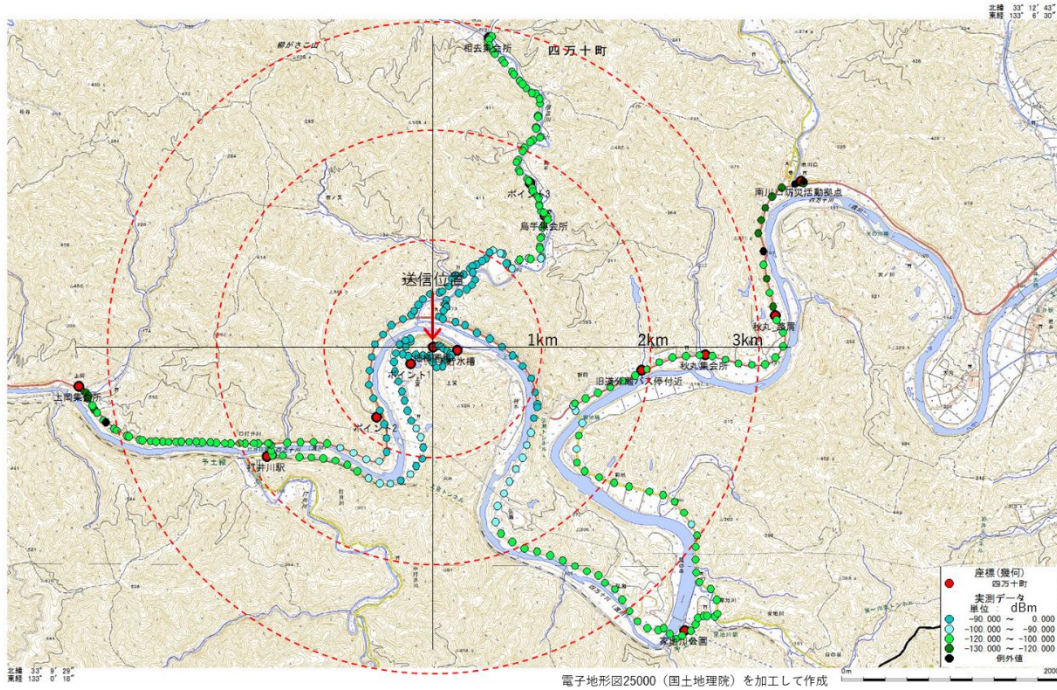


図 4-57 ドライブテスト結果

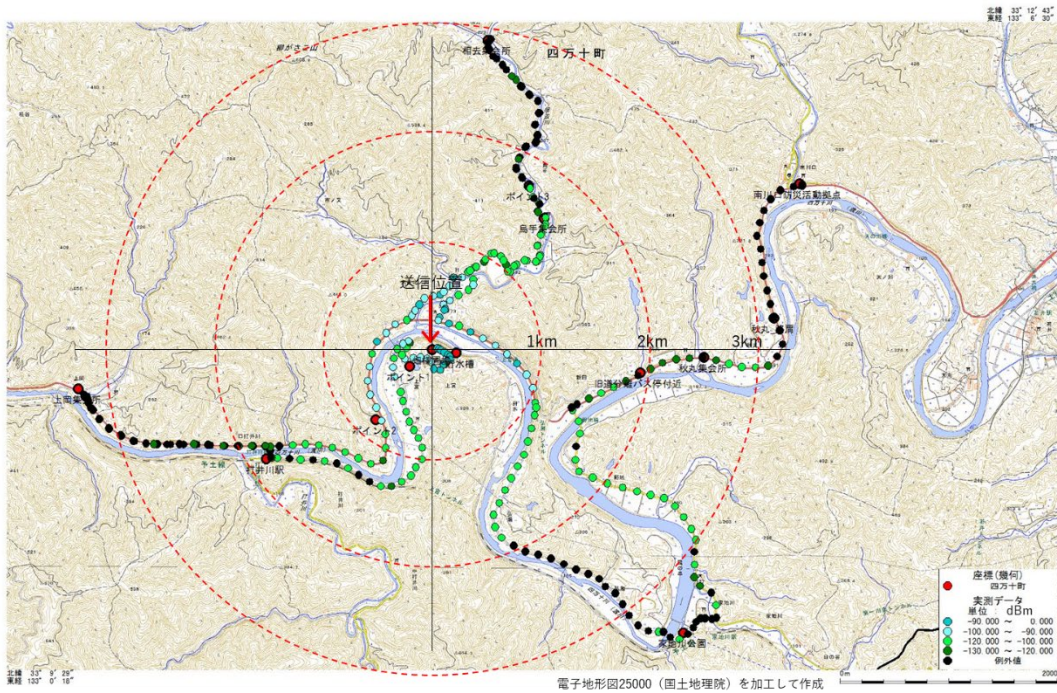


図 4-58 ドライブテスト結果

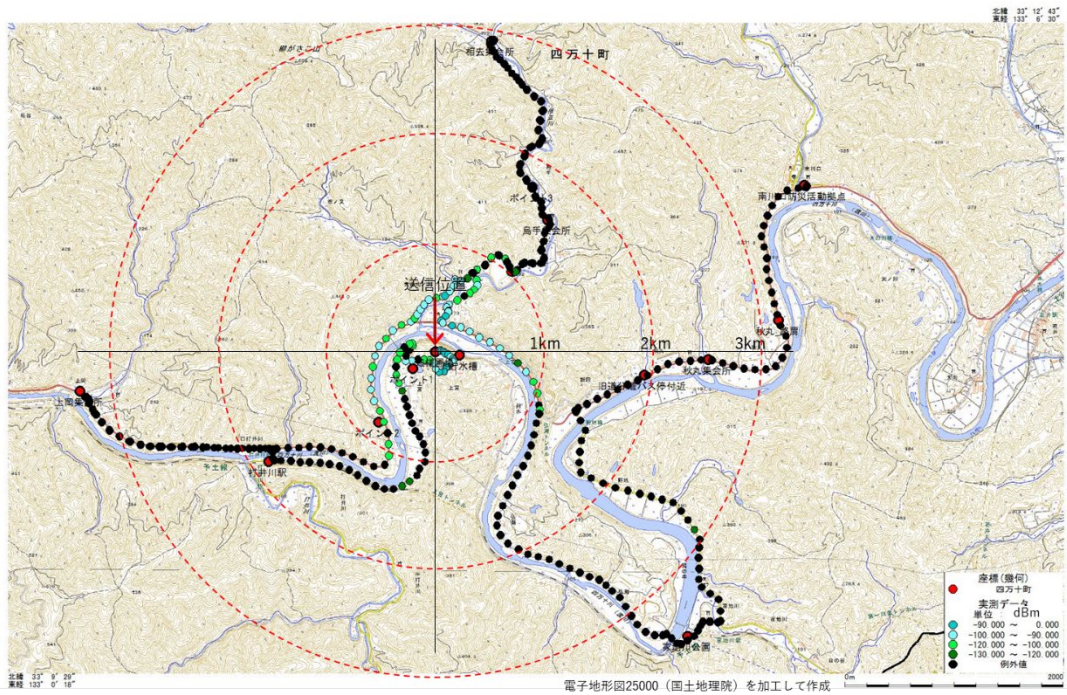


図4-59 ドライブテスト結果

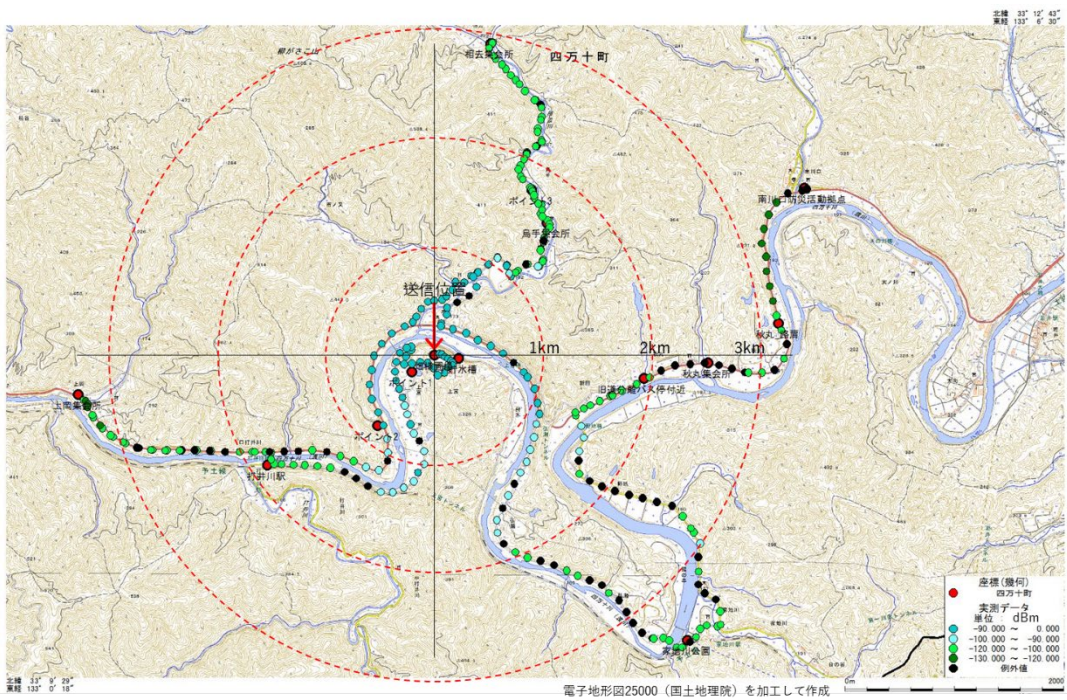


図4-60 ドライブテスト結果

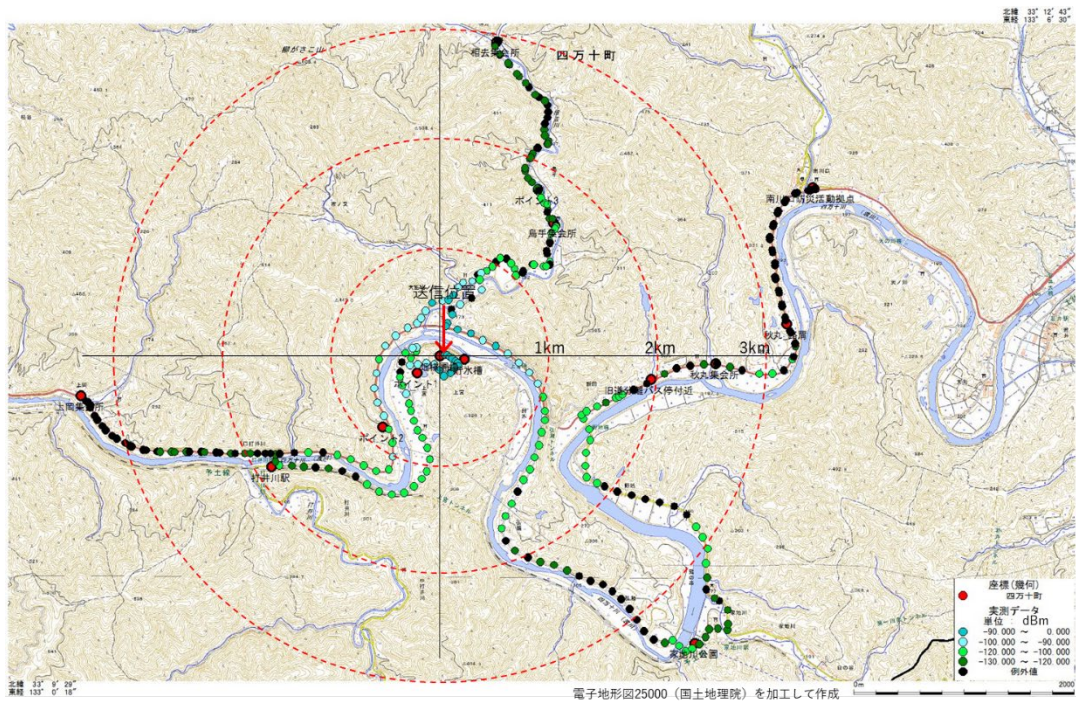


図4-61 ドライブテスト結果

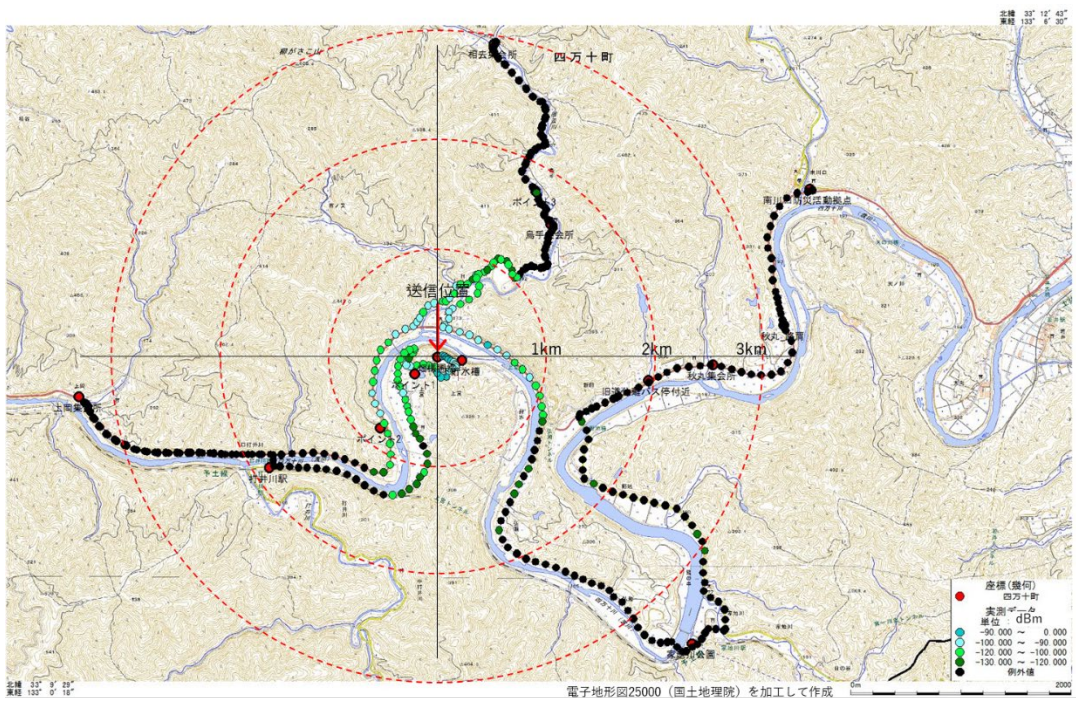


図4-62 ドライブテスト結果

子局（打井川駅）から送信

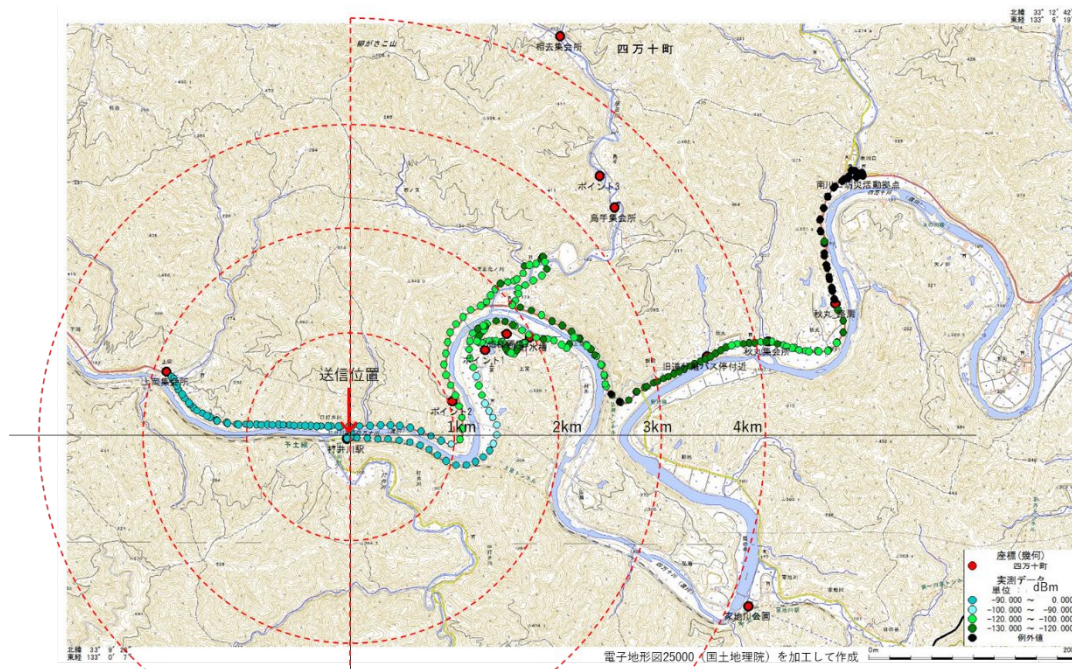


図 4-63 ドライブテスト結果

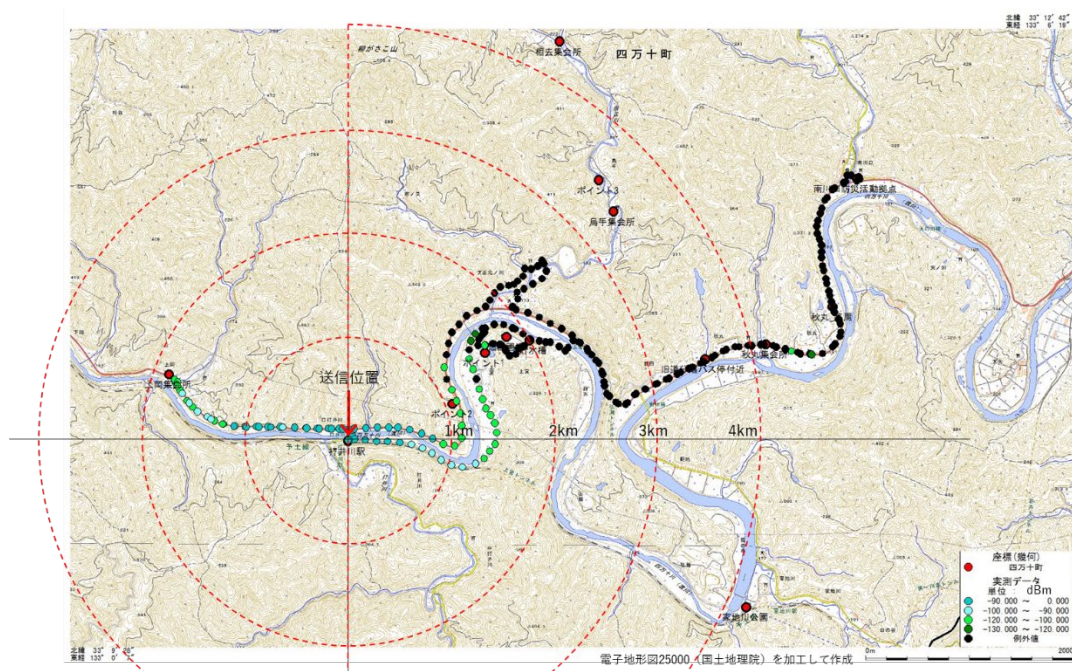


図 4-64 ドライブテスト結果

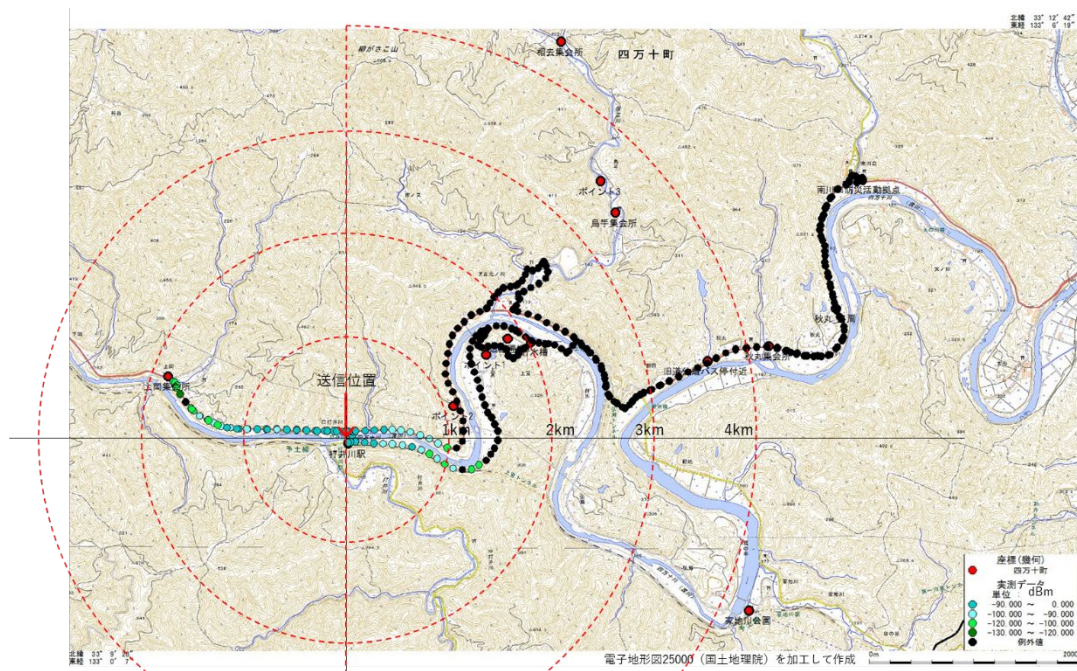


図4-65 ドライブテスト結果

子局（打井川駅）から送信
八木アンテナ送信

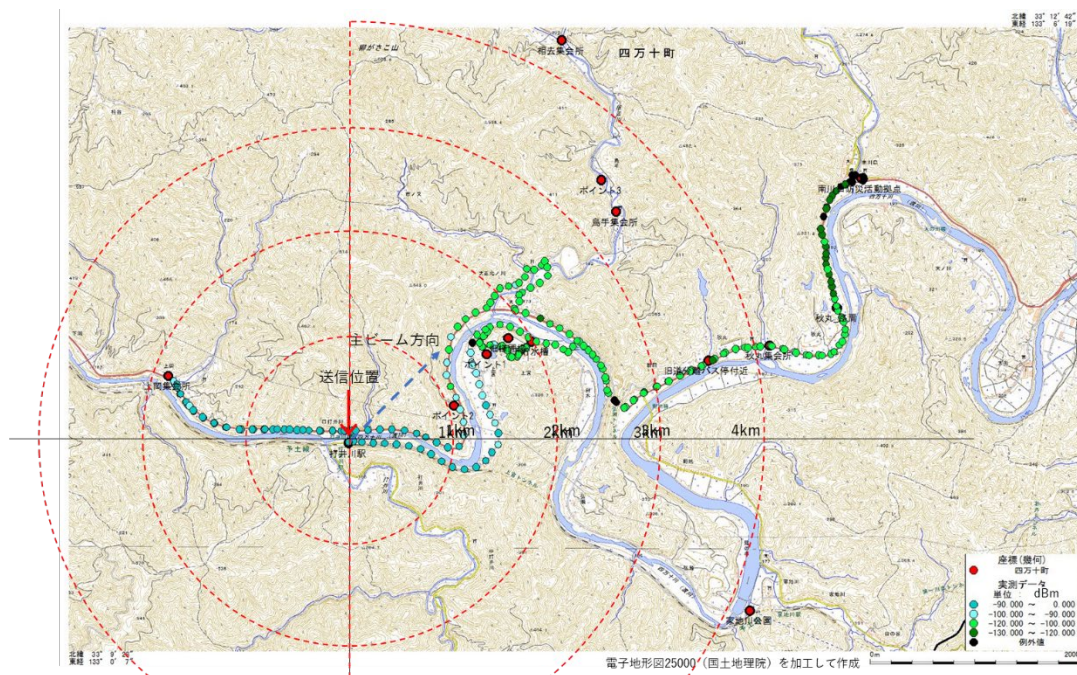
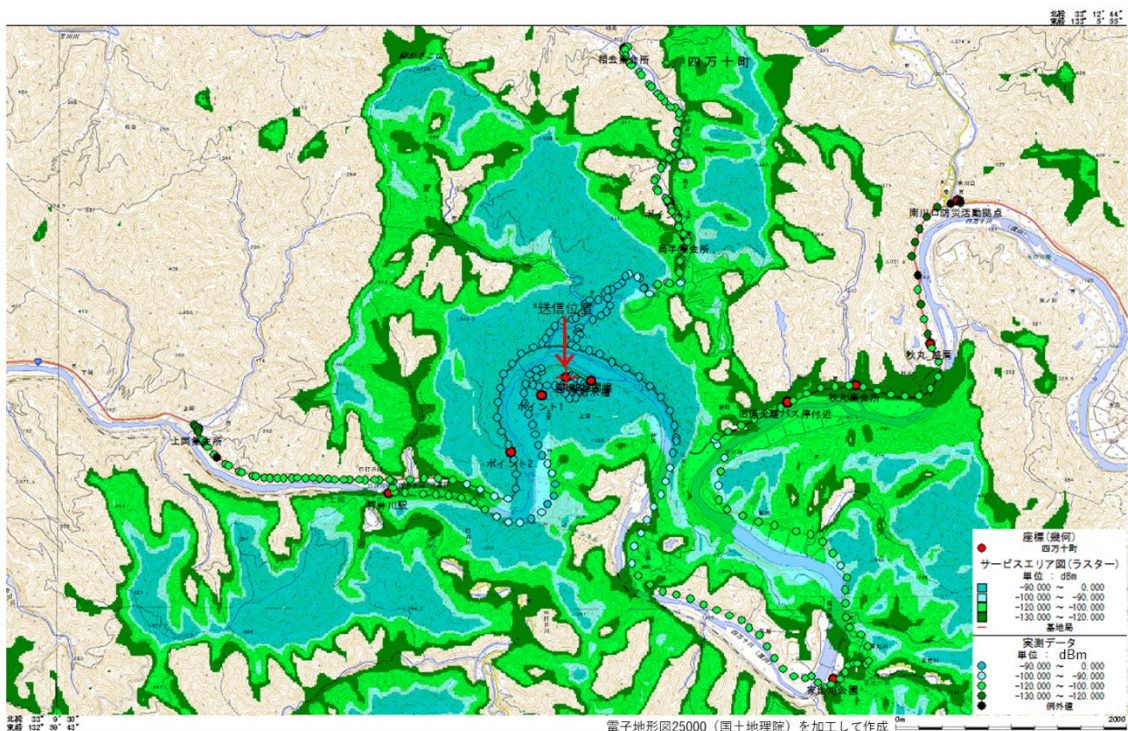


図4-66 ドライブテスト結果

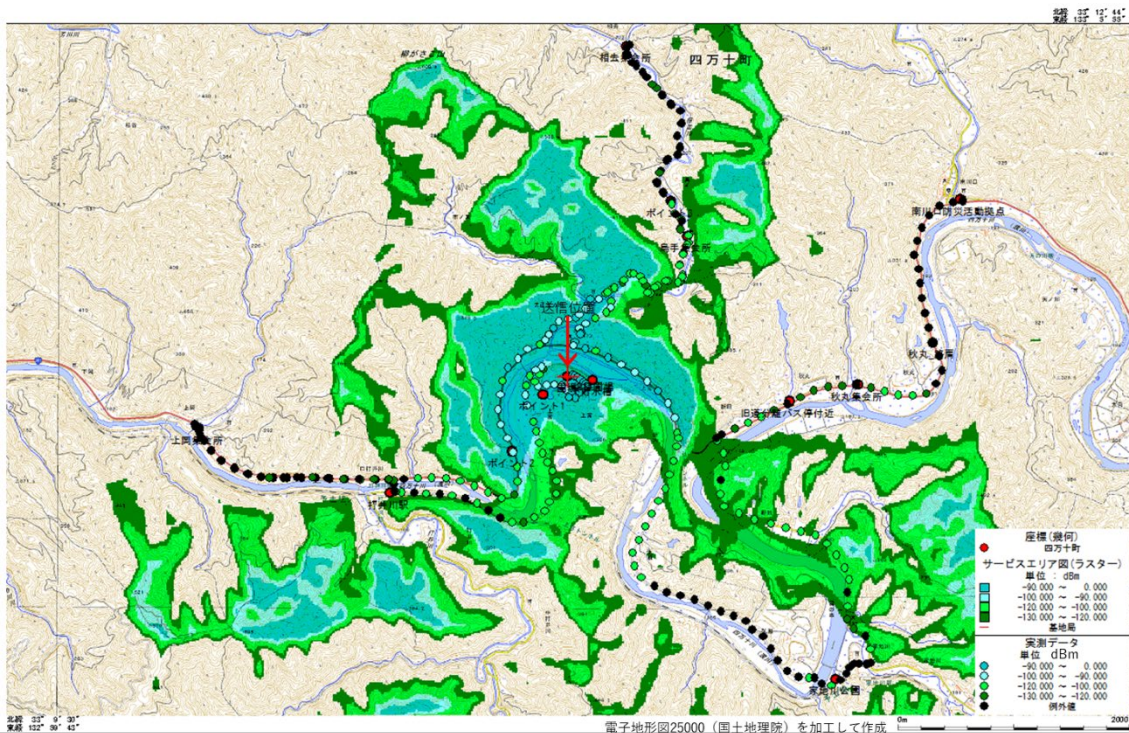
ドライブテスト測定結果とエリアシミュレーション結果を同時に作図し、双方の比較を行った（図4-67～4-72）。エリアシミュレーションのソフトウェアは、DenpaPro Ver4.1.0.11 アジア航測製を使用している。

- 図4-67 親局（圃場）から送信 400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz1W 拡散係数 SF=7
- 図4-68 親局（圃場）から送信 429MHz 帯特定小電力 LoRa® 429.5MHz10mW 拡散係数 SF=7
- 図4-69 親局（圃場）から送信 920MHz 帯特定小電力 LoRa® 920.6MHz20mW 拡散係数 SF=7
- 図4-70 子局（打井川駅）から送信 400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz1W 拡散係数 SF=7
- 図4-71 子局（打井川駅）から送信 429MHz 帯特定小電力 LoRa® 429.5MHz10mW 拡散係数 SF=7
- 図4-72 子局（打井川駅）から送信 920MHz 帯特定小電力 LoRa® 920.6MHz20mW 拡散係数 SF=7



送信アンテナ高 5m、受信アンテナ高 2m
 送信アンテナ利得 2dBi、受信アンテナ利得 2dBi
 送信ケーブル損失 2.6dB、受信ケーブル損失 1dB
 自由空間伝搬損失

図4-67 ドライブテスト測定結果とエリアシミュレーション結果



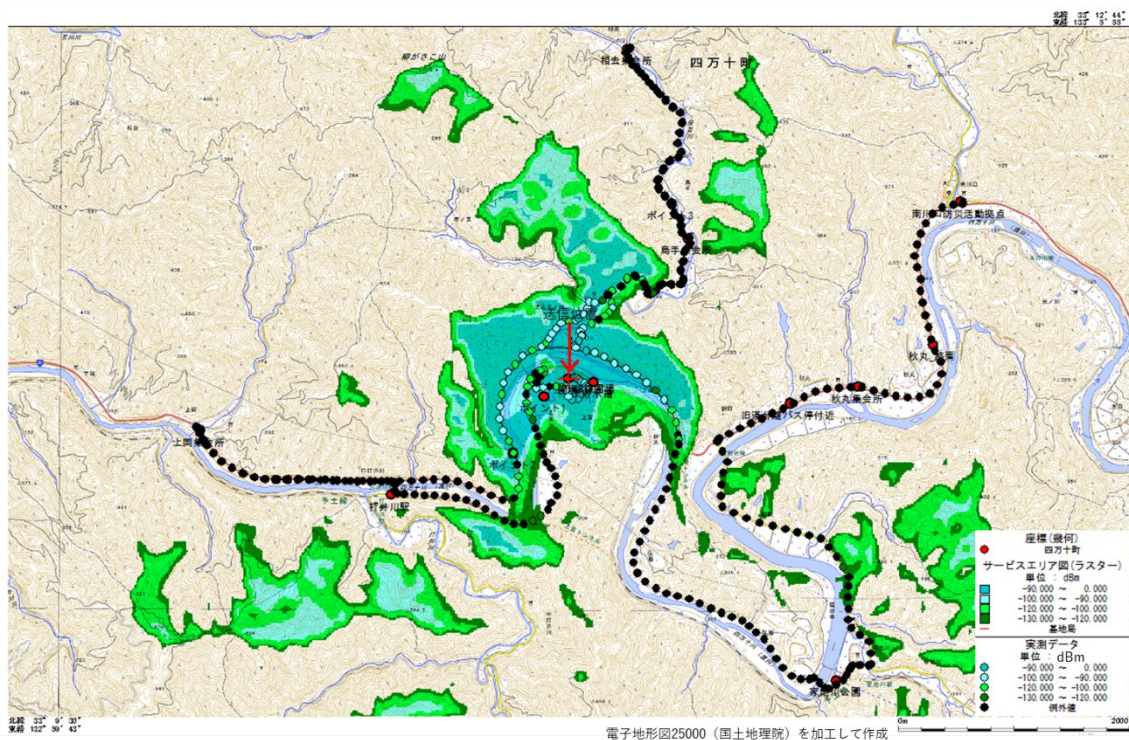
送信アンテナ高 5m、受信アンテナ高 2m

送信アンテナ利得 2dBi、受信アンテナ利得 2dBi

送信ケーブル損失 2.6dB、受信ケーブル損失 1dB

自由空間伝搬損失

図 4-68 ドライブテスト測定結果とエリアシミュレーション結果



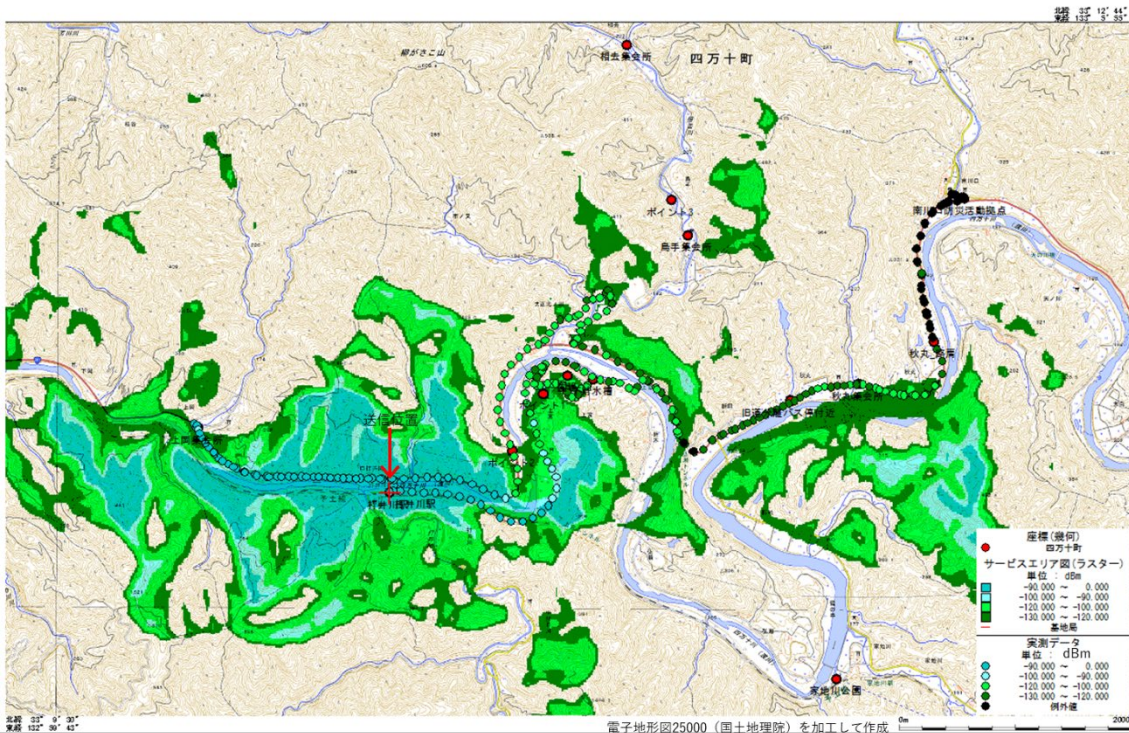
送信アンテナ高 5m、受信アンテナ高 2m

送信アンテナ利得 2dBi、受信アンテナ利得 2dBi

送信ケーブル損失 8.5dB、受信ケーブル損失 1.6dB

自由空間伝搬損失

図 4-69 ドライブテスト測定結果とエリアシミュレーション結果



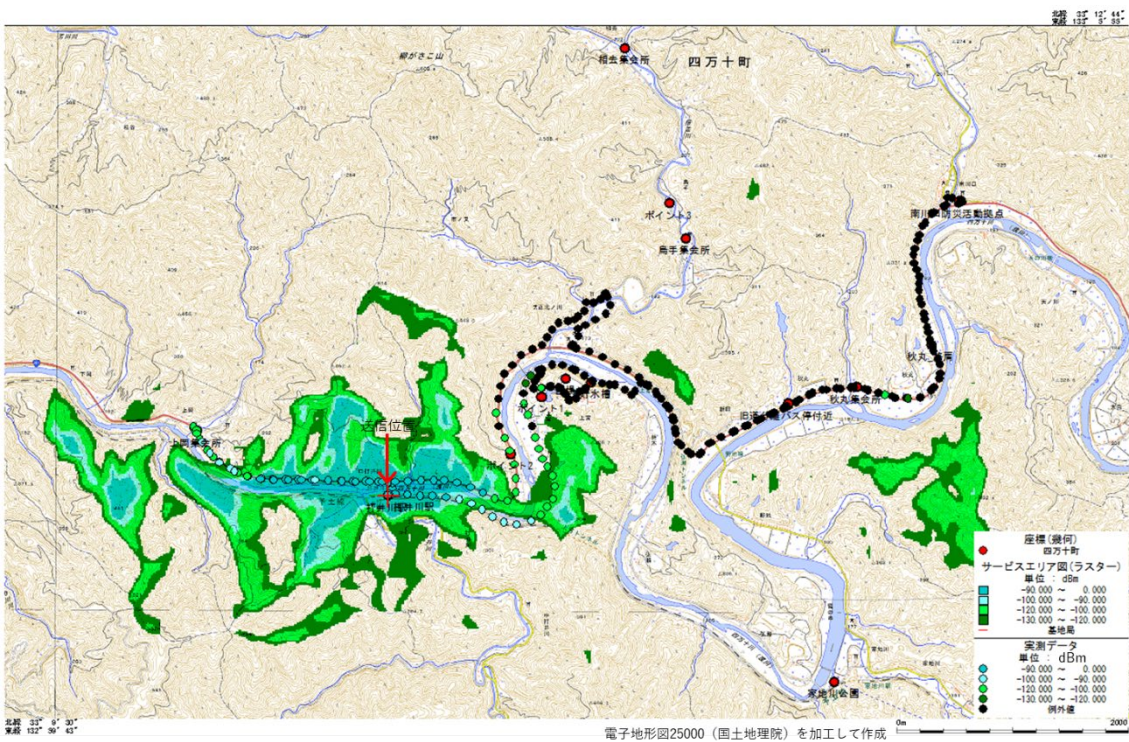
送信アンテナ高 2m、受信アンテナ高 2m

送信アンテナ利得 2dBi、受信アンテナ利得 2dBi

送信ケーブル損失 2.6dB、受信ケーブル損失 1dB

自由空間伝搬損失

図 4-70 ドライブテスト測定結果とエリアシミュレーション結果



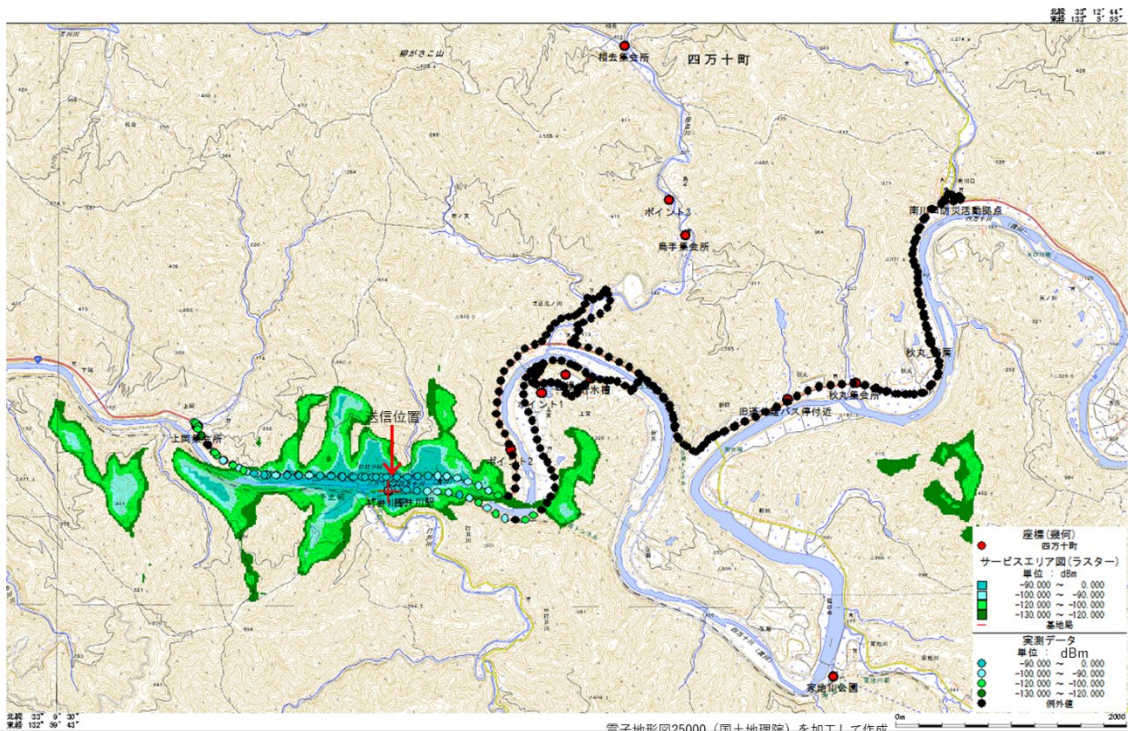
送信アンテナ高 2m、受信アンテナ高 2m

送信アンテナ利得 2dBi、受信アンテナ利得 2dBi

送信ケーブル損失 2.6dB、受信ケーブル損失 1dB

自由空間伝搬損失

図 4-71 ドライブテスト測定結果とエリアシミュレーション結果



送信アンテナ高2m、受信アンテナ高2m

送信アンテナ利得2dBi、受信アンテナ利得2dBi

送信ケーブル損失8.5dB、受信ケーブル損失1.6dB

自由空間伝搬損失

図4-72 ドライブテスト測定結果とエリアシミュレーション結果

次に、参考のために送信位置からの距離と受信電力の関係をグラフにまとめた。それぞれ、自由空間伝搬損失で計算した受信電力計算値と奥村秦式郊外地で計算した受信電力計算値を合わせて示している。なお、自由空間伝搬損失で計算した受信電力計算値と奥村秦式郊外地で計算した受信電力計算値については、送信位置からの距離のみで計算しており、途中のリッジによる損失などは考慮されていない（図4-73～図4-80）。

図4-73 親局（圃場）から送信 400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz1W 拡散係数 SF=7

図4-74 親局（圃場）から送信 429MHz 帯特定小電力 LoRa® 429.5MHz10mW 拡散係数 SF=7

図4-75 親局（圃場）から送信 920MHz 帯特定小電力 LoRa® 920.6MHz20mW 拡散係数 SF=7

図4-76 図4-73～4-75の実測値を重ね書き

図4-77 子局（打井川駅）から送信 400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz1W 拡散係数 SF=7

図4-78 子局（打井川駅）から送信 429MHz 帯特定小電力 LoRa® 429.5MHz10mW 拡散係数 SF=7

図4-79 子局（打井川駅）から送信 920MHz 帯特定小電力 LoRa® 920.6MHz20mW 拡散係数 SF=7

図4-80 図4-77～4-79の実測値を重ね書き

親局（圃場）から送信

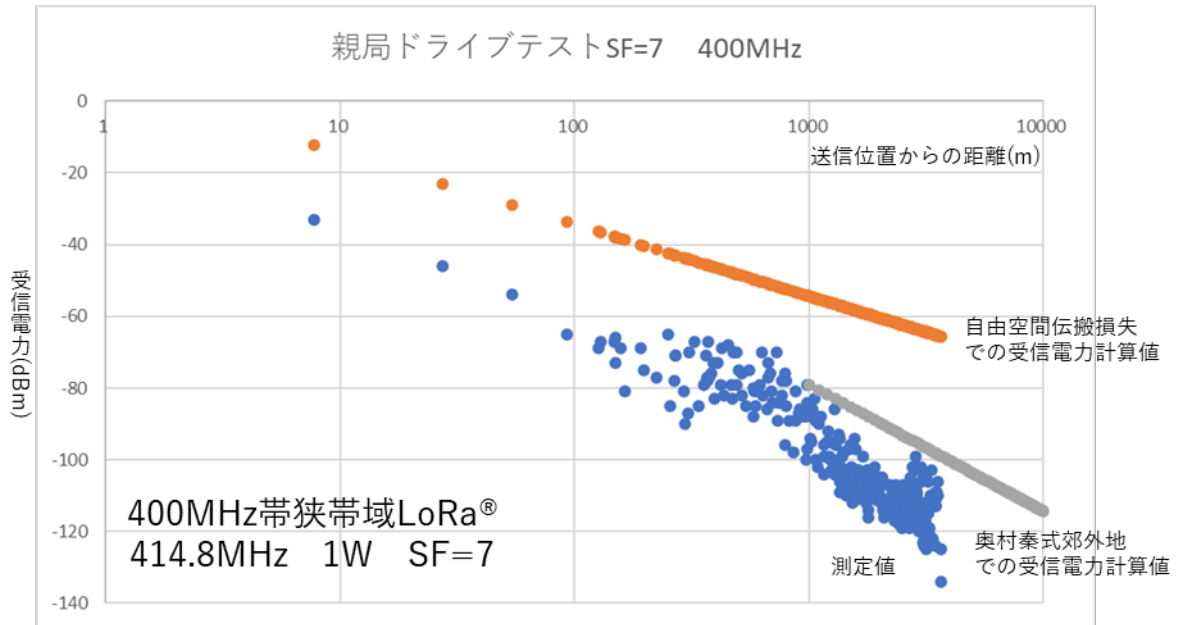


図4-73 ドライブテスト測定結果と受信電力計算値

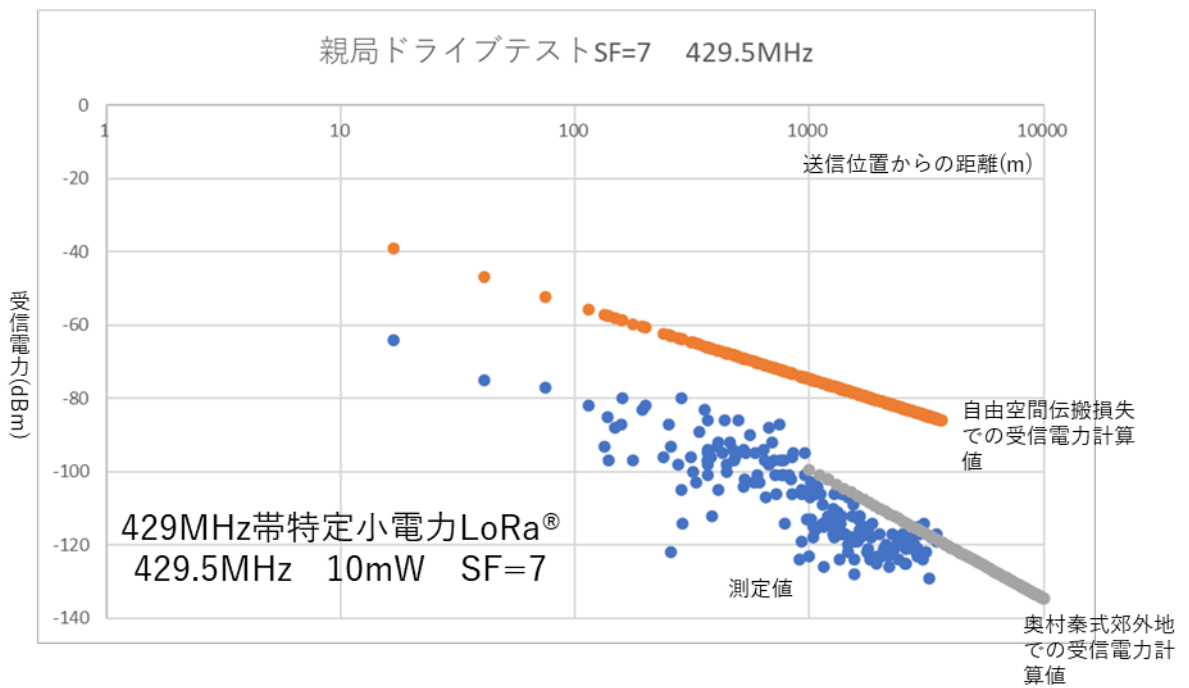


図4-74 ドライブテスト測定結果と受信電力計算値

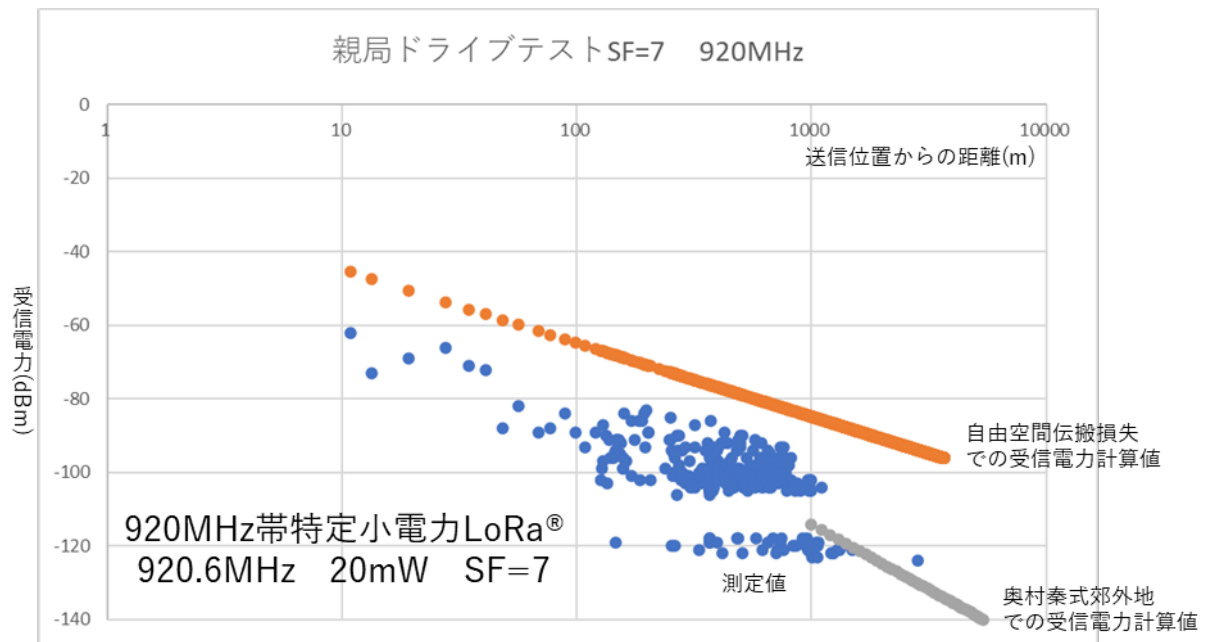
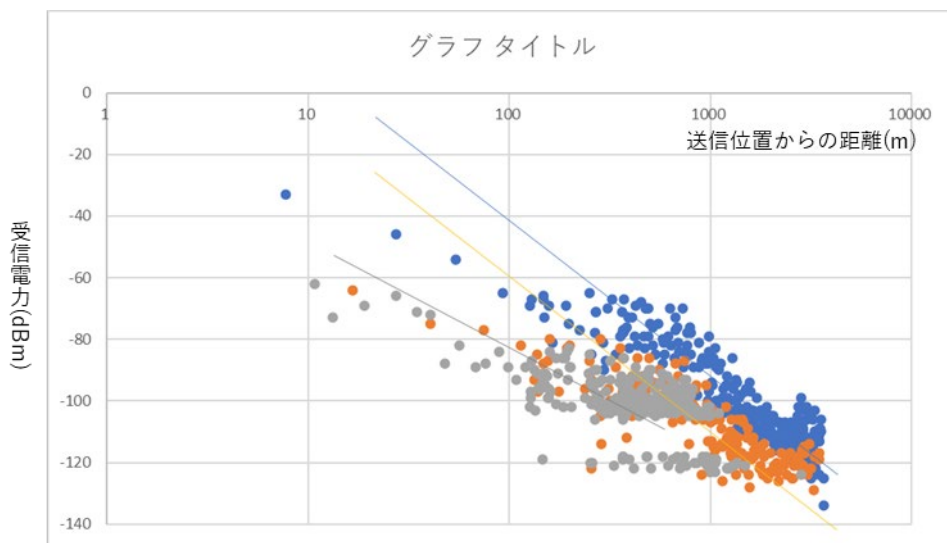


図4-75 ドライブテスト測定結果と受信電力計算値



青：400MHz帯狭帯域LoRa®414.8MHz 1W SF=7
 橙：429MHz帯特定小電力LoRa®429.5MHz 10mW SF=7
 灰：920MHz帯特定小電力LoRa®920.6MHz 20mW SF=7

図4-76 図4-73～4-75の実測値を重ね書き

打井川駅から送信

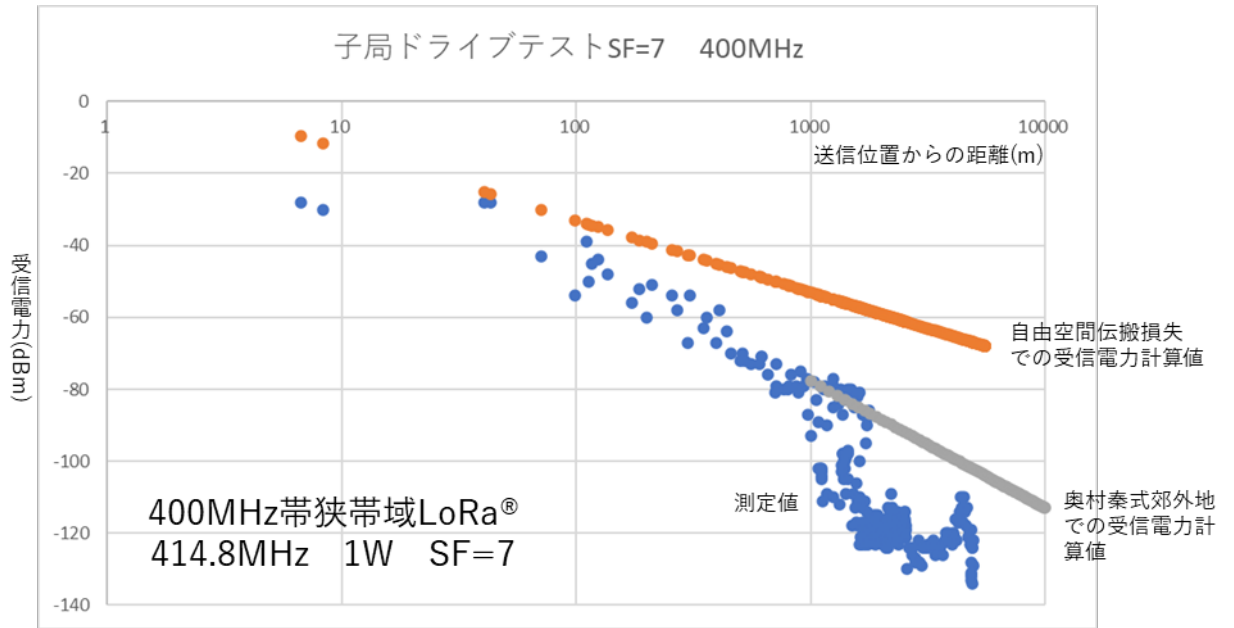


図4-77 ドライブテスト測定結果と受信電力計算値

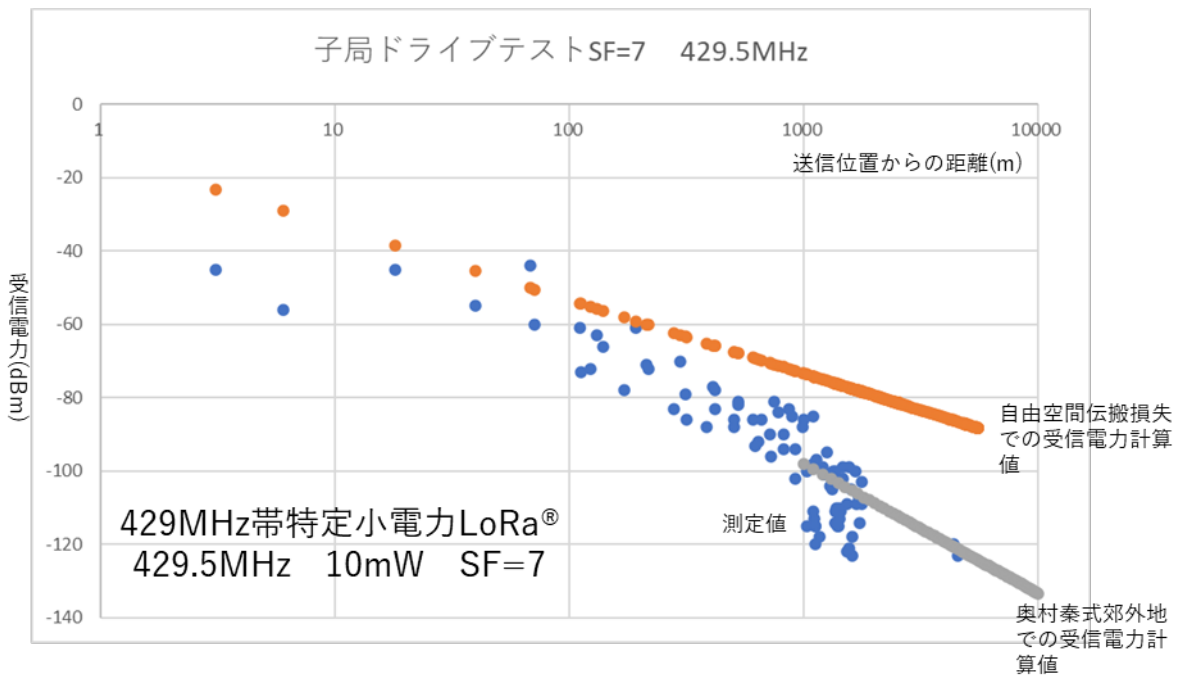


図4-78 ドライブテスト測定結果と受信電力計算値

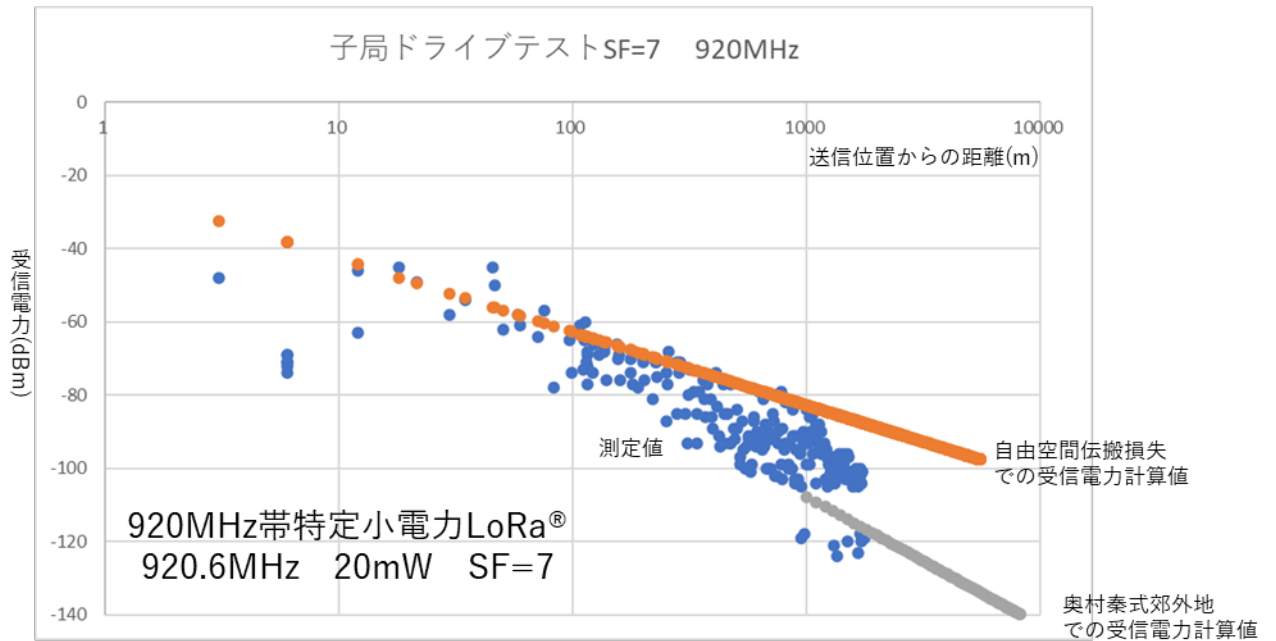


図4-79 ドライブテスト測定結果と受信電力計算値

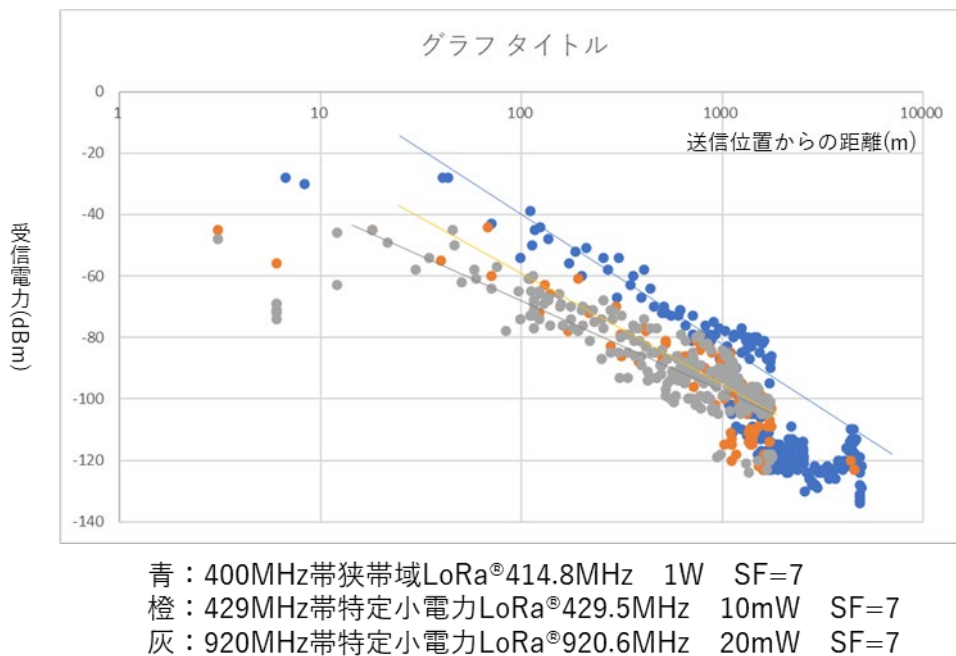


図4-80 図4-77～4-79の実測値を重ね書き

4. 4. 1. 4 ドライブテスト測定結果 考察

ドライブテスト測定結果から、400MHz 帯狭帯域 LoRa®は、一山超えた先、さらにその先まで電波が到達していた。429MHz 帯特定小電力 LoRa®は、見通し範囲内に加えて、電波は弱いが一山超えて電波が到達していた場所が見られた。920MHz 帯特定小電力 LoRa®は、見通し範囲内のみ到達しており、山を越えて伝搬することは難しい結果となった。

中山間地域で一山超えた先と通信するためには、400MHz 帯狭帯域 LoRa®が有用であることを示す結果となった。

LoRa®拡散係数 SF について、ドライブテストでは SF を大きくするとエリアが狭くなる現象が見られた。ドライブテストにおいては、電測車は時速 40km で走行したが、ドップラ効果あるいは、拡散係数 SF を大きくするとパケット伝送所要時間長くなり、電測車走行によるレベル変動の影響を受けやすくなったことが影響している可能性が考えられる。

エリアシミュレーションと実測値の比較について、ほぼ似たような傾向が見られた。エリア検討にエリアシミュレーションは有効であると考えられる。

なお、今回の結果では、実測値の受信電力の方が高い場所が見られた。今回のような川沿いの地形が影響し、エリアシミュレーションでは計算されていない反射波が影響していることも考えられる。(今回のエリアシミュレーションでは回折波のみ計算されている)

4. 4. 2 固定状態での測定結果

4. 4. 2. 1 固定状態での測定概要

試作システムにて、送信は固定、受信は車両を停止した状態（固定）にて測定を実施した（図4-81）。

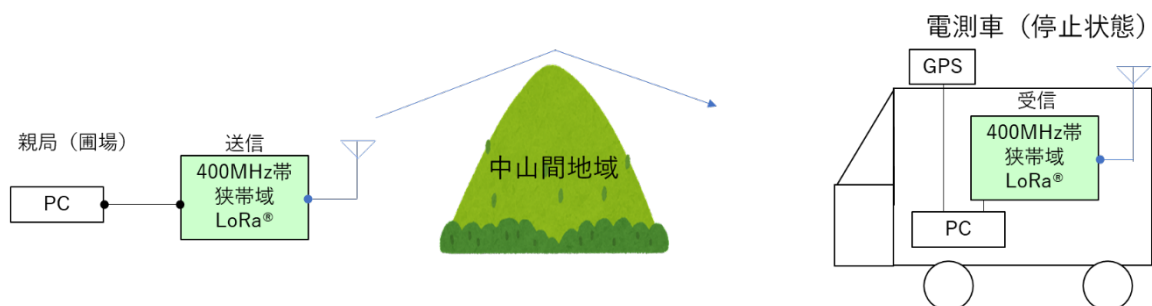


図4-81 固定状態での測定 概要

4. 4. 2. 2 固定状態での測定条件

固定状態での測定条件を表4-9に、測定状況を図4-82に示す。

表4-9 固定状態での測定 測定条件

周波数	414.8MHz (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 429.5MHz (429MHz 帯特定小電力 LoRa®) 920.6MHz (920MHz 帯特定小電力 LoRa®)
空中線電力	1W (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 10mW (429MHz 帯特定小電力 LoRa®) 20mW (920MHz 帯特定小電力 LoRa®)
送信アンテナ高	5m (圃場から送信時) 2m (打井川駅から送信時)
受信アンテナ高	2m (電測車屋根に設置)
送信アンテナ利得	2dBi (無指向性) 11dBi (八木アンテナ 400MHz 帯狭帯域 LoRa®のみ)
受信アンテナ利得	2dBi
送信ケーブル損失	2.6dB (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 2.6dB (429MHz 帯特定小電力 LoRa®) 8.5dB (920MHz 帯特定小電力 LoRa®)
受信ケーブル損失	1.0dB (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 1.0dB (429MHz 帯特定小電力 LoRa®) 1.6dB (920MHz 帯特定小電力 LoRa®)

偏波面	垂直
電測車走行速度	停止状態
測定項目	受信電力、パケットエラーレート



打井川駅



上岡集会所



路肩

図4-82 固定状態での測定 測定状況

4. 4. 2. 3 固定状態での測定結果

固定状態での測定結果を図4-83～4-89に示す。地図上に測定場所と見通し図を合わせて示す。

図4-83 親局（圃場）から送信 打井川駅受信

図4-84 親局（圃場）から送信 上岡集会所受信

図4-85 親局（圃場）から送信 路肩受信

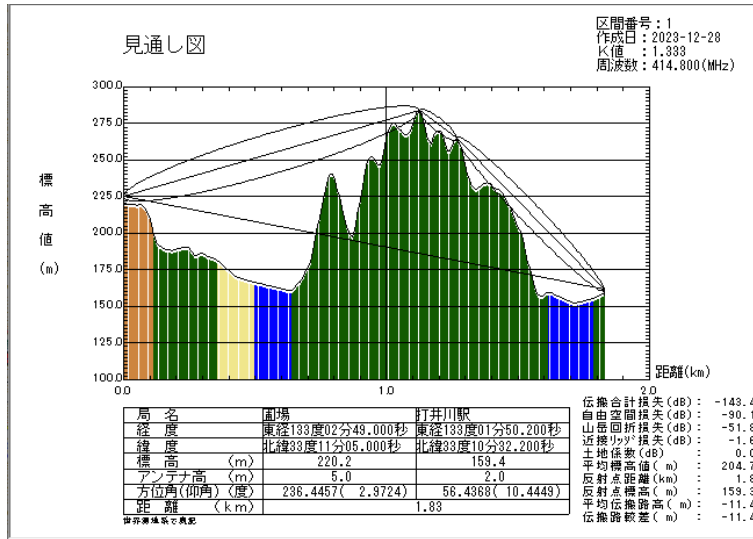
図4-86 打井川駅から送信 親局（圃場）受信

図4-87 上岡集会所から送信 親局（圃場）受信

図4-88 路肩から送信 親局（圃場）受信

図4-89 打井川駅から送信（八木アンテナ） 親局（圃場）受信

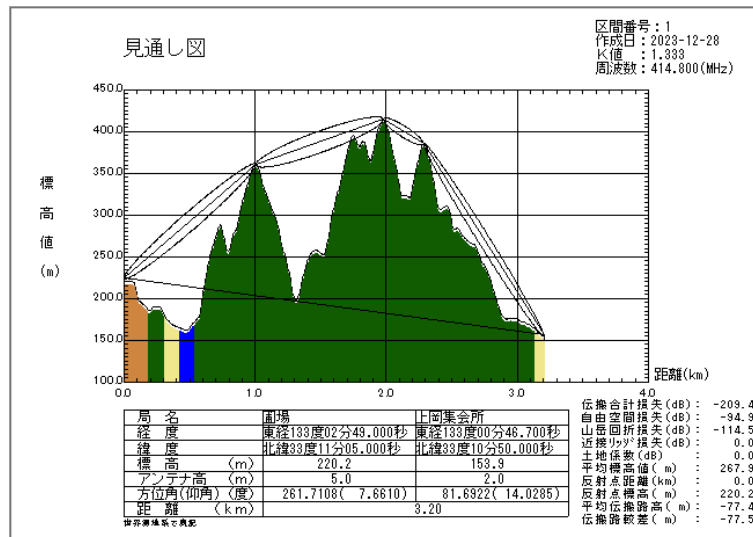
親局（圃場）から送信 打井川駅受信



400MHz帯狭帯域LoRa® 414.8MHz 1W	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-109.0	-109.4	-107.3
パケットエラーレート (%)	0	0	0
429MHz帯特定小電力LoRa® 429.5MHz 10mW	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-121.7	-122.2	-122.7
パケットエラーレート (%)	30	0	0
920MHz帯特定小電力LoRa® 920.6MHz 20mW SF=7	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	受信できず	受信できず	受信できず
パケットエラーレート (%)	-	-	-

図4-83 固定状態での測定 測定結果

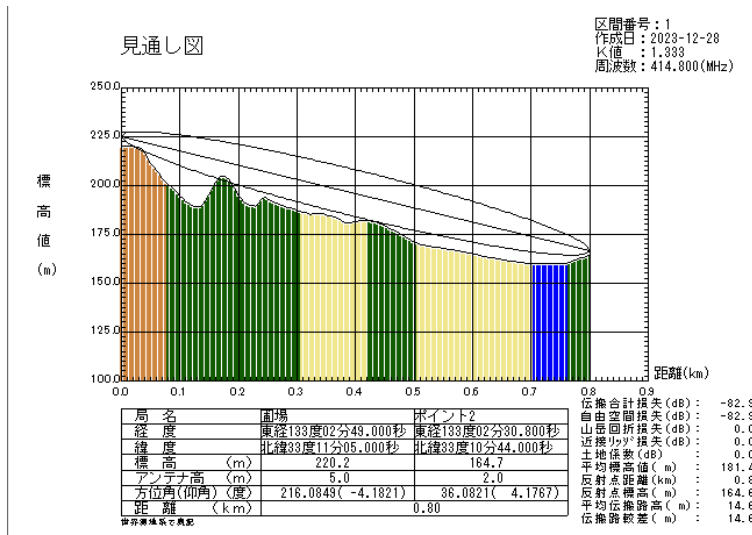
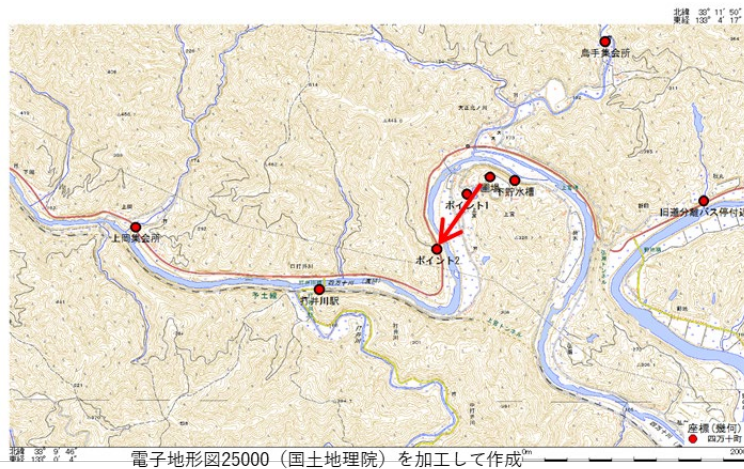
親局（圃場）から送信 上岡集会所受信



400MHz帯狭帯域LoRa® 414.8MHz 1W	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-118.6	-118.6	-118.3
パケットエラーレート (%)	0	0	0
429MHz帯特定小電力LoRa® 429.5MHz 10mW	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	受信できず	受信できず	-141.0
パケットエラーレート (%)	-	-	20
920MHz帯特定小電力LoRa® 920.6MHz 20mW SF=7	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	受信できず	受信できず	受信できず
パケットエラーレート (%)	-	-	-

図4-84 固定状態での測定 測定結果

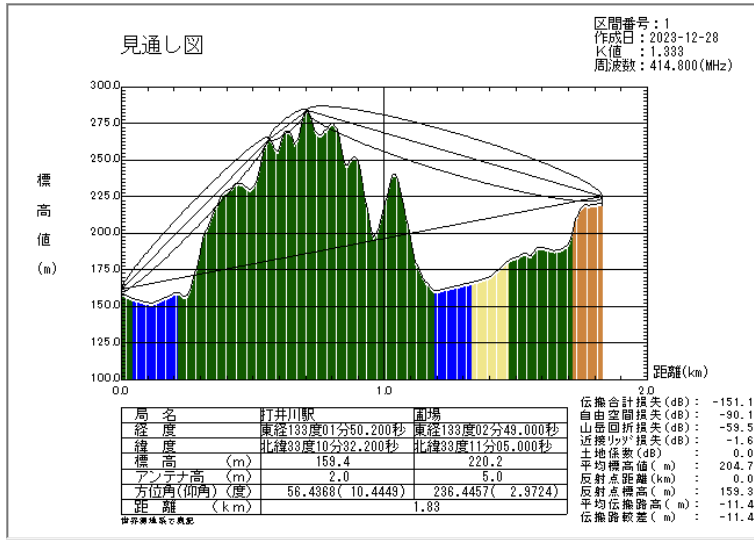
親局（圃場）から送信 路肩受信



400MHz帯狭帯域LoRa® 414.8MHz 1W	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-83.4	-85.9	-82.3
パケットエラーレート (%)	0	0	0
429MHz帯特定小電力LoRa® 429.5MHz 10mW	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-94.0	-94.7	-93.8
パケットエラーレート (%)	0	0	0
920MHz帯特定小電力LoRa® 920.6MHz 20mW SF=7	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-97	-98	-98
パケットエラーレート (%)	0	0	0

図4-85 固定状態での測定 測定結果

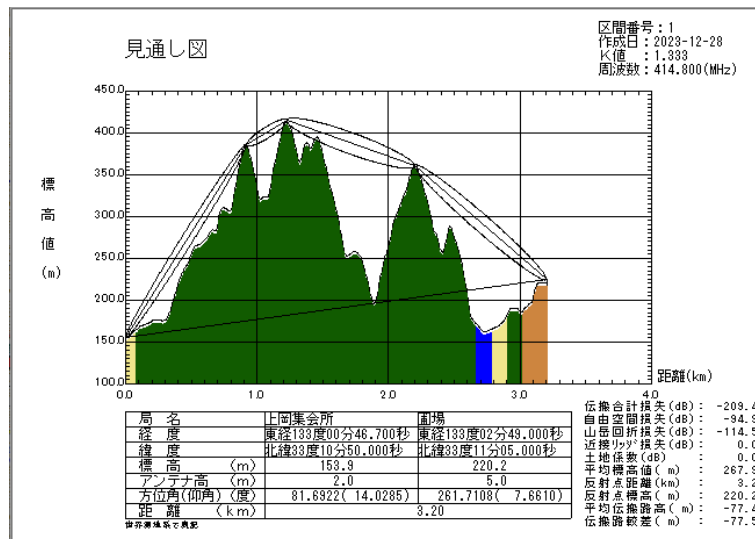
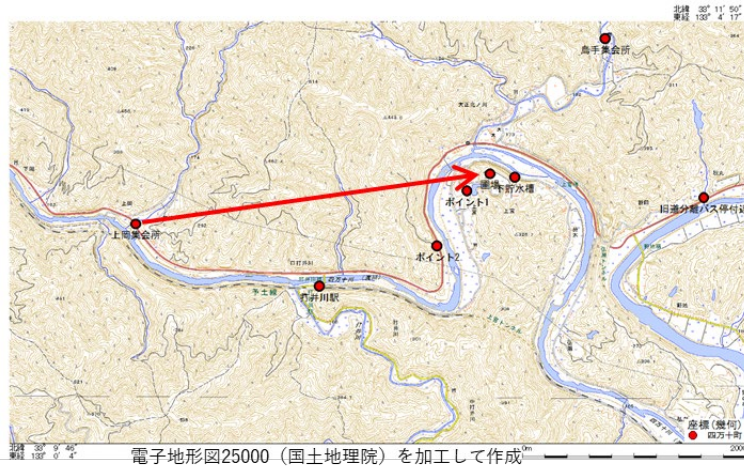
打井川駅から送信 親局（圃場）受信



400MHz帯狭帯域LoRa® 414.8MHz 1W	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-111.6	-110.4	-110.0
パケットエラーレート (%)	0	0	0
429MHz帯特定小電力LoRa® 429.5MHz 10mW	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-124.3	-124.4	-124.7
パケットエラーレート (%)	0	0	0
920MHz帯特定小電力LoRa® 920.6MHz 20mW SF=7	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	受信できず	受信できず	受信できず
パケットエラーレート (%)	-	-	-

図4-86 固定状態での測定 測定結果

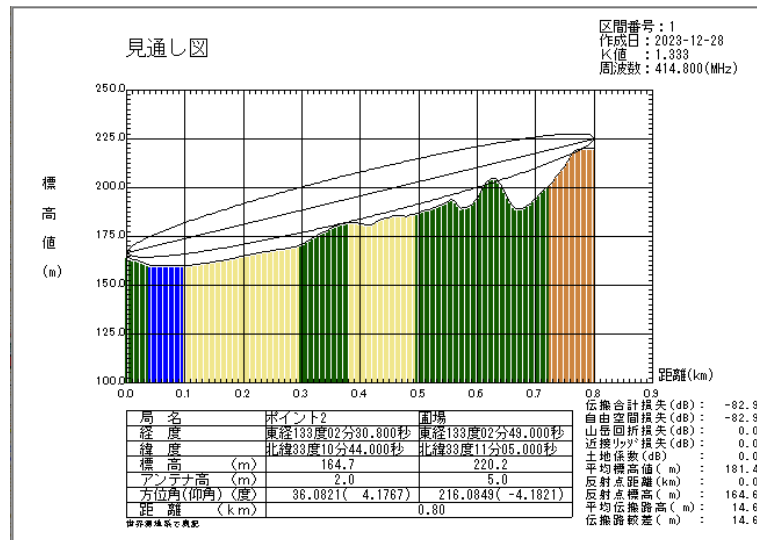
上岡集会所から送信 親局（圃場）受信



400MHz帯狭帯域LoRa® 414.8MHz 1W	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-116.3	-116.0	-115.9
パケットエラーレート (%)	0	0	0
429MHz帯特定小電力LoRa® 429.5MHz 10mW	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-131.5	-131.4	-132.3
パケットエラーレート (%)	0	0	0
920MHz帯特定小電力LoRa® 920.6MHz 20mW SF=7	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	受信できず	受信できず	受信できず
パケットエラーレート (%)	-	-	-

図4-87 固定状態での測定 測定結果

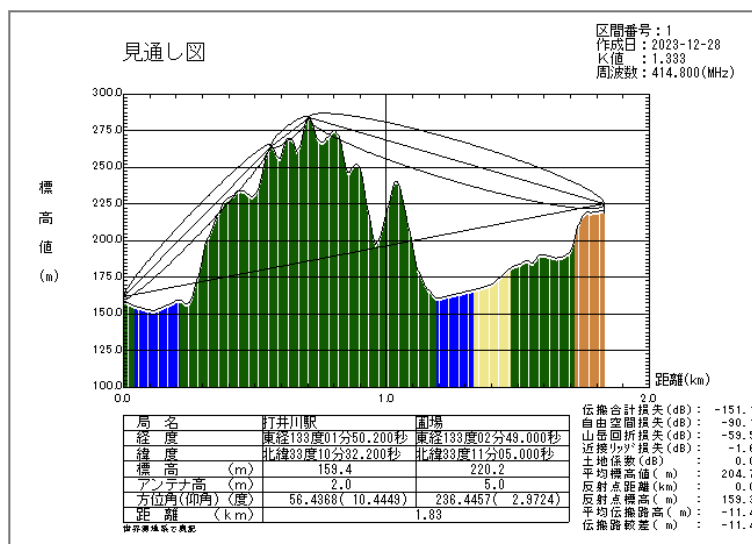
路肩から送信 親局（圃場）受信



400MHz帯狭帯域LoRa® 414.8MHz 1W	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-77.1	-80.2	-75.1
パケットエラーレート (%)	0	0	0
429MHz帯特定小電力LoRa® 429.5MHz 10mW	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-101.4	-103.5	-100.9
パケットエラーレート (%)	0	0	0
920MHz帯特定小電力LoRa® 920.6MHz 20mW SF=7	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-100	-99	-98
パケットエラーレート (%)	0	0	0

図4-88 固定状態での測定 測定結果

打井川駅から送信（八木アンテナ） 親局（圃場）受信



400MHz帯狭帯域LoRa® 414.8MHz 1W	SF=7	SF=10	SF=12
受信レベル (dBm)	-100.3	-100.8	-99.6
パケットエラーレート (%)	0	0	0

図4-89 固定状態での測定 測定結果

4. 4. 2. 4 固定状態での測定 考察

固定状態での測定においても、400MHz 帯狭帯域 LoRa®は、一山超えた先、さらにその先まで電波が到達していた。

LoRa®拡散係数 SF について、ドライブテストでは SF を大きくするとエリアが狭くなる現象が見られたが、固定状態での測定では、SF を大きくするとパケットエラーレートが低下し、受信状態が改善された測定点が見られた。固定状態においては SF を大きくすることは、パケットエラーレートの改善に効果があると考えられる。

ドライブテストにおいては、やはりドップラ効果あるいは、拡散係数 SF を大きくするとパケット伝送所要時間長くなり、電測車走行によるレベル変動の影響を受けやすくなったことが影響している可能性が考えられる。

固定状態での測定からも、中山間地域で一山超えた先と通信するためには、400MHz 帯狭帯域 LoRa®が有用であることを示す結果となった。

4. 4. 3 水位計長期データ取得

4. 4. 3. 1 水位計長期データ取得概要

第3章と第5章において検討した結果を踏まえて、提案システムの試作システムとして圃場において貯水槽の水位監視を行う水位観測システムを試作した。試作システムを実際に設置した状態で約1か月間運用し、水位監視状況についてデータを取得し、通信状況の変化等の分析を行った（図4-90）。長期にわたって設置して測定を行うことで、受信レベル変動などの通信状況の変化について把握を行うことを目的とした。また、400MHz帯狭帯域LoRa®の他に、429MHz帯特定小電力LoRa®についても同時に測定を行い、比較検証を実施した。

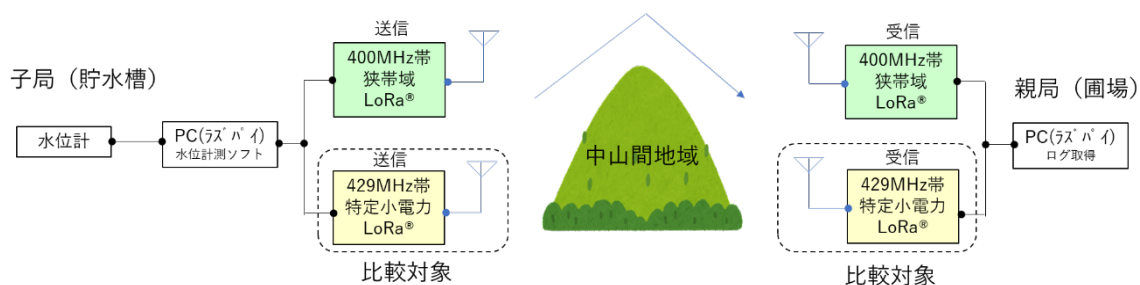


図4-90 水位計長期データ取得 系統図

4. 4. 3. 2 水位計長期データ取得測定条件

水位計長期データ取得の測定条件を表4-10に、測定状況を図4-91に示す。

表4-10 水位計長期データ取得 測定条件

周波数	414.8MHz (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 429.5MHz (429MHz 帯特定小電力 LoRa®)
空中線電力	1W (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 10mW (429MHz 帯特定小電力 LoRa®)
送信アンテナ高	1.5m
受信アンテナ高	1.5m
送信アンテナ利得	2dBi (無指向性)

受信アンテナ利得	2dBi（無指向性）
送信ケーブル損失	2.6dB
受信ケーブル損失	2.6dB
拡散係数	SF=7
偏波面	垂直
送信間隔、データ量	1日あたり20回、1回あたり約100Byte
測定項目	受信電力
測定期間	2023/12/14~2024/1/22 38日間



子局（貯水槽）



親局（圃場）



図4-9 1 水位計長期データ取得 測定状況

親局（圃場）と子局（貯水槽）の位置関係と見通し図を図4-92に示す。双方の距離は0.23kmで見通し外となっている。

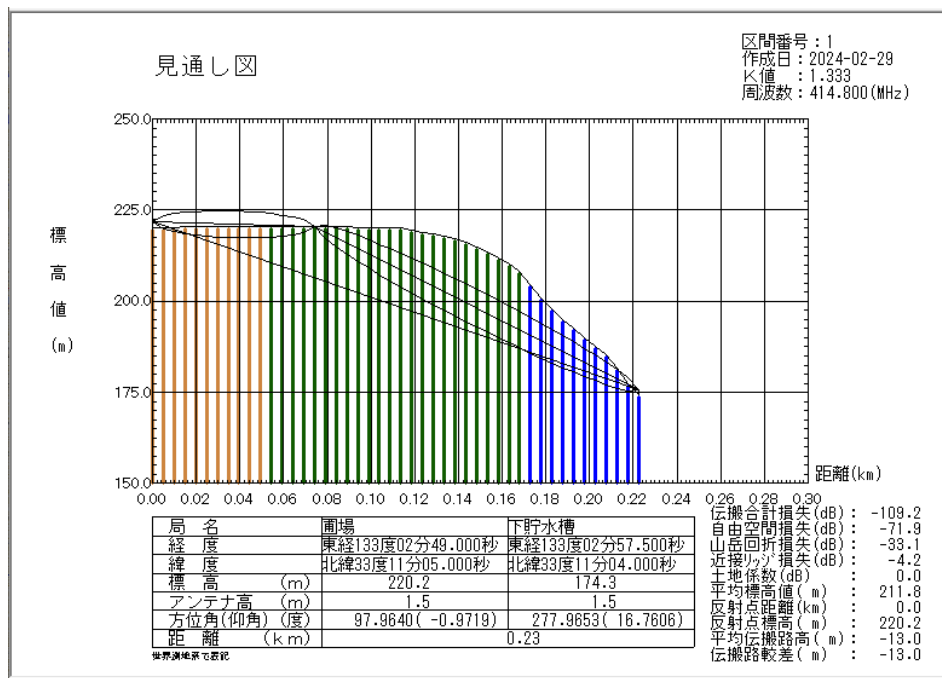
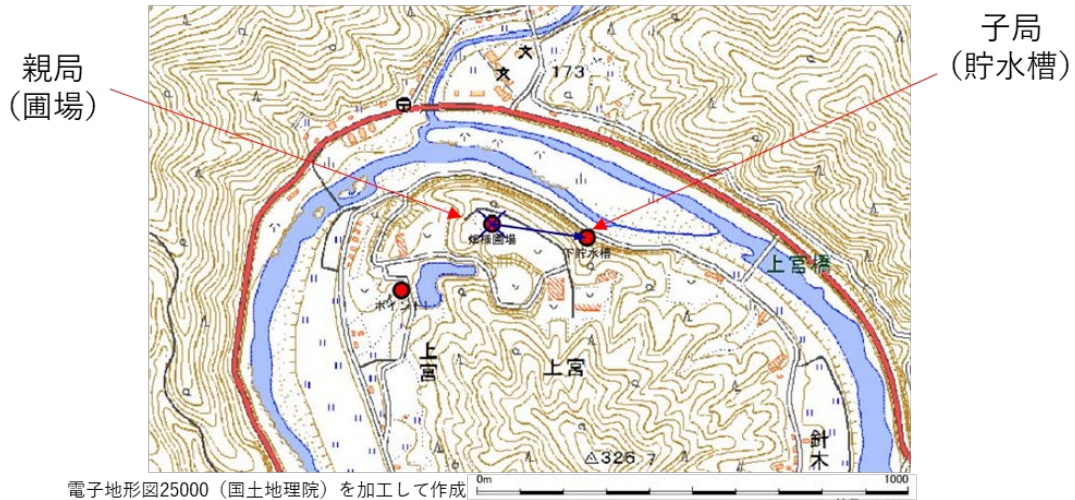


図4-92 親局（圃場）と子局（貯水槽）の位置関係と見通し図

4. 4. 3. 3 水位計長期データ取得測定結果

水位計長期データ取得の測定結果を図4-93に示す。400MHz帯狭帯域LoRa®は、38日間の実験期間内で通信断は発生しなかった（通信成功率100%）。429MHz帯特定小電力LoRa®は、測定期間内で20回通信断が発生（通信成功率97.4%）した。400MHz帯狭帯域LoRa®の受信レベル平均は-90.1dBm、429MHz帯特定小電力LoRa®の受信レベル平均は-113.7dBmとなった。両者の差は約20dBであり、送信出力の差（1Wと10mW）がそのまま表れていると考えられる。

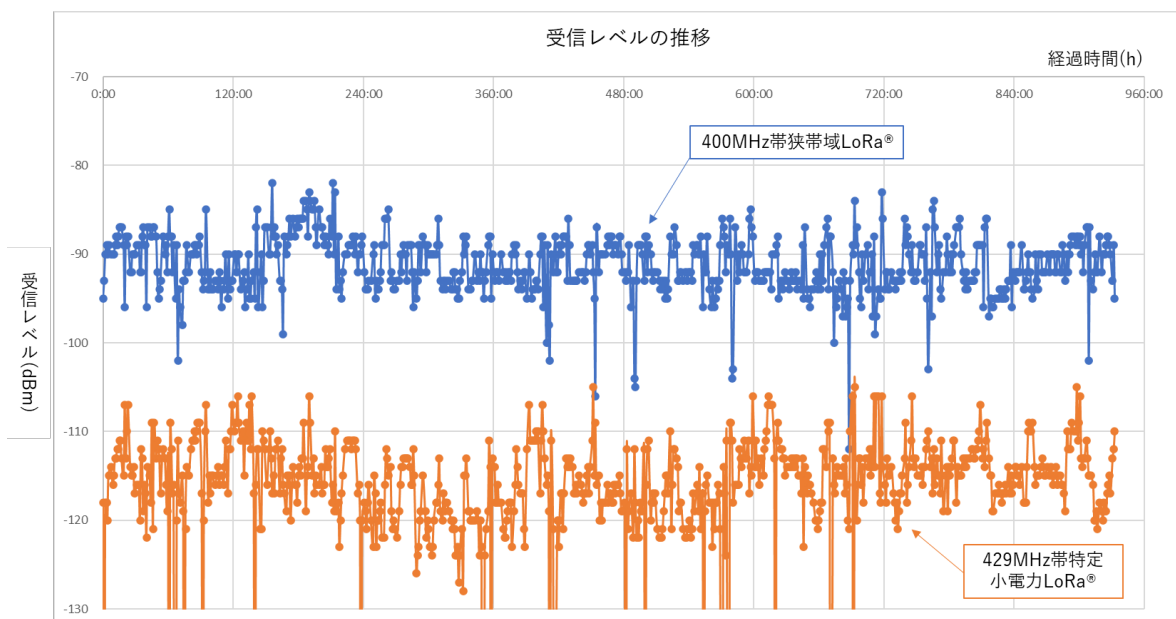


図4-93 水位計長期データ取得 測定結果

また、測定場所から最も近いアメダス観測地点（窪川）の1時間毎雨量と平均風速を、受信レベル測定結果に合わせて記載した結果を図4-94に示す。また、受信レベルと雨量、風速間の相関係数を求めた（表4-11）この測定結果からは、受信レベルと雨量・風速に明確な相関は無いと考えられる。受信レベル変動の要因について、子局（貯水槽）周辺が木々に覆われているため（図4-95）、その影響も考えられる。

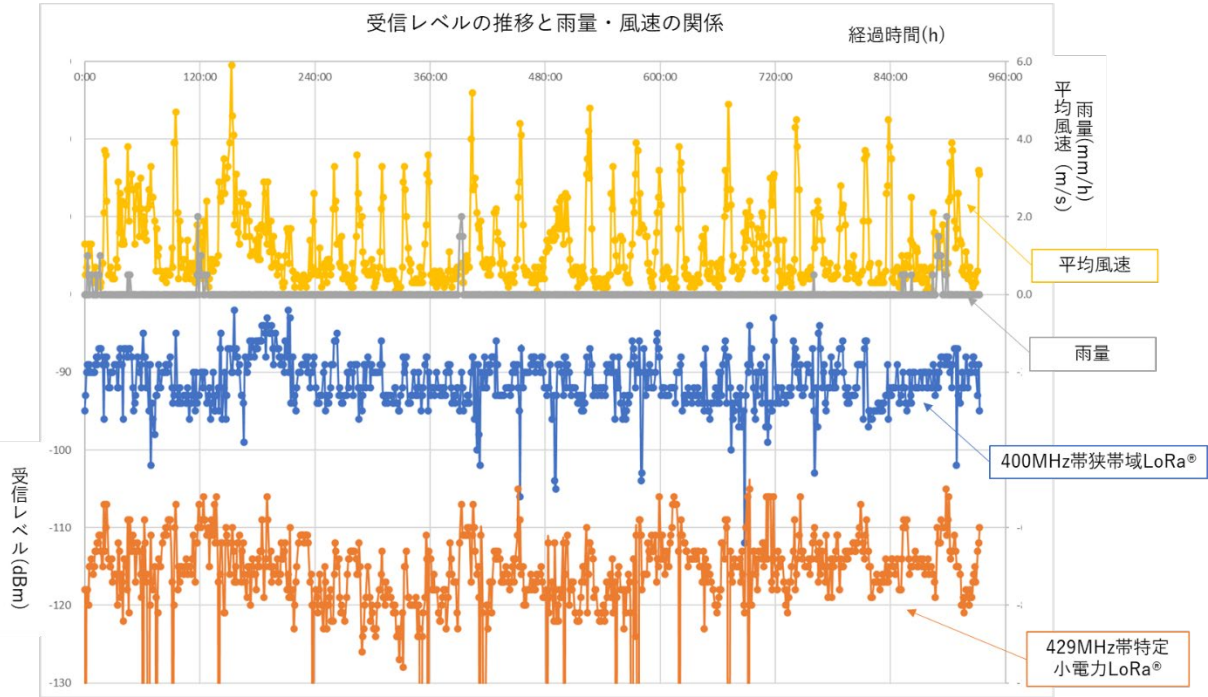


図 4 - 9 4 水位計長期データ取得 測定結果

表 4 - 1 1 受信レベルと雨量、風速間の相関係数

対象	相関係数
400MHz 帯狭帯域 LoRa®受信レベルと 429MHz 帯特定小電力 LoRa®受信レベル間	0.060
400MHz 帯狭帯域 LoRa®受信レベルと風速間	0.188
429MHz 帯特定小電力 LoRa®受信レベルと風速間	-0.056
400MHz 帯狭帯域 LoRa®受信レベルと雨量間	0.036
429MHz 帯特定小電力 LoRa®受信レベルと雨量間	0.080



図4-95 子局（貯水槽）周辺状況

さらに、実験場所は山間部であるため、反射によるマルチパスが発生してレベル変動の原因となった可能性も考えられる。親局（圃場）と子局（貯水槽）間は見通し外であるが、四万十川を挟んだ反対側の山とは見通しがあるため、これらの山によって反射されることによってマルチパスが発生し、直接波との干渉が発生してレベル変動の原因となった可能性が考えられる。図4-96に、四万十川を挟んだ反対側の山に反射点があると仮定した場合の見通し図を示す。仮定した反射点との見通しはあるため、強いレベルの反射波が発生する可能性がある。マルチパスが発生しているかどうかは、受信点にて八木アンテナなど指向性アンテナを使用して、電波の到来方向と受信レベルを測定することで知ることができるが、今回の実証実験においては実施できていない。

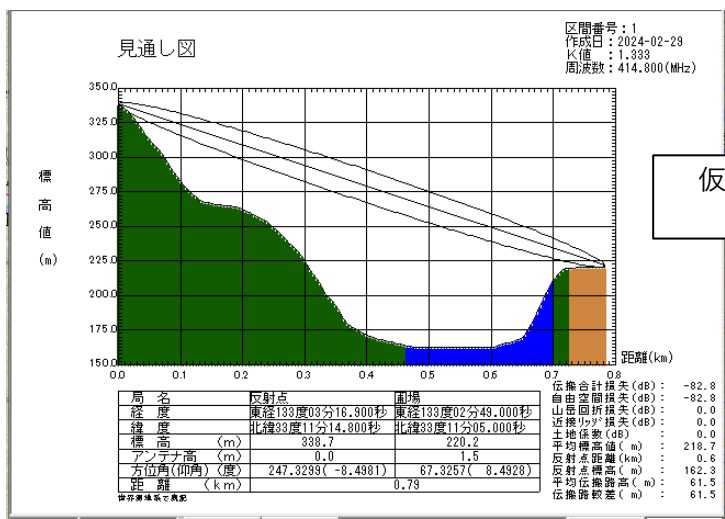
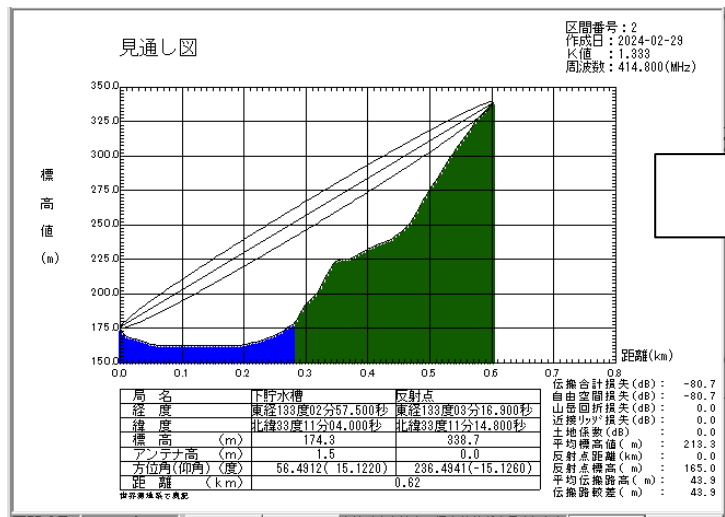
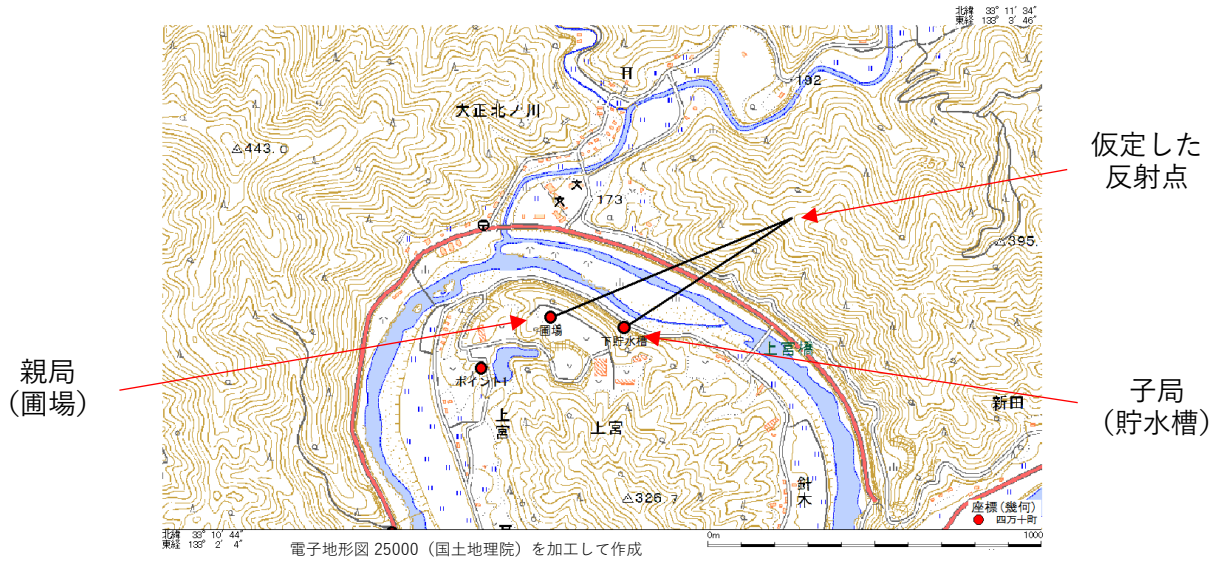


図4-96 反射点と親局(圍場)子局(貯水槽)の位置関係と見通し図

4. 4. 3. 4 水位計長期データ取得 考察

400MHz 帯狭帯域 LoRa®と、429MHz 帯特定小電力 LoRa®の受信レベル平均値の差は約 20dB となっており、中山間地域で一山超えた先と通信するためには、400MHz 帯狭帯域 LoRa®が有用であることを示す結果となった。

なお、400MHz 帯狭帯域 LoRa®、429MHz 帯特定小電力 LoRa®ともに、受信レベルの変動が 10dB 程度、最大 20dB 近く発生している。400MHz 帯狭帯域 LoRa®の基準感度は拡散係数 SF=7 で-134dBm であるが、通信の信頼性を確保するためには、受信レベルの変動を考慮し、基準感度プラス 10~20dB の受信レベルが得られるように置局や回線設計を行う必要があることを示している。

4. 4. 4 ドローンでの実験

ドローンに搭載しての運用を検討するために、ドローンから発生するノイズの測定と、通信実験としてドローンに受信機を搭載して上空へ上げた際の通信状況の測定を実施した。

4. 4. 4. 1 ドローンノイズ測定概要

429MHz 帯特定小電力無線機をドローンに搭載した場合、ドローンが発するノイズによって通信不良が発生するとの情報が寄せられたため、ドローンから発生するノイズの測定を実施した（図4-97）。スペクトラムアナライザおよび無線モジュールを使用してノイズレベルの測定を行った。

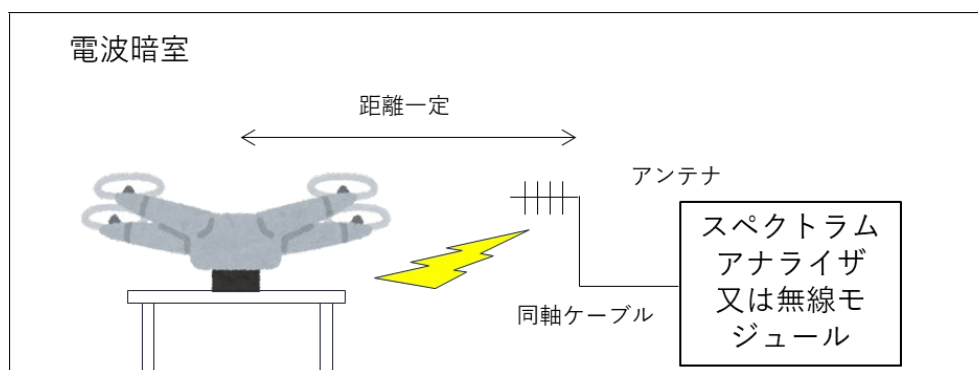


図4-97 ドローンノイズ測定概要

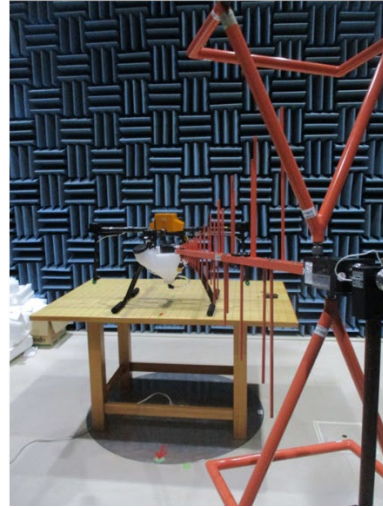
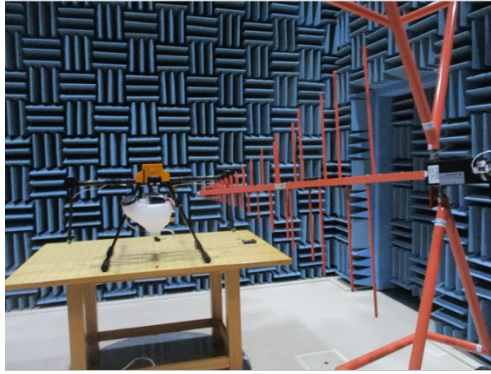
4. 4. 4. 2 ドローンノイズ測定条件

ドローンノイズ測定での測定条件を表4-12に、測定状況を図4-98に示す。

表4-12 ドローンノイズ測定 測定条件

測定したドローン	使用予定のドローン マゼックス 飛助 mini
	他機種ドローン DJI Inspire1
スペクトラムアナライザ	アンリツ MS2830A
アンテナ	広帯域アンテナ (ログペリアンテナ) CC6479 SCHAFFNER 社
測定場所	サーキットデザイン株式会社電波暗室
測定項目	ドローン本体とアンテナ間の距離を1mとした場合のノイズ電力 (スペクトラムアナライザで測定した受信電力) RSSI (無線モジュールで受信した場合のノイズレベル)

マゼックスドローン



DJI Inspire1

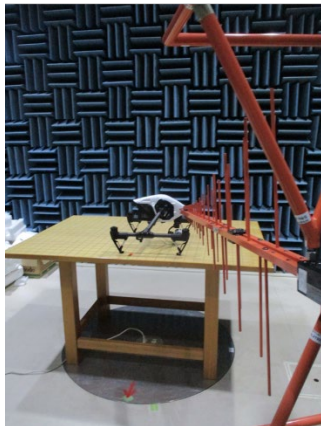


図4-98 ドローンノイズ測定状況

4. 4. 4. 3 ドローンノイズ測定結果

スペクトラムアナライザでのドローンノイズ測定結果を、図4-99～4-114に示す。

図4-99 マゼックスドローン 垂直偏波 30MHz～3GHz

図4-100 マゼックスドローン 水平偏波 30MHz～3GHz

図4-101 マゼックスドローン 垂直偏波 414.8MHz 付近

図4-102 マゼックスドローン 水平偏波 414.8MHz 付近

図4-103 マゼックスドローン 垂直偏波 410～420MHz

図4-104 マゼックスドローン 垂直偏波 350～355MHz

図4-105 マゼックスドローン 垂直偏波 429～430MHz

図4-106 マゼックスドローン 垂直偏波 920～930MHz

図4-107 DJIドローン 垂直偏波 30MHz～3GHz

図4-108 DJIドローン 水平偏波 30MHz～3GHz

図4-109 DJIドローン 垂直偏波 414.8MHz 付近

図4-110 DJIドローン 水平偏波 414.8MHz 付近

図4-111 DJIドローン 垂直偏波 429～430MHz

図4-112 DJIドローン 水平偏波 429～430MHz

図4-113 マゼックスドローンとDJIドローンの比較 垂直偏波 30MHz～3GHz

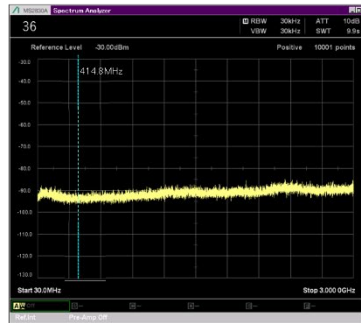
図4-114 マゼックスドローンとDJIドローンの比較 水平偏波 30MHz～3GHz

マゼックス
ドローン

電源OFF

垂直偏波
ログベリアンテナ
30MHz~3GHz
RBW30kHz

モーター
アイドル状態



プロボON
ドローンON

モーター
最大回転

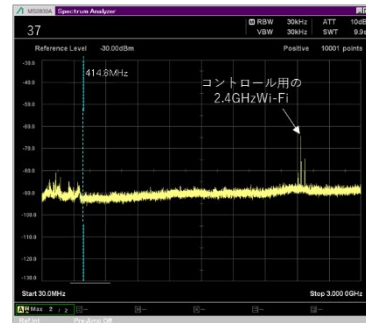


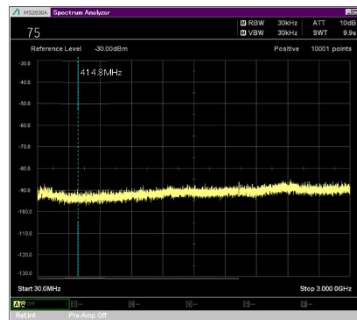
図4-99 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローン 垂直偏波 30MHz~3GHz

マゼックス
ドローン

電源OFF

水平偏波
ログベリアンテナ
30MHz~3GHz
RBW30kHz

モーター
アイドル状態



プロボON
ドローンON

モーター
最大回転

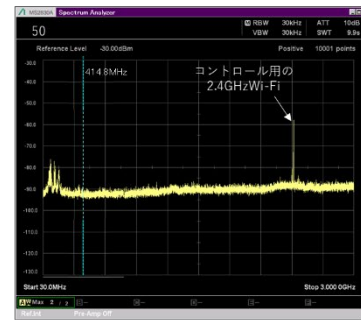
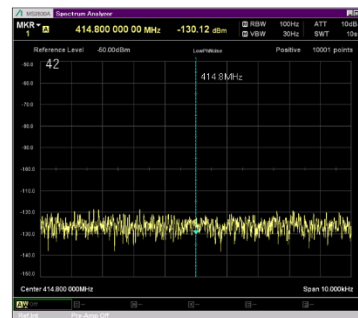


図4-100 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローン 水平偏波 30MHz~3GHz

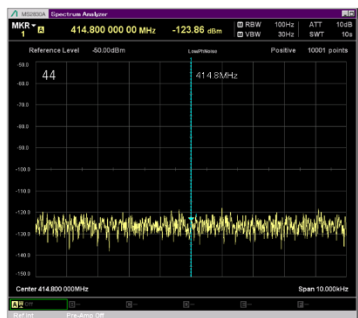
マゼックス
ドローン

電源OFF

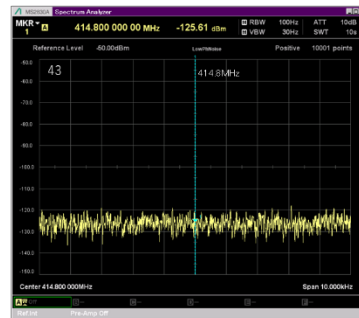
垂直偏波
ログベリアンテナ
414.795~414.805MHz
RBW100Hz



モーター
アイドル状態



プロポON
ドローンON



モーター
最大回転

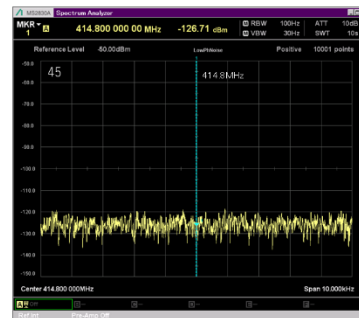
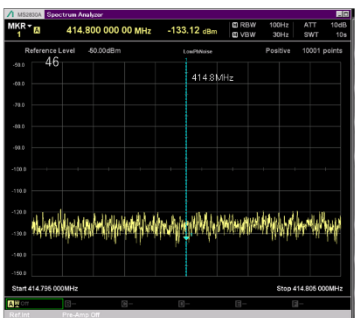


図 4-101 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローン 垂直偏波 414.8MHz 付近

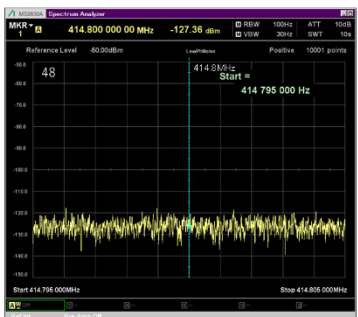
マゼックス
ドローン

電源OFF

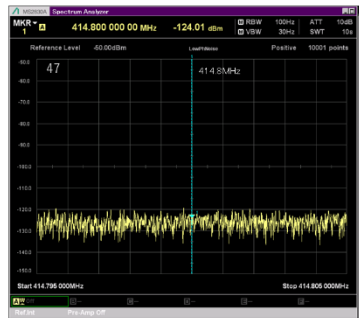
水平偏波
ログベリアンテナ
414.795~414.805MHz
RBW100Hz



モーター
アイドル状態



プロポON
ドローンON



モーター
最大回転

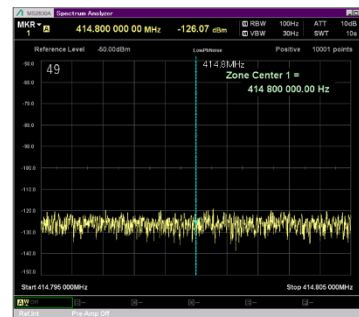


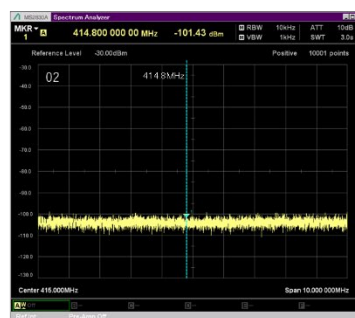
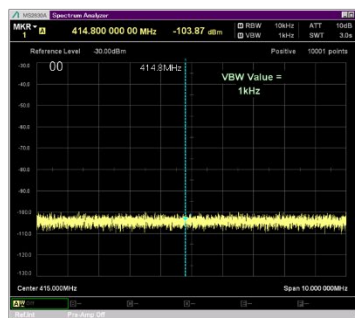
図 4-102 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローン 水平偏波 414.8MHz 付近

マゼックス
ドローン

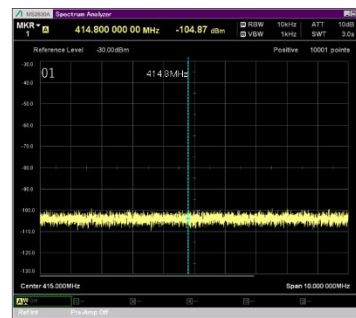
電源OFF

垂直偏波
ダイポールアンテナ
410~420MHz
RBW10kHz

モーター
アイドル状態



プロポON
ドローンON



モーター
最大回転

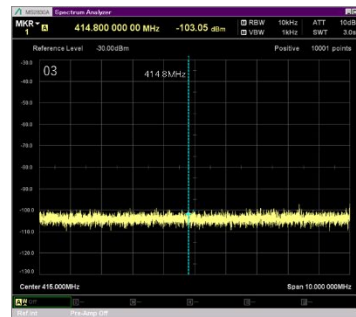


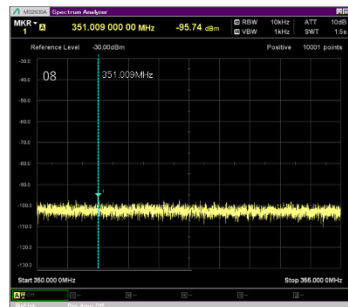
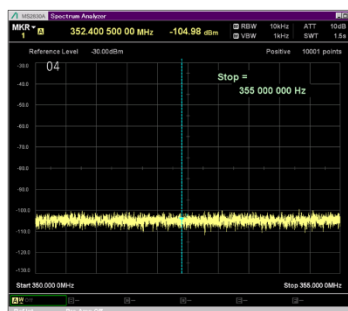
図4-103 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローン 垂直偏波 410~420MHz

マゼックス
ドローン

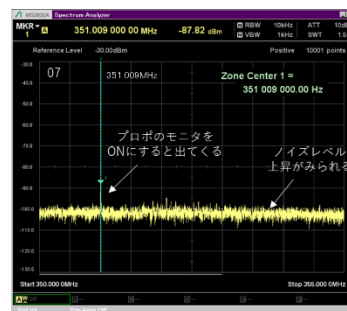
電源OFF

垂直偏波
ダイポールアンテナ
350~355MHz
RBW10kHz

モーター
アイドル状態



プロポON
ドローンON



モーター
最大回転

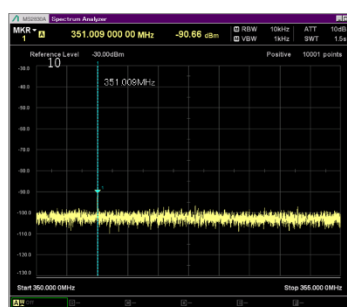
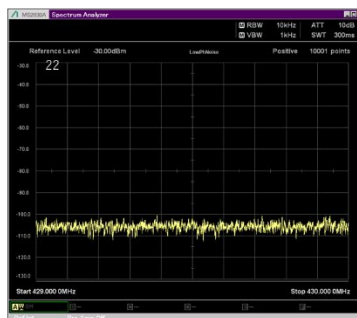


図4-104 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローン 垂直偏波 350~355MHz

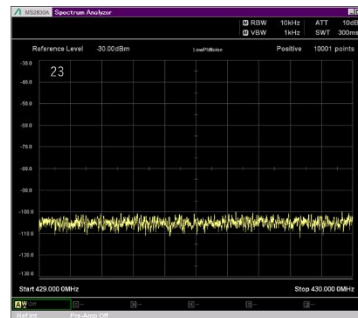
マゼックス
ドローン

電源OFF

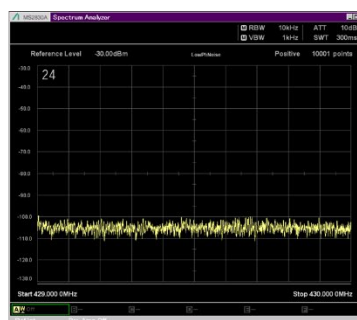
垂直偏波
ダイポールアンテナ
429~430MHz
RBW10kHz
SAWフィルタ付き



プロボON
ドローンON



モーター
アイドル状態



モーター
最大回転

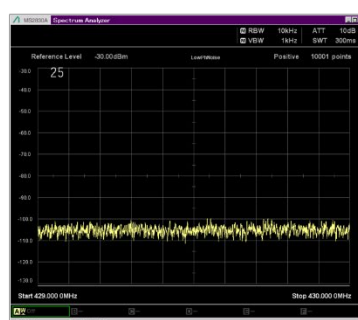
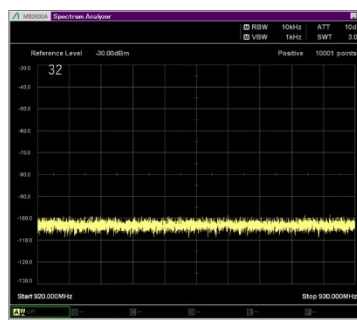


図4-105 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローン 垂直偏波 429~430MHz

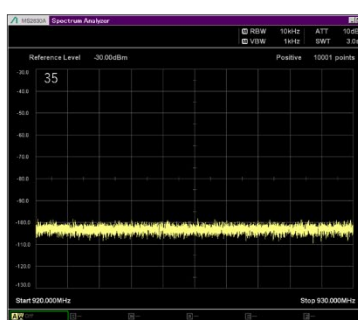
マゼックス
ドローン

電源OFF

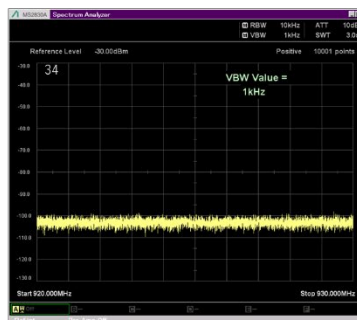
垂直偏波
ダイポールアンテナ
920~930MHz
RBW10kHz



プロボON
ドローンON



モーター
アイドル状態



モーター
最大回転

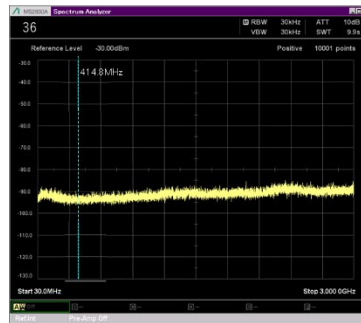


図4-106 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローン 垂直偏波 920~930MHz

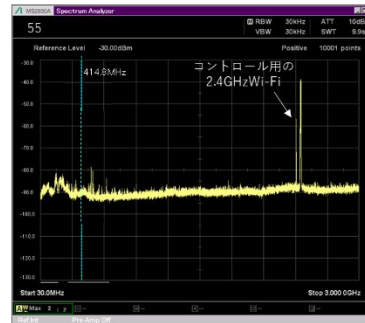
DJI Inspire1

電源OFF

垂直偏波
ログベリアンテナ
30MHz~3GHz
RBW30kHz



プロポON
ドローンON



モーター
回転

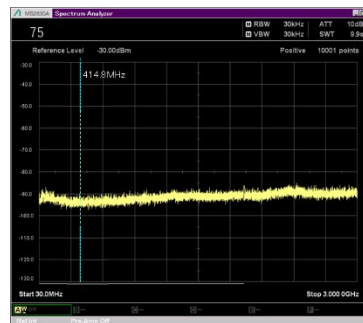


図4-107 ドローンノイズ測定結果 DJIドローン 垂直偏波 30MHz~3GHz

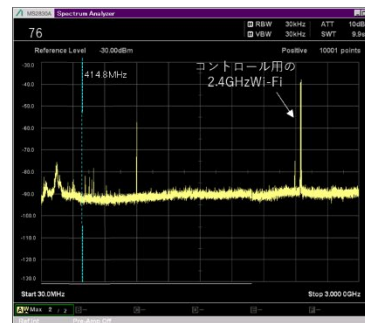
DJI Inspire1

電源OFF

水平偏波
ログベリアンテナ
30MHz~3GHz
RBW30kHz



プロポON
ドローンON



モーター
回転

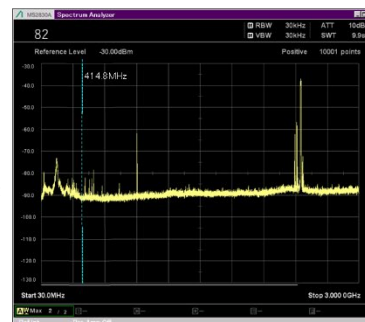
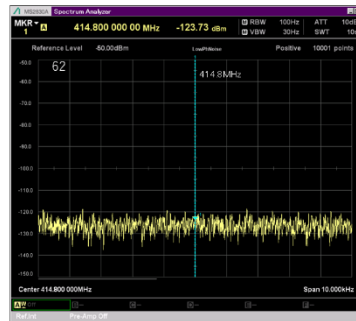


図4-108 ドローンノイズ測定結果 DJIドローン 水平偏波 30MHz~3GHz

DJI Inspire1

電源OFF

垂直偏波
ログベリアンテナ
414.795~414.805MHz
RBW100Hz



プロポON
ドローンON



モーター
回転

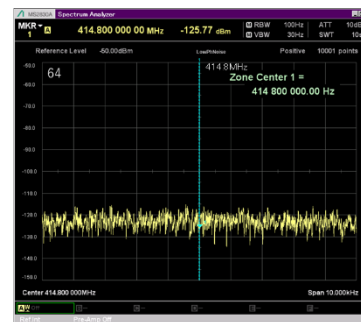
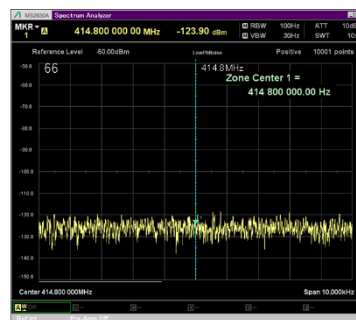


図 4-109 ドローンノイズ測定結果 DJIドローン 垂直偏波 414.8MHz 付近

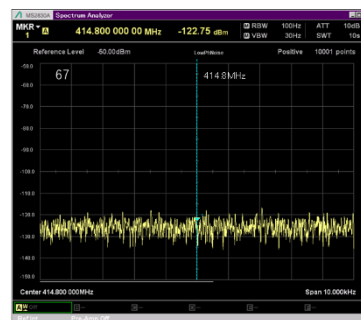
DJI Inspire1

電源OFF

水平偏波
ログベリアンテナ
414.795~414.805MHz
RBW100Hz



プロポON
ドローンON



モーター
回転

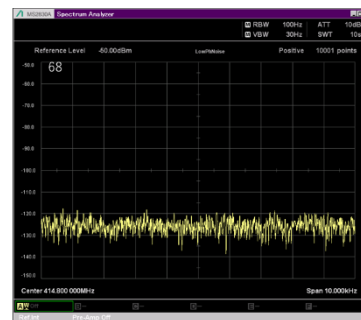
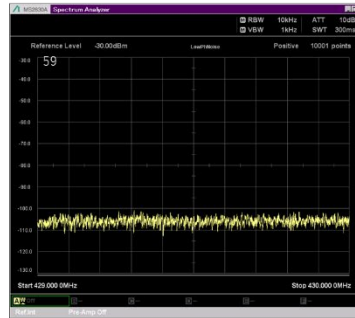


図 4-110 ドローンノイズ測定結果 DJIドローン 水平偏波 414.8MHz 付近

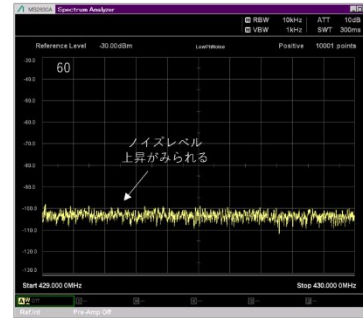
DJI Inspire1

電源OFF

垂直偏波
ダイポールアンテナ
429~430MHz
RBW10kHz
SAWフィルタ付き



プロポON
ドローンON



モーター
回転

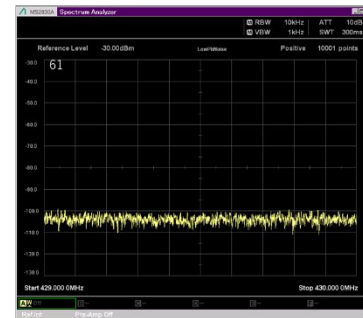
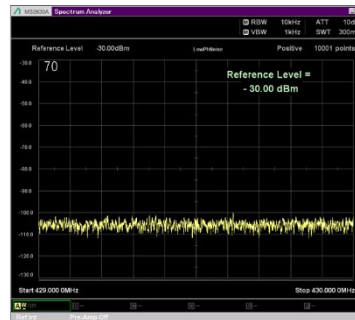


図4-1-1-1 ドローンノイズ測定結果 DJIドローン 垂直偏波 429~430MHz

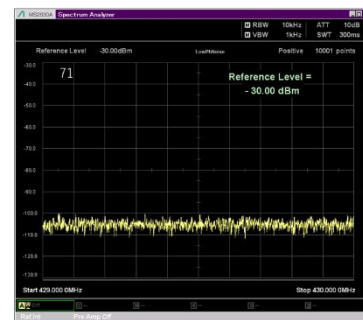
DJI Inspire1

電源OFF

水平偏波
ダイポールアンテナ
429~430MHz
RBW10kHz
SAWフィルタ付き



プロポON
ドローンON



モーター
回転

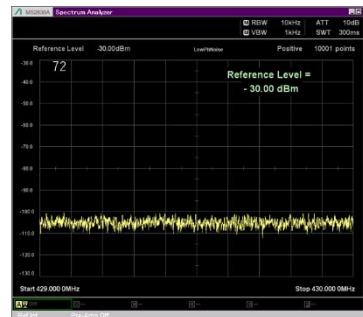


図4-1-1-2 ドローンノイズ測定結果 DJIドローン 水平偏波 429~430MHz

マゼックスドローンと DJI ドローンとの比較を以下に示す。

マゼックス
ドローンと
DJI Inspire1
の比較

垂直偏波
ログペリアンテナ
30MHz~3GHz
RBW30kHz

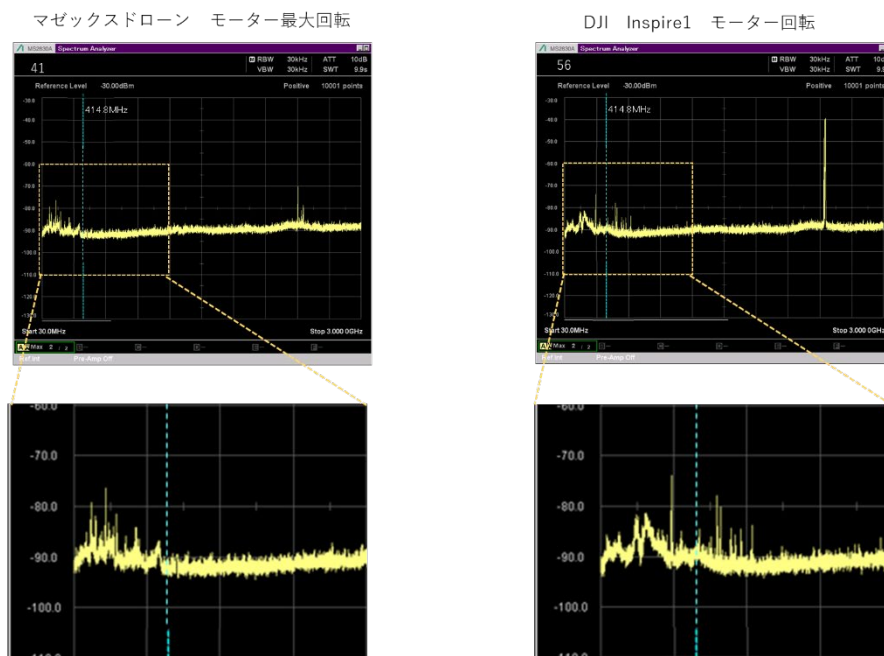


図4-1-13 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローンとDJIドローンの比較 垂直偏波 30MHz~3GHz

マゼックス
ドローンと
DJI Inspire1
の比較

水平偏波
ログペリアンテナ
30MHz~3GHz
RBW30kHz

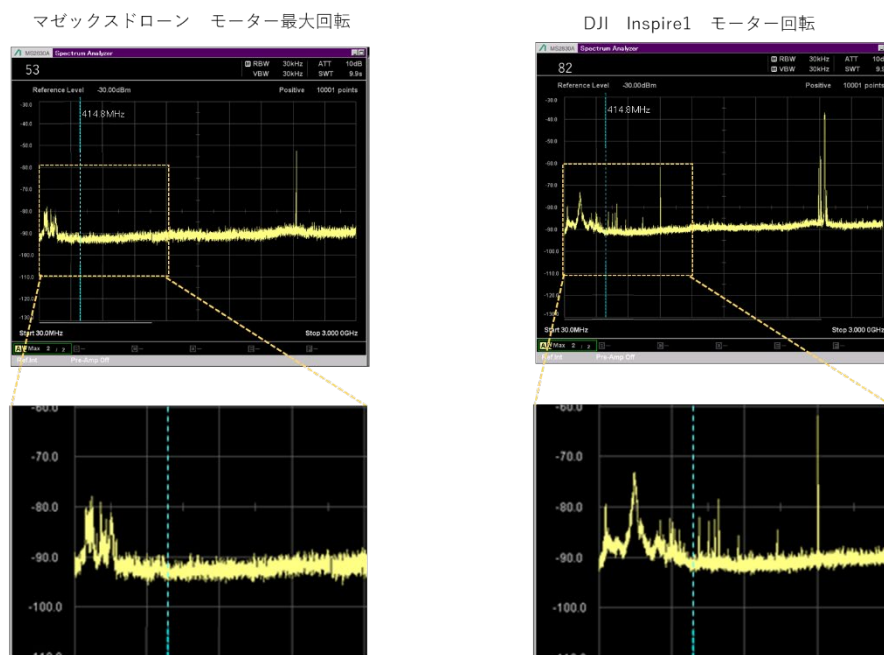


図4-1-14 ドローンノイズ測定結果 マゼックスドローンとDJIドローンの比較 水平偏波 30MHz~3GHz

無線モジュールでのノイズ測定結果を表4-13~4-14、図4-115~116に示す。無線モジュールの受信チャンネルを徐々に変化させて、受信電力（ノイズレベル）の測定を実施した。周波数414.8MHz付近と429.5MHz付近にて測定を行った。

表4-13 無線モジュールでのノイズ測定結果 414.8MHz付近

CH	MHz	環境ノイズ (dBm)	電源ON (dBm)	電源ON+回転 (dBm)
1	414.7875	-124	-115	-116
2	414.8	-124	-117	-116
3	414.8125	-124	-117	-116

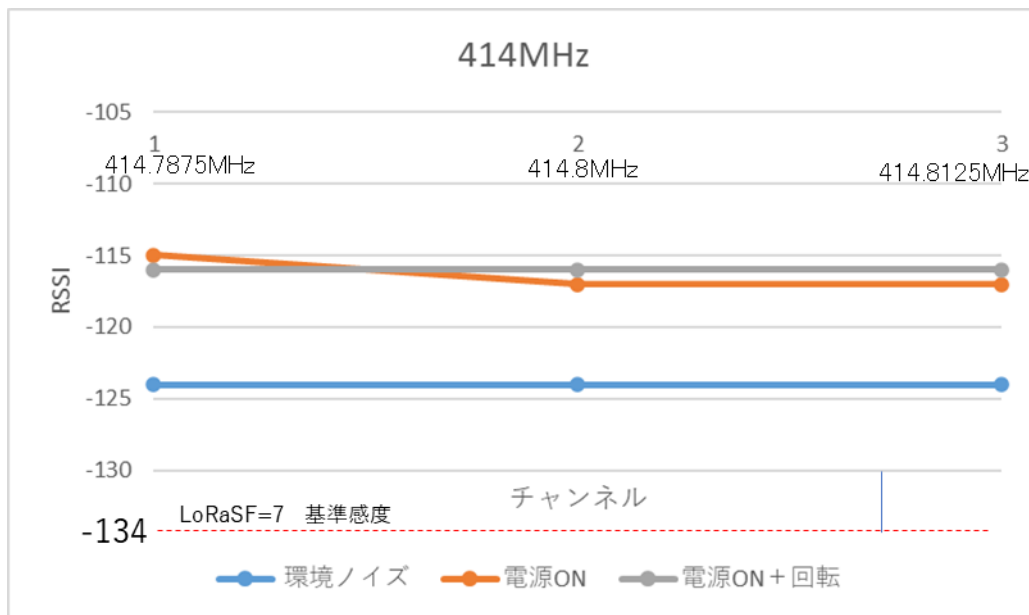


図4-115 無線モジュールでのノイズ測定結果 414.8MHz付近

表 4-14 無線モジュールでのノイズ測定結果 429.5MHz 付近

CH	MHz	環境ノイズ (dBm)	電源ON (dBm)	電源ON+回転 (dBm)
7	429.25	-127	-116	-116
8	429.2625	-127	-114	-115
9	429.275	-126	-115	-116
10	429.2875	-127	-115	-114
11	429.3	-127	-114	-115
12	429.3125	-125	-116	-116
13	429.325	-126	-117	-116
14	429.3375	-128	-115	-115
15	429.35	-126	-116	-115
16	429.3625	-127	-116	-115
17	429.375	-127	-115	-115
18	429.3875	-126	-115	-115
19	429.4	-127	-116	-115
20	429.4125	-127	-115	-115
21	429.425	-125	-117	-116
22	429.4375	-126	-116	-115
23	429.45	-127	-116	-115
24	429.4625	-128	-116	-115
25	429.475	-126	-115	-116
26	429.4875	-126	-115	-116
27	429.5	-127	-116	-117
28	429.5125	-126	-116	-115
29	429.525	-127	-115	-115
30	429.5375	-127	-116	-115
31	429.55	-126	-115	-116
32	429.5625	-127	-115	-115
33	429.575	-128	-116	-115
34	429.5875	-125	-115	-115
35	429.6	-127	-115	-115
36	429.6125	-127	-115	-116
37	429.625	-127	-115	-115
38	429.6375	-125	-115	-114
39	429.65	-127	-114	-114
40	429.6625	-127	-115	-115
41	429.675	-125	-114	-114
42	429.6875	-127	-114	-114
43	429.7	-127	-115	-115
44	429.7125	-125	-114	-114
45	429.725	-127	-115	-115
46	429.7375	-128	-115	-115

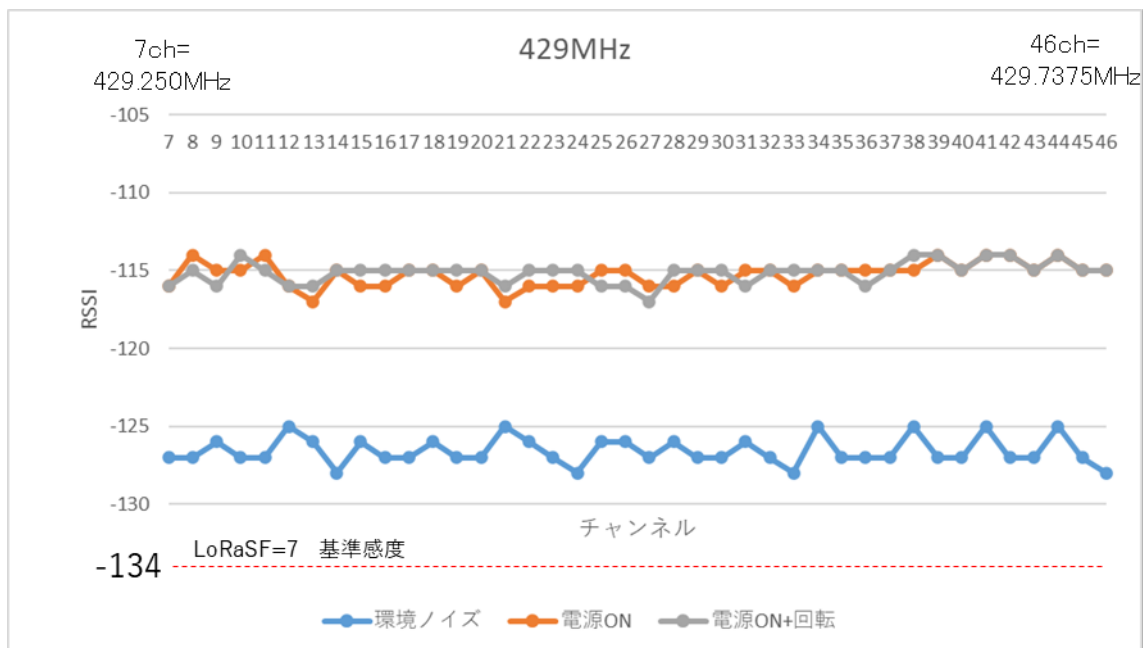


図 4-116 無線モジュールでのノイズ測定結果 429.5MHz 付近

また、ドローン通信実験の前にも、ドローンから発生するノイズの測定を実施した（図4-117、表4-15）。スペクトラムアナライザを使用してノイズレベルの測定を行った。

結果を図4-118～119に示す。ドローン電源が OFF/ON でノイズに顕著な差は見られなかった。

なお、図4-119において、他局からの電波は測定されていない。別の特定小電力システムの電波が測定された場合は、影響を受けて運用が困難となる場合があるが、実証実験時には発生していない。

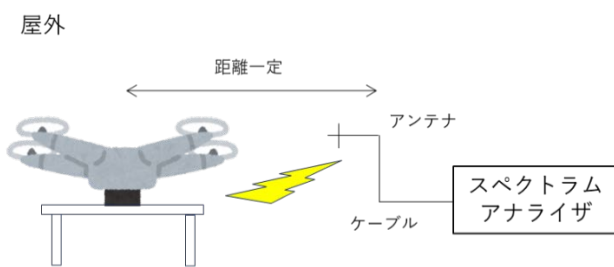


図4-117 ドローンノイズ測定概要

表4-15 ドローンノイズ測定 測定条件

測定したドローン	マゼックス 飛助 mini (400MHz 帯無線機、429MHz 帯無線機、 PC (ラズパイ) を搭載した状態)
スペクトラムアナライザ	アンリツ MS2721A
アンテナ	ダイポールアンテナ アンリツ MP534A
測定場所	屋外 (窪川運動場野球場)
測定項目	ドローン本体とアンテナ間の距離を 1.5m とした場合の ノイズ電力 (スペクトラムアナライザで測定した受信電力)

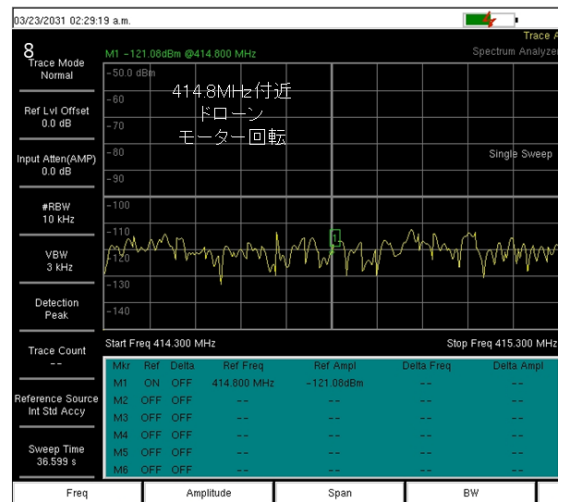
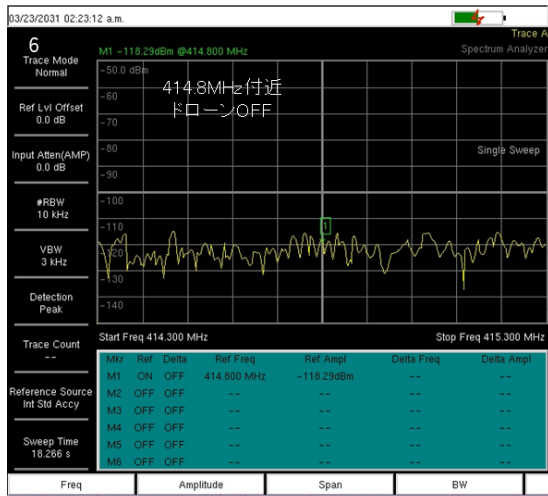


図 4-1-18 ドローンノイズ測定結果 垂直偏波 414.5MHz 付近

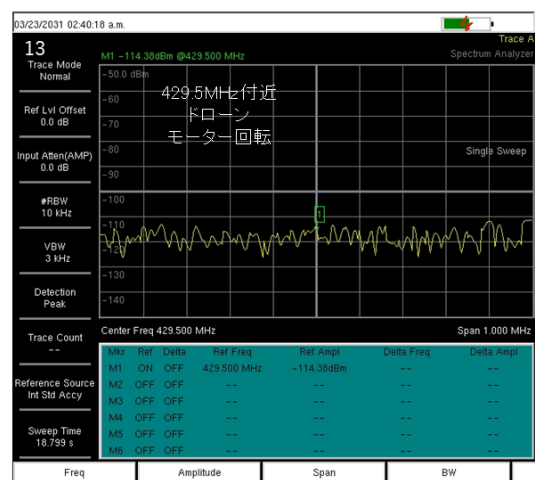
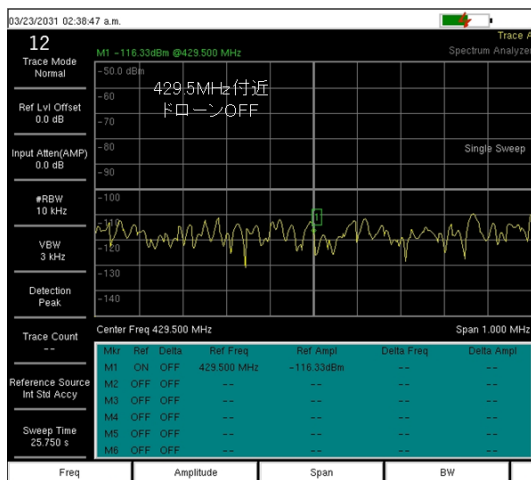


図 4-1-19 ドローンノイズ測定結果 垂直偏波 429~430MHz

4. 4. 4. 4 ドローンノイズ測定結果 考察

マゼックスドローンにおいては、100～200MHz など低い周波数においてノイズが見られたが、使用する 400MHz 帯では、キャリアセンスに引っかかるようなノイズは測定されなかった。

サーキットデザイン様の御協力で、過去ノイズが多かった別の機種のだローンも測定した。429.5MHz 付近においても 5dB 程度のノイズレベル上昇が見られた。また、400MHz より低いところと高いところで、細かいノイズも発生していた。また、機種によるが、使用する周波数とドローンノイズ周波数が一致すると、キャリアセンスに引っかかることが考えられる。

今回使用するマゼックス社製ドローンについては、400MHz 帯で問題となるノイズは出ていなかったため、シールドなどノイズ対策は実施せず、この機種で実験を行うこととした。

なお、マゼックスドローンにおいても、無線モジュールで測定した場合は、ノイズレベルが 10dB 程度上昇する現象が見られた。今回のスペクトラムアナライザでは見ることができなかった、低いレベルのノイズが発生しており、それによってノイズレベルが上昇したと考えられる。

ドローンに搭載する場合は、10dB 程度ノイズ発生が見込まれるものとして、回線設計を行う必要があると考えられる。つまり、少なくとも基準感度から 10dB 程度上のレベルの受信レベルが得られるよう、置局を検討する必要がある。

4. 4. 4. 5 ドローン通信実験

ドローンに受信機を搭載した状態で飛行を行い、高所での受信状態改善の程度について測定を行った。400MHz 帯狭帯域 LoRa®と、429MHz 帯特定小電力 LoRa®とで比較を実施した（図4-120）。

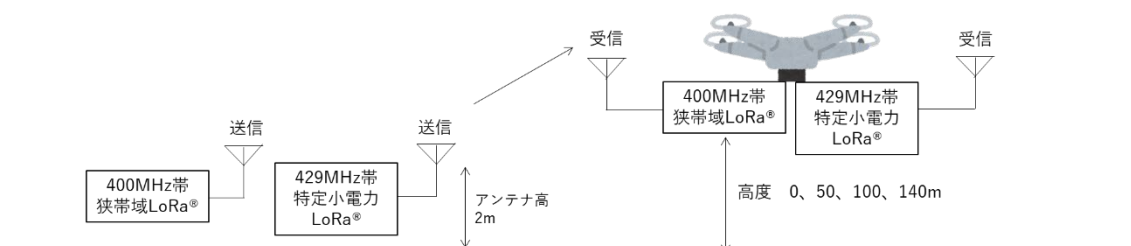


図4-120 ドローン通信実験概要

4. 4. 4. 6 ドローン通信実験 測定条件

ドローン通信実験での測定条件を表4-16に、測定状況を図4-121示す。

表4-16 ドローン通信実験 測定条件

周波数	414.8MHz (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 429.5MHz (429MHz 帯特定小電力 LoRa®)
空中線電力	1W (400MHz 帯狭帯域 LoRa®) 10mW (429MHz 帯特定小電力 LoRa®)
送信アンテナ高	2m
受信アンテナ高	0、50、100、140m
移動速度	水平方向 0m/s (真上方向へ飛行し、水平方向には移動しない)
送信アンテナ利得	2dBi (無指向性)
受信アンテナ利得	2dBi (無指向性)
送信ケーブル損失	1dB
受信ケーブル損失	0dB
拡散係数	SF=7
偏波面	垂直
送信回数	10回
測定項目	受信電力



429MHz帯特定
小電力LoRa®受信機



受信機用バッテリー
(モバイルバッテリー) アンテナ 400MHz帯狭帯域
LoRa®受信機 PC (ラズパイ)



アンテナ



400MHz帯狭帯域
LoRa®送信機

429MHz帯特定
小電力LoRa®送信機



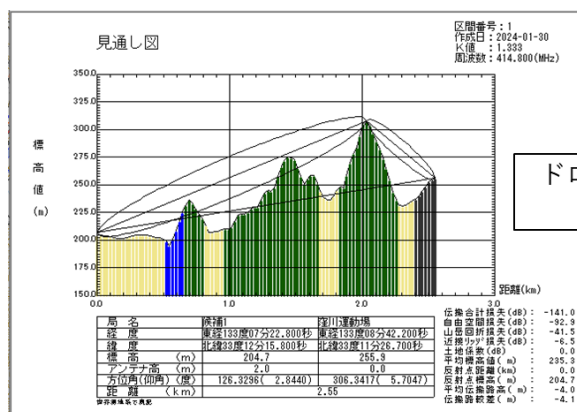
図4-121 ドローン通信実験 測定状況

送受信場所を図4-122に示す。ドローンには受信機を搭載し、四万十町窪川運動場野球場にて飛行を行った。送信場所は、2か所それぞれから送信を行った。

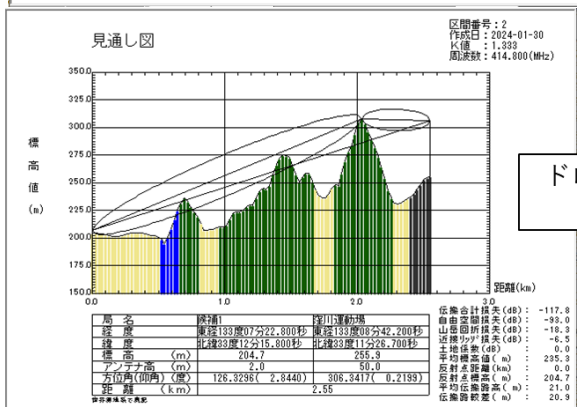


図4-122 送受信場所

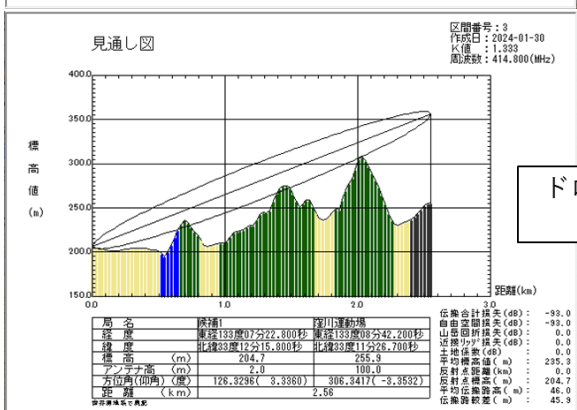
各送信場所から受信場所までの見通し図を図4-123～4-124に示す。送信場所その1は、受信場所との直線距離2.55kmであり、ドローン高度100m以上で見通しありとなる。送信場所その2は、受信場所との直線距離3.36kmであり、ドローン高度140mでも見通しはない。



ドローン高度
0m



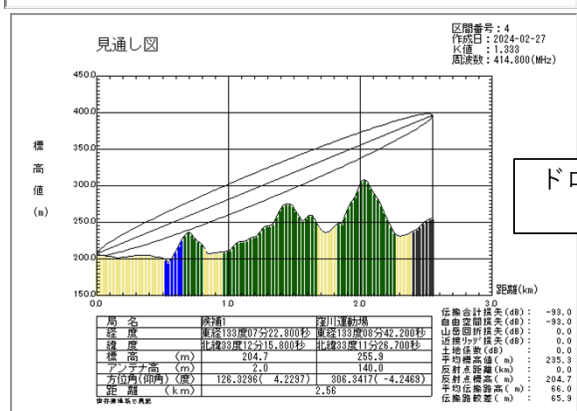
ドローン高度
50m



ドローン高度
100m

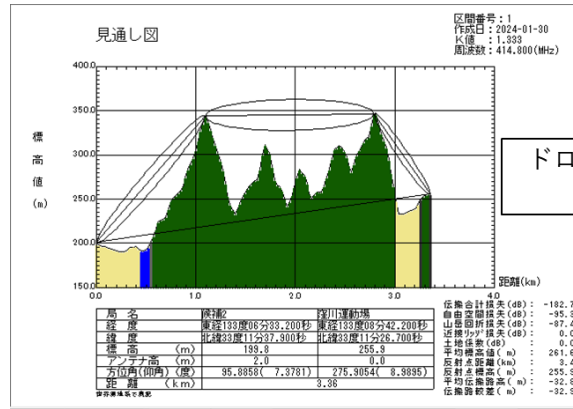
土地利用凡例

- 田
- 畑
- 果樹園
- その他の樹木畑
- 森林
- 荒れ地
- 建物用地A
- 建物用地B
- 幹線交通用地
- その他の用地
- 内水地(湖沼)
- 内水地(河川地A)
- 内水地(河川地B)
- 海浜
- 海水域

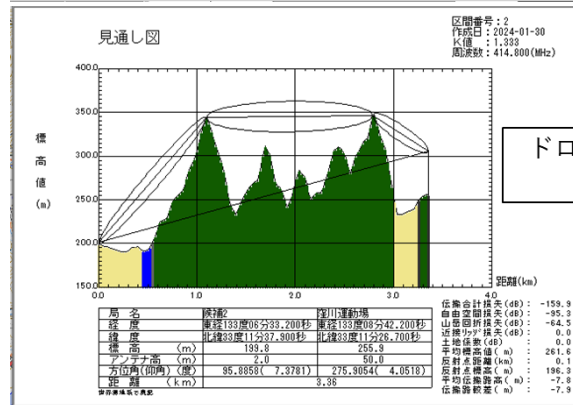


ドローン高度
140m

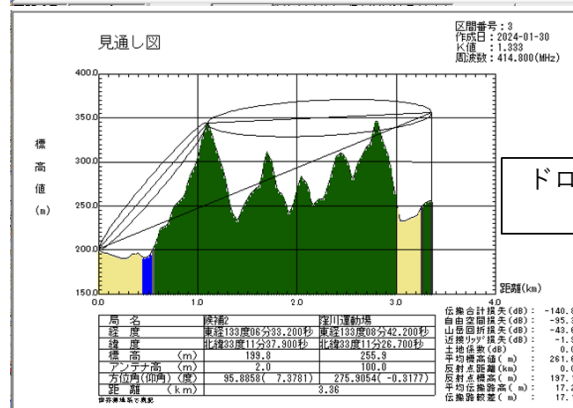
図4-123 送信場所その1から受信場所間の見通し図



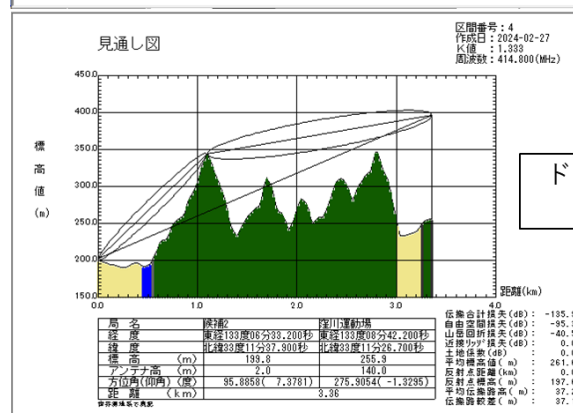
ドローン高度
0m



ドローン高度
50m



ドローン高度
100m



ドローン高度
140m

土地利用凡例

- 田
- 畑
- 果樹園
- その他の樹木畑
- 森林
- 荒地
- 建物用地A
- 建物用地B
- 幹線交通用地
- その他の用地
- 内水地(湖沼)
- 内水地(河川地A)
- 内水地(河川地B)
- 海浜
- 海水域

図4-124 送信場所その2から受信場所間の見通し図

4. 4. 4. 7 ドローン通信実験 測定結果

ドローン通信実験での測定結果を表4-17~4-18、図4-125~4-126に示す。各ドローン高度での受信レベルとパケットエラーレートを示している。

表4-17 測定結果 送信場所その1から送信した場合

400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz 1W SF=7	高度 0m	50m	100m	140m
受信レベル (dBm)	-103.2	-91.3	-74.0	-68.2
パケットエラーレート (%)	0	0	0	0
429MHz 帯特定小電力 LoRa® 429.5MHz 10mW SF=7	高度 0m	50m	100m	140m
受信レベル (dBm)	測定できず	-106.0	-100.2	-91.6
パケットエラーレート (%)	100	0	10	0

表4-18 測定結果 送信場所その2から送信した場合

400MHz 帯狭帯域 LoRa® 414.8MHz 1W SF=7	高度 0m	50m	100m	140m
受信レベル (dBm)	測定できず	-99.4	-99.5	-97.6
パケットエラーレート (%)	100	10	10	0
429MHz 帯特定小電力 LoRa® 429.5MHz 10mW SF=7	高度 0m	50m	100m	140m
受信レベル (dBm)	測定できず	測定できず	-116.0	-113.0
パケットエラーレート (%)	100	100	90	10

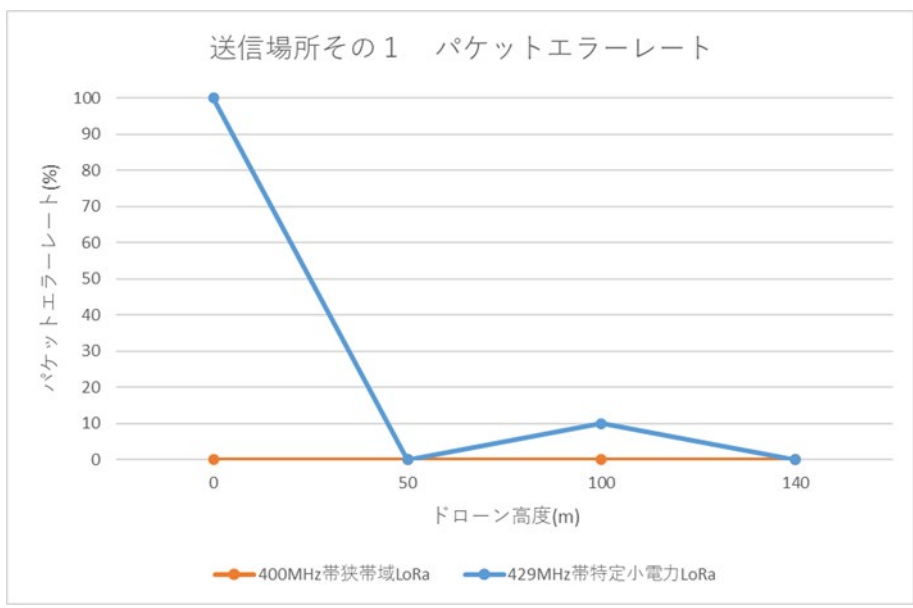
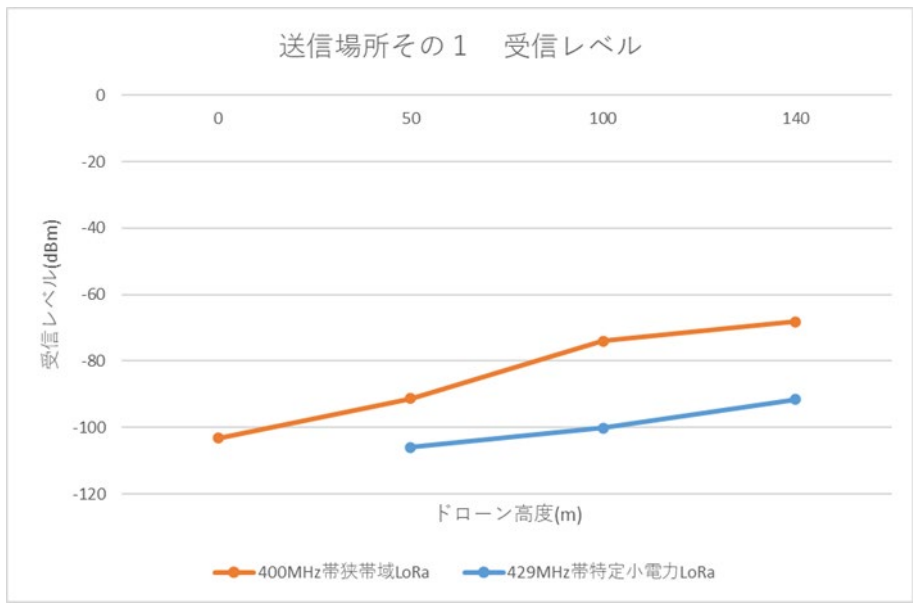


図4-125 測定結果 送信場所その1から送信した場合

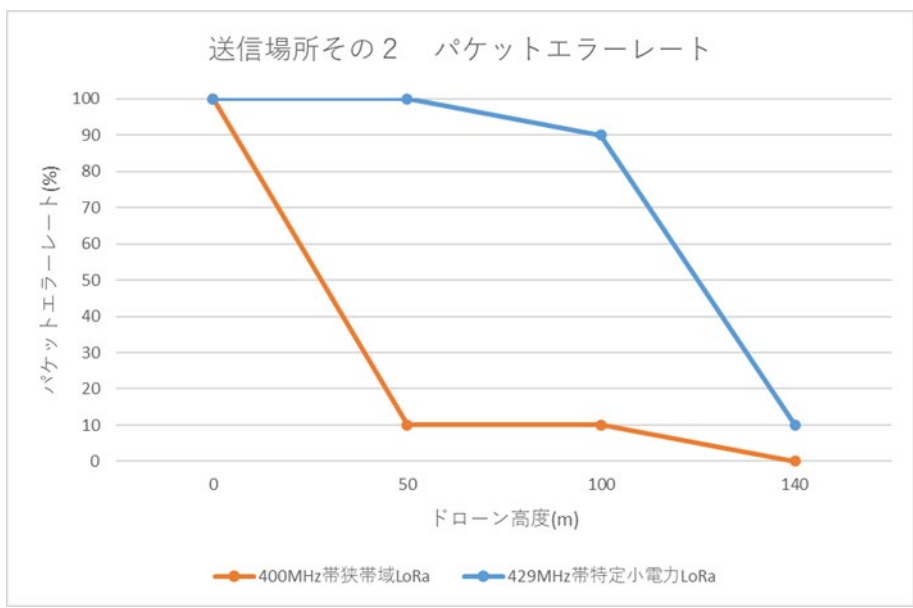
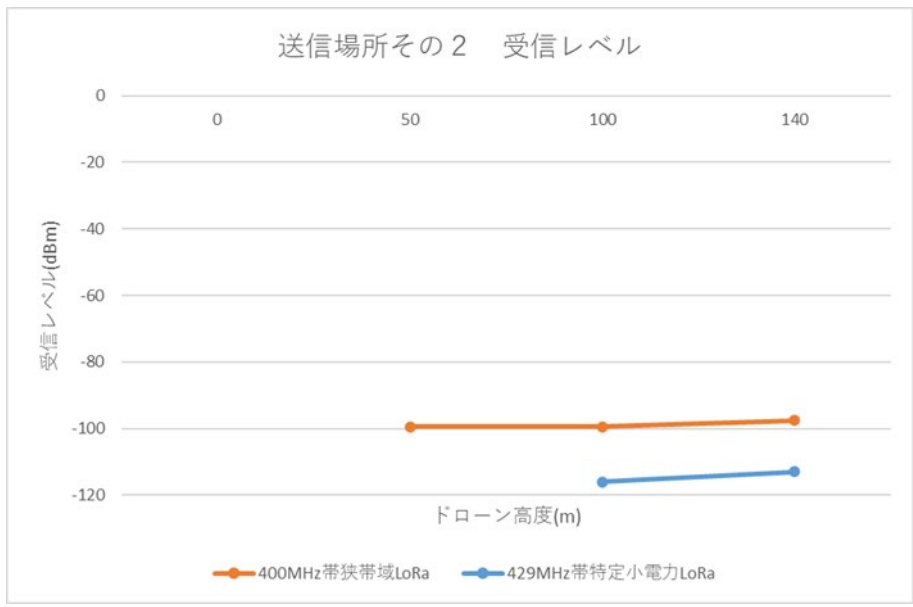


図4-126 測定結果 送信場所その2から送信した場合

4. 4. 4. 8 ドローン通信実験 測定結果考察

ドローンを使用して高所で受信することによって、以下に示すような通信状況の改善が見られた。

例. 送信場所その1 429MHz 帯特定小電力 LoRa®

ドローン高度 0mでは通信できないが、50mでは通信可能となった。

送信場所その2 400MHz 帯狭帯域 LoRa®

ドローン高度 0mでは通信できないが、50mでは通信可能となった。

429MHz 帯特定小電力 LoRa®

ドローン高度 140mでは通信可能となった。

ドローンを使用して高所で受信することは、通信状況改善のためには有効であると考えられる。

今回の通信実験では、ドローンは受信のみであったが、ドローンを使用して高所から送信することは、今回のドローン通信実験結果からも、広範囲に電波が到達すると考えられる。通信状況改善には効果があるが、他局へ干渉を与える可能性があるため、ドローンからの400MHz 帯狭帯域 LoRa®の送信は、実施しないことが望ましいと考えられる。

なお、現状、429MHz 帯特定小電力 LoRa®はドローンからの送信は制度上可能となっているため、ドローンからの送信が必要な場合は、429MHz 帯特定小電力 LoRa®を使用する方法が考えられる。

第 5 章 他の無線システムとの共用検討

実証実験の結果を受けて、他の無線システムとの共用検討を行った。以下の項目について実施した。

ア 400MHz 帯における他の無線システムの諸元等調査

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの利用が想定される 400MHz 帯における割り当て状況（総合無線局監理システム）、周波数割当計画及び地域周波数利用計画策定基準一覧、過去の情報通信審議会の委員会報告等を調査し、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの導入にあたって共用検討が必要となる既存の無線システムを選定し、その諸元を調査し、取りまとめを行った。

イ 共用検討（机上検討）

自由空間伝搬損失にて、第 3 章においてとりまとめた 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム（地上で利用する場合及び上空で利用する場合それぞれの諸元・運用条件等に対して）と 5.1 章で調査した既存の無線システムとの共用検討を実施し、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムを 400MHz 帯に導入するために必要な共用条件案をとりまとめた。

検討にあたっては、第 3 章において検討した条件ごとに与干渉及び被干渉の机上検討・シミュレーション評価を実施して所要改善量と必要離隔距離を算出し、400MHz 帯における 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム導入条件案（離隔距離等を踏まえた運用条件案）のとりまとめをおこなった。

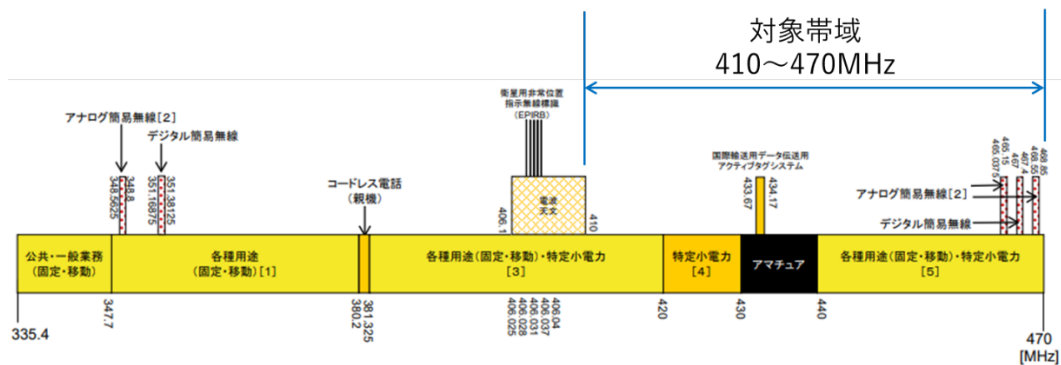
ウ 提案システムの周波数選定

ア及びイの検討結果を踏まえて、実証試験を高知県内で実施するために、最適な地域割当可能な周波数の選定を行った。周波数の選定にあたっては主管課と協議しながら検討を行った。

5. 1 400MHz 帯における他の無線システムの諸元等調査

5. 1. 1 対象周波数範囲

今回の検討に当たっては、図5-1に示す410~470MHzを対象周波数範囲とした。使用した無線モジュールの周波数下限から410MHzからとし、地上デジタルテレビ放送の帯域が始まる470MHzまでとしている。



電波の使用状況に関する補足説明

【335.4-960MHz】

番号	周波数帯 (MHz)	主な用途等
[1]	347.7-380.2	地方公共団体及び電力・ガス・運輸交通等公共機関の公共業務、一般私企業の各種業務
[2]	348.5625-348.8 465.0375-465.15 468.55-468.85	アナログ簡易無線。使用期限は令和6年11月30日まで
[3]	381.3-420	①デジタル空港無線、NTT東西の加入者線災害対策臨時電話、地方公共団体及び運輸交通等公共機関の公共業務、一般私企業の各種業務 ②体内植込型医療データ伝送装置の免許を要しない無線局(特定小電力無線局) ③ラジオゾンデ及び気象用ラジオ・ロボット
[4]	420-430	連絡無線、データ伝送装置、医療用テレメーター等の免許を要しない無線局(特定小電力無線局)
[5]	440-470	①デジタル空港無線、NTT東西の加入者線災害対策臨時電話、タクシー無線、鉄道・バス等の貨客運送事業、放送事業者の音声番組中継 ②連絡無線、データ伝送装置、医療用テレメーター等の免許を要しない無線局(特定小電力無線局)

<https://www.tele.soumu.go.jp/resource/search/myuse/use/335m.pdf> より抜粋

図5-1 対象周波数範囲

5. 1. 2 候補周波数

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムが使用する周波数候補には、四国内のニーズに応じて新たなシステムへ迅速に周波数割当が可能なことが求められる。現行の制度内で割り当て可能な周波数として、地域周波数利用計画策定基準一覧表において、「各総合通信局及び沖縄総合通信事務所における地域周波数利用計画の策定に当たり、必要に応じて変更することができる」とされる周波数が定められている。410～470MHz の対象周波数内で四国内においてこれに該当し、使用可能とされているのは表5－1に示す周波数であり、この周波数を候補とすることが適当と考えられる。

表5－1 候補周波数

周波数範囲	割り当て可能な周波数
411.05～412.325MHz	411.05、411.075、411.1、411.125、411.15、411.175、411.2、411.25、411.275、411.35、411.3625、411.375、411.3875、411.4、411.4125、411.425、411.4375、411.45、411.4625、411.475、411.5、411.55、411.6、411.7、411.8、411.85、411.9、412.025、412.0375、412.05、412.0625、412.075、412.0875、412.1、412.1125、412.125、412.1375、412.15、412.1625、412.175、412.1875、412.2、412.2125、412.225、412.2375、412.25、412.275、412.3、412.325MHz
414.1625～415.45MHz	414.1625、414.175、414.1875、414.2、414.2125、414.225、414.25、414.2625、414.275、414.2875、414.3、414.325、414.35、414.375、414.4、414.4125、414.425、414.45、414.475、414.4875、414.55、414.6、414.65、414.75、414.8、414.85、414.9、414.95、415.05、415.1、415.15、415.2、415.25、415.3、415.35、415.4、415.45MHz
451.55～453.025MHz	451.55、451.6125、451.625、451.6375、451.65、451.675、451.7、451.7125、451.7875、451.95、451.97、452.05、452.1、452.25、452.725、452.75、452.9、452.9125、452.925、452.9375、452.95、452.9625、452.975、452.9875、453.0、453.0125、453.025MHz

5. 1. 3 隣接の既存無線システム

候補周波数近傍にて使用されている無線局について、地域周波数利用計画策定基準一覧表や総務省電波利用ホームページ無線局等情報検索から調査を行った。表5-1に示した周波数範囲ごとの隣接既存システムの状況を図5-2に示す。

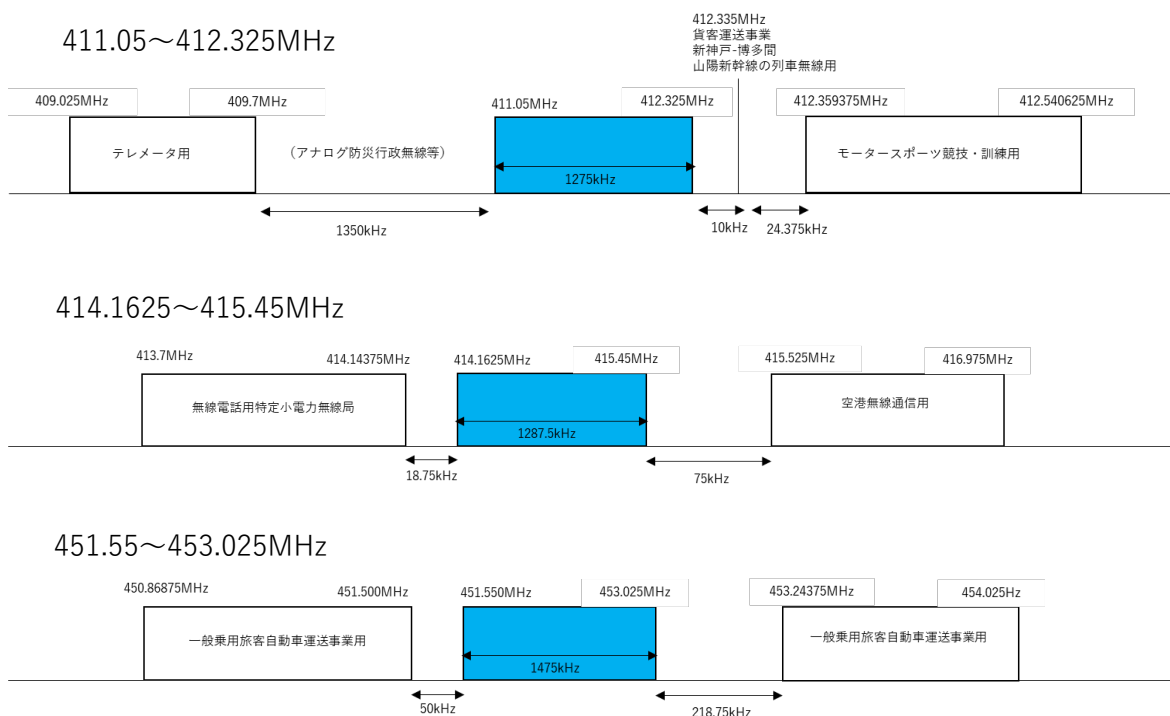


図5-2 隣接システムの使用状況

次に、総務省電波利用ホームページ無線局等情報検索から、隣接既存システムごとに無線局等情報を検索し、使用されている電波の型式等を調査した。特に高知県内に設定されている無線局を対象とした。結果を表5-2に示す。

表 5 - 2 隣接既存システムの電波の型式等

周波数範囲	既存システムの詳細
411.05~412.325MHz	下隣接 テレメータ用 地震又は火山噴火予知観測用 変調方式 FSK/GMSK 空中線電力 20W
	同帯域 一般業務用 漁業通信に関する事項 電波の型式 F2D、F3E 空中線電力 10W
	上隣接 一般業務用 スポーツ・レジャーに関する事項 電波の型式 5K80F1D、5K80F1E、8K50F2D、 8K50F3E 空中線電力 5W、20W
414.1625~415.45MHz	下隣接 無線電話用特定小電力無線局 電波の型式 F2D、F3E 空中線電力 1mW
	同帯域 一般業務用 一般業務用通信に関する事項 電波の型式 8K50F2D、8K50F3E 空中線電力 5W
	上隣接 空港無線通信用 電気通信業務用 電波の型式 24K3G1D、24K3G1E 空中線電力 1.8W
451.55~453.025MHz	下隣接 一般業務用 一般乗用旅客自動車の運行に関する事項 電波の型式 5K80F1D、5K80F1E 空中線電力 5W 5K80G1D、5K80G1E 空中線電力 5W
	同帯域 公共業務用 上下水道事業に関する事項 電波の型式 8K50F2D、8K50F3E 空中線電力 10W
	上隣接 一般業務用 一般乗用旅客自動車の運行に関する事項 電波の型式 5K80G1D、5K80G1E 空中線電力 10W

既存システムの電波の型式は多岐にわたっているが、変調方式の観点からまとめると表 5 - 3 に示す 3 種類の変調方式に集約することが可能と考えられる。

表 5 - 3 集約した変調方式

電波の型式	集約後の変調方式
5K80F1D、5K80F1E	FSK (周波数偏移変調) ⇒ 4 値 FSK
5K80G1D、5K80G1E、 24K3G1D、24K3G1E	PSK (位相変調) ⇒ $\pi/4$ シフト QPSK
8K50F2D、8K50F3E	アナログ ⇒ アナログ FM

5. 1. 4 共用検討の組み合わせ

集約後の変調方式を使用し、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムと 400MHz 帯既存システム間の共用検討の組み合わせは、表 5-4 のようにまとめることができる。本調査検討においては、これら組み合わせについて検討を行うこととする。

表 5-4 共用検討組み合わせ

被干渉	与干渉
400MHz 帯 狭帯域 LoRa®通信 システム	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
	4 値 FSK
	$\pi / 4$ シフト QPSK
	アナログ FM

被干渉	与干渉
4 値 FSK	400MHz 帯 狭帯域 LoRa®通信 システム
$\pi / 4$ シフト QPSK	
アナログ FM	

5. 1. 5 実証実験周波数

実証実験を高知県内で実施するために、最適な地域割当可能な周波数の選定を行った。周波数の選定にあたっては、四国総合通信局の主管課と協議しながら検討した。表 5-1 の候補周波数の中から、実験予定場所（高知県四万十町）周辺にて免許されておらず、上下の隣接チャンネルについても周辺で免許されていない周波数を選定し、414.8MHz を使用することとした。

5. 2 共用検討

5. 2. 1 離隔距離

400MHz 帯狭帯域 LoRa®の共用検討として、屋内実証実験結果を使用し、離隔距離の算出を行った(図5-3)。なお、本検討においては中山間地域での利用を想定し、リッジ(山の尾根)ありの条件で検討を行った。リッジ損失は、図5-4の条件での計算値30.3dBを使用した。リッジ損失の計算式は、情報通信審議会情報通信技術分科会小電力システム委員会 小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件 平成20年3月 資料集 資料6 P47の式を使用している。

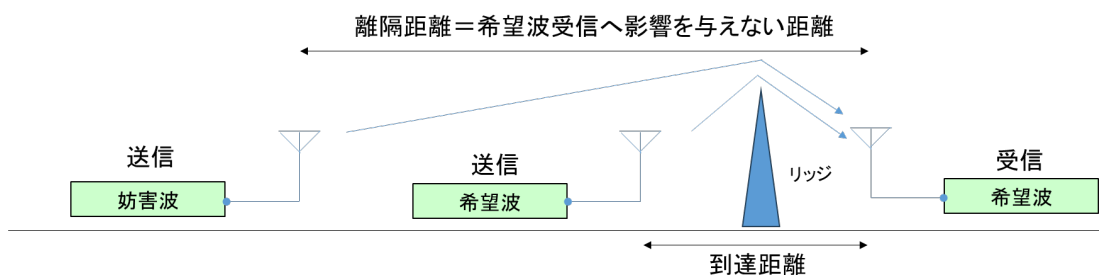


図5-3 離隔距離

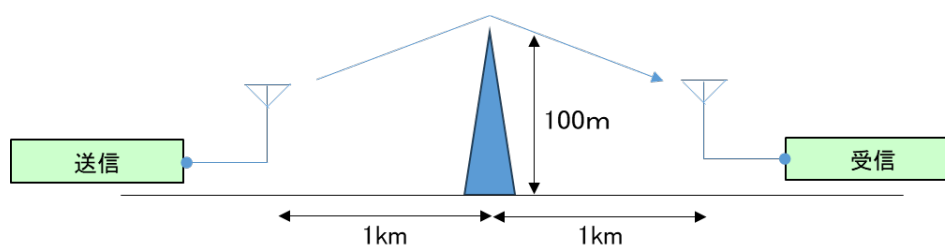


図5-4 リッジ損失条件

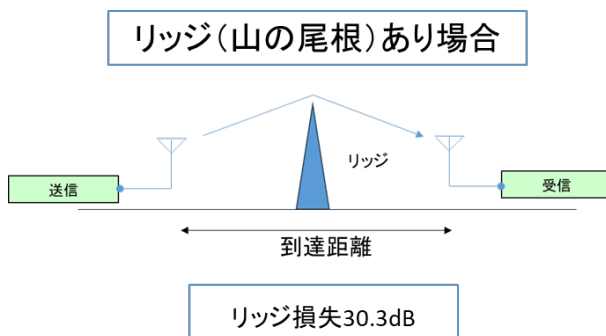
5. 2. 2 到達距離

屋内実証実験結果を使用し、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムおよび既存システムごとの基準感度で受信時の到達距離の計算を実施した。リッジ損失ありの場合と、参考のためにリッジ損失なしの場合両方について計算を行った。表5-5、5-6に結果を示す。なお、離隔距離については、中山間地域に最も近いと思われる奥村秦式（郊外地）を使用し、リッジ損失を加算する形で算出を行っている。

奥村秦式は、以下を参照した。電子情報通信学会 AP 研伝搬データベース 奥村一秦式
https://www.ieice.org/cs/ap/misc/denpan-db/prop_model_db/model_list/okumura-hata-formula/

表5-5 リッジ損失ありの場合の到達距離

変調方式		基準感度	受信レベルが基準感度となる時の伝搬損失(中央値変換後)(dB)	リッジ損失30.3dBありの場合の伝搬損失(dB)	到達距離 (奥村秦式(郊外地)+ リッジ損失にて計算)
400MHz 帯狭帯域LoRa® 1W	拡散係数SF=7	-134dBm	156.8	126.5	3.0km
	拡散係数SF=8	-137dBm	159.8	129.5	3.6km
	拡散係数SF=9	-139dBm	161.8	131.5	4.1km
	拡散係数SF=10	-142dBm	164.8	134.5	5.0km
	拡散係数SF=11	-144dBm	166.8	136.5	5.7km
	拡散係数SF=12	-146dBm	168.8	138.5	6.5km
429MHz帯特定小電力LoRa SF=7 10mW		-134dBm	136.8	106.5	1km以下 ※
4-FSK 5W		-117dBm	146.8	116.5	1.5km
π/4シフトQPSK 5W		-116dBm	145.8	115.5	1.4km
FM 5W		-124dBm	153.8	123.5	2.4km

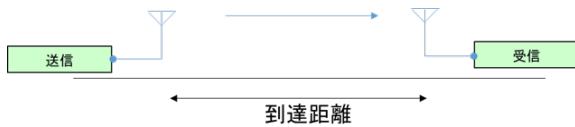


各種条件は、情報通信審議会情報通信技術分科会小電力システム委員会 小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件 平成20年3月資料集 資料6 P39の値を使用している
 送信アンテナ利得 2.14dBi、送信アンテナの高さ 30m、給電線損失 3.5dB、アレスタ損失 0.6dB
 受信アンテナ利得 2.14dBi、受信アンテナの高さ 1.5m、給電線損失 1.0dB
 場所率マージン 3.0dB、複局干渉 5.0dB、414.8MHz

表5-6 リッジ損失なしの場合の到達距離

変調方式		基準感度	受信レベルが基準感度となる時の伝搬損失 (中央値変換後)(dB)	到達距離 (奥村秦式大都市)	到達距離 (奥村秦式郊外地)
400MHz帯 狭帯域 LoRa® 1W	拡散係数SF=7	-134dBm	156.8	11.8km	20km以上 ※
	拡散係数SF=8	-137dBm	159.8	14.3km	20km以上 ※
	拡散係数SF=9	-139dBm	161.8	16.3km	20km以上 ※
	拡散係数SF=10	-142dBm	164.8	19.9km	20km以上 ※
	拡散係数SF=11	-144dBm	166.8	20km以上 ※	20km以上 ※
	拡散係数SF=12	-146dBm	168.8	20km以上 ※	20km以上 ※
429MHz帯特定小電力LoRa® SF=7 10mW		-134dBm	136.8	3.1km	5.8km
4-FSK 5W		-117dBm	146.8	6.1km	11.3km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W		-116dBm	145.8	5.7km	10.6km
FM 5W		-124dBm	153.8	9.7km	17.9km

※奥村秦式の適用範囲外



各種条件は、情報通信審議会情報通信技術分科会小電力システム委員会 小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件 平成20年3月資料集 資料6 P39の値を使用している
 送信アンテナ利得 2.14dBi、送信アンテナの高さ 30m、給電線損失 3.5dB、アレスタ損失 0.6dB
 受信アンテナ利得 2.14dBi、受信アンテナの高さ 1.5m、給電線損失 1.0dB
 場所率マージン 3.0dB、複局干渉 5.0dB、414.8MHz

5. 2. 3 同一チャネル干渉

屋内実証実験結果を使用し、組合せごとの同一CH干渉を避けるために必要な離隔距離の計算を実施した。リッジありの場合について計算を行っている。表5-7、5-8に結果を示す。なお、離隔距離については、中山間地域に最も近いと思われる奥村秦式（郊外地）を使用し、リッジ損失を加算する形で算出を行っている。

表5-7 同一チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（提案システム被干渉）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(中央値交換後)(dB)	リッジ損失30.3dBありの場合の伝搬損失(dB)	離隔距離 (奥村秦式(郊外地)+リッジ損失にて計算)	
400MHz帯 狭帯域 LoRa® 1W	拡散係数 SF=7	-134dBm	400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	4dB	-138dBm	160.8	130.5	4.0km
			400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	-9dB	-125dBm	147.8	117.5	1.7km
			4-FSK 5W	-7.5dB	-126.5dBm	156.3	126.0	3.0km
			$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-6.9dB	-127.1dBm	156.9	126.6	3.1km
			FM 5W	-8.5dB	-125.5dBm	155.3	125.0	2.8km

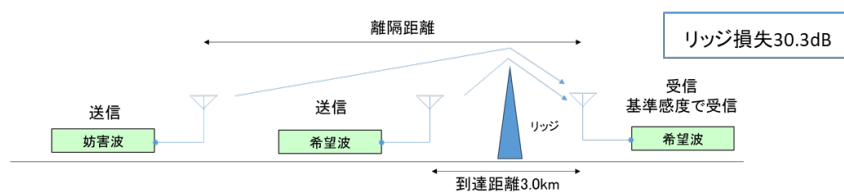
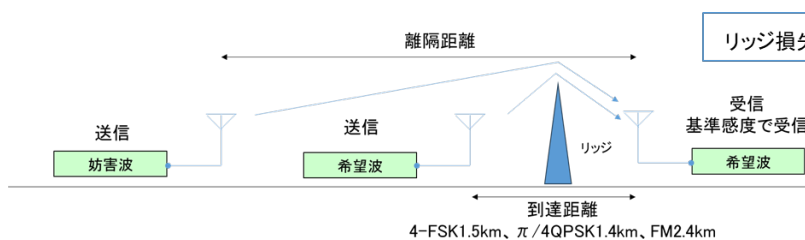


表5-8 同一チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（提案システム与干渉）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(中央値交換後)(dB)	リッジ損失30.3dBありの場合の伝搬損失(dB)	離隔距離 (奥村秦式(郊外地)+リッジ損失にて計算)
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	17dB	-134dBm	163.8	133.5	4.8km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		8.8dB	-124.4dBm	154.2	123.9	2.6km
FM 5W	-124dBm		6dB	-130dBm	159.8	129.5	3.7km
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	17dB	-134dBm	163.8	133.5	4.8km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		10.8dB	-126.8dBm	156.6	126.3	3.0km
FM 5W	-124dBm		6dB	-130dBm	159.8	129.5	3.7km



5. 2. 4 隣接チャネル干渉

屋内実証実験結果を使用し、組合せごとの隣接 CH 干渉（12.5kHz 離れ）を避けるために必要な離隔距離の計算を実施した。リッジ損失ありの場合について計算を行っている。表5-9、5-10に結果を示す。なお、離隔距離については、中山間地域に最も近いと思われる奥村秦式（郊外地）を使用し、リッジ損失を加算する形で算出を行っている。た

だし、奥村奏式の適用範囲（1~20 km）外になる場合は、参考のために自由空間伝搬損失を使用して算出を行っている。

表5-9 隣接チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（提案システム被干渉）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(中央値変換後)(dB)	リッジ損失30.3dBありの場合の伝搬損失(dB)	離隔距離(奥村奏式(郊外地)+リッジ損失にて計算)	参考 離隔距離(自由空間伝搬損失+リッジ損失にて計算)	
400MHz帯 狭帯域 LoRa® 1W	拡散係数 SF=7	-134dBm	400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	-54dB	-80dBm	102.8	72.5	1km以下 ※	0.20km
			400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	-60dB	-74dBm	96.8	66.5	1km以下 ※	0.10km
			4-FSK 5W	-68.5dB	-65.5dBm	95.3	65.0	1km以下 ※	0.09km
			$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-58.9dB	-75.1dBm	104.9	74.6	1km以下 ※	0.26km
			FM 5W	-66.5dB	-67.5dBm	97.3	67.0	1km以下 ※	0.11km

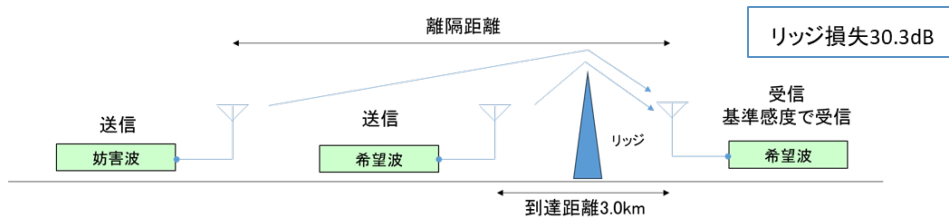
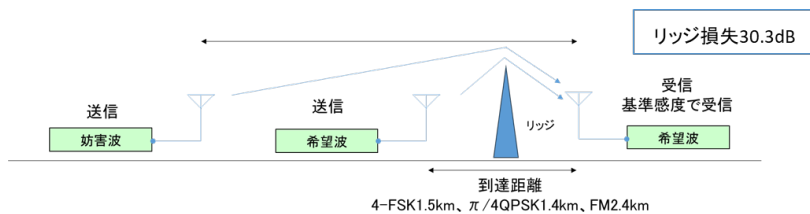


表5-10 隣接チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（提案システム与干渉）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(中央値変換後)(dB)	リッジ損失30.3dBありの場合の伝搬損失(dB)	離隔距離(奥村奏式(郊外地)+リッジ損失にて計算)	参考 離隔距離(自由空間伝搬損失+リッジ損失にて計算)
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	-33dB	-84dBm	113.8	83.5	1km以下 ※	0.72km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		-40.2dB	-75.8dBm	105.6	75.3	1km以下 ※	0.28km
FM 5W	-124dBm		-33dB	-91dBm	120.8	90.5	1km以下 ※	1.7km
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	-44dB	-73dBm	102.8	72.5	1km以下 ※	0.20km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		-53.2dB	-62.8dBm	92.6	62.3	1km以下 ※	0.06km
FM 5W	-124dBm		-55dB	-69dBm	98.8	68.5	1km以下 ※	0.13km



5. 2. 5 共用検討（離隔距離）まとめ

以上の結果から、中山間地域での 400MHz 帯狭帯域 LoRa®の周波数共用条件（離隔距離）については、以下の通りと考えられる。

・同一チャネル干渉

既存システムとの離隔距離は、4.8km 程度必要（リッジ損失 30.3dB ありの場合）であり、400MHz 帯狭帯域 LoRa®同士については、離隔距離 4km 程度必要となる。ただし、拡散係数が異なる場合は、1.7km 程度でよい（リッジ損失 30.3dB ありの場合）。（図 5 - 5）

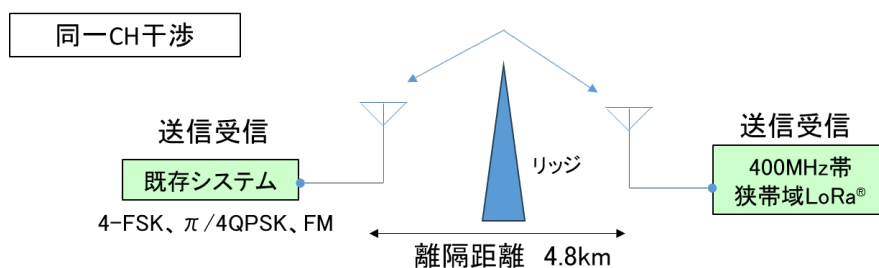


図 5 - 5 同一チャネル干渉 離隔距離

・隣接チャネル（12.5kHz 離れ）干渉

既存システムおよび 400MHz 帯狭帯域 LoRa®との離隔距離は、1km 以下となる（リッジ損失 30.3dB ありの場合）（図 5 - 6）。実質、リッジの向こう側のシステムとの共存は可能と考えられる。

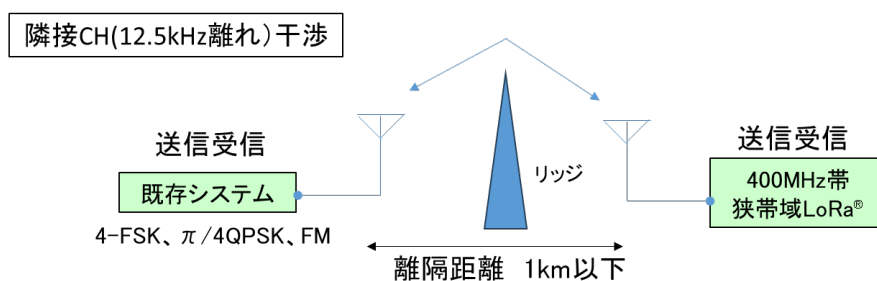


図 5 - 6 隣接チャネル干渉 離隔距離

5. 2. 6 リッジ損失なし時の離隔距離

参考のために、平野部などリッジ損失無しの場合の離隔距離についても検討を行った(図5-7)。

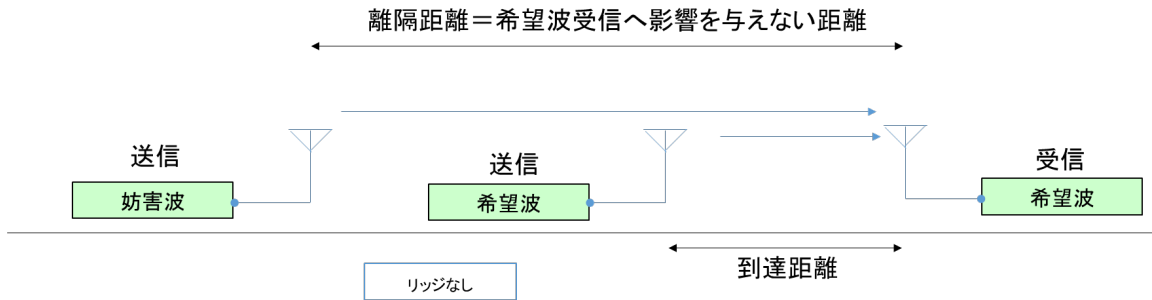


図5-7 離隔距離 (リッジ損失無し)

5. 2. 6. 1 同一チャネル干渉 (リッジ損失無し)

屋内実証実験結果を使用し、同一チャネル使用時でリッジ損失なしの離隔距離の計算を実施した。表5-11~5-12に結果を示す。なお、離隔距離については、過去、400MHz帯に関する委員会報告で使用されている奥村秦式(大都市)を使用して算出している。

表5-11 同一チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離 (リッジ損失無し)

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(中央値変換後)(dB)	離隔距離 (奥村秦式(大都市)にて計算)
400MHz帯 狭帯域 LoRa® 1W	-134dBm	400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	4dB	-138dBm	160.8	15.4km
		400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	-9dB	-125dBm	147.8	6.6km
		4-FSK 5W	-7.5dB	-126.5dBm	156.3	11.5km
		$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-6.9dB	-127.1dBm	156.9	11.9km
		FM 5W	-8.5dB	-125.5dBm	155.3	10.8km

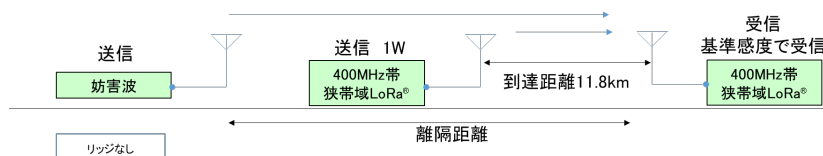
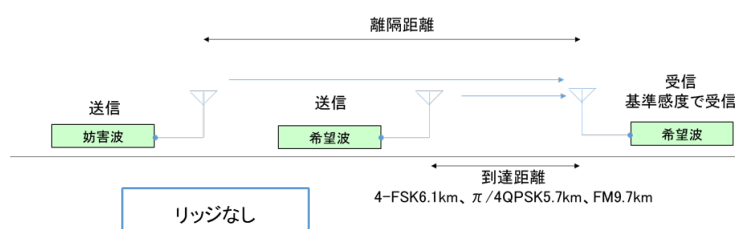


表5-12 同一チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（リッジ損失無し）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(中央値変換後)(dB)	離隔距離 (奥村秦式(大都市)にて計算)
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	17dB	-134dBm	163.8	18.7km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		8.8dB	-124.4dBm	154.2	10.0km
FM 5W	-124dBm		6dB	-130dBm	159.8	14.4km
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	17dB	-134dBm	163.8	18.7km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		10.8dB	-126.8dBm	156.6	11.7km
FM 5W	-124dBm		6dB	-130dBm	159.8	14.4km



5. 2. 6. 2 隣接チャネル干渉（リッジ損失無し）

屋内実証実験結果を使用し、隣接チャネル使用時でリッジ損失なしの離隔距離の計算を実施した。表5-13～5-14に結果を示す。なお、到達距離については、過去、400MHz帯に関する委員会報告で使用されている奥村秦式（大都市）を使用している。奥村秦式の適用範囲（1~20 km）外になる場合は、参考のために自由空間伝搬損失を使用して算出を行っている。自由空間伝搬損失の式は、情報通信審議会情報通信技術分科会小電力システム委員会 小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件 平成20年3月 資料集 資料6 別添1 P45を参照した。

表5-13 隣接チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（リッジ損失無し）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(中央値実装後)(dB)	離隔距離(奥村奏式(大都市)にて計算)	参考 離隔距離(自由空間伝搬損失にて計算)	
400MHz帯 狭帯域 LoRa® 1W	拡散係数 SF=7	-134dBm	400MHz帯狭帯域LoRa®1W 拡散係数SF=7	-54dB	-80dBm	102.8	1km以下 ※	6.7km
			400MHz帯狭帯域LoRa®1W 拡散係数SF=10	-60dB	-74dBm	96.8	1km以下 ※	3.4km
			4-FSK 5W	-68.5dB	-65.5dBm	95.3	1km以下 ※	2.8km
			$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-58.9dB	-75.1dBm	104.9	1km以下 ※	8.5km
			FM 5W	-66.5dB	-67.5dBm	97.3	1km以下 ※	3.6km

※奥村奏式の適用範囲外

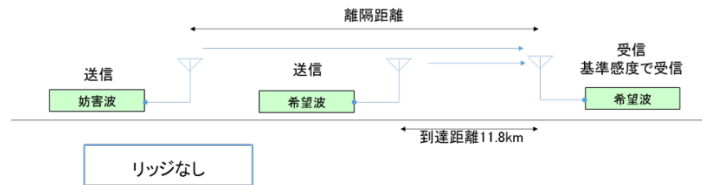
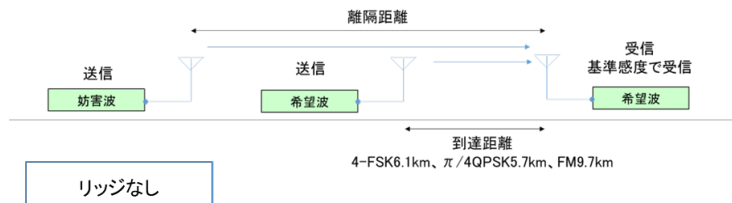


表5-14 隣接チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（リッジ損失無し）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(中央値実装後)(dB)	離隔距離(奥村奏式(大都市)にて計算)	参考 離隔距離(自由空間伝搬損失にて計算)
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	-33dB	-84Bm	113.8	1km以下 ※	23.5km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		-40.2dB	-75.8dBm	105.6	1km以下 ※	9.2km
FM 5W	-124dBm		-33dB	-91dBm	120.8	1.2km	52.5km
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	-44dB	-73dBm	102.8	1km以下 ※	6.7km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		-53.2dB	-62.8dBm	92.6	1km以下 ※	2.1km
FM 5W	-124dBm		-55dB	-69dBm	98.8	1km以下 ※	4.2km

※奥村奏式の適用範囲外



5. 2. 6. 3 共用検討（離隔距離）まとめ（リッジ損失無し）

以上の結果から、平野部などリッジ損失無しの場合の 400MHz 帯狭帯域 LoRa®の周波数共用条件（離隔距離）については、以下の通りと考えられる。

・同一チャネル干渉

既存システムとの離隔距離は、18.7km 程度必要（リッジ損失なしの場合）。

400MHz 帯狭帯域 LoRa®同士については、離隔距離は 15.4km 程度必要。ただし、拡散係数が異なる場合は、6.6km 程度でよい（リッジ損失なしの場合）（図 5－8）。

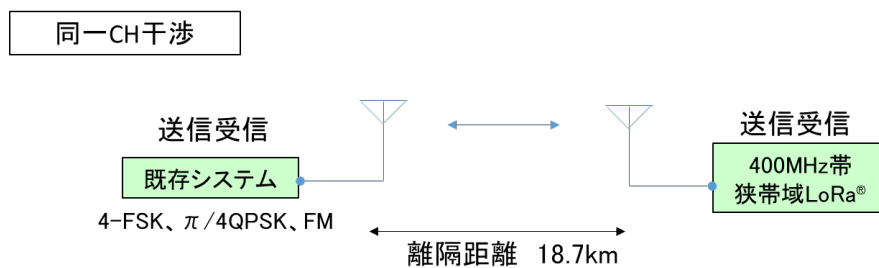


図 5－8 同一チャネル干渉（リッジ損失無しの場合） 離隔距離

・隣接チャネル（12.5kHz 離れ）干渉

既存システムおよび 400MHz 帯狭帯域 LoRa®との離隔距離は、1.2km となる（リッジ損失なしの場合）（図 5－9）。

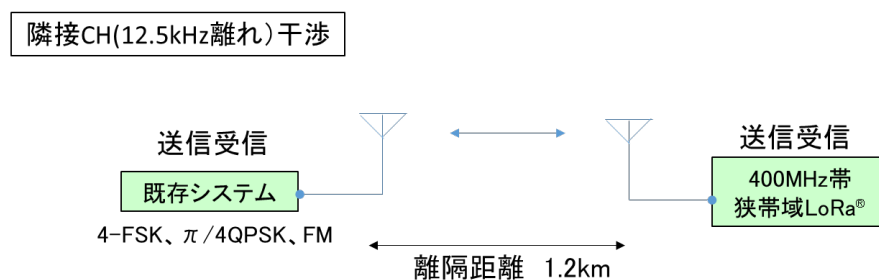


図 5－9 隣接チャネル干渉（リッジ損失無し） 離隔距離

5. 2. 7 ドローン使用時の離隔距離

参考のために、ドローンを使用して高所から送信した場合の離隔距離についても検討を行った（図5-10）。

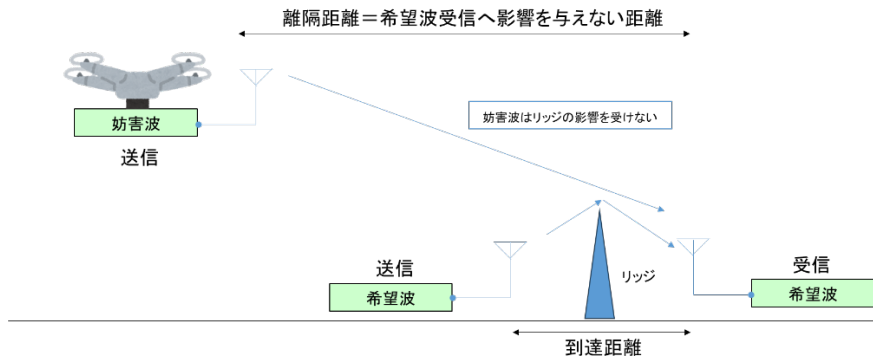


図5-10 離隔距離（ドローン使用時）

5. 2. 7. 1 同一チャネル干渉（ドローン使用時）

屋内実証実験結果を使用し、同一チャネル使用時でドローン使用時の離隔距離の計算を実施した。表5-15～5-16に結果を示す。なお、離隔距離については、ドローン使用のため、自由空間伝搬損失にて計算した場合と、自由空間伝搬損失に球面大地による回折損失を加えた損失から計算した場合の2通りで算出している。

球面大地による回折損失の算出は、以下の条件にて実施した。

周波数 414.8MHz、地球半径 6378137m、等価地球半径係数 4/3、

大地表面の実効導電率 0.01S/m、送信アンテナ高 150m、受信アンテナ高 2m

参照 電子情報通信学会 AP 研伝搬データベース 球面大地による回折

https://www.ieice.org/cs/ap/misc/denpan-db/prop_model_db/model_list/spherical_earth_diffraction/

表5-15 同一チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（ドローン使用時）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失 (dB)	離隔距離 (自由空間伝搬損失にて計算)	離隔距離 (球面大地回折にて計算)	
400MHz帯 狭帯域 LoRa® 1W	拡散係数 SF=7	-134dBm	400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	4dB	-138dBm	159.2	5300km	67.7km
			400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	-9dB	-125dBm	146.2	1200km	50.7km
			4-FSK 5W	-7.5dB	-126.5dBm	154.7	3200km	61.8km
			$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-6.9dB	-127.1dBm	155.3	3400km	62.6km
			FM 5W	-8.5dB	-125.5dBm	153.7	2800km	60.5km

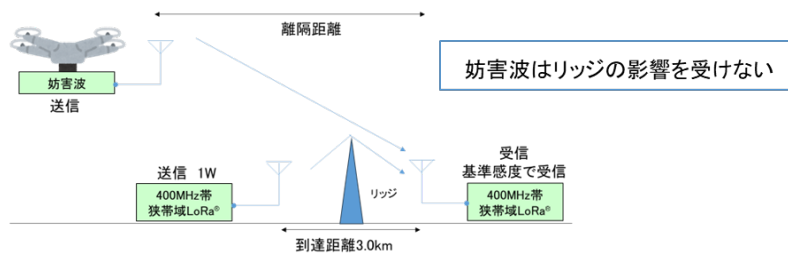
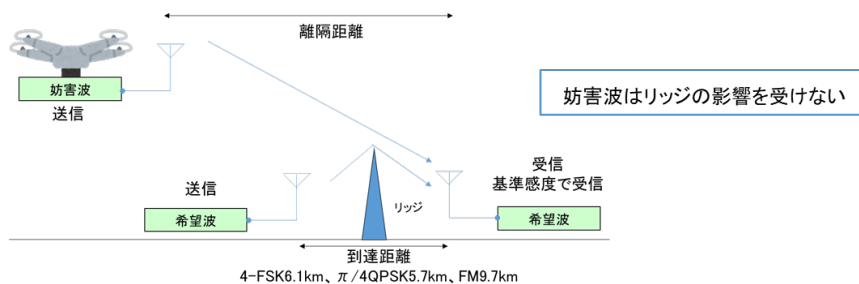


表5-16 同一チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（ドローン使用時）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失 (dB)	離隔距離 (自由空間伝搬損失にて計算)	離隔距離 (球面大地回折にて計算)
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	17dB	-134dBm	162.2	7500km	71.7km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		8.8dB	-124.4dBm	152.6	2500km	59.0km
FM 5W	-124dBm		6dB	-130dBm	158.2	4700km	66.4km
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	17dB	-134dBm	162.2	7500km	71.7km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		10.8dB	-126.8dBm	155.0	3300km	62.2km
FM 5W	-124dBm		6dB	-130dBm	158.2	4700km	66.4km



5. 2. 7. 2 隣接チャネル干渉（ドローン使用時）

屋内実証実験結果を使用し、隣接チャネル使用時にドローン使用時の離隔距離の計算を実施した。表5-17～5-18に結果を示す。なお、離隔距離については、ドローン使用のために、自由空間伝搬損失にて計算した場合と、自由空間伝搬損失に球面大地による回折損失を加えた損失から計算した場合の2通りで算出している。

表5-17 隣接チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（ドローン使用時）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(dB)	離隔距離 (自由空間伝搬損失にて計算)	離隔距離 (球面大地回折にて計算)	
400MHz帯 狭帯域 LoRa® 1W	拡散係数 SF=7	-134dBm	400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	-54dB	-80dBm	101.2	6.7km	※
			400MHz帯狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	-60dB	-74dBm	95.2	3.4km	※
			4-FSK 5W	-68.5dB	-65.5dBm	93.7	2.8km	※
			$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-58.9dB	-75.1dBm	103.3	8.5km	※
			FM 5W	-66.5dB	-67.5dBm	95.7	3.6km	※

※球面大地による回折損失は発生しない

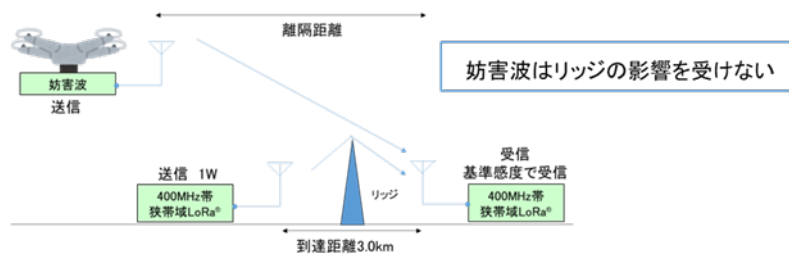
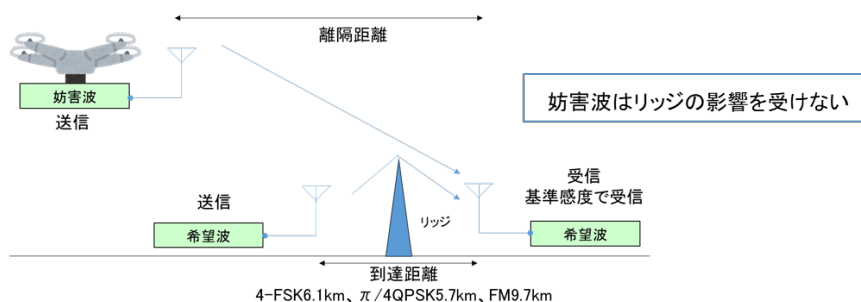


表5-18 隣接チャネル干渉を避けるために必要な離隔距離（ドローン使用時）

希望波 変調方式	基準感度	妨害波 変調方式	D/U	許容妨害波レベル	受信レベルが許容妨害波レベルとなる時の伝搬損失(dB)	離隔距離 (自由空間伝搬損失にて計算)	離隔距離 (球面大地回折にて計算)
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=7	-33dB	-84Bm	112.2	23.5km	14.7km
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		-40.2dB	-75.8dBm	104.0	9.2km	※
FM 5W	-124dBm		-33dB	-91dBm	119.2	52.5km	20.2km
4-FSK 5W	-117dBm	400MHz帯 狭帯域LoRa® 1W 拡散係数SF=10	-44dB	-73dBm	101.2	6.7km	※
$\pi/4$ シフトQPSK 5W	-116dBm		-53.2dB	-62.8dBm	91.0	2.1km	※
FM 5W	-124dBm		-55dB	-69dBm	97.2	4.2km	※

※球面大地による回折損失は発生しない



5. 2. 7. 3 共用検討（離隔距離）まとめ（ドローン使用時）

以上の結果から、ドローン使用時の400MHz帯狭帯域LoRa®の周波数共用条件（離隔距離）については、以下の通りと考えられる。

・同一チャネル干渉

既存システムとの離隔距離は、71.7km程度必要となる（妨害波リッジ損失なしの場合）（球面大地回折にて計算）。400MHz帯狭帯域LoRa®同士については、離隔距離は67.7km程度必要となる。ただし、拡散係数が異なる場合は、50.7km程度必要となる（妨害波リッジ損失なしの場合）（球面大地回折にて計算）（図5-11）。

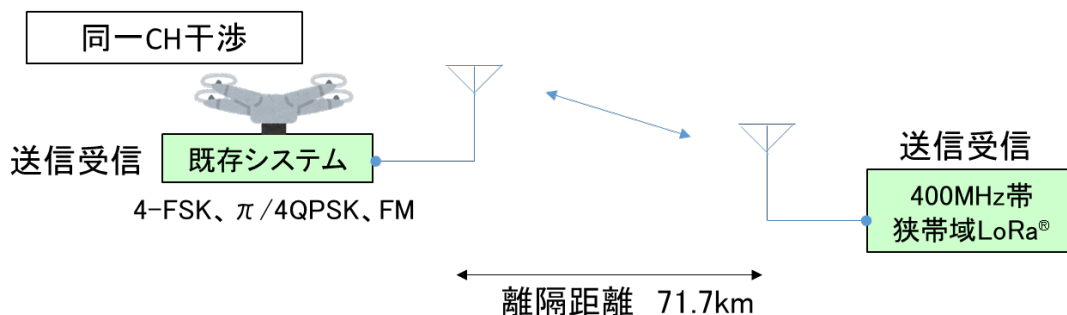


図5-11 同一チャネル干渉（リッジ損失無しの場合） 離隔距離

・隣接チャネル（12.5kHz 離れ）干渉

既存システムおよび 400MHz 帯狭帯域 LoRa®との離隔距離は、20.2km となる。（リッジ損失なしの場合）（球面大地回折にて計算）（図 5 - 1 2）。

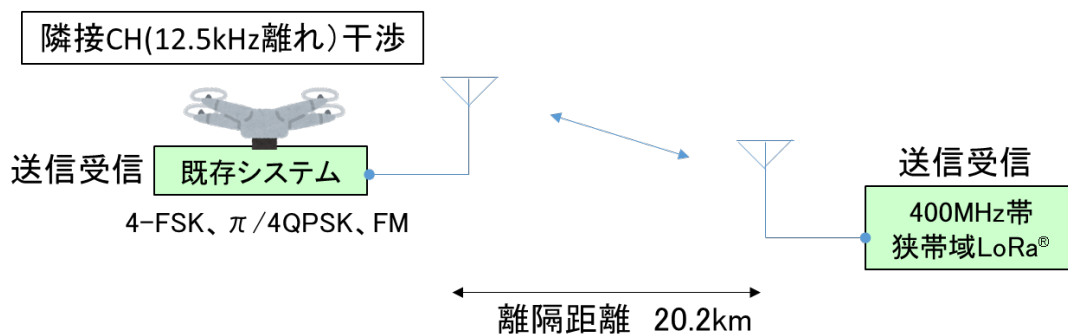


図 5 - 1 2 隣接チャネル干渉（リッジ損失無し） 離隔距離

5. 2. 8 周波数偏差

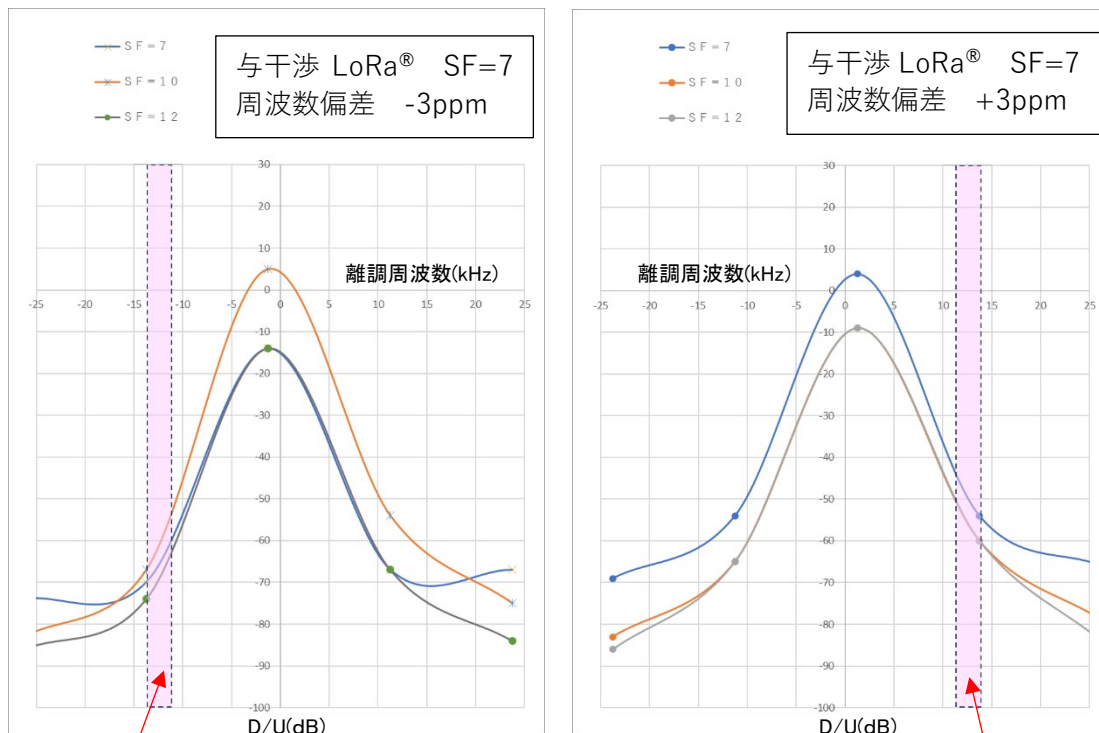
既存システムである狭帯域デジタル通信方式では、周波数の許容偏差は±3ppm とされている（無線設備規則第5条 別表第一号 44 335.4MHz を超え 470MHz 以下チャンネル間隔が 12.5kHz のもの陸上移動局又は携帯局であって、平均電力が 1W 以下のものより）。400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムについても、隣接周波数を使用している既存システムと同じ許容偏差とすることが望ましいと考えられる。屋内実証実験結果をもとに、周波数の許容偏差±3ppm の妥当性について検討を行った。

周波数の許容偏差±3ppm は、今回実証実験を実施した周波数 414.8MHz では、±1.24kHz に相当する。屋内実証実験で得られた、隣接チャンネル干渉測定結果のグラフを、この周波数分シフトさせることで、周波数に偏差がある場合の隣接チャンネル D/U について確認を行った。図 5-13～図 5-19 に結果を示す。周波数偏差がある場合は、各図の桃色網掛け部分に隣接システムの中心周波数が位置することとなる。

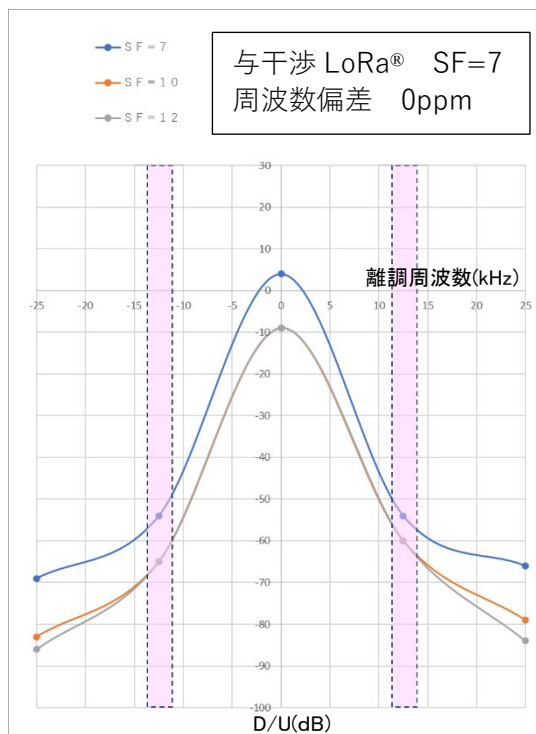
図 5-13	被干渉（希望波）	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
	与干渉（妨害波）	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
図 5-14	被干渉（希望波）	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
	与干渉（妨害波）	4 値 FSK
図 5-15	被干渉（希望波）	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
	与干渉（妨害波）	$\pi/4$ シフト QPSK
図 5-16	被干渉（希望波）	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
	与干渉（妨害波）	アナログ FM
図 5-17	被干渉（希望波）	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
	与干渉（妨害波）	4 値 FSK
図 5-18	被干渉（希望波）	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
	与干渉（妨害波）	$\pi/4$ シフト QPSK
図 5-19	被干渉（希望波）	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
	与干渉（妨害波）	アナログ FM

周波数に±3ppm の偏差がある場合においても隣接チャンネル D/U は、偏差の無い場合（0ppm）と比べて大きな劣化は見られない。このため、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムにおいて周波数の許容偏差を±3ppm としても問題はないと考えられる。

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム



隣接システムの
中心周波数範囲



隣接システムの
中心周波数範囲

図5-13 周波数に偏差がある場合の隣接チャネル干渉測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	4値FSK

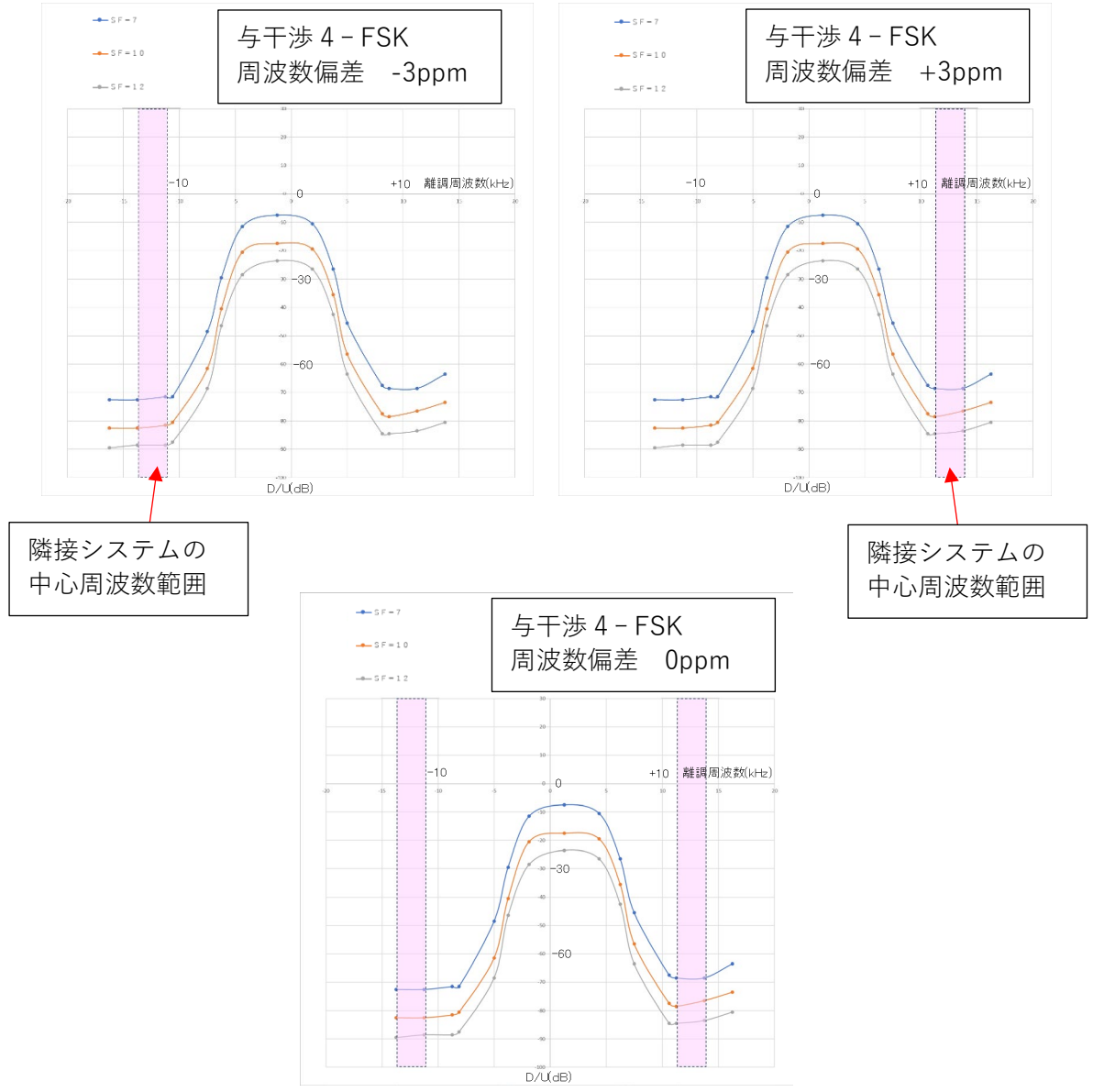


図 5 - 1 4 周波数に偏差がある場合の隣接チャネル干渉測定測定結果

被干渉 (希望波)	与干渉 (妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	$\pi/4$ シフトQPSK

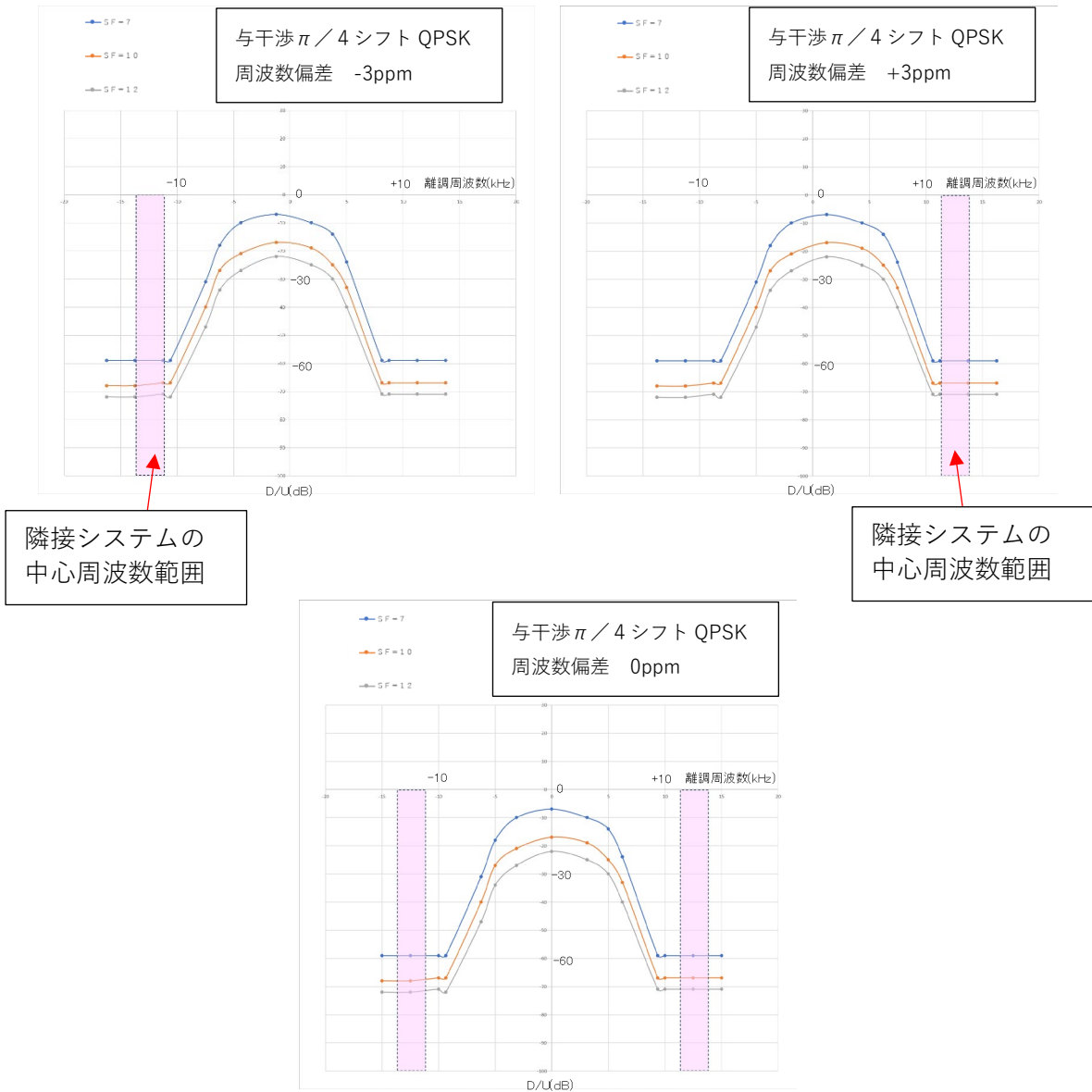


図 5 - 1 5 周波数に偏差がある場合の隣接チャネル干渉測定結果

被干渉 (希望波)	与干渉 (妨害波)
400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム	アナログFM

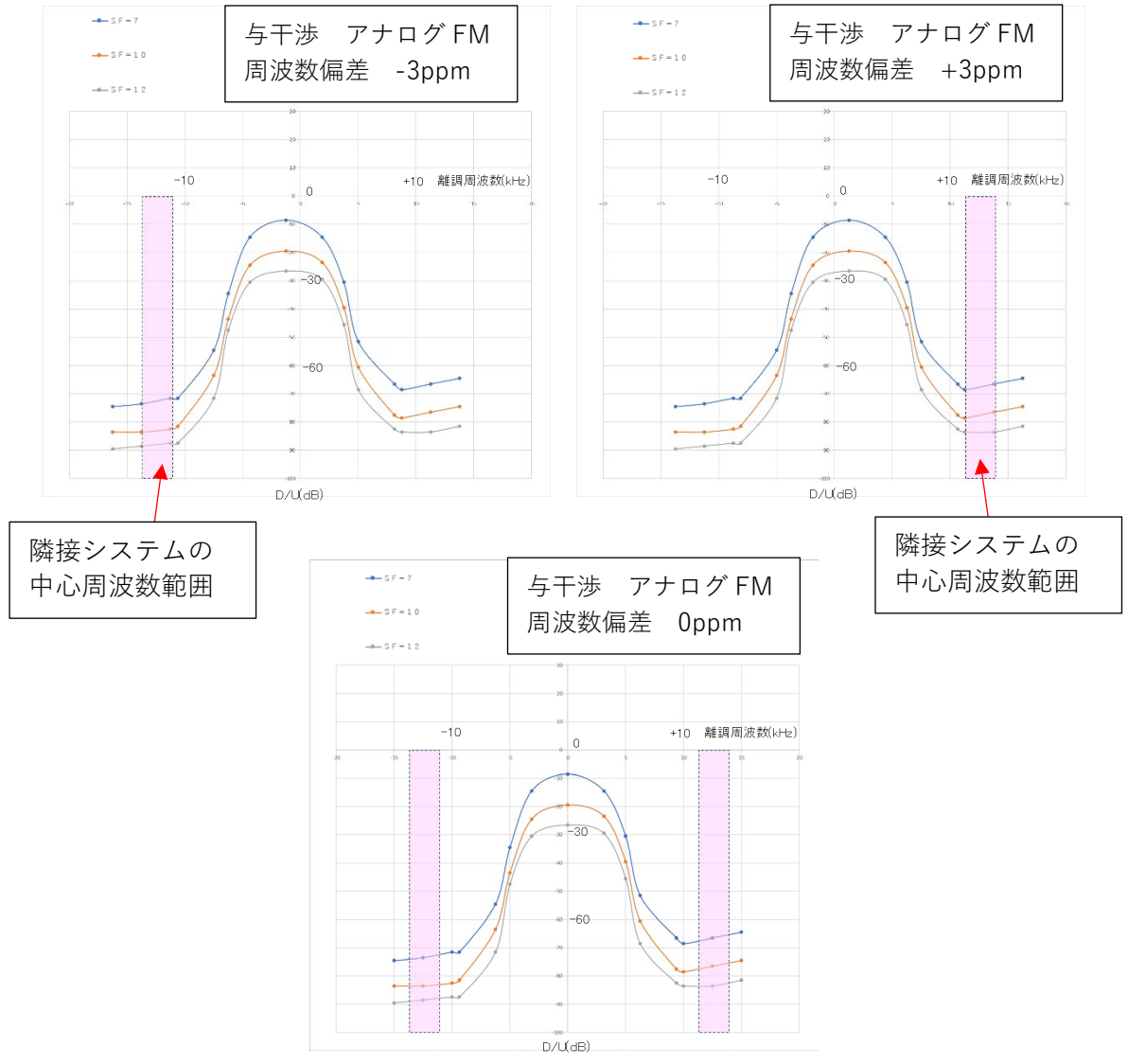


図 5 - 1 6 周波数に偏差がある場合の隣接チャネル干渉測定測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
4値FSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

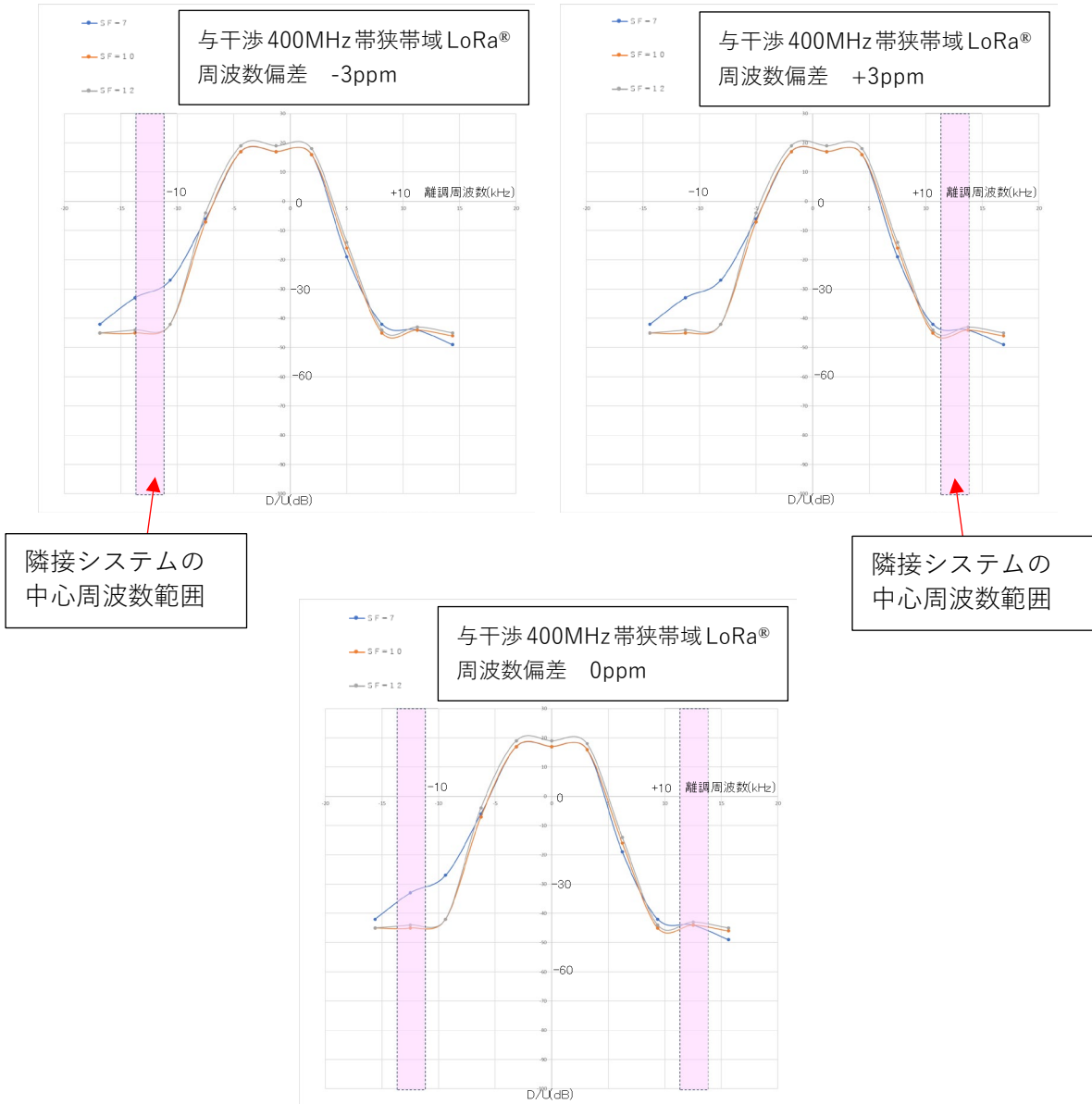


図 5-17 周波数に偏差がある場合の隣接チャネル干渉測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
$\pi/4$ シフトQPSK	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

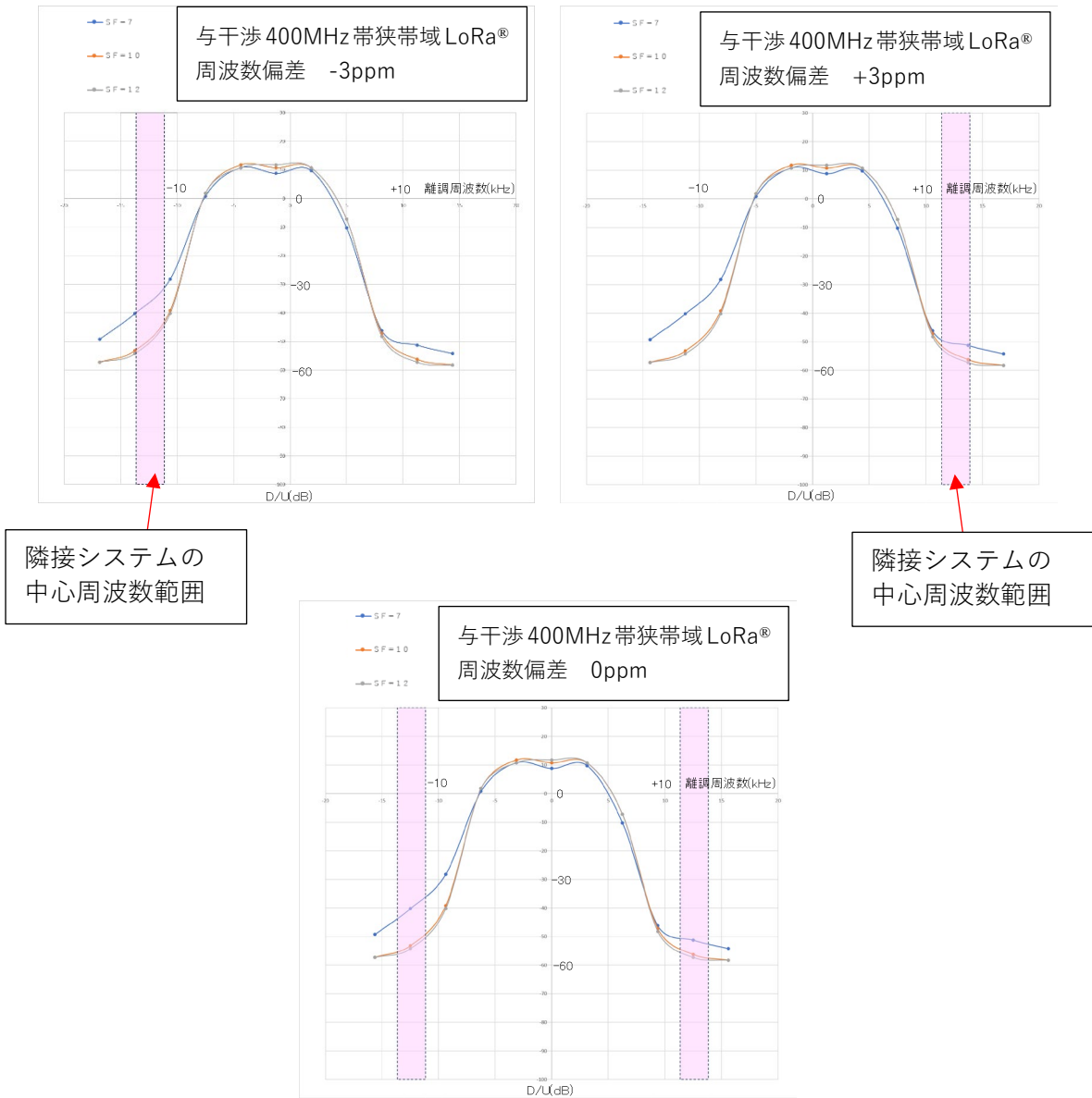


図5-18 周波数に偏差がある場合の隣接チャネル干渉測定結果

被干渉(希望波)	与干渉(妨害波)
アナログFM	400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システム

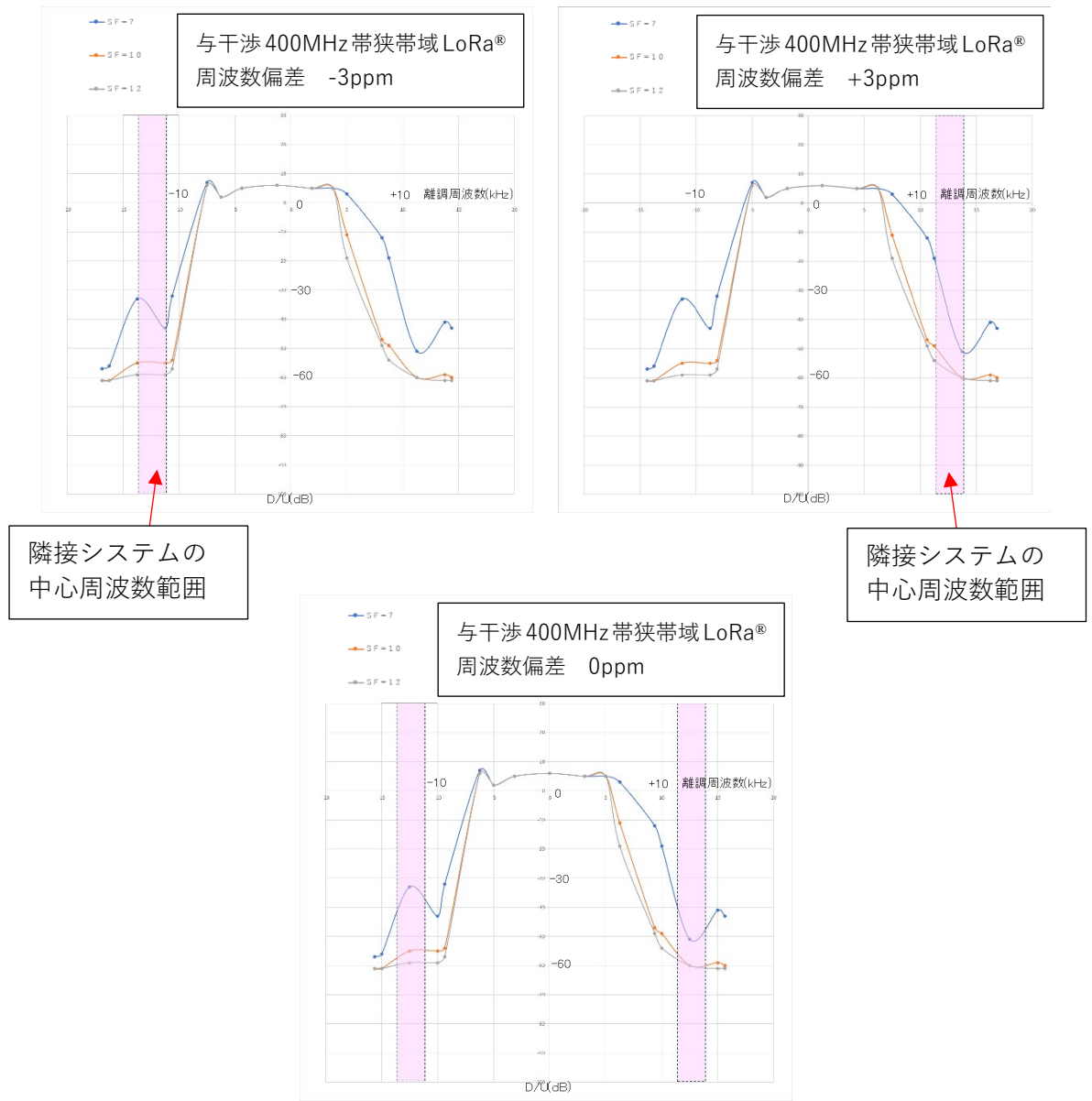


図5-19 周波数に偏差がある場合の隣接チャネル干渉測定結果

第6章 諸元・運用条件案（最終案）

諸元・運用条件討等の案のとりまとめにあつては、中山間地域における長距離伝搬を実現するために、地上で利用する場合の空中線電力（20mW から 1W 程度まで電力による伝搬距離の改善についても検証した。）、アンテナ利得、アンテナ高等の条件や上空で利用する場合のドローン利用（用途、高度、移動速度、局数、利用頻度、送信時間等も調査・検討した。）等の条件について検討し、地上で利用する場合及び上空で利用する場合のそれぞれについて、最適な諸元・運用条件等の案をとりまとめた。検討にあつては、SF 値の選定によって伝搬距離が改善する一方で伝送効率とのトレードオフにあることを考慮して、各諸元・運用条件について SF 値と伝搬距離の関係を明らかにした。なお、実際に設置が想定される区間においてエリアシミュレーションを実施しながら、実現性の高い諸元・運用条件等の案をとりまとめた。

あわせて、現行の 400MHz 帯/900MHz 帯特定小電力システムや簡易無線システム等を使用した場合との比較を行い、本システムの導入の有効性（現行のシステムで実現できない条件）、導入・運用コストの最適化、システムの運用方法（免許方式等）についてもあわせて検討し、とりまとめを行った。

さらに、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の「アドホックネットワークを手軽に形成する端末間通信」(<https://www2.nict.go.jp/oihq/seeds/detail/0012.html>)について調査し、提案システムへの適用例の検討を行った。

上記でとりまとめた案が中山間地域以外の地域での利用に適用可能かどうか、地理的な条件による使用目的や使用場所に応じた条件・解決策等もあわせて検討を行った。

6. 1 諸元・運用条件案（一次案）の修正

本調査検討においては、諸元・運用条件案（一次案）を制定し、これをもとに各種実証実験や共用検討を実施してきた。各種実証実験や共用検討の結果を受けて、修正が必要な項目が明らかとなったため、諸元・運用条件案（一次案）の修正を行い、最終案とした。修正後の諸元・運用条件案を表6-1に示す。赤字で示す部分が一次案からの修正箇所となる。

表6-1 修正後の諸元・運用条件案

システム名	400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム
周波数	400MHz 帯
出力	1W
占有周波数帯域幅	最大 8.5kHz
必要チャンネル数	3 チャンネル
キャリアセンス	あり または なし
キャリアセンスレベル	-96dBm
	LoRa®の電波を受信しているか否かで判断を行うキャリアセンス機能を合わせて搭載することが推奨される
送信時間制限	30 秒以下
送信休止時間	2 秒以上
1 時間当たりの送信時間総和	キャリアセンスなし：180 秒以下（Duty5%） キャリアセンスあり：制限なし
局数 データ量 通信頻度	上記条件は以下の前提で算出している 局数 半径 1 k m (3.14km ²) あたり 30 局 (中山間地域では、1km 範囲内に山があり、見通し外になると考えられる) データ量 100Byte 通信頻度 10 分に 1 回
送信時間、送信時間総和の制限方法	無線機内に制限を行う機能を内蔵するか、無線従事者が運用時に適切に設定して運用を行うかのいずれか
混信防止機能	通信する相手方を識別するための符号（識別符号）を自動的に送信し、又は受信する機能を備える
変調方式	LoRa® (429MHz 特定小電力 LoRa®と同じ)
電波の型式	F1D
通信方向	単方向を基本とし、双方向も可能とする

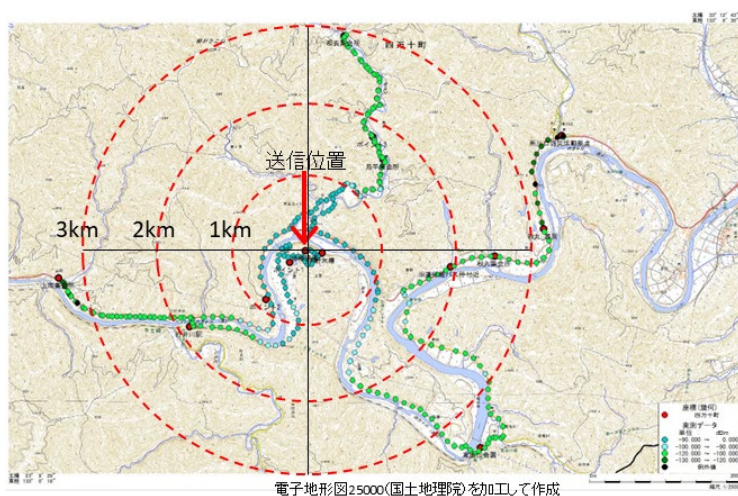
上空利用	上空での受信は可能、送信は不可
端末間通信	キャリアセンスなし時 適用は困難 キャリアセンスあり時 適用可能
中山間地域以外での使用	中山間地域とは別の諸元・運用条件案が必要
無線局免許、無線従事者 電波利用料	無線局免許 必要、無線従事者 必要、 陸上移動局 400 円／年
到達距離	中山間地域で、ひと山を超える距離 1～2km 程度を想定
無線局の目的	一般業務用小容量テレメータシステム 中距離自営回線を想定 親局 1 局⇔子局 1～3 局

6. 1. 1 諸元・運用条件案（一次案）の修正詳細

諸元・運用条件案（一次案）から修正した項目や、特に検討が必要な条件としていた項目について、詳細を以下に示す。

6. 1. 1. 1 出力

一次案においては出力 1W とし、屋外実証実験では出力 1W にて中山間地域でドライブテストを実施した。結果、1W あれば、中山間地域で必要とされる通信距離（一山を超える距離 2,3km）を確保できることが分かった（ドライブテスト測定結果例 図 6-1）。出力 1W は妥当な値と考えられる。



ドライブテスト結果
400MHz 帯狭帯域 LoRa®
414.8MHz 1W SF=7

図 6-1 ドライブテスト結果例

6. 1. 1. 2 離隔距離

出力 1W とした場合、屋内実証実験結果より、以下の離隔距離を確保することで周波数共用が可能であることが分かった（図 6-2 詳細は第 5 章参照）。

なお、中山間地域においては基本的にリッジ損失を見込むことが可能であり、周波数の配置を工夫しながら使用することで周波数の繰り返し利用が可能であり、周波数の有効活用も可能であると考えられる。しかし、さらに多くのシステム導入が進んだ場合を考慮し、離隔距離がとれないほど近隣での利用や将来的に局数が大幅に増加した場合への対応策を次項以降にまとめた。

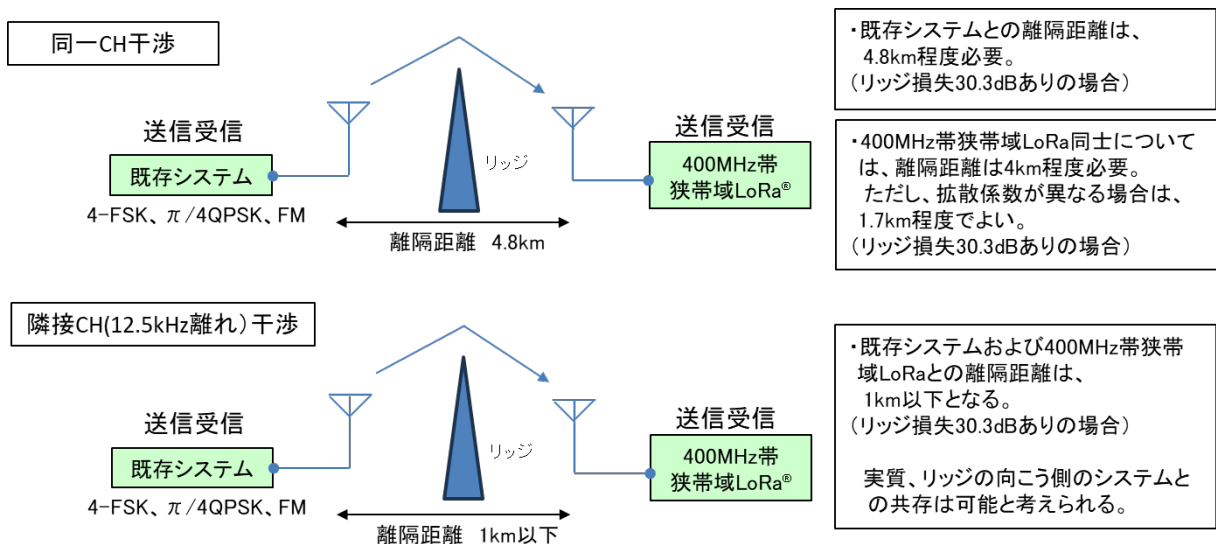


図 6-2 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システムの離隔距離

6. 1. 1. 3 離隔距離が確保できない場合の諸元・運用条件案

前項に示す離隔距離を確保しながら運用することで共用が可能となるが、400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システムの局数が増えてきた場合、使用できるチャンネル数に限りがあるため、離隔距離が確保できず、免許が困難となることが想定される。そのため、限られたチャンネル数で、必要な局数を収容するために各種条件の検討を実施した。検討の対象は、チャンネル数、キャリアセンス、送信時間制限、1 時間当たりの送信時間総和、通信頻度、データ量（1 回の通信あたり）とした。

なお、キャリアセンスについては、廉価な無線システムを実現するためには、「キャリアセンスなし」が有効であるため、「キャリアセンスなし」が導入できるよう検討を行った。た

だし、通信の信頼性を上げるためには「キャリアセンスあり」が有効なため、「キャリアセンスあり」の条件についても検討を行った。

まず、データ量と通信頻度は、アンケートで最も多かった回答を採用し、データ量 100Byte、通信頻度 10 分に 1 回とした。

局数については、中山間地域の農家数と面積から、半径 1 k m 範囲の局数を求めた。中山間地域では、1km 範囲内に山があり、見通し外になると考えられるため、半径 1 k m としている。農家数と面積については、屋外実証実験を実施した高知県四万十町の値を使用した。農家 1 戸当たりの局数については、水位計などのデータ収集の目的から推測し、4 局とした。結果、半径 1 k m 範囲内の局数を 30 局とした（図 6 - 3）。

<p>農林水産省 わがマチ・わがムラ 高知県四万十町詳細データ https://www.machimura.maff.go.jp/machi/contents/39/412/details.html 総農家数 1,542 戸 総土地面積 64,228ha =642.28km² 総土地面積1km²あたり2.4戸</p> <p>半径1km (3.14km²) あたり7.5戸 半径2km (12.56km²) あたり30.1戸 半径3km (28.26km²) あたり67.8戸</p>	<p>中山間地域では、1km範囲内に山があり、見通し外になると考えられる。 半径1km (3.14km²) あたり7.5戸</p> <p>1戸あたり、子局2局とすると、全局数は 7.5戸 × 2局 = 15局</p> <p>1戸あたり、子局3局とすると、全局数は 7.5戸 × 3局 = 22.5局</p> <p>1戸あたり、子局4局とすると、全局数は 7.5戸 × 4局 = 30局</p>
---	--

図 6 - 3 局数の検討

次に、呼量から呼損率の計算を実施した。10 分ごとに 100Byte 送信した場合の 1 時間当たり呼量を求め、30 局での呼量（1 ゾーン呼量）を求めた。アーランの損失式負荷表（アーラン B 式）より、回線数 1 ~ 7 で、各 1 ゾーン呼量の呼損率を求めた。なお、LoRa® 拡散係数 SF=7~12 それぞれにおいて求めた。図 6 - 4 に結果を示す。

10分ごとに100Byte送信した場合の1時間当たり呼量						
SF=7	4.7秒×6回=28.2秒	28.2秒/3600秒=0.00783erl				
SF=8	7.9秒×6回=47.4秒	47.4秒/3600秒=0.01317erl				
SF=9	13.8秒×6回=82.8秒	82.8秒/3600秒=0.02300erl				
SF=10	24.3秒×6回=145.8秒	145.8秒/3600秒=0.04050erl				
SF=11	43.3秒×6回=259.8秒	259.8秒/3600秒=0.07217erl				
SF=12	78.8秒×6回=472.8秒	472.8秒/3600秒=0.13133erl				
中山間地域の局数(半径1km2あたり)を30局とすると、						
1ゾーン呼量は、						
SF=7	30局×0.00783erl=0.2349erl					
SF=8	30局×0.01317erl=0.3951erl					
SF=9	30局×0.02300erl=0.69erl					
SF=10	30局×0.04050erl=1.215erl					
SF=11	30局×0.07217erl=2.1651erl					
SF=12	30局×0.13133erl=3.9399erl					
アーランの損失式負荷表(アーランB式)より、						
回線数1時の呼損率は	回線数2時の呼損率は	回線数3時の呼損率は	回線数4時の呼損率は	回線数5時の呼損率は	回線数6時の呼損率は	回線数7時の呼損率は
SF=7 0.190	SF=7 0.022	SF=7 0.002	SF=7 0.000	SF=7 0.000	SF=7 0.000	SF=7 0.000
SF=8 0.283	SF=8 0.053	SF=8 0.007	SF=8 0.001	SF=8 0.000	SF=8 0.000	SF=8 0.000
SF=9 0.408	SF=9 0.123	SF=9 0.028	SF=9 0.005	SF=9 0.001	SF=9 0.000	SF=9 0.000
SF=10 0.549	SF=10 0.250	SF=10 0.092	SF=10 0.027	SF=10 0.007	SF=10 0.001	SF=10 0.000
SF=11 0.684	SF=11 0.425	SF=11 0.235	SF=11 0.113	SF=11 0.047	SF=11 0.017	SF=11 0.005
SF=12 0.798	SF=12 0.611	SF=12 0.445	SF=12 0.305	SF=12 0.194	SF=12 0.113	SF=12 0.060

図 6-4 呼損率計算結果

過去委員会報告（情報通信審議会情報通信技術分科会小電力システム委員会小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件 平成 20 年 3 月 資料集 資料 8 P86~88）においては、呼損率 10%または 20%を基準として必要なチャネル数（回線数）が検討されている。呼損率 20%以下とするためには、回線数 5 とすれば、SF=12 でも呼損率は 20% (0.2)以下となった。呼損率 10%以下とするためには、回線数 7 とすれば、SF=12 でも呼損率は 10% (0.1)以下となった。

拡散係数 SF を大きくすると、受信感度がよくなり、遠距離での受信状況が改善することが屋内・屋外実証実験で示されたため、大きな SF を選択できることが望ましい。しかし、拡散係数 SF を大きくすると送信時間が長くなり、例えば SF=12 で 100Byte のデータを送信するためには 78.8 秒必要となる。送信時間が長い場合、受信レベル変動の影響を受けやすくなるため、大きな SF を選択したことによる受信状況の効果が期待ほど得られない可能性もある。また、送信時間が長くなると、無線機の消費電力が増えるため、蓄電池や太陽電池を電源とする場合には問題となる。さらには、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムへ割り当て可能な回線数（チャネル数）が限られ、多くのチャネルを準備できないことも想定される。

以上の理由から、送信時間について、ある程度の値で制限を設けることが望ましいと考えられる。今回は、SF=10にて送信時間等の算出を行うこととした。SF=10の場合は、回線数3で呼損率が0.092であり、呼損率10%以下となっている。SF=10の時に100Byteのデータを送信する時間は24.3秒≒30秒であり、1時間当たりの送信時間総和は、30秒×6回=180秒となる。

よって、回線数=チャンネル数を3つ確保し、送信時間30秒以下、1時間当たりの送信時間総和を180秒以下とすれば、呼損率10%以下とすることができる。なお、SF=12であっても、送信時間が30秒以下になるデータ量に制限すれば使用可能である。SF=12で送信時間が30秒以下になるデータ量は5Byteとなる。

チャンネル数については3としたが、当初は1チャンネルでスタートし、利用者が増加してきた際に増やす方法もあり得る。

また、実際の呼損率は、タイミングをずらして送信するように設定したり、農家ごとに拡散係数を変えて設定することで下げることが可能と考えられる。

ここで、「キャリアセンスなし」の場合、特定の局が複数回送信することによる周波数を占拠することを防ぐために、1時間当たりの送信時間総和を180秒以下とする制限を設けることが望ましい。「キャリアセンスあり」の場合は、送信前に他局の送信有無を確認することで他局への干渉を低減することができるため、429MHz帯特定小電力と同じく、1時間当たりの送信時間総和については制限なしで問題ないと考えられる。また、「キャリアセンスなし」での運用では、他局が送信中に自局が送信して通信不能になることが発生するため、信頼性の高い通信を実施したい場合は、キャリアセンスを実施し、他局の送信が終了してから自局が送信する動作とすることが望ましい。

なお、「キャリアセンスあり」の場合、1時間当たりの送信時間総和について制限なしという表現としているが、これは、制限なく電波の送信が可能である意味ではない。実際の運用時は、毎回の送信の前にキャリアセンスを行う必要があり、制限なく電波を送信することは不可能である。周波数共用のためには、毎回の送信後に送信休止時間を設け、他のキャリアセンスあり局へ送信機会を与える運用方法が望ましいと考えられる。送信休止時間の長さについて、既存システムの429MHz帯特定小電力においては、送信時間40秒以下、送信休止時間2秒以上となっている。これにならい、400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムについても、送信休止時間2秒以上とすることが望ましい。送信時間と送信休止時間の例を図6-5に示す。

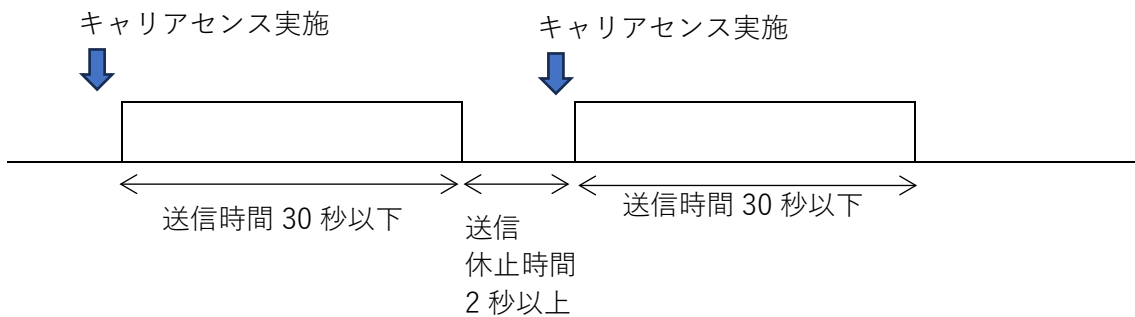


図 6-5 送信時間と送信休止時間の例

以上のように、本諸元・運用条件案では、「キャリアセンスなし」と「キャリアセンスあり」の両方の条件を制定し、利用者が目的に応じて選択できる形とした（図 6-6）。

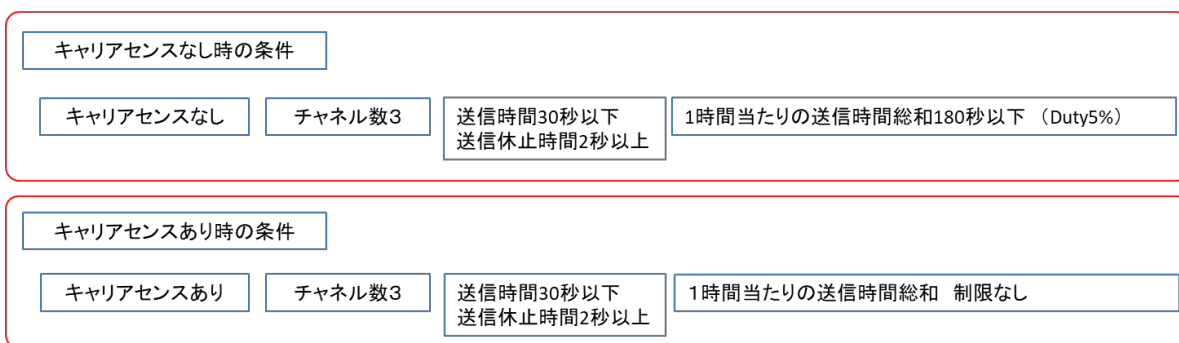


図 6-6 「キャリアセンスなし」と「キャリアセンスあり」条件

6. 1. 1. 4 チャンネルの運用方法

チャンネル数については3つ必要としたが、以下の運用方法が考えられる。

- ① 3チャンネルすべて指定して、免許人がその中から選定して使用する（簡易無線や特定小電力と同じ方法）
- ② 免許時に3チャンネルの中から1チャンネルを指定する（業務用無線（免許局）と同じ方法）

この中で、400MHz帯狭帯域 LoRa®通信システムについては、当初は無線局免許が必要となるため、業務用無線（免許局）と同じように免許時に他局への干渉の影響を考慮した上で、1チャンネルを指定して割り当てる運用方法（②の運用方法）が望ましいと考えられる。

また、現時点では免許局となるが、将来的に登録局とすることで、無線局開設の手続きを簡略化することが可能となる。登録局とする場合は、他の無線局に混信を与えないように運用することのできる機能を有することが必須となり、キャリアセンス機能の搭載が必要となる。このため、免許局 = キャリアセンス無し、登録局 = キャリアセンスあり という区分けを行う方向も考えられる。免許局と登録局の区分けを行う場合、同様の区分けのある簡易無線局では、お互いのチャンネルは別々となっていることから、免許局と登録局のチャンネルは別々とし、免許局専用、あるいは登録局専用のチャンネルとすることが望ましい。

6. 1. 1. 5 送信時間制限等の運用方法

送信時間 30 秒以下とする送信時間制限、送信休止時間確保、および 1 時間当たりの送信時間総和を 180 秒以下とする送信時間総和制限については、以下の運用方法が考えられる。

- ①無線機内に送信時間制限や送信休止時間確保、送信時間総和制限を行う機能（タイマー機能）を内蔵する。
- ②無線従事者が運用時にデータ量や通信頻度を適切に設定することで、送信時間を制限内に抑えて運用を行う。

①の方法について、無線機内に送信時間制限や送信休止時間確保、送信時間総和制限を行う機能を内蔵することは技術的には可能であり、誰が無線設備を操作しても、制限内に抑えることが可能となる（特定小電力にて採用されている方法）。

例えば、送信時間制限については、送信時間（秒）を監視する方法の他に、送信時間は送信する電文長（バイト数）によって決まるため、送信バイト数を監視する方法もある。送信時間総和制限については、送信時間（秒）を積算する機能を設ける方法の他に、送信時間と送信休止時間を組み合わせて制御する方法も考えられる。例えば、1 回の送信時間の 19 倍の休止時間を設ける方法とすることも可能である（10 秒送信時は 190 秒送信休止、30 秒送信時は 570 秒休止）。制限の方法によっては、無線機価格に影響するような機能追加となる場合があるため、低廉な制限方法を採用することが望ましい。

②の方法について、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムは、当初は無線従事者が必要となるため、無線従事者が送信時間（データ量）や通信頻度を適切に設定することによ

て、送信時間や送信時間総和を制限内に抑えことが可能と考えられる。この場合、無線機に機能追加は必要ないため、廉価なシステムとすることが可能となる。

いずれの方法でも問題ないと考えられるため、送信時間制限、送信休止時間確保、送信時間総和制限については、無線機内に送信時間制限や送信休止時間確保、送信時間総和制限を行う機能を内蔵する方法か、無線従事者が運用時にデータ量や通信頻度を適切に設定することで、送信時間を制限内に抑えて運用を行う方法のいずれかとすることが望ましいと考えられる。

6. 1. 1. 6 キャリアセンスレベル

「キャリアセンスあり」のキャリアセンスレベルについて、過去委員会報告（情報通信審議会情報通信技術分科会小電力システム委員会小電力を用いる自営系移動通信の活用・高度化方策に係る技術的条件 平成20年3月 資料集 資料4 P33~35）においては、無線機の基準感度へ一定のマージンを加えて算出されている。同様の手法で、400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの基準感度差分、キャリアセンスレベルをシフトさせてキャリアセンスレベルを求めた結果、-113dBm (0dB μ V) となった（図6-7）。

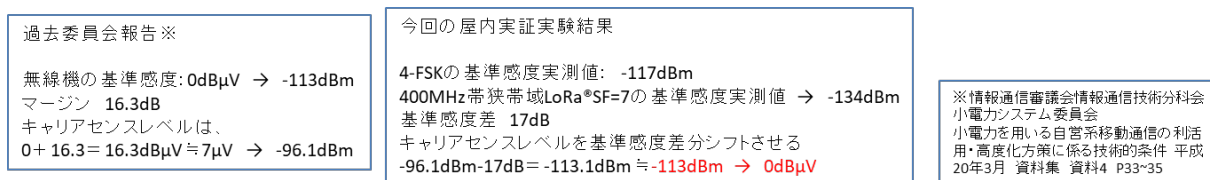


図6-7 キャリアセンスレベルの計算

しかし、実使用環境においては、キャリアセンスレベルを下げると、外来ノイズによっても送信できなくなる事象が発生しうる。また、水位計長期データ取得結果から、通信の信頼性を確保するためには、基準感度プラス10~20dBの受信レベルが得られるように置局や回線設計を行う必要があることが示されている。このため、400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムにおいても、簡易無線や429MHz帯特定小電力のキャリアセンスレベルと同じ、-96dBmとしても問題ないと考えられる。

6. 1. 1. 7 LoRa®電波のキャリアセンス

キャリアセンスレベルを-96dBmとしたが、通常、キャリアセンスは受信レベルがしきい値の上か下かで判断を行っている。今回使用している LoRa®は、受信感度がよいため、他局の電波が微弱な場合でキャリアセンスレベル以下であっても、送信を行うと干渉を引き起こす恐れがある（図6-8）。

また、屋内実証実験結果より、妨害波が先に送信を開始し、後から希望波を送信した場合は、D/U は大きな値となる現象が見られた。このことは、拡散係数が同じ電波が先に送信されている場合に、キャリアセンスレベル以下であるため後から送信を行っても、後から送信した電波は受信されづらくなることを示している。

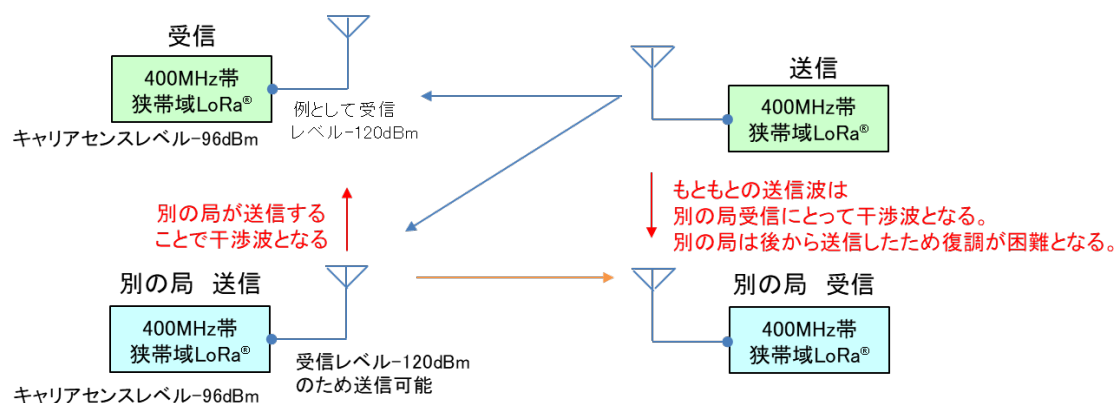


図6-8 LoRa®でのキャリアセンスの必要性

このため、キャリアセンスありの場合は、受信レベルがしきい値（-96dBm）の上か下かで判断を行う機能の他に、LoRa®の電波を受信しているか否かで判断を行うキャリアセンス機能を合わせて搭載することが、干渉低減の観点から推奨される。図6-9に示すように受信レベルがキャリアセンスレベル以下であっても、LoRa®電波の受信を検知した場合は送信しないため、干渉低減に効果がある。ここで、LoRa®電波の検知は、自局に設定している拡散係数と同じ拡散係数のLoRa®電波を受信した際に実施される。

なお、LoRa®拡散係数 SF が異なる場合、D/U はマイナスとなったため、干渉低減の方法として、周辺局のLoRa®拡散係数 SF と異なる拡散係数 SF を使用する方法も有効と考えられる（図6-10）。

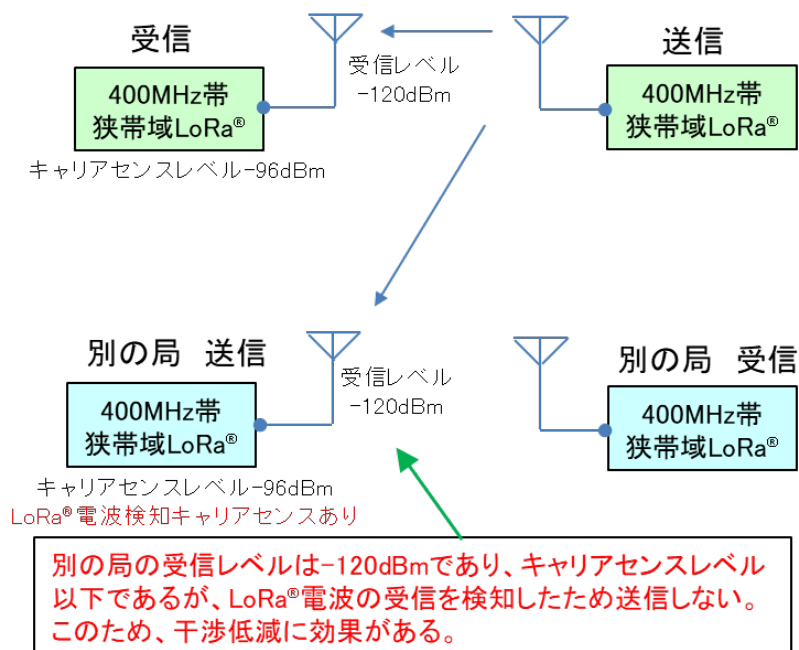


図 6 - 9 LoRa®の電波を受信しているか否かで判断を行うキャリアセンス機能

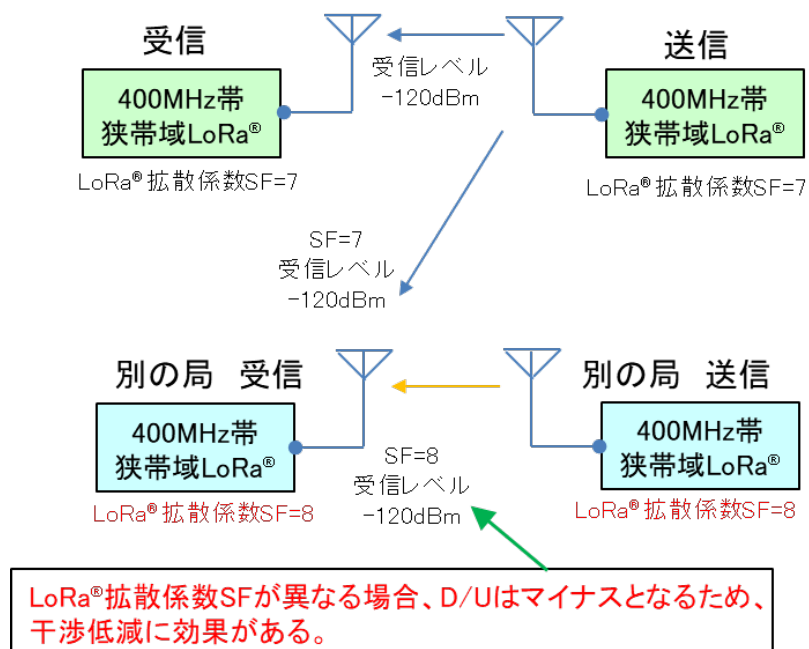


図 6 - 1 0 LoRa®の電波を受信しているか否かで判断を行うキャリアセンス機能

6. 1. 1. 8 混信防止機能

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムは、当初は無線局免許が必要となり、無線従事者免許も必要となるが、将来的に特定小電力にて 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムが使用可能となれば、無線局免許や無線従事者が不要となり、利便性が向上する。特定小電力無線とするためには、混信防止機能として「通信する相手方を識別するための符号（識別符号）を自動的に送信し、又は受信する機能」を備える必要がある（図6-11）。また、この機能は、簡易無線局で使用されている呼出名称記憶装置の動作に類似しており、どの無線局からの電波かを識別するために使用することも可能である。以上の理由から 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムにおいても、混信防止機能として「通信する相手方を識別するための符号（識別符号）を自動的に送信し、又は受信する機能」を備えることが望ましい。

なお、今回の実証実験において使用した無線モジュールにおいては、ユーザー識別用 ID という名称でこの機能が搭載されており、識別符号の長さは 16 ビット（0~65535 まで）となっている。送信する識別符号の内容については、免許申請時に申請者が記載する、免許時に指定する、無線局免許状に記載される免許の番号とするなどの運用方法が考えられる。

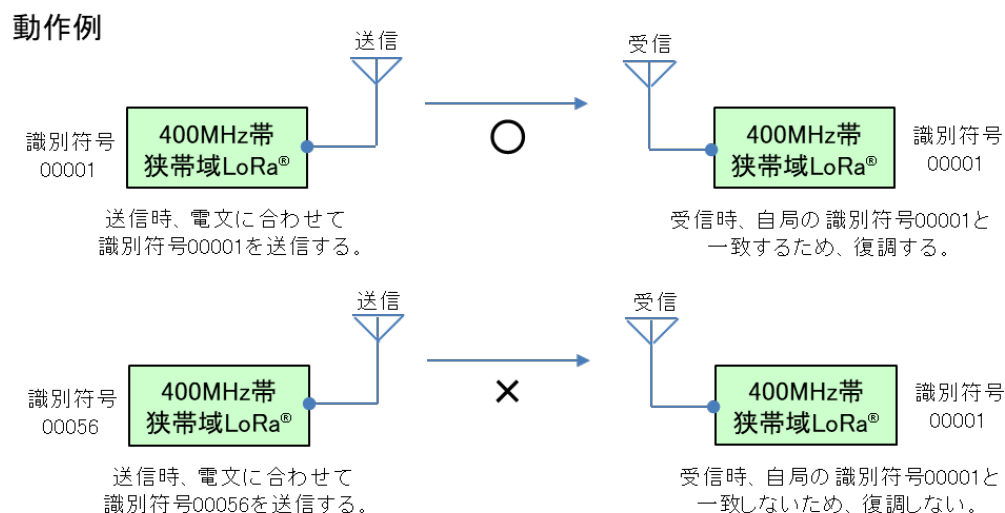


図6-11 混信防止機能概要

6. 1. 1. 9 既存システムとの比較

ここで、400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの諸元・運用条件案と既存システムとの比較を表6-2に示す。400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムは、既存システムと比較し、中山間地域での到達距離が長く、キャリアセンス無しでの送信も可能であり、大きなメリットがあると考えられる。

表6-2 400MHz帯狭帯域LoRa®通信システム諸元・運用条件案と既存システムの比較

既存システム		送信出力	送信時間	1時間当たりの送信時間総和	キャリアセンスの要否	キャリアセンスレベル	無線局免許	中山間地域での到達距離※
400MHz帯狭帯域LoRa®通信システム	-	1W	30秒以下 送信 2秒以上 休止	180秒以下	不要	-	必要	3.0km (拡散係数SF=7)
				制限なし	必要	-96dBm		
426MHz帯特定小電力 (テレメータ、データ伝送用)	ARIB STD T67	1mW	40秒以下 送信 2秒以上 休止	制限なし	不要	-	不要	-
429MHz帯特定小電力		10mW	チャンネルによって異なる 40秒送信2秒休止または 連続送信	制限なし	必要	-96dBm	不要	1km以下
920MHz帯特定小電力	ARIB STD T108	20mW	チャンネルによって異なる 0.4秒以下、4秒以下	360秒以下	必要	-80dBm	不要	-
		20mW	4秒以下 送信 50m秒以上 休止	36秒以下	不要	-		
デジタル簡易無線 登録局	ARIB STD T98	5W(陸上および 日本周辺海域) 1W(上空)	5分送信、1分休止	なし	必要	7μV -96.1dBm	登録局	1.5km

※奥村式(郊外地)
+リッジ損失30.3dB
基準感度にて受信時
の距離を計算

6. 2 ドローン使用時の諸元・運用条件案

今回の実証実験結果から、ドローンでの使用時の400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムの周波数共用条件（離隔距離）については、図6-12の通りと考えられる（詳細は第5章参照）。

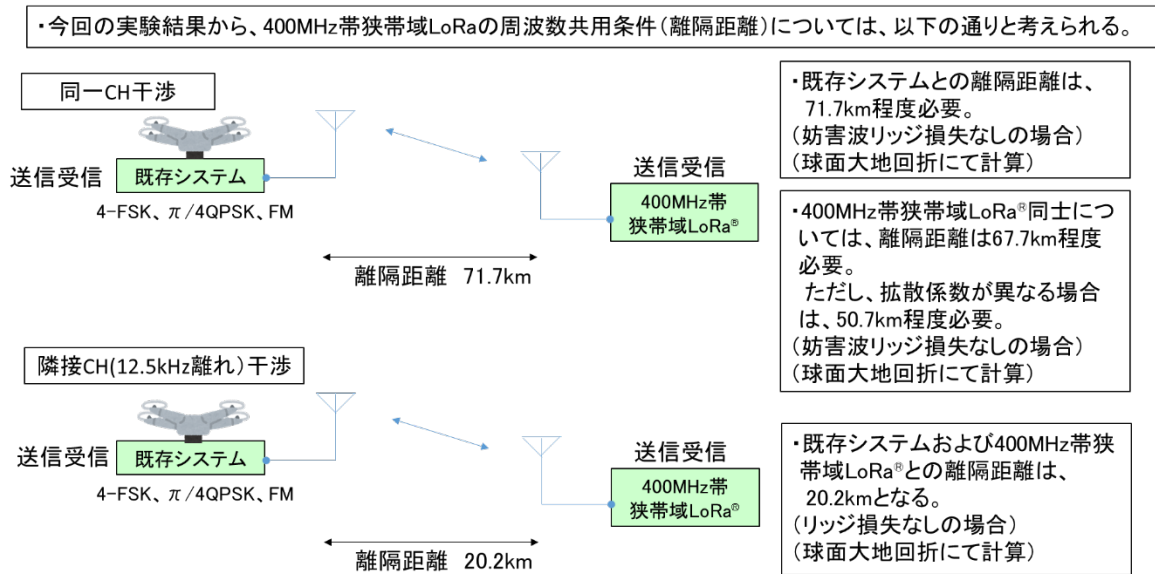


図6-12 ドローンでの使用時の共用条件（離隔距離）

計算上、中山間地域と比べて長距離の離隔距離が必要となる。他の局へ与える干渉の影響が大きく、十分な検証ができていないため、現時点ではドローンからの送信は困難と考えられる。送信出力を下げるなどして、離隔距離の短縮を目指すことも可能だが、429MHz帯特定小電力（出力10mW）は、ドローンでの使用が可能のため、そちらを使用する方向も考えられる。なお、400MHz帯狭帯域LoRa®通信システムでもドローンでの受信は可能であり、屋外実証実験結果より、到達距離の拡大に効果が期待される。

以上の結果から、ドローン使用時などの上空利用については、現時点では上空での受信は可能、送信は不可とし、今後の検討課題とすることが望ましい。

6. 3 端末間通信の適用について

国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)殿にて研究が行われている端末間通信について、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムへの適用が可能かどうか検討を行った。

端末間通信は、無線端末のみでネットワークを構成する技術であり、通信範囲内にある無線端末がプロトコルに従って自律的・自動的に相互接続するため、インフラを必要とせず、設置が簡単な上、地域全体を常にカバーしなければならない高コストなワイヤレスネットワークを構築せずに済み、災害時の影響も受けにくいといった特長がある。

この特長を活かし、路線バスや郵便配達車両などに端末間通信の収集端末を乗せて、運行情報やエリア情報の収集配信を行ったり、健康見守り、農業IoTのための簡易なセンサーデータ収集などでの利用の検討が行われている（図6-13）。

出典 NICT バーチャル展示室 https://www2.nict.go.jp/wireless/i_pac.html

端末間通信（技術解説） https://www2.nict.go.jp/wslab/pj_pac.html



図6-13 端末間通信の応用例

400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムへの端末間通信の適用については、「キャリアセンスなし」と「キャリアセンスあり」の条件によって異なると考えられる。

キャリアセンス無しの場合は、1時間当たりの送信時間総和制限があるため、適用が困難と考えられる。また、キャリアセンス無しの場合、無線機は送信機のみで受信機無しとすることも可能だが、受信機無しの場合は端末間通信のネットワーク構成を行うことができない。キャリアセンスありの場合、端末間通信の実証が行われている920MHz帯特定小電力と同等以上の送信時間が確保できるため、適用可能と考えられる（図6-14）。

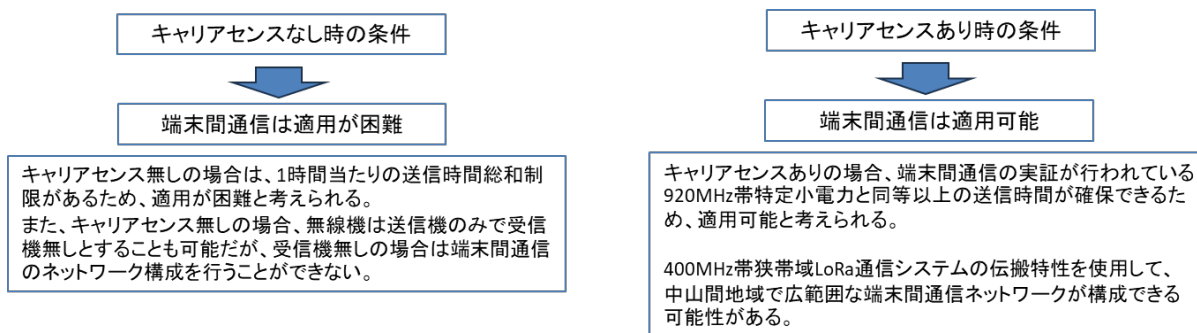


図 6 - 1 4 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムへの端末間通信の適用

NICT 殿は、今回屋外実験を実施した場所と同じ高知県にて、中山間地域における端末間通信技術を活用した圃場データの効率的な収集について研究を実施され、実験を 920MHz 帯特定小電力 LoRa®にて実施されている (図 6 - 1 5)。400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムへ端末間通信を適用した場合、400MHz 帯 LoRa®の伝搬特性から長距離のアドホックリンクが形成可能となり、中山間地域でさらに広い範囲のセンサデータを収集できるネットワークを構成できる可能性がある。

端末間通信によるセンサデータ収集イメージ

開発した端末機の構成

端末間通信性能評価実験(1)

端末間通信性能評価実験(2)

出典 ICT 技術勉強会 2024 年 2 月 22 日愛媛大学メディアホール 端末間通信とその利活用

図 6 - 1 5 中山間地域における端末間通信技術を活用した圃場データの効率的な収集 概要

6. 4 中山間地域以外での使用について

今回の実証実験結果から、平野部など中山間地域以外の地域（リッジ損失なし）での400MHz帯狭帯域LoRa®の周波数共用条件（離隔距離）については、図6-16の通りと考えられる（詳細は第5章参照）。

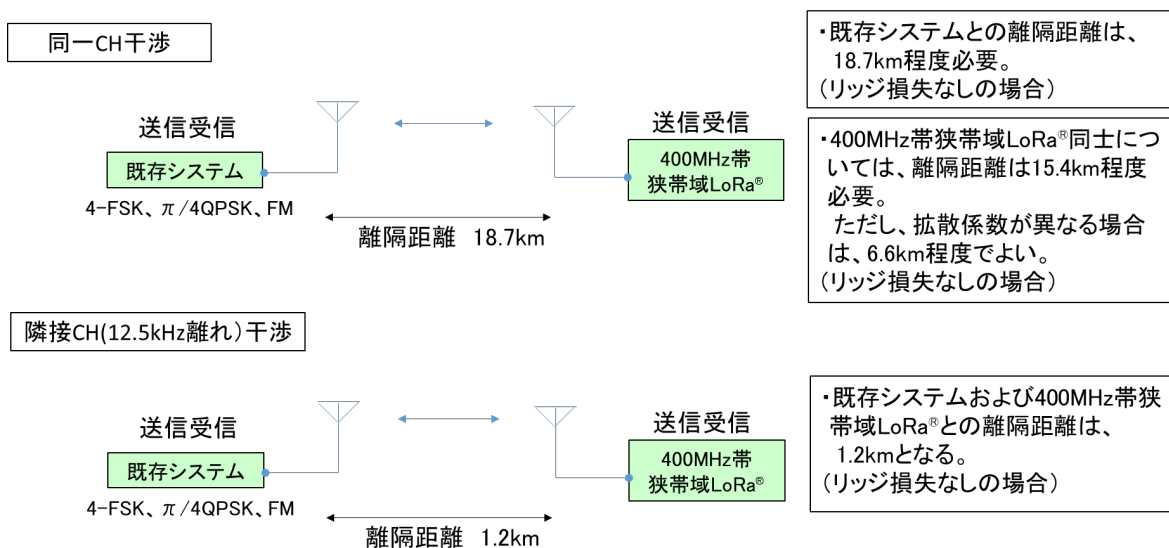


図6-16 中山間地域以外の地域での共用条件（離隔距離）

中山間地域と比べ、リッジ損失が無いために離隔距離が長くなる。また、離隔距離が長くなると同一ゾーン内の局数が増え、さらに、平野部は人口が多いため局数が増える。このため、中山間地域とは別の諸元・運用条件案が必要になると考えられる。

中山間地域以外での諸元・運用条件案の算出例を図6-17に示す。例として高知県南国市の面積と農家戸数を使用し、仮に半径10kmの範囲に電波が到達するとした。局数について、平野部では山などのリッジ損失が無いため、特定小電力で必要な通信距離を確保できる場合も多いと考えられるため、農家への400MHz帯狭帯域LoRa®の普及率はもっと低くなることも想定される。例として普及率10%時の1,452局にて検討を行った。通信頻度を1時間に1回に減らし、LoRa®拡散係数SF=7として必要チャネル数が4となった。4チャネルの割り当てであれば、実現出来る可能性があると考えられるが、平野部への400MHz帯狭帯域LoRa®の適用については、局数、普及率、ゾーン半径、送信回数、送信時間、1時間当たりの送信時間総和、ニーズ（必要なデータ量、送信頻度など）など、さらに検討が必要と考えられる。

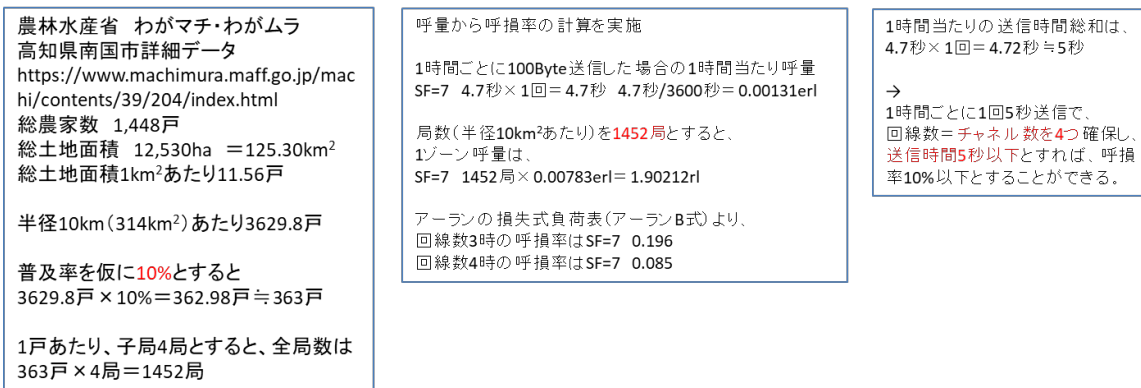


図 6 - 1 7 中山間地域以外での諸元・運用条件案の算出例

6. 5 諸元・運用条件案の課題

以上のように本調査検討において、諸元・運用条件案を取りまとめたが、今後の課題として以下があげられる。

1. 無線局免許

400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システムは、新規システムであり、迅速に使用できるようにするため、現行の枠組み内で実施する方向で検討を行った。このため、当初は無線局免許が必要となり、無線従事者免許も必要となる。農家個人の方が、無線局免許や無線従事者免許を取得することはハードルが高い。なお、現行の枠組み内でも、農家の方が一員である団体（協議会などの任意団体）が無線局免許を取得する方法などが実施可能である（添付資料参照）。このような方法を実施することで免許取得のハードルを下げることも可能である。

また、現在は免許局となるが、登録局にて LoRa[®]を使用できるようにする方向も考えられる。免許局と登録局との違いを表 6 - 3 に示す。登録局であれば簡素な手続きで短期間での無線局開設が可能となる。

さらには、特定小電力で 400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システムが使用可能となれば、さらに利便性が高くなる。無線設備規則の改正や、ARIB（電波産業会）にて管理される標準規格の制定など、実施しなければならない項目のハードルは高いが、無線局免許や無線従事者免許が不要となるなど、大幅な利便性の向上が図られる。これらは普及後の将来的な課題と考えられる。

表 6 - 3 免許局と登録局の違い

項目	免許局	登録局（包括登録）
無線局開設までの流れ	無線局免許申請書提出 ↓ 審査 ↓ 予備免許 ↓ 落成検査 ↓ 免許 無線局免許状交付	無線局登録申請書提出 ↓ 審査 ↓ 登録、無線局登録状交付 ↓ 登録局の開設届出書提出
落成検査	必要	不要
包括登録 (定められた区域内に無線設備の規格を同じくする登録局を2以上開設しようとする者は、無線設備の規格を同じくするものであれば、包括登録を受けることができる)	不可能	可能
レンタル	不可能	可能
他の無線局に混信を与えないように運用することのできる機能 (例、キャリアセンス機能)	不要	必要
適合表示無線設備の使用	適合表示無線設備以外も使用可能	適合表示無線設備のみを使用するものであること

2. 中山間地域以外での使用

平野部や沿岸部、海上などの中山間地域以外や、ドローンから送信時は、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの電波は広範囲に到達する。このため、他局と周波数共用しながら運用するためには、中山間地域とは別の諸元・運用条件案が必要になる。平野部などでの伝搬特性やニーズなどを考慮しながら、将来的に検討すべき課題と考えられる。

第7章 技術的条件案

これまでの検討結果を踏まえ、中山間地域に有効な 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの技術的条件案をとりまとめた。

キャリアセンスなしの場合は、表7-1、7-2、7-3、7-4-1、7-4-3、キャリアセンスありの場合は、表7-1、7-2、7-3、7-4-2、7-4-3に示す条件となる。

表7-1 一般的条件

	項目	条件	備考
1	通信方式	単向通信方式、単信方式 または同報通信方式	単向通信方式：送信局から受信局へ一方的に送信を行う。 単信方式：送信と受信を切り替えながら互いに通信を行う。 同報通信方式：送信局から複数の受信局へ向けて一方的に送信を行う。
2	電波型式	F1D	F：周波数変調 1：副搬送波を使用しないデジタル信号の単一チャンネル D：データ伝送・遠隔測定・遠隔指令
3	変調方式	LoRa®	諸元・運用条件案より
4	周波数	400MHz 帯	諸元・運用条件案より
5	チャンネル間隔	12.5 k Hz	諸元・運用条件案より
6	使用環境条件	中山間地域とする。 ドローンなど上空からの送信は不可とする。	諸元・運用条件案より

表 7-2 送信装置

	項目	条件	備考
1	空中線電力	1W 以下	諸元・運用条件案より
2	空中線電力の偏差	上限 20% 下限 50%	無線設備規則第 14 条 表二十その他の送信設備より
3	周波数の許容偏差	±3 (百万分率)	諸元・運用条件案より
			既存システムの狭帯域デジタル通信方式の条件に準拠している。 無線設備規則第 5 条 別表第一号 44 335.4MHz を超え 470MHz 以下チャンネル間隔が 12.5kHz のもの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 より
4	スプリアス発射又は不要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 25 μ W 以下	無線設備規則第 7 条 別表第三号 335.4MHz を超え 470MHz 以下、1W 以下より
		スプリアス領域における不要発射の強度の許容値 25 μ W 以下	
5	占有周波数帯幅の許容値	8.5kHz	諸元・運用条件案より
6	隣接チャンネル漏えい電力	所定の搬送波周波数から 12.5kHz 離れた周波数を中心とする ±4.25kHz の帯域内に輻射される電力は送信電力に対して -45dB 以下であること。	既存システムの狭帯域デジタル通信方式の値 (-45dB) に準拠した。
			無線設備規則 57 条の三の二 チャンネル間隔が 12.5kHz のもの、一ワット以下の無線局の場合 より

表 7-3 受信装置

	項目	条件	備考
1	副次的に発する電波等の強度	4nW 以下	無線設備規則第 24 条 表二十その他の送信設備より

表7-4-1 制御装置（キャリアセンスなしの場合）

	項目	条件	備考
1	送信時間	電波を発射してから送信時間 30 秒以内にその電波の発射を停止するものであること。	諸元・運用条件案より
2	送信休止時間	2 秒以上	諸元・運用条件案より
3	キャリアセンス	不要	諸元・運用条件案より
4	送信時間総和	無線設備の 1 時間当たりの送信時間の総和が 180 秒以下であること。	諸元・運用条件案より
5	混信防止機能	通信する相手方を識別するための符号（識別符号）を自動的に送信し、又は受信する機能を備える。	諸元・運用条件案より

表7-4-2 制御装置（キャリアセンスありの場合）

	項目	条件	備考
1	送信時間	電波を発射してから送信時間 30 秒以内にその電波の発射を停止するものであること。	諸元・運用条件案より
2	送信休止時間	2 秒以上	諸元・運用条件案より
3	キャリアセンス	必要 無線設備は新たな送信に先立ち、キャリアセンスによる干渉確認を実行した後、送信を開始すること。 キャリアセンスは電波を発射しようとする周波数に対して行い、無線機入力端において-96dBm を超える場合、送信を行わないものであること。	諸元・運用条件案より
4	送信時間総和	制限なし	諸元・運用条件案より
5	混信防止機能	通信する相手方を識別するための符号（識別符号）を自動的に送信し、又は受信する機能を備える。	諸元・運用条件案より

表 7 - 4 - 3 制御装置（送信時間および送信時間総和の制限方法）

	項目	条件	備考
1	送信時間、送信休止時間および送信時間総和の制限方法	無線機内に送信時間制限や送信休止時間確保、送信時間総和制限を行う機能を内蔵する方法か、無線従事者が運用時にデータ量や通信頻度を適切に設定することで、送信時間や送信時間総和を制限内に抑えて運用を行う方法のいずれか	諸元・運用条件案より

おわりに

本調査検討の実施にあたっては、高知県の中山間地域に有効な 400MHz 帯狭帯域 LoRa® 通信システムの技術的条件案について調査検討を行った。

本調査検討にあたっては、調査検討終了後すぐにでも高知県内での利用ニーズに応えられるよう、実用局免許が可能な 414.8MHz の周波数を選定し、地域周波数利用計画策定基準一覧表 第2号 陸上移動業務及び携帯移動業務の局 3 1 及び2以外の無線局 の各種業務用無線局の用途にテレメータ用を追加している。

リッジ損失ありの場合の隣接チャンネルとの離隔距離が 1km 以内との共用検討結果を踏まえ、今後、中山間地域でのニーズが増えてくる場合には、1km 半径内が山に囲まれた環境である高知の山間部において、そのエリア内で 30 局を運用可能するために 3 チャンネル（波）で構成されるシステムとして検討結果を取りまとめている。

一方で、本調査検討を進める過程においては、2 章（2. 4 今後有効とみられるニーズについての調査）に記載したように、各所からのニーズが発生している状況である。

特に、今回のような中山間地域ではなく、海上に向けて視野の開けた沿岸部等で 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムを利用する場合には、あらためて技術的条件の検討が必要である。今後、様々な条件を包含した 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの制度整備を視野に、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムの制度化や専用波の確保に向けた検討が必要であると考えられる。

最後に、本調査検討実施に当たり御協力いただいた関係者各位に感謝の意を表し、400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムが地域の課題解決に広く利用されることを期待する。

参考資料 1 調査票詳細

ニーズ調査を実施した調査票の詳細を以下に示す。調査票は、学識経験者や無線機器製造業者などの専門家向けと、それ以外の方への一般の方向けの2種類を作成し、調査を行った。

P2 専門家向け

P15 一般の方向け

(専門家向け)

400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システムに関するアンケート

- 口に✓又は () に必要事項を記入してください。

I 無線テレメータシステムの使用について

今回の調査検討では、一定間隔で機器の情報（水位、水質、水温、温度、湿度、雨量、位置他の各種データ）を採取して、無線で伝送するシステム（無線テレメータシステム）にて使用する無線システムに対しての検討を行います。

(参考 図1：無線テレメータシステム（水位計）の例

別紙表1、2：無線テレメータシステムにて使用する現行無線システムの仕様例)

無線テレメータシステムまたは類似したシステムを利用されている場合、そのシステムについてお答え下さい。



図1 無線テレメータシステム（水位計）の例

質問1 貴社・貴団体の製品やサービス、または業務において、無線を使用した「無線テレメータシステム」を使用されていますか。

使用している。⇒質問2へ

使用していない。⇒質問9へ

質問2 どのような業種に属する製品やサービス、または業務において無線テレメータシステムを使用されていますか。また、具体的な使用場所や製品やサービスの内容、用途についてお書きください。

(複数回答可)

業種

農業、 林業、 水産、 建設業、 製造業、 サービス業、
その他 (_____)

具体的な使用場所

(例. 場所：水田、畑、山林、住宅、工場など)

製品やサービスの内容、用途

(例. 用途：水位・傾斜・雨量・温度監視、データ伝送、動物わな監視など)

質問3 どのような無線システムを使用されていますか。わかる範囲で周波数帯と通信方式をお答えください。

(複数回答可)

特定小電力無線局

- 426MHz帯、 429MHz帯、 920MHz帯、 1.2GHz帯
 2.4GHz帯、 5GHz帯、
 その他の周波数帯 (_____)、 不明

通信方式

- アナログ (FM、AM)、 FSK、 PSK、
 LoRa[®]、 Sigfox、 ELTRES、 ZETA、 Wi-SUN
 Wi-Fi その他 (_____)、 不明

デジタル簡易無線局 (登録局) (350MHz帯)

デジタル簡易無線局 (免許局) (150MHz帯、400MHz帯)

アナログ簡易無線局 (免許局) (150MHz帯、400MHz帯、50GHz帯)

デジタル業務用無線局 (免許局) (150MHz帯、400MHz帯)

アナログ業務用無線局 (免許局) (150MHz帯、400MHz帯)

キャリア系

- LTE (4G)、 5G、 3G、 LTE-M、 MCA、
 その他 (_____)、 不明

その他 (_____)、 不明

質問4 無線での通信距離はどの程度ですか。最も近いものをお選びください。

- 0~10m、 10~100m、 100~500m、 500m~1000m、
 1km~3km、 3~5km、 5~10km、 10km以上
 その他 (_____)、 不明

質問5 無線での通信の頻度はどの程度ですか。最も近いものをお選びください。

- 常時、 1分に1回、 10分に1回、 30分に1回、
1時間に1回、 6時間に1回、 12時間に1回、 一日に1回、
一週間に1回、 半月に1回、 ひと月に1回、
その他（_____）、 不明

質問6 1回の通信あたりのデータ量はどの程度ですか。最も近いものをお選びください。

- 10Byte、 100Byte、 1kByte、 10kByte、 100kByte
1MByte、 10MByte、 10MByte以上、
その他（_____）、 不明、 データ通信ではない

質問7 現在使用されている無線の価格はどの程度ですか。販売されている場合は、どの程度の価格ですか。最も近いものをお選びください。

初期費用（無線機1台あたり）

- ¥10,000、 ¥50,000 ¥100,000、 ¥100,000以上
その他（_____）

通信料（1ヶ月あたり）

- ¥0、 ¥1,000、 ¥5,000、 ¥10,000以上
その他（_____）

年間保守費

- ¥0、 ¥10,000、 ¥50,000、 ¥100,000以上
その他（_____）

質問8 現在使用されている無線システムへの不満点はありますか。

(複数回答可)

- 電波が届かない、 チャンネル数が少ない、 回線速度が遅い、
- 送信時間制限がある、 使用場所に制限がある（上空は使用不可など）
- 無線局免許の手続きが面倒、 免許が必要、 電波利用料が高い、

- 無線機の種類が少ない、 無線機が故障しやすい、 電池がもたない、
- 無線機の価格が高い、 月々の通信料が高い、 毎年の保守料が高い

- その他（_____）、

- 不満はない

質問11へお進みください。

無線テレメータシステムを使用されていない方へお聞きします。

質問9 無線テレメータシステムを使用されていない理由は何ですか。また、使用したいが具体的に課題があって使用されていない場合は、その課題をお書きください。

(複数回答可)

- 有線などその他の回線で十分、 電波が届かない、 回線速度が遅い、
無線はよくわからないため、 無線局免許の手続きが面倒、

- 無線機の種類が少ない、 無線機が故障しやすい、 電池がもたない、
無線機の価格が高い、 月々の通信料が高い、 毎年の保守料が高い
その他 (_____)、

不明

無線を使用する上での課題

質問10 価格的にどの程度であれば、無線の使用を検討されますか。最も近いものをお選びください。

初期費用（無線機1台あたり）

- ¥10,000、 ¥50,000 ¥100,000、 ¥100,000以上
その他 (_____)

通信料（1ヶ月あたり）

- ¥0、 ¥1,000、 ¥5,000、 ¥10,000以上
その他 (_____)

年間保守費

- ¥0、 ¥10,000、 ¥50,000、 ¥100,000以上
その他 (_____)

質問11へお進みください。

Ⅱ 中山間地域に有効な400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システムについて

質問11 本調査検討会では、無線テレメータシステムにて使用する無線システムとして、「中山間地域に有効な400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システム」の導入検討を行っています。表3と10ページに示すシステムとなります。貴社・貴団体の製品やサービス、または業務において、当該システムを採用される可能性はありますか。

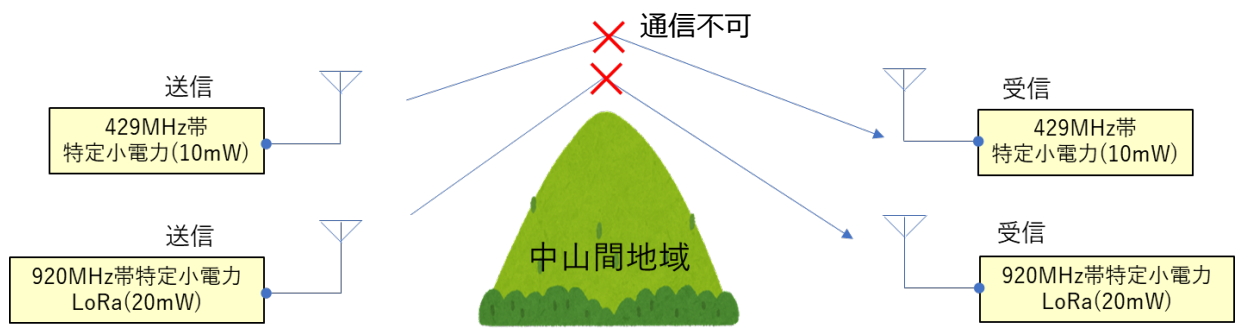
ある、 ない、 わからない、
その他（ _____ ）

表3 400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システム仕様案

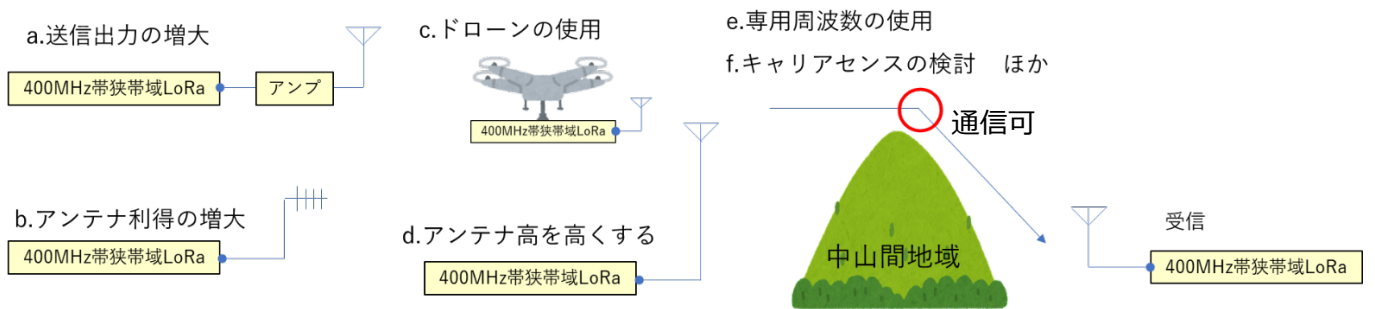
システム名	400MHz 帯狭帯域 LoRa [®] 通信システム
周波数	400MHz 帯
出力	1W 程度 (調査検討会にて検討を行う)
占有周波数帯域幅	最大 8.5kHz
チャンネル数	未定
キャリアセンス	未定 (調査検討会にて検討を行う)
通信時間制限	未定 (調査検討会にて検討を行う)
呼出名称記憶装置	規定なし
変調方式	LoRa [®]
データ量 (1回の通信あたり)	小容量 1~数 10byte 程度
上空利用	未定 (調査検討会にて検討を行う)
無線局免許 電波利用料	必要 陸上移動局 400 円/年
到達距離	中山間地域で、ひと山を超える距離 1~2km 程度を想定
無線局の目的	一般業務用 小容量テレメータシステム 中距離自営回線を想定

400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システムの導入に向けての検討の方向性

中山間地域では、既存システムでの通信が困難



中山間地域でも通信可能なシステムとして
400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システムの導入検討を行う



- 400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システムの特徴
- ・ 中山間地域で通信距離を確保できる。
 - ・ 安価な初期費用（出荷台数の多い429MHz特定小電力の機器を流用可能なため）。
 - ・ 通信料なし。電波利用料 ¥ 400 / 年。

質問12 質問11に示した当該システムは、どのような業種に属する製品やサービス、または業務において使用が想定されますか。また、具体的な製品やサービスについて想定される場合は、使用場所や製品やサービスの内容、用途をお書きください。

(複数回答可)

業種

農業、 林業、 水産、 建設業、 製造業、 サービス業、
その他 (_____)

具体的な使用場所

(例. 場所：水田、畑、山林、住宅、工場など)

製品やサービスの内容、用途

(例. 用途：水位・傾斜・雨量・温度監視、データ伝送、動物わな監視など)

質問13 質問11に示した当該システムの概要の中で、変更すれば採用が促進される項目はありますか。具体的な変更内容があればお書きください。

(複数回答可)

ある、

周波数、 出力、 占有周波数帯域幅、 チャンネル数、
キャリアセンス、 通信時間制限、 呼出名称記憶装置、
変調方式、 データ量、 上空利用、 無線局免許、
電波利用料、 アンテナ利得、 アンテナ高

具体的な変更内容 (_____)

ない、 わからない、

その他 (_____)

質問14 質問11に示した当該システムの無線機は、1台どの程度の価格であれば使用されますか。販売されている場合、どの程度の価格が見込まれますか。最も近いものをお選びください。

初期費用（無線機1台あたり）

- ¥10,000、 ¥50,000 ¥100,000、 ¥100,000以上
 その他（ _____ ）

通信料（1ヶ月あたり）

- ¥0、 ¥1,000、 ¥5,000、 ¥10,000以上
 その他（ _____ ）

年間保守費

- ¥0、 ¥10,000、 ¥50,000、 ¥100,000以上
 その他（ _____ ）

質問15 質問11に示した当該システムに限らず、導入を希望される無線システムがあれば、その要件・仕様を自由回答でお書きください。

（例. x x x（場所）で使用できる無線、x x x bpsでx x km届く無線、
免許不要の無線、x x x MHzを使用する無線 など）

あり _____

なし

アンケートに記入いただいた内容に関し、個別にお伺いする場合がありますので、連絡先の記入をお願いいたします。

御社・貴機関名 _____

御所属 _____

お名前 _____

電話番号 _____

E-Mail _____

記入いただいた情報については、本アンケートに関してお伺いする目的以外には使用しません。

以上です。御協力いただきありがとうございました。
本アンケート用紙を返信用封筒にて返送をお願いします。

別紙

表1 無線テレメータシステムにて使用する現行無線システムの仕様例 その1 自営系

システム名	①429MHz 特定小電力 ARIB STD-T67	②920MHz 特定小電力 ARIB STD-T108	③簡易無線（登録局） ARIB STD-T98
周波数	429MHz 帯	920MHz 帯	350MHz 帯
出力	10mW	20mW	5W（陸上および日本周辺海域） 1W（上空）
占有周波数 帯域幅	最大 8.5kHz	最大 4MHz	5.8kHz
チャンネル数	46（帯域幅 8.5kHz）	38（帯域幅 200kHz）	35 →82（陸上および日本周辺海域） 5 →15（上空でも使用可能）※
キャリア センス	必須	必須 制限を満たすものは不要	必須
通信時間 制限	チャンネルによって 40 秒送信 2 秒休止 または連続送信	チャンネルによって 4 秒送信 50m 秒休止または 0.4 秒 送信 4 秒休止 その他のパターンもあり	連続して 5 分を超える電波の発射 をしようとした場合に、自動的に その送信を停止し、その停止から 1 分以上経過した後でなければ送 信を行わないものであること。
呼出名称 記憶装置	規定なし	規定なし	必須
変調方式	LoRa [®] 、FSK、PSK など	LoRa [®] 可能	LoRa [®] 不可
データ量 （1 回の通 信あたり）	小～中容量 1～数百 byte 程度	小～大容量 1～1Mbyte 程度	小～中容量 1～数十 kbyte 程度
上空利用時 の制限	規定なし	規定なし	上空を利用する無線設備につい ては、送受信空中線系を含め、一 つの筐体に収められていること。
無線局免許 電波利用料	不要	不要	無線局登録が必要 1 局当たり年 400 円
到達距離	中山間地域で、ひと山を 超えることは難しい	中山間地域で、ひと山を 超えることは難しい	中山間地域で、ひと山を 超えることは可能
無線局の 目的	—	—	簡易無線業務用
価格帯 無線機 1 台	3～5 万円 無線モジュールは 5 千円程度から	3～5 万円 無線モジュールは 5 千円程度から	3～5 万円（音声通信用無線機） データ通信専用機は 20 万円程度

※令和 5 年 6 月 1 日より増波

表2 無線テレメータシステムにて使用する現行無線システムの仕様例 その2 キャリア系

システム名	④LTE (4G)	⑤ELTRES	⑥Sigfox
周波数	700/800/900MHz、 1.5/1.7/2/3.5GHz	920MHz 帯	920MHz 帯
出力	端末 最大 200mW	20mW	アップリンク 20mW ダウンリンク 250mW
占有周波数 帯域幅	5,10,15MHz	200kHz	アップリンク 100Hz ダウンリンク 200Hz
チャンネル数	-	-	-
キャリア センス	なし	あり	あり
通信時間 制限	契約プランによって 容量制限がある	最短 1 分間隔送信	通信回数の制限がある アップリンク 1 日 140 回
呼出名称 記憶装置	-	-	-
変調方式	QPSK、16QAM、64QAM BPSK、QPSK、8PSK、16QAM	$\pi/2$ シフト BPSK	SBB-SC + D-BPSK ISB + GFSK
データ量 (1 回の通 信あたり)	1 回の通信あたりの制限は 無いが契約プランによって 容量制限がある	128bit (16byte) (ペイロードの容量)	アップリンク 12byte ダウンリンク 8byte (ペイロードの容量)
上空利用時 の制限	あり 手続きが必要	なし	なし
無線局免許 電波利用料	電気通信事業者の包括免許 150 円/年 電気通信事業者が支払	不要	端末側は不要
到達距離	-	-	-
無線局の 目的	電気通信業務用	-	-
価格帯 無線機 1 台	産業用 LTE ルータ 3~5 万円程度	システムによって異なる	システムによって異なる
通信料	プランによって異なる 例. ドコモ IoT プラン 月々400 円 30MB、上限月々1,200 円	システムによって異なる 例. 通信費 + システム使用料 月々500 円 / 1set	システムによって異なる 例. SORACOM Air for Sigfox 通信料金 1584 円/年
エリア カバー率	人口カバー率 99.9% (2020 年)	国内人口カバー率 90% (2020 年)	国内人口カバー率 95% (2020 年)
備考	双方向通信可能	アップロード (端末送信) のみ可能 GPS 受信が必須	双方向通信可能

(一般の方向け)

400MHz 帯狭帯域 LoRa[®]通信システムに関するアンケート

• 口に✓又は()に必要事項を記入してください。

一定間隔で機器の情報(水位、水質、水温、温度、湿度、雨量、わな状態、位置他の各種データ)を採取し、無線・電波を使って伝送するシステム(無線テレメータシステム)についてお聞きします。

(参考 図1: 無線テレメータシステム(水位計)の例

図2: 無線テレメータシステム(ハウス内温度計測)の例)

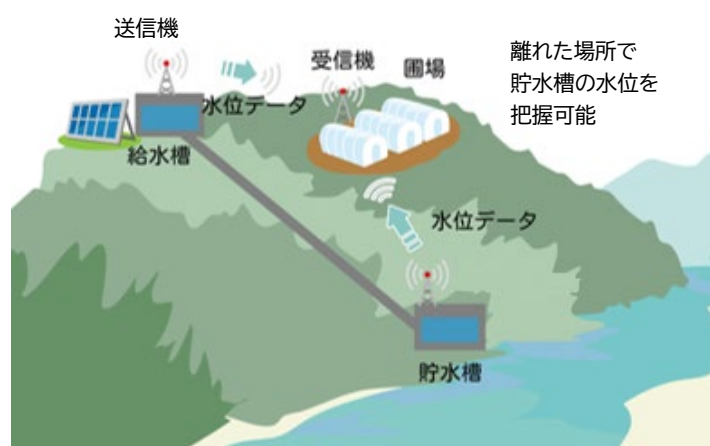


図1 無線テレメータシステム(水位計)の例

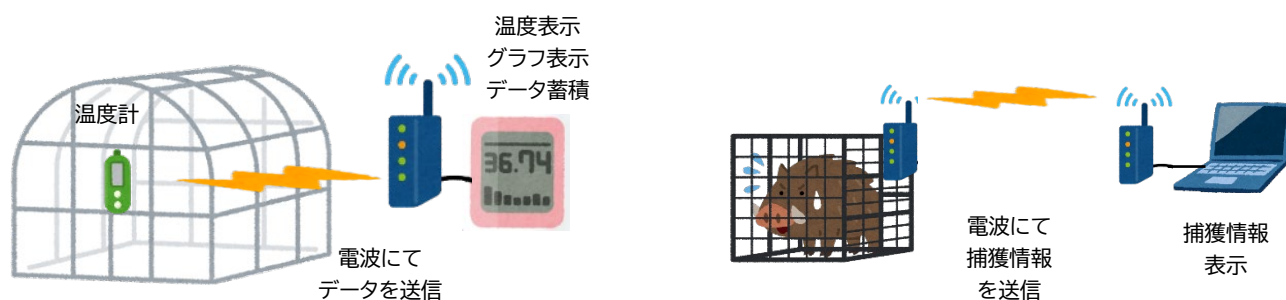


図2 無線テレメータシステム(ハウス内温度計測、わな監視)の例

質問1 いま現在、無線を使用した「無線テレメータシステム」を使用されていますか。

使用している。

いまは使用していないが、以前使用していた。

質問2へお進みください

使用していない。

質問8へお進みください

質問2 どのような用途で使用されている、あるいは使用されていましたか。

(例. 場所 xxで : 水田、畑、山林、住宅、工場など

対象 xxを測るため : 水位、傾斜、雨量、温度、湿度、わな状態、位置など)

質問3 どのような無線を使用されている、あるいは使用されていましたか。わかる範囲でお答えください。

(複数回答可)

携帯電話回線(ドコモ、AU、ソフトバンク、楽天など)、

Wi-Fi(2.4GHz・5GHz無線LAN)、 Bluetooth、

無線局免許不要の無線(特定小電力、429MHz帯、920MHz帯など)、

無線局免許・登録が必要な無線(簡易無線、業務無線など)

その他(_____)、

不明

質問4 無線での通信距離はどの程度ですか。最も近いものをお選びください。

0~10m、 10~100m、 100~500m、 500m~1000m、

1km~3km、 3~5km、 5~10km、 10km以上

その他(_____)、

不明

質問5 無線で水位などのデータを採取される頻度はどの程度ですか。最も近いものをお選びください。

- 常時、 1分に1回、 10分に1回、 30分に1回、
1時間に1回、 6時間に1回、 12時間に1回、 一日に1回、
一週間に1回、 半月に1回、 ひと月に1回、
その他（_____）、 不明

質問6 使用されている、あるいは使用されていた無線機の価格や通信料、保守費はどの程度ですか。最も近いものをお選びください。

初期費用（無線機1台あたり）

- ¥10,000、 ¥50,000 ¥100,000、 ¥100,000以上
その他（_____）

通信料（1ヶ月あたり）

- ¥0、 ¥1,000、 ¥5,000、 ¥10,000以上
その他（_____）

年間保守費

- ¥0、 ¥10,000、 ¥50,000、 ¥100,000以上
その他（_____）

質問7 使用されている、あるいは使用されていた無線への不満点はありますか。

(複数回答可)

不満がある、

不満の内容

電波が届かない、 チャンネル数が少ない、 回線速度が遅い、
 送信時間制限がある、 使用場所に制限がある（上空は使用不可など）
 無線局免許の手続きが面倒、 免許が必要、 電波利用料が高い、

無線機の種類が少ない、 無線機が故障しやすい、 電池がもたない、
 無線機の価格が高い、 月々の通信料が高い、 毎年の保守料が高い
 その他（_____）

不満はない

質問10へお進みください。

無線テレメータシステムを使用していない方へお聞きします。

質問8 無線テレメータシステムを使用されない理由は何ですか。また、使用したいが具体的に課題があって使用されていない場合は、その課題をお書きください。

(複数回答可)

有線などその他の回線で十分、 電波が届かない、 回線速度が遅い、
無線はよくわからないため、 無線局免許の手続きが面倒、

無線機の種類が少ない、 無線機が故障しやすい、 電池がもたない、
無線機の価格が高い、 月々の通信料が高い、 毎年の保守料が高い
その他 (_____)、
不明

無線を使用する上での課題

質問9 価格的にどの程度であれば、無線の使用を検討されますか。最も近いものをお選びください。

初期費用(無線機1台あたり)

¥10,000、 ¥50,000 ¥100,000、 ¥100,000以上
その他 (_____)

通信料(1ヶ月あたり)

¥0、 ¥1,000、 ¥5,000、 ¥10,000以上
その他 (_____)

年間保守費

¥0、 ¥10,000、 ¥50,000、 ¥100,000以上
その他 (_____)

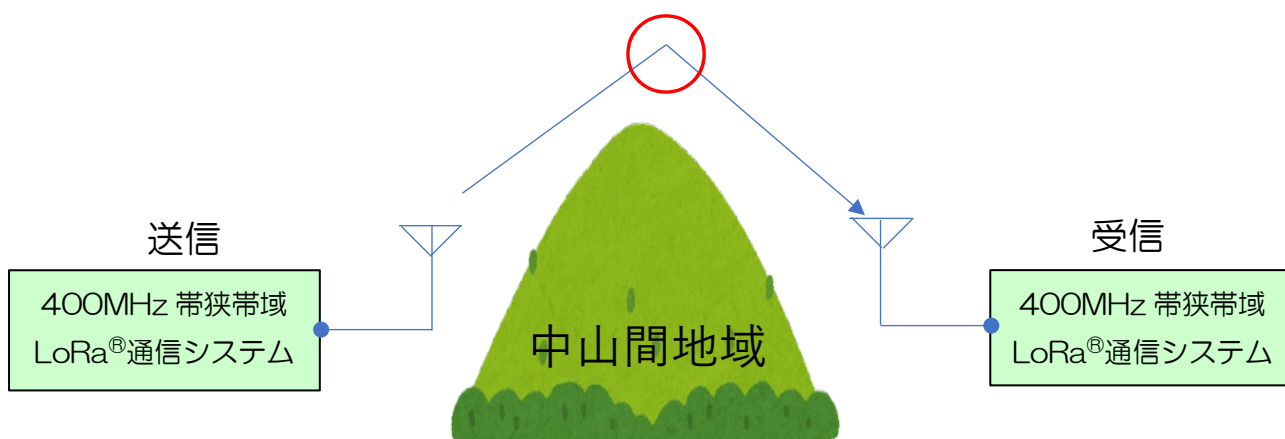
質問10へお進みください。

質問10 本調査検討会では、無線テレメータシステムにて使用する無線として、「中山間地域に有効な400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システム」の導入検討を行っています。

下記のような特徴を持ちますが、当該無線を使用される可能性はありますか。また、今後、使用できそうな用途があれば、その内容を自由回答でお書きください。

ある、 ない、 わからない、
その他（ _____ ）

使用できそうな用途（例. 場所 xxで：水田、畑、山林、住宅、工場、
中山間地域、平野部、山岳地帯など
対象 xxを測るため：水位、傾斜、雨量、温度、位置など）



400MHz帯狭帯域LoRa[®]通信システムの特徴

- ・ 中山間地域で通信距離を確保できる。
- ・ 安価な初期費用（出荷台数の多い429MHz特定小電力の機器を流用可能なため）。
- ・ 通信料なし。電波利用料¥400/年。

調査検討会にて検討する方法の例

送信出力の増大、アンテナ利得の増大、ドローンの使用、
アンテナ高を高くする、専用周波数の使用、キャリアセンスの検討

アンケートに記入いただいた内容に関し、個別にお伺いする場合がありますので、連絡先の記入をお願いいたします。

御社・貴機関名 _____

御所属 _____

お名前 _____

電話番号 _____

E-Mail _____

記入いただいた情報については、本アンケートに関してお伺いする目的以外には使用しません。

以上です。御協力いただきありがとうございました。
本アンケート用紙を返信用封筒にて返送をお願いします。

参考資料 2 導入パターン例

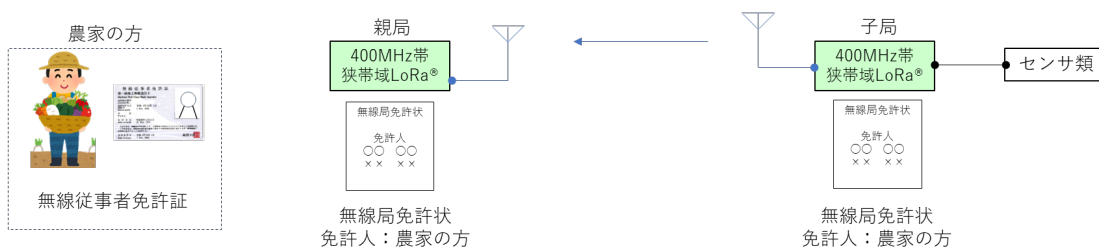
400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムは、新規システムであり、迅速に使用できるようにするため、現行の枠組み内で実施する方向で検討を行った。このため、当初は無線局免許が必要となり、無線従事者免許も必要となる。農家個人の方が、無線局免許や無線従事者免許を取得することはハードルが高いと考えられるが、現行の枠組み内でも、農家の方が一員である団体（協議会などの任意団体）が無線局免許を取得する方法などが実施可能である。このような方法を実施することで免許取得のハードルを下げることも可能である。

本資料においては、考えられる導入パターン例について検討を行い、表 1 に示す 11 のパターンをあげている。この中で、パターン 3. 免許局・農家の方が一員である団体（任意団体）が無線局免許を取得 が最も実現性が高いと考えられる。なお、特定小電力あるいは登録局で 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システムが使用可能となれば、さらに利便性が高くなる（パターン 6~10）。普及後の将来的な課題としたい。

表1 400MHz 帯狭帯域 LoRa®通信システム導入パターン例

パターン		無線局免許	無線従事者 免許	無線局の 目的	電波利用料	無線機	通信の相手方	電気通信事業	実現性
1	免許局・農家の方が無線局免許を取得	農家の方が取得	農家の方が取得	一般業務用	農家の方が支払い	農家の方が購入	農家の方の無線局に限る	該当しない	△～○
2	免許局・農家の方が一員である法人が無線局免許を取得	法人が取得	法人内の方が取得	一般業務用	法人が支払い	法人が購入	法人所属の無線局に限る	該当しない	△～○
3	免許局・農家の方が一員である団体（任意団体）が無線局免許を取得	団体が取得	団体内の方が取得	一般業務用	団体が支払い	団体が購入	団体所属の無線局に限る	該当しない	○
4	免許局・農家の方とは別の法人等が無線局免許を取得、別の法人が無線機を農家の方へ貸し出し（レンタル）	別の法人が取得	別の法人内の方が取得	一般業務用	別の法人が支払い	別の法人が購入	別の法人所属の無線局に限る	該当しない	×
5	免許局・農家の方とは別の法人等が無線局免許を取得、別の法人が農家の方へ情報提供を行う	別の法人が取得	別の法人内の方が取得	電気通信事業用	別の法人が支払い	別の法人または農家の方が購入	別の法人所属の無線局に限る	該当する	×
6	400MHz帯狭帯域LoRa®を特定小電力無線局とした場合	不要	不要	（特定小電力無線局）	不要	農家の方が購入	制限なし	該当しない	すぐには実現できない
7	400MHz帯狭帯域LoRa®を特定小電力無線局とし、別の法人が無線機を農家の方へ貸し出し（レンタル）	不要	不要	（特定小電力無線局）	不要	別の法人が購入	制限なし	該当しない	すぐには実現できない
8	400MHz帯狭帯域LoRa®を特定小電力無線局とし、別の法人が農家の方へ情報提供を行う	不要	不要	（特定小電力無線局）	不要	別の法人または農家の方が購入	制限なし	該当する	すぐには実現できない
9	400MHz帯狭帯域LoRa®を登録局とし、農家の方が無線局登録を取得した場合	無線局登録を農家の方が取得	農家の方が取得	一般業務用	農家の方が支払い	農家の方が購入	制限なし	該当しない	すぐには実現できない
10	400MHz帯狭帯域LoRa®を登録局とし、別の法人が無線機を農家の方へ貸し出し（レンタル）	無線局登録を別の法人が取得	法人内の方が取得	一般業務用	別の法人が支払い	別の法人が購入	制限なし	該当しない	すぐには実現できない
11	400MHz帯狭帯域LoRa®を登録局とし、別の法人が農家の方へ情報提供を行う	無線局登録を別の法人が取得	別の法人内の方が取得	電気通信事業用	別の法人が支払い	別の法人または農家の方が購入	制限なし	該当する	×

パターン 1. 免許局・農家の方が無線局免許を取得



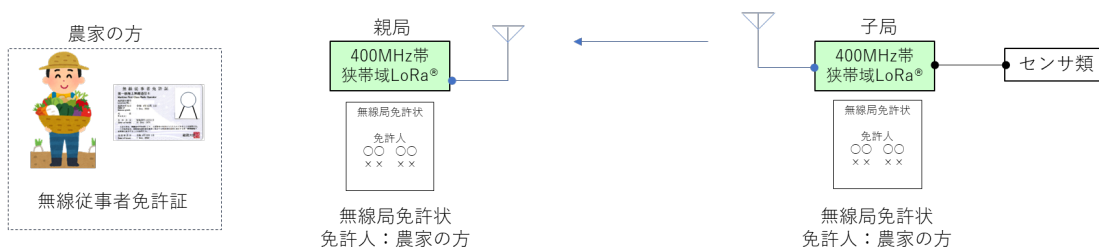
項目	内容
無線局免許	農家の方が取得
無線従事者免許	農家の方が取得
無線局の目的	一般業務用
電波利用料	農家の方が支払い
無線機	農家の方が購入
通信の相手方	農家の方の無線局に限る
電気通信事業	該当しない

実現性 △ ~ ○

→ 現行の枠組み内で実現可能

農家の方個人が免許を取得するハードルが高い。

パターン 2. 免許局・農家の方が一員である法人が無線局免許を取得



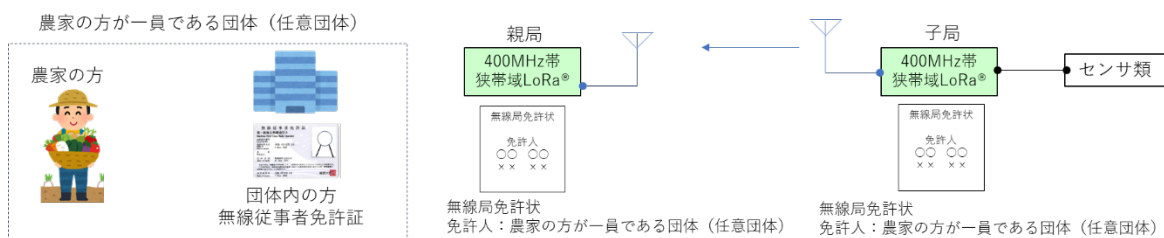
項目	内容
無線局免許	農家の方が取得
無線従事者免許	農家の方が取得
無線局の目的	一般業務用
電波利用料	農家の方が支払い
無線機	農家の方が購入
通信の相手方	農家の方の無線局に限る
電気通信事業	該当しない

実現性 △ ~ ○

→ 現行の枠組み内で実現可能

農家の方個人が免許を取得するハードルが高い。

パターン 3. 免許局・農家の方が一員である団体（任意団体）が無線局免許を取得



項目	内容
無線局免許	農家の方が一員である団体が取得
無線従事者免許	農家の方が一員である団体内の方が取得
無線局の目的	一般業務用
電波利用料	農家の方が一員である団体が支払い
無線機	農家の方が一員である団体が購入
通信の相手方	農家の方が一員である団体の無線局に限る
電気通信事業	該当しない

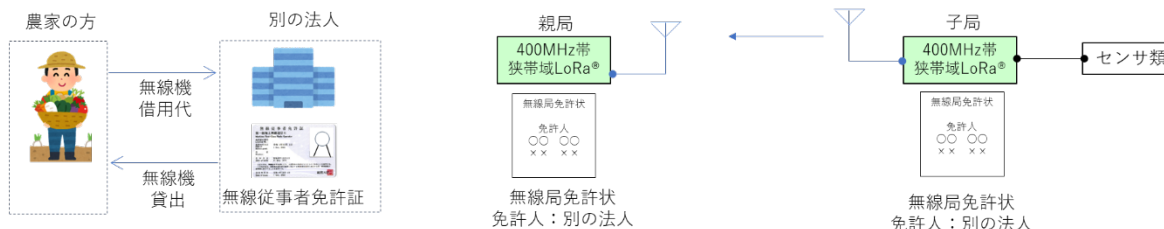
実現性 ○

➡ 現行の枠組み内で実現可能

例えば、水利組合や協議会などの団体が無線局免許を取得する場合。協議会の中に、無線の知識を持った個人や法人が参加すれば、ハードルが低くなる。

パターン 4. 免許局・農家の方とは別の法人等が無線局免許を取得

別の法人が無線機を農家の方へ貸し出し（レンタル）



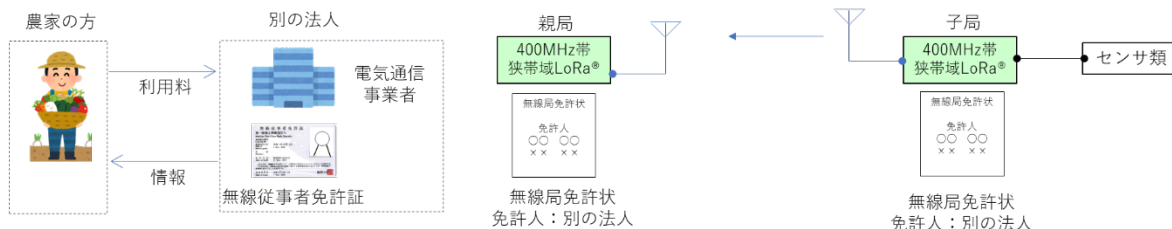
項目	内容
無線局免許	別の法人が取得
無線従事者免許	別の法人の方が取得
無線局の目的	一般業務用
電波利用料	別の法人が支払い
無線機	別の法人が購入
通信の相手方	別の法人所属の無線局に限る
電気通信事業	該当しない

実現性 ✗

➡ 無線局（免許局）を他人へ貸し出すことは不可のため

パターン 5. 免許局・農家の方とは別の法人等が無線局免許を取得

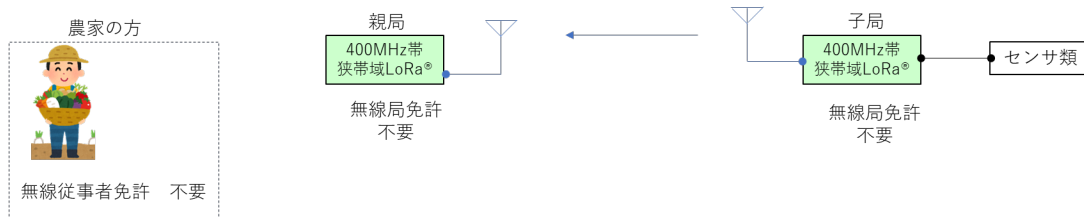
別の法人が農家の方へ情報提供を行う



項目	内容
無線局免許	別の法人が取得
無線従事者免許	別の法人の方が取得
無線局の目的	電気通信事業用
電波利用料	別の法人が支払い
無線機	別の法人または農家の方が購入
通信の相手方	別の法人所属の無線局に限る
電気通信事業	該当する

実現性 **×**
 400MHz帯は、電気通信事業用で使用できないため。

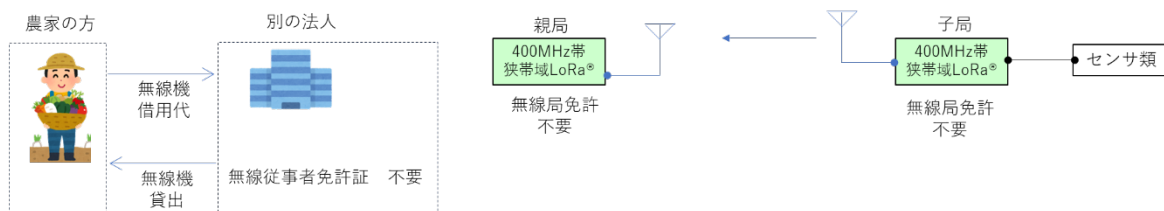
パターン 6. 400MHz 帯狭帯域 LoRa®を特定小電力無線局とした場合



項目	内容
無線局免許	不要
無線従事者免許	不要
無線局の目的	(特定小電力無線局)
電波利用料	不要
無線機	農家の方が購入
通信の相手方	制限なし
電気通信事業	該当しない

実現性 **×**
 すぐには実現できない
 400MHz帯狭帯域LoRa®を特定小電力無線局とすることは、直ちには実現できない。

パターン 7. 400MHz 帯狭帯域 LoRa®を特定小電力無線局とし、
別の法人が無線機を農家の方へ貸し出し（レンタル）



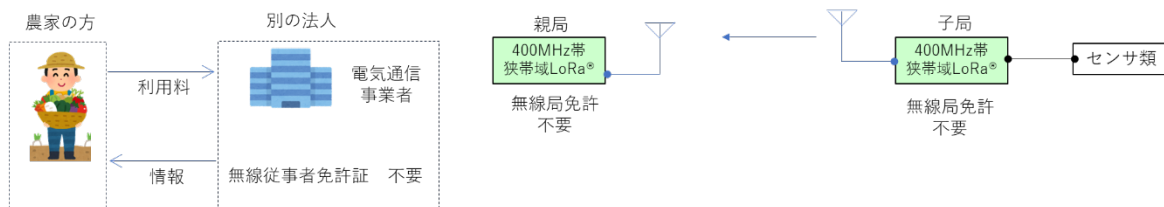
項目	内容
無線局免許	不要
無線従事者免許	不要
無線局の目的	(特定小電力無線局)
電波利用料	不要
無線機	別の法人が購入
通信の相手方	制限なし
電気通信事業	該当しない

実現性
すぐには実現できない



400MHz帯狭帯域LoRa®を特定小電力無線局とすることは、直ちには実現できない。

パターン 8. 400MHz 帯狭帯域 LoRa®を特定小電力無線局とし、
別の法人が農家の方へ情報提供を行う



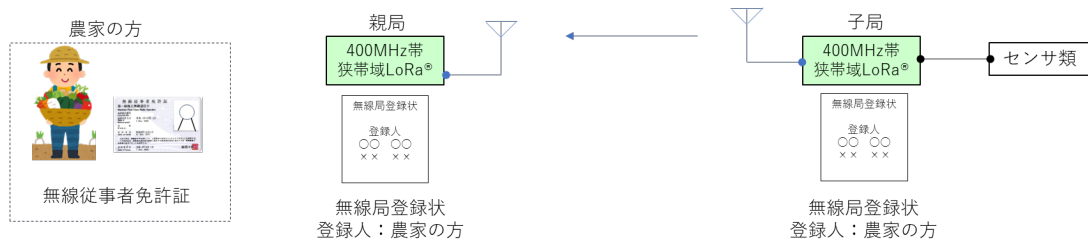
項目	内容
無線局免許	不要
無線従事者免許	不要
無線局の目的	(特定小電力無線局)
電波利用料	不要
無線機	別の法人または農家の方が購入
通信の相手方	制限なし
電気通信事業	該当する

実現性
すぐには実現できない



400MHz帯狭帯域LoRa®を特定小電力無線局とすることは、直ちには実現できない。

パターン 9. 400MHz 帯狭帯域 LoRa®を登録局とし、
農家の方が無線局登録を取得した場合

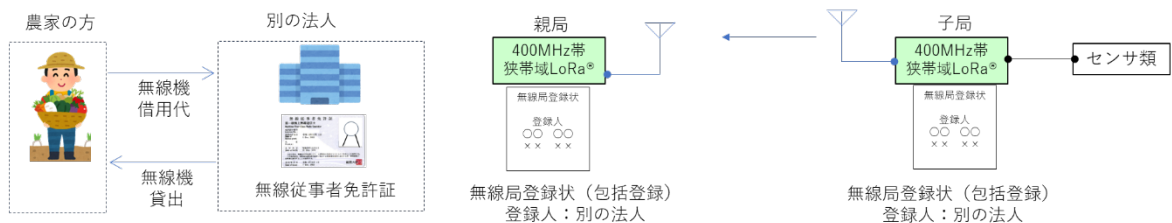


項目	内容
無線局免許	無線局登録を農家の方が取得
無線従事者免許	農家の方が取得
無線局の目的	一般業務用
電波利用料	農家の方が支払い
無線機	農家の方が購入
通信の相手方	制限なし
電気通信事業	該当しない

実現性
すぐには実現できない

400MHz帯狭帯域LoRa®を登録局とすることは、直ちには実現できない。

パターン 10. 400MHz 帯狭帯域 LoRa®を登録局とし、
別の法人が無線機を農家の方へ貸し出し (レンタル)

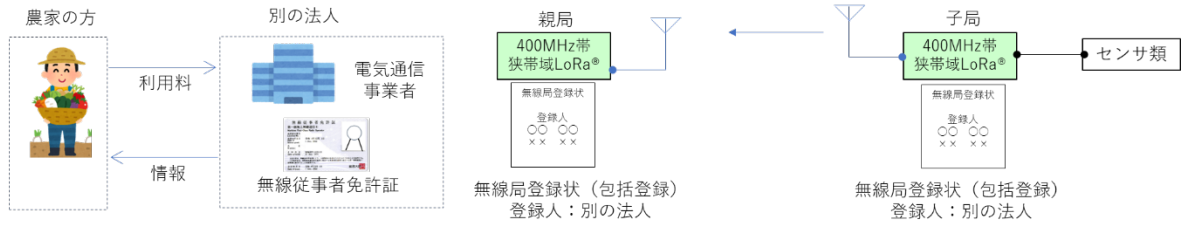


項目	内容
無線局免許	無線局登録を別の法人が取得
無線従事者免許	別の法人の方が取得
無線局の目的	一般業務用
電波利用料	別の法人が支払い
無線機	別の法人が購入
通信の相手方	制限なし
電気通信事業	該当しない

実現性
すぐには実現できない

400MHz帯狭帯域LoRa®を登録局とすることは、直ちには実現できない。包括登録局であればレンタル可能となる。

パターン 11. 400MHz 帯狭帯域 LoRa®を登録局とし、
別の法人が農家の方へ情報提供を行う



項目	内容
無線局免許	無線局登録を別の法人が取得
無線従事者免許	別の法人の方が取得
無線局の目的	電気通信事業用
電波利用料	別の法人が支払い
無線機	別の法人または農家の方が購入
通信の相手方	制限なし
電気通信事業	該当する

実現性 **×**
400MHz帯は、電気通信事業用で使用できないため。

参考資料 3 用語解説

用語	解説
拡散係数 SF	Spreading Factor LoRa®変調において、スリープの開始周波数と終了周波数を何通り設定するかを示している。拡散係数を大きくすると、周波数の変化スピードが遅くなり、感度は良くなるが、通信速度が遅くなる。
感度抑圧	受信機に高いレベルの電波が入力された場合、受信機の感度が低下する現象。
技術基準適合証明	小規模な無線局に使用するための無線設備であって、総務省令で定めるものについて行う、技術基準に適合していることの証明。
キャリアセンス	carrier sense 無線機が、送信の前に受信を行って他局から電波が送信されていないこと確認してから送信する機能。
キャリアセンスレベル	キャリアセンスを実施する際に、他局から電波が送信されていると判断する受信レベルのしきい値。
業務用無線	一般業務用を目的とする無線。150MHz 帯や 400MHz 帯が使用されている。電力会社、ガス会社、水道事業者、バス会社、新聞社などが使用する。
呼損率	通信回線使用時に、空き回線が無いため使用できなかった割合。
呼量	単位時間当たりの通信回線の占有量。単位は erl (アーラン)。単位時間あたりの回線の平均使用回数と回線の平均占有時間の積で表される。
相互変調	受信機に周波数が異なる複数の電波が入力された場合、無線機の非直線性から、入力された周波数と別の周波数の電波が発生する現象。発生した別の周波数の電波が受信周波数と合致した場合は、受信性能低下の原因となる。
特定小電力	免許不要無線局の一種であり、総務省で定める一定の条件を満たした無線設備であれば無線従事者資格も無線局免許も不要で使用できる。

用語	解説
無線モジュール	通信に必要な送信機や受信機、制御用装置を一つにまとめ小型化した電子部品。
リッジ	ridge 山の尾根、背 山によって電波が遮られることによって発生する損失をリッジ損失という。
ARIB STD	Association of Radio Industries and Businesses 一般社団法人 電波産業会にて制定された標準規格 ARIB STD-T67 特定小電力無線局 400MHz 帯及び 1,200MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備 ARIB STD-T98 デジタル簡易無線局の無線設備 ARIB STD-T108 920MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備
BER	Bit Error Rate 無線機間でデータのやり取りを行った際の成功率。受信に失敗したビット数÷送信したビット数にて求められる。
D/U	希望波 (Desire) と妨害波 (Undesire) のレベル比を示す。 干渉測定の場合、D/U が大きいと妨害波に弱く、D/U が小さいと妨害波に強いことを示す。
Duty	1 時間当たりの送信時間総和をパーセントで示した値。Duty10%であれば、1 時間当たり 360 秒送信可能となる。
FM	Frequency Modulation 周波数変調の略 音声など送りたい信号の振幅に応じて、周波数を変化させるアナログ変調方式。

用語	解説
LoRa®	ローラ Long Range の略 Semtech Corporation の登録商標 送信する電波の周波数を連続的に変化（スイープ）させながら通信を行う変調方式。送りたい情報に応じて、スイープの開始周波数と終了周波数を変化させている。高感度で雑音に強いいため長距離通信が可能。
PER	Packet Error Rate 無線機間でパケットのやり取りを行った際の成功率。受信に失敗したパケット数÷送信したパケット数にて求められる。
SINAD	Signal-to-Noise And Distortion ratio 受信機からの音声を評価する指標であり、信号電力＋雑音電力＋ひずみ成分電力と雑音電力＋歪み成分電力の比で表される。
4-FSK	4 値 FSK（Frequency Shift Keying 周波数偏移変調）の略。周波数を送りたい情報に応じて、あらかじめ定めた 4 つの周波数（f1,f2,f3,f4）に変化させるデジタル変調方式。
$\pi / 4$ シフト QPSK	$\pi / 4$ シフト Quadrature Phase Shift Keying の略。位相を送りたい情報に応じて、あらかじめ定めた角度に変化させるデジタル変調方式。隣り合うタイムスロットの位相差を $\pi / 4$ としている。

参考資料 4 参考資料

本報告書作成に当たっては、以下の参考資料を参照した。

電気通信技術審議会答申 400MHz 帯等を使用する業務用の陸上移動局等のデジタル・ナロー通信方式の技術的条件 平成 10 年 6 月

情報通信審議会情報通信技術分科会小電力システム委員会 小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件 平成 20 年 3 月

地域振興用周波数の有効利用のための技術的条件に関する調査検討会報告書 地域振興用周波数の有効利用のための技術的条件に関する調査検討会 平成 28 年 3 月

ARIB STD-T67 特定小電力無線局 400MHz 帯及び 1,200MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備

ARIB STD-T98 デジタル簡易無線局の無線設備

ARIB STD-T108 920MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備

電子情報通信学会 AP 研伝搬データベース 奥村一秦式

https://www.ieice.org/cs/ap/misc/denpan-db/prop_model_db/model_list/okumura-hata-formula/

電子情報通信学会 AP 研伝搬データベース 球面大地による回折

https://www.ieice.org/cs/ap/misc/denpan-db/prop_model_db/model_list/spherical_earth_diffraction/

特定小電力超長距離無線モデム Smart RF modem MLR-429 マニュアル

Version 2.0 Mar2020 株式会社 サーキットデザイン

特定小電力超長距離無線モデム Smart RF modem MLR-429 シリアル通信マニュアル

Version2.0 Mar 2020 株式会社 サーキットデザイン

NICT バーチャル展示室 https://www2.nict.go.jp/wireless/i_pac.html

端末間通信（技術解説） https://www2.nict.go.jp/wslab/pj_pac.html