

# ロボット農業の高度化のための 技術的条件等に係る調査検討

## 報 告 書

平成 30 年 3 月

ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会



## はじめに

近年、北海道の主要産業の一つである農業は、営農戸数の減少、就業者の高齢化による労働力不足が課題となっています。

このような課題の解決に向け、無人化によるロボット農業が注目されており、地域及び研究機関からは、ロボットトラクターの安全な自律走行の確保や、農作業の省力化・効率化を図るため各種データの自動観測・収集等をはじめとするロボット農業の高度化に適したシステムの構築について強い要望が寄せられているところです。

このようなことから、北海道総合通信局では、農業分野での利活用を見据え、400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波等を利用する RTK-GNSS システム等について、伝送距離と誤差精度、伝送方式、必要とするチャンネル数及び占有周波数帯幅等の必要な技術的条件やシステム構成に係る検討を行い、ロボット農業の高度化に適したシステム構成等について提言し、電波の有効利用の促進に資することを目的として「ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会」を設置しました。

本調査検討会では、ロボット農業の現状と課題を検討し、RTK-GNSS システム、ロボットトラクターの状態観測データ及び制御データの伝送、圃場の各種情報のデータ伝送、自営ブロードバンドの構築について具体的な検討を行うため各作業部会に分かれ、技術的検証に関し実証試験を含めた調査検討を行い、この度その成果を報告書として取りまとめたところです。

本報告書が、ロボット農業の高度化に適したシステム構築に大いに役立つことを期待いたします。

最後に、多忙な中、本調査検討会に参画いただきました委員各位、また、実証試験に携われたスタッフ各位、フィールド試験等にご協力いただいた関係各位に心より感謝申し上げます。

平成30年3月

「ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会」  
座長 北海道大学大学院農学研究院 ビークルロボティクス研究室  
准教授 岡本 博史

# 目次

<b>1. 調査検討の概要</b> .....	<b>1</b>
1.1 調査検討の背景と目的.....	1
1.2 調査検討項目.....	1
<b>2. ロボット農業の現状と課題</b> .....	<b>3</b>
<b>3. RTK-GNSS システム等におけるロボット農業の高度化に必要な技術的条件等</b> .....	<b>4</b>
3.1 400MHz 帯各種業務用データ専用デジタル波を利用する RTK-GNSS システム.....	4
3.1.1 衛星測位方式毎の精度の整理.....	4
3.1.2 RTK-GNSS を用いた車両位置情報補正技術における伝送距離と精度の検討....	10
3.1.3 RTK-GNSS 補正データ量の検討.....	19
3.1.4 RTK-GNSS 補正データの連続送信の必要性及び間欠送信の実現性の検討 .....	29
3.1.5 伝送方式、変調方式の検討.....	35
3.1.6 混信保護比、繰り返し距離等の検討.....	37
3.1.7 まとめ.....	42
3.2 ロボットトラクターの状態観測データの伝送.....	43
3.2.1 作業画像データ（アップリンク）の伝送検討.....	43
3.2.2 位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等データの伝送検討.	46
3.3 ロボットトラクターへの制御データの伝送.....	60
3.3.1 必要データ量と更新レートの検討.....	60
3.3.2 農家の自宅まで 10km を伝送する無線方式の検討.....	61
3.3.3 複数台利用での共用について.....	62
3.3.4 まとめ.....	62
3.4 圃場の各種情報データの伝送.....	63
3.4.1 必要なデータの種類、量、更新レートの検討.....	63
3.4.2 無線方式に関する検討.....	67
3.4.3 ネットワークシステム併用について.....	70
3.4.4 監視データ収集頻度の検討.....	71
3.4.5 圃場の各種情報データの伝送のまとめ.....	71
3.4.6 圃場の各種情報データの伝送の課題.....	73
3.5 自営ブロードバンドの構築について.....	74
3.5.1 スマート農業ネットワークのあり方について.....	74
3.5.2 スマート農業ネットワークの整備・運用のあり方について.....	74
<b>4. 技術的条件案の策定</b> .....	<b>76</b>
4.1 RTK-GNSS 位置情報補正データ伝送用無線機.....	76
4.1.1 一般的条件.....	76
4.1.2 無線設備の技術的条件.....	79

4.1.3 その他の技術的条件 .....	80
4.2 位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等データの伝送用無線機 .....	81
<b>5. 調査検討のまとめ .....</b>	<b>82</b>
<b>資料編 .....</b>	<b>84</b>
資料 1 ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会 開催趣旨 ....	84
資料 2 ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会 設置要領 ....	85
資料 3 ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会 委員構成 ....	87
資料 4 検討経過報告 .....	88

## 1. 調査検討の概要

### 1.1 調査検討の背景と目的

近年、北海道の主要産業の一つである農業は、営農戸数の減少、就業者の高齢化による労働力不足が課題となっている。

このような課題の解決に向け、無人化によるロボット農業が注目されており、地域及び研究機関からは、ロボットトラクターの安全な自律走行の確保や、農作業の省力化・効率化を図るため各種データの自動観測・収集等をはじめとするロボット農業の高度化に適したシステムの構築について強い要望が寄せられている。

このようなことから、本調査検討では、農業分野での利活用を見据え、400MHz 帯各種業務用データ専用デジタル波等を利用する RTK-GNSS システム等について、伝送距離と誤差精度、伝送方式、必要とするチャンネル数及び占有周波数帯幅等の必要な技術的条件やシステム構成について検討を行い、ロボット農業の高度化に適したシステムの構築について提言し、電波の有効利用の促進に資することを目的とする。

### 1.2 調査検討項目

次に掲げる項目について調査検討を行い、その結果を取りまとめた。

なお、本調査検討にあつては、北海道総合通信局で開催の「ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会」（以下、「調査検討会」という。）の意見等を踏まえて実施した。

#### (1) ロボット農業の現状と課題

#### (2) RTK-GNSS システム等におけるロボット農業の高度化に必要な技術的条件等

##### 1) 400MHz 帯各種業務用データ専用デジタル波を利用する RTK-GNSS システム

- 衛星測位方式毎の精度の整理（机上検討）
- RTK-GNSS を用いた車両位置情報補正技術における伝送距離と精度の検討（机上検討及び実証試験）
- RTK-GNSS 補正データ量の検討（机上検討及び実証試験）
- RTK-GNSS 補正データの連続送信の必要性及び間欠送信の実現性の検討（机上検討）
- 伝送方式、変調方式の検討（机上検討）
- 混信保護比、繰り返し距離等の検討（机上検討）

##### 2) ロボットトラクターの状態観測データの伝送

- 作業画像データ（アップリンク）の伝送検討（机上検討）
- 位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等データの伝送検討（机上検討及び実証試験）

### 3) ロボットトラクターへの制御データの伝送

- 必要データ量と更新レートの検討（机上検討）
- 農家の自宅からトラクターまで 10 km を伝送する無線方式の検討（机上検討）
- 複数台利用での共用検討（机上検討）

### 4) 圃場の各種情報データの伝送

- 必要データ量と更新レートの検討（机上検討）
- 農家の自宅から圃場まで 10km を伝送する無線方式の検討（机上検討）

### 5) 自営ブロードバンドの構築について

#### (3) ロボット農業の高度化に適したシステム構築の提言

#### (4) その他必要な事項

## 2. ロボット農業の現状と課題

農業分野においては、農業生産の深刻な労働力不足及び農業を基幹産業としている地方経済の疲弊と人口減、また農業大規模化への対応が喫緊の課題となっている。

このような課題の解決に向け、無人化によるロボット農業が注目されており、地域及び研究機関からは、ロボットトラクターの安全な自律走行の確保や、農作業の省力化・効率化を図るため各種データの自動観測・収集等をはじめとするロボット農業の高度化に適したシステムの構築について強い要望が寄せられおり、その実現において電波は重要な技術要素となっている。図 2-1 に当該分野における電波利用の概念図を示す。

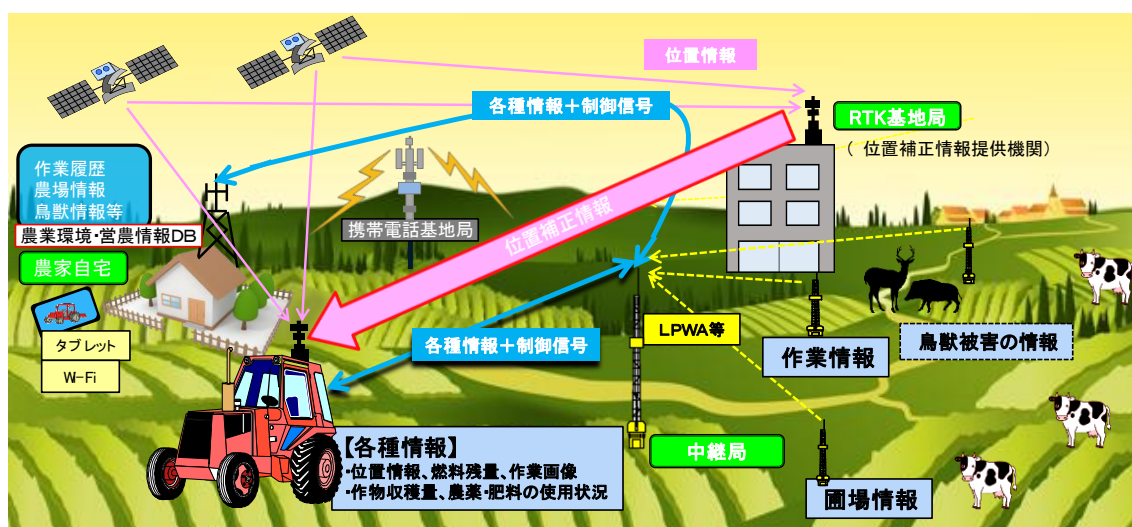


図 2-1 ロボット農業における電波利用

圃場側においては、GPS に代表される GNSS（全地球測位システム）による位置情報を用いたロボットトラクターの稼働とともに、農家等との間においては、センサーによるロボットトラクターの状態観測データ（燃料残量、農薬・肥料の使用量等）やロボットトラクターの制御データ、圃場の各種データの通信が想定される。

ロボット農業の進展は一般的に、現在の市場製品化または検証段階の「オートステアリングシステム」（人がトラクターに搭乗しての手放し運転支援）や「有人－無人協調作業システム」（人による圃場での安全性確保のもとでのロボットトラクター稼働）の段階から、作業能力の限界を打破しこれまでにない大規模・低コスト生産を実現するための「無人作業システム」による自動化に向け進んでいる。

このような進展のステップのもとで、まず位置情報については、今後の準天頂衛星の本格稼働も睨み、ロボット農業に必要な精度や更新頻度を満足する測位方式や通信方式の検証が求められる。また現在検証段階の「有人－無人協調作業システム」での通信は車同士で行われるため遠距離通信は求められないが、近い将来の「無人作業システム」による自動化に向けては、ロボットトラクターの状態観測データや制御データ、圃場データについて、圃場と農家間やビッグデータ分析のためのクラウド間で通信を行う必要があり、それらデータに求められる様々な通信要件を充足する通信方式やシステムの検証を、地域の圃場がキャリアサービスエリア外となりうる状況や経済性の観点とともに、進めていく必要がある。



### 3. RTK-GNSS システム等におけるロボット農業の高度化に必要な技術的条件等

#### 3.1 400MHz 帯各種業務用データ専用デジタル波を利用する RTK-GNSS システム

現状、農業トラクターの自動化運転やガイダンスにおける RTK-GNSS の位置補正情報の無線伝送は、無線機器の低廉化に有利な 4 値 FSK 方式を採用し、送信速度 4800bps で 400MHz 帯各種業務用無線局の周波数（352.0875～352.1125MHz 及び 352.2875～352.3125MHz の 6.25kHz 間隔の合計 10 波）を使用している。

谷合地域等ではトラクター側の可視衛星数が少なくなり、このトラクター側の可視衛星と対応するよう、基地局から衛星数に制限をかけず位置補正情報を送信する状況において、今後の準天頂衛星等の本格稼動による衛星数増加のもと、送信速度 4800bps では十分な位置補正情報が送れない状況にある。このような背景のもと、本調査検討では、送信速度を 2 倍の 9600bps にすることによる効果を検証した。

##### 3.1.1 衛星測位方式毎の精度の整理

まず始めに、民間レベルで利用できる衛星測位方式の仕様について整理することを目的として、図 3-1 に衛星測位方式の種類と精度の一覧を示すとともに、代表的な単独測位、単独搬送波位相測位、及び、本検討で対象とする RTK 測位についてその内容をまとめた。

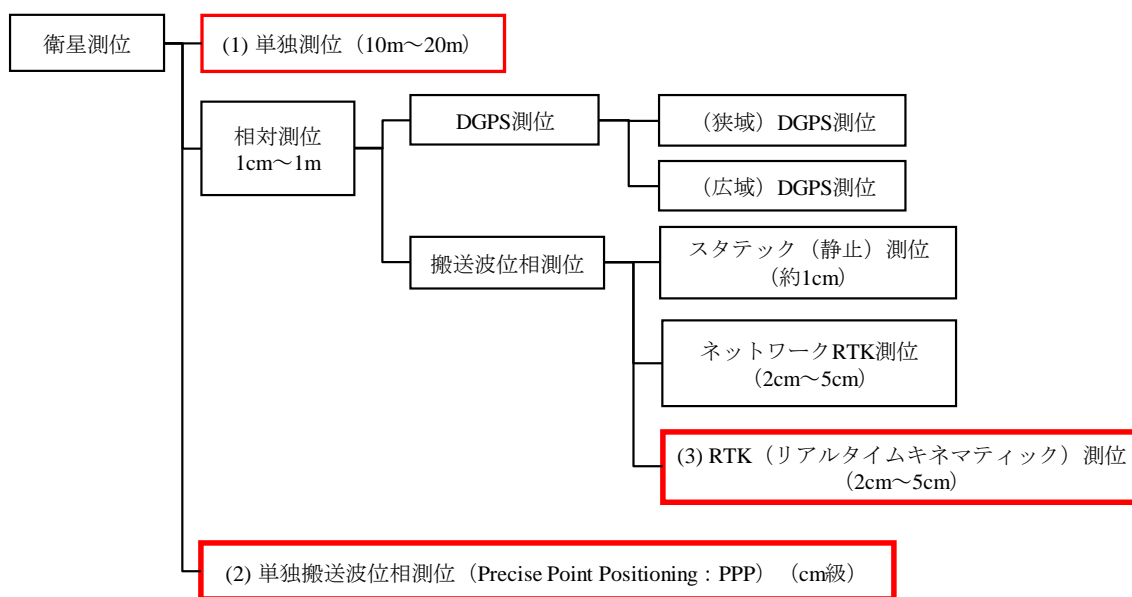


図 3-1 衛星測位方式の種類と精度

出所) 「GNSS の基本知識 (2016 年 7 月 29 日)」 (測位衛星技術株式会社) を参考に作成

## (1) 単独測位

単独測位のイメージを図 3-2 に示す。受信機 1 台により、GPS または GPS を含む GNSS 衛星を利用し、測位には最低 4 機の衛星を要する。

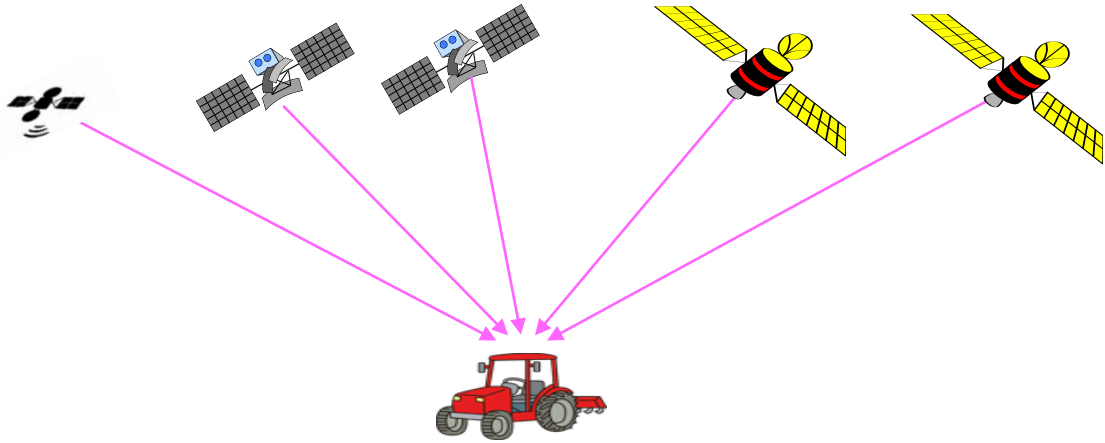


図 3-2 単独測位イメージ図

- ① GPS (Global Positioning System : 汎地球測位システム (米国) ) による単独測位  
L1 信号 : 1575.42MHz、民間用 C/A コード (1.023Mcps) が一般的に利用されている。  
米軍規定の単独測位誤差 : 水平方向 平均 13m 最大 36m
- ② GNSS (Global Navigation Satellite System : 全球測位衛星システム) による単独測位  
GNSS とは以下に示す衛星群の総称である。
  - ・ GPS (米国 : 衛星数 24 機 軌道傾斜角  $55^\circ$  )
  - ・ QZSS (Quasi-Zenith Satellite System : 準天頂衛星)  
(日本 : 衛星数 7 機 軌道傾斜角  $47^\circ$  )  
単独測位誤差 : 水平方向 平均 2.9m 最大 6.02m  
※L1-SAIF 信号対応受信機 : 水平方向 平均 0.58m 最大 1.56m
  - ・ GLONASS (ロシア : 衛星数 24 機 軌道傾斜角  $64.8^\circ$  )  
単独測位誤差 : 水平方向 10m~22m
  - ・ Galileo (EU : 衛星数 30 機 軌道傾斜角  $56^\circ$  )  
単独測位誤差 : 水平方向 約 10m
  - ・ BeiDou (中国 : 衛星数 20 機 軌道傾斜角  $56^\circ$  )  
単独測位誤差 : 水平方向 約 25m

## (2) 単独搬送波位相測位

受信機 1 台により 2 周波を受信することで測位する方式である。

- ① GPS : L1 信号 (1575.42MHz) / L2 信号 (1227.60MHz) : 水平誤差約 20cm  
電離層による電波遅延誤差を異なる周波数を用いることで補正する方式である。  
GPS による 2 周波単独搬送波位相測位のイメージを図 3-3 に示す。

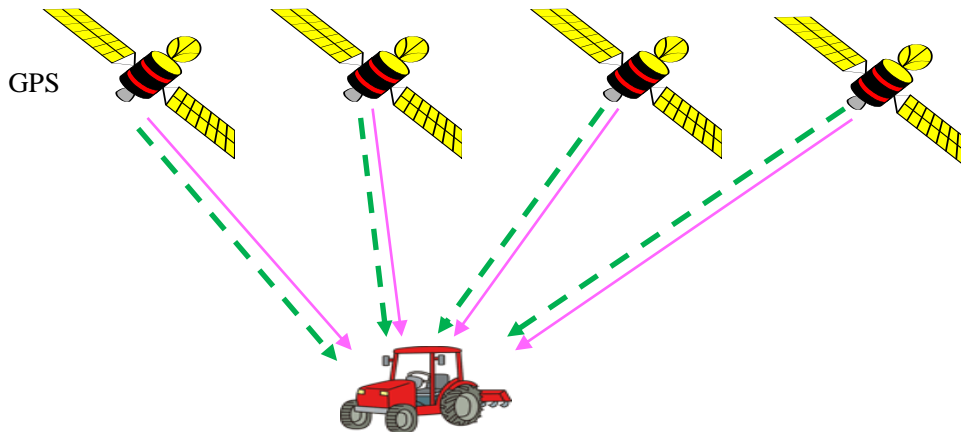


図 3-3 GPS による 2 周波単独搬送波位相測位イメージ図

※2009 年より L5 信号（1176.45MHz）が運用され、高精度化や高速初期化が特徴となっている。

② QZSS : L1（1575.42MHz）／L6 LEX 信号（1278.75MHz）：水平誤差約 12 cm 測位補強信号により位置補正を行う方式である。

QZSS による 2 周波単独搬送波位相測位のイメージを図 3-4 に示す。

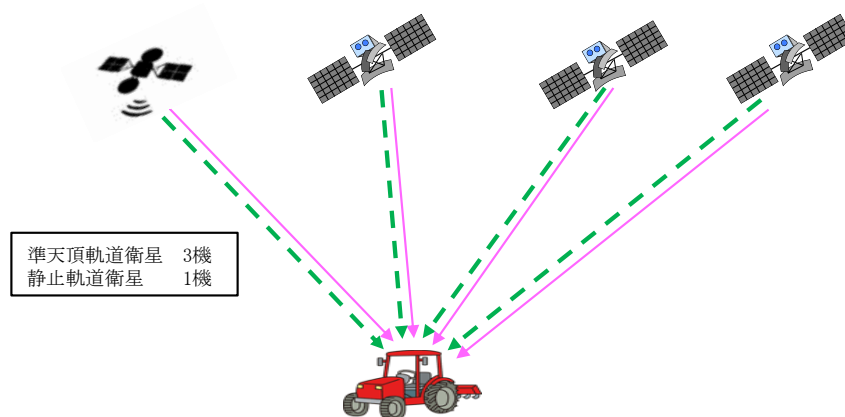


図 3-4 QZSS による 2 周波単独搬送波位相測位イメージ図

公表されているみちびき衛星によるセンチメートル級精度は、水平方向で、静止時 6cm 以下、移動時 12cm 以下とされており<sup>1</sup>、今後利用が開始される測位補強信号（L6）の活用によりどの程度の精度が確保され、ロボット農業に適用可能かを検討していくことが必要である。加えて、地域によっては地盤自体が年数センチ動いていることから、地殻変動等の地域特有の補正が必要な場合は RTK との併用が必要と考えられる。

<sup>1</sup> 内閣府「みちびき（準天頂衛星システム：QZSS）公式サイト」より  
センチメートル級測位補強サービス（CLAS：Centimeter Level Augmentation Service）の精度は 5 機以上の可視衛星による仰角マスクを 15 度とした場合。

参考：QZSS について

ビルの谷間や林間でも受信しやすいように、高い仰角で航行する「8の字軌道」になっており、仰角  $40^\circ$  以上の滞留時間が8時間あることより、3衛星あれば、24時間基準局として稼働することができる。図 3-5 に QZSS の軌道を示す。

GPS と同一の信号である、L1C や、L2、L5 も送信しつつ、1278.75MHz で、日本独自の L6 (LEX) 信号による補強信号も送信することで高い測位精度が実現可能となる。

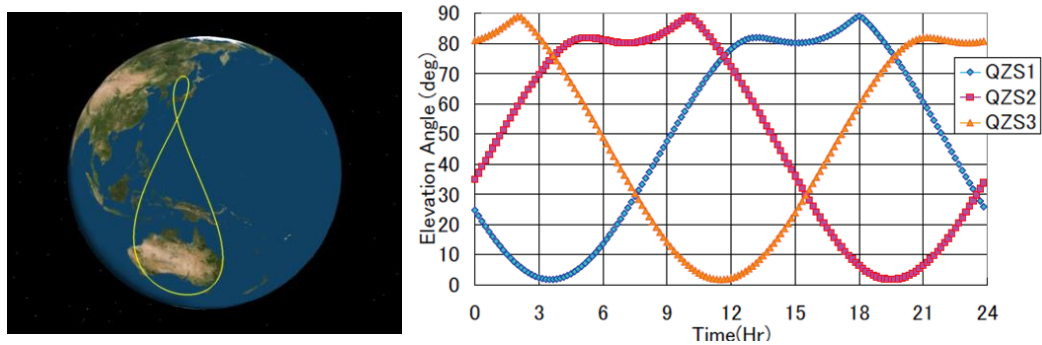


図 3-5 QZSS の軌道

出所) 「準天頂衛星による高精度測位システムの紹介」三菱電機技法 Vol26、「高精度測位技術の応用について」宇宙航空研究開発機構 第13回クリティカルソフトウェアワークショップ (2016年1月21日)

(3) RTK (リアルタイムキネマティック) 測位

RTK (リアルタイムキネマティック) 測位のイメージを図 3-6 に示す。

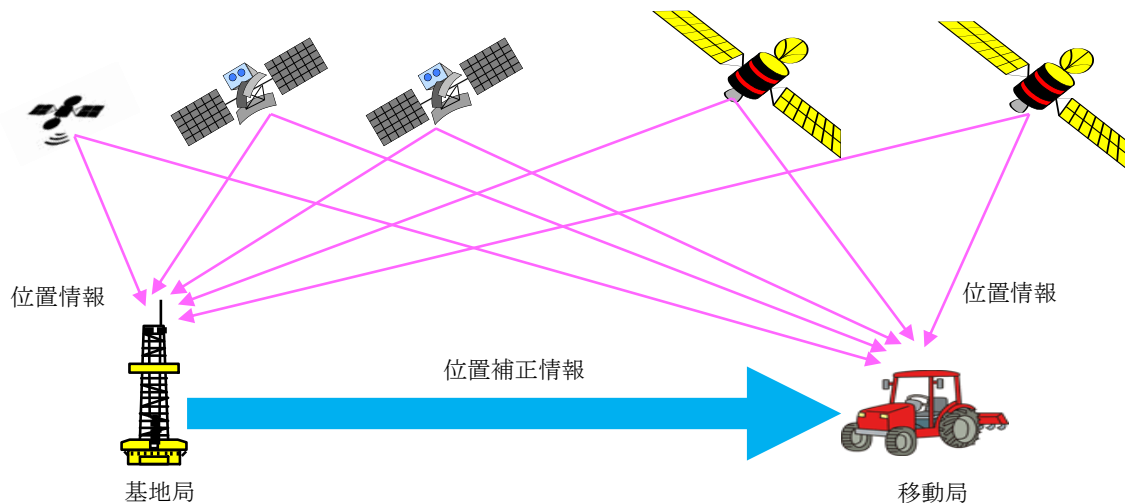


図 3-6 RTK (リアルタイムキネマティック) 測位イメージ図

※各衛星から来る搬送波位相を基地局・移動局それぞれの受信機が同時に観測し、基地局が位置補正情報を移動局に送り、移動局側で演算処理することで高精度の位置を算出する方式。

RTK 測位では、(基準となる) 基地局、移動局それぞれの受信機において、各衛星から来る搬送波位相を測定する。位相は受信機内で搬送波のレプリカを発生させ比較することで特定し、その位相間に幾つの波数 (整数値バイアス) があるかを収束計算により決定する。

整数値バイアスの決定はまず始めに推測値を求め、それを収束させていく手順で行われる。始めの推測値は単独測位受信機 2 台を使用したディファレンシャル測位値より求められ、その解を起点として候補範囲を推測し収束させていく。整数値バイアスが決定すると 2cm CEP (又は RMS)<sup>2</sup>以下の位置精度となる。整数値バイアスが決定するまでの解を FLOAT 解 (推測解) と呼び、その精度は 20cm CEP (又は RMS) である。そこから収束して FIX 解 (収束解) が決まると精度は 2cm CEP (又は RMS) 以下となる。

なお、RTK 測位における L1 一周波を使用する場合と、L1,L2,L5 複数波を使用する場合の違いは、移動局側での収束解までの時間が数秒と速いこと、及び、精度が一周波の場合の 1/3 以下と高精度であることが挙げられる。

#### 参考：測位衛星に関する GPS 利用と GNSS 利用について

GPS は、6 つの軌道面に各々 4 機配置の合計 24 機の測位衛星と予備の測位衛星で、現在 31 機の測位衛星が地球を周回しているが、元々が米軍用であることから日本上空で最適配置とはなっておらず、時間帯によっては日本上空で可視測位衛星数が減少し、測位精度に影響する場合がある。さらに、高層ビル、高架、歩道橋、樹木等、測位衛星との見通しを遮蔽する建造物が多くある都市部では測位率は著しく劣化し、北海道においても、山の斜面、丘陵地帯の谷間、防風林などにより測位率が劣化する。

以下に、GPS と GNSS の日本上空における可視衛星数の比較について、千葉県内の開放地 (グラウンド) における試行測定結果 (双葉電子工業株式会社より提供) を示す。

- ・ 測定の試験系統： (図 3-7 参照)
- ・ 測定場所：千葉県長生郡長生村 (緯度 35.412849, 経度 140.325081) (図 3-8 参照)
- ・ 測定日時：2015 年 12 月 2 日 13:30 頃
- ・ 測定手順：測位アンテナを上空に向けて置きアンテナと測定者は約 1.5m 離れて測定。



図 3-7 GPS または GNSS との試験系統図

<sup>2</sup> CEP (Circular Error Probability) は 50% 誤差円半径、RMS (Root Mean Square) は 63~68% 誤差円半径を示す。平均位置を中心に半径 CEP (または RMS) の円を描けば、その円の内側に全測位点の 50% (または 63~68%) が含まれる。



図 3-8 測定場所（千葉県長生郡長生村）

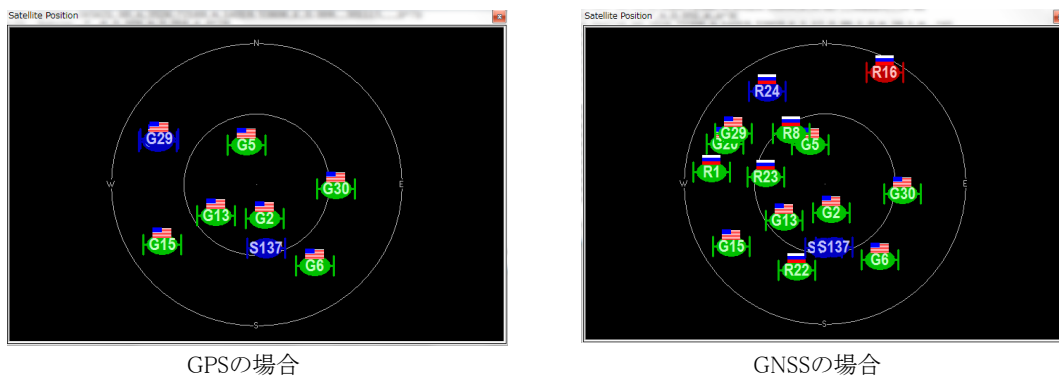


図 3-9 測定結果：GPS と GNSS の可視衛星数の比較

測定結果（図 3-9）より、GNSS における可視衛星数は GPS 衛星に比べておよそ 2 倍となっている。RTK 方式による補正では、衛星数が諸障害で 4 機以下となると誤差が急激に増大し、測位は可視衛星数が多い方が安定する。測位衛星に関する GPS の利用と比べて GNSS の利用は、遮蔽の度合いが大きい地域においてもより多くの衛星信号を受信でき測位成功率が向上することから、より高い位置精度の実現が期待される。一方で、3.1 の冒頭で言及の通り、基地局から衛星数に制限をかけず位置補正情報を送信する状況等においては、今後の準天頂衛星等の本格稼動による衛星数増加のもと、現行の送信速度（4800bps）では十分な位置補正情報が送れない状況にあることから、本調査検討では送信速度向上による効果を検証した。次項以降にその結果を示す。

### 3.1.2 RTK-GNSS を用いた車両位置情報補正技術における伝送距離と精度の検討

農業トラクターの自動化運転やガイダンスにおける RTK-GNSS の位置補正情報の無線伝送について、送信速度を現行の 4800bps から 9600bps に上げ、伝送距離と精度（FIX 解への収束）を確認することで、送信速度向上による効果の検証を行う。

#### (1) 机上検討

RTK-GNSS を用いた車両位置情報補正による伝送距離と精度の検証方法を検討した。

機器メーカーにおけるフィールドでの通常の計測方法では、基準点からの相対移動距離と測量用レーザ計測値の比較で精度を計測しているが、今回対象とする広範な移動（10km 程度範囲）における誤差計測にはこの通常の計測方法は使えないため、機器メーカーとも確認し、実証試験で使用する RTK-GNSS 機器であるニコン・トリンプル、Ublox 双方の機器ともに推定誤差をデータ記録できることより、測定地域を車（移動局）で移動し、各測定地点における測位より求められる基地局からの移動距離とその地点での推定誤差をデータ記録することとした。

実証試験のイメージを図 3-10 に示す。また、主な機器メーカーの基地局と移動局間の距離による水平誤差例を表 3-1 に示す。

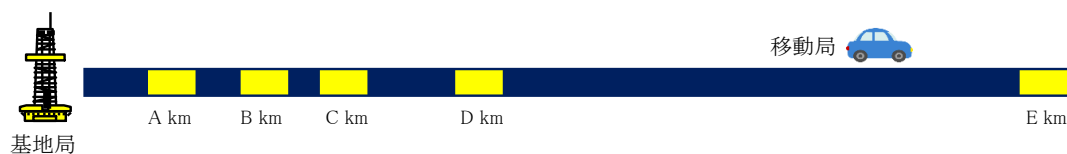


図 3-10 実証試験イメージ図

表 3-1 主なメーカーの基地局と移動局間の距離による水平誤差例（mm）

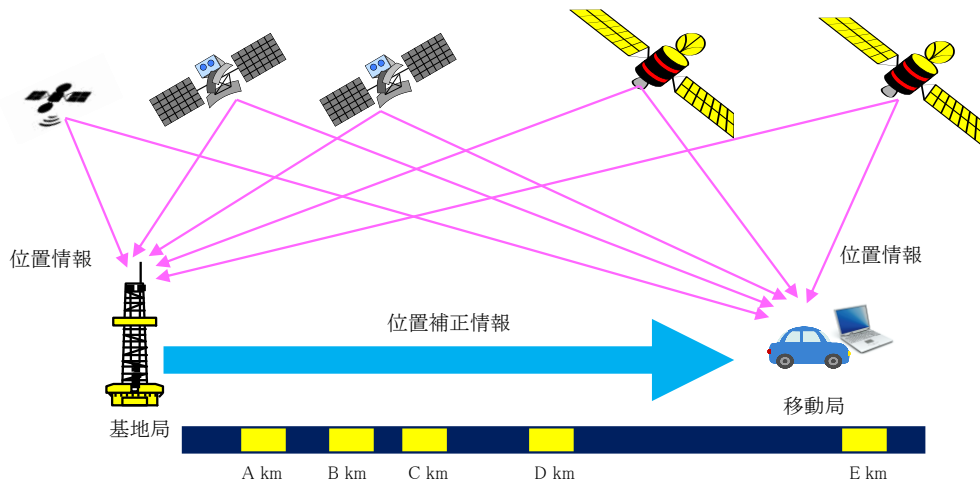
メーカー（方式）	推定誤差／距離(m)	100	1000	5000	10000
ニコン・トリンプル (3 周波方式)	誤差 8mm+距離×1ppm (mm) RSM (67%)	8.1	9.0	13.0	18.0
Ublox (1 周波方式)	誤差 25mm+距離×1ppm (mm) CEP (50%)	25.1	26.0	30.0	35.0
マゼラン (1 周波方式)	誤差 5mm+距離×1ppm (mm) RSM (67%)	5.1	6.0	10.0	—
ヘミスフィア (2 周波方式)	誤差 10mm+距離×1ppm (mm) RSM (67%)	10.1	11.0	15.0	20.0

出所) 下記を参照し作成

- 「SPS855 GNSS Modular Receiver DATASHEET」 (ニコン・トリンプル) 、
- 「NEO-M8P\_DataSheet\_ (UBX-15016656) r06」 (Ublox) 、
- 「L1 Multi GNSS RTK モジュール (P/N: MJ-2001-GL1)」 (マゼラン) 、
- 「R330 受信機 取扱説明書 Rev.B」 (ヘミスフィア)

## (2) 実証試験

農業トラクターの自動化運転やガイダンスにおける RTK-GNSS の位置補正情報の無線伝送について、送信速度を現行の 4800bps から 9600bps に上げ、伝送距離と精度（FIX 解への収束）を確認することで、送信速度向上による効果の検証を行った。実証試験のイメージを図 3-11 に示す。



※移動局側において位置精度の収束状況（FIX 解への収束）をモニタリングすることで検証を行う。

図 3-11 実証試験イメージ図

実証試験の系統図を図 3-12 に示す。

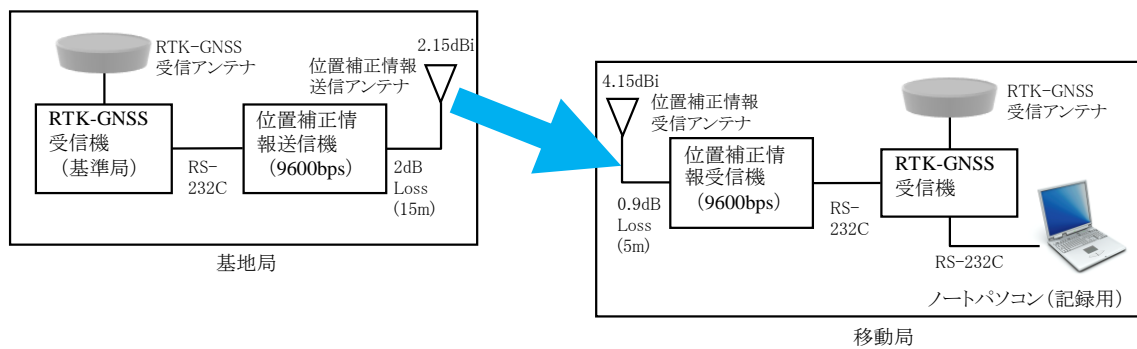


図 3-12 実証試験系統図

実験試験局である位置補正情報送信機の仕様を表 3-2 に示す。

表 3-2 実験試験局仕様

電波の型式	周波数	空中線電力	送信速度	実効レート
8K30 F1D	367.6125MHz	5W/2W	9600bps	3400bps

※実験試験局無線機は音声データの遅延を短くするために 1 パケット 40ms と短く設定されているため、符号化率約 35%となっている。



RTK-GNSS 受信機の RTK に係わる仕様を以下に示す。

● RTK 仕様 (ニコン・トリンプル)

型式 : SPS855  
捕捉衛星 : 3 周波方式  
GPSL1/L2/L2C/L5, GLONASSL1/L2C/A, Galileo, Beidou, QZSS  
RTK 精度 : 8mm+1ppm (5km : 13mm 10km : 18mm)  
補正データフォーマット : CMR, CMR+, CMRx, RTCM2.x, RTCM3.2  
今回のデータ : CMRx 400B/秒 (3200bps) として  
実験試験局実効レート以下に設定する。

※トラクターのガイダンスシステムや自動運転等に多く使用されている製品であることから選定した。

● RTK 仕様 (Ublox)

型式 : M8P  
捕捉衛星 : 1 周波方式 GPSL1, GLONASSL1, Galileo, Beidou, QZSS  
RTK 精度 : 25mm+1ppm (5km : 30mm 10km : 35mm)  
補正データフォーマット : RTCM3.2  
今回のデータ : RTCM3.2 MSM4 (2726bps) として  
実験試験局実効レート以下に設定する

※小型デバイスとして商品化されたもので基礎データが取れることから比較用として選定した。

【試験手順】

実験試験局 (送信速度を 9600bps とした 400MHz 帯各種業務用データ専用デジタル無線局の) より位置補正情報 (RTK-GNSS 補正データ) を送り、対象地域を車で 40km/h で移動しながら各測定地点では 10km/h 以下の低速走行又は停車して FIX 解への収束状況を測定した。基地局・移動局における設定を以下に示す。

① 基地局

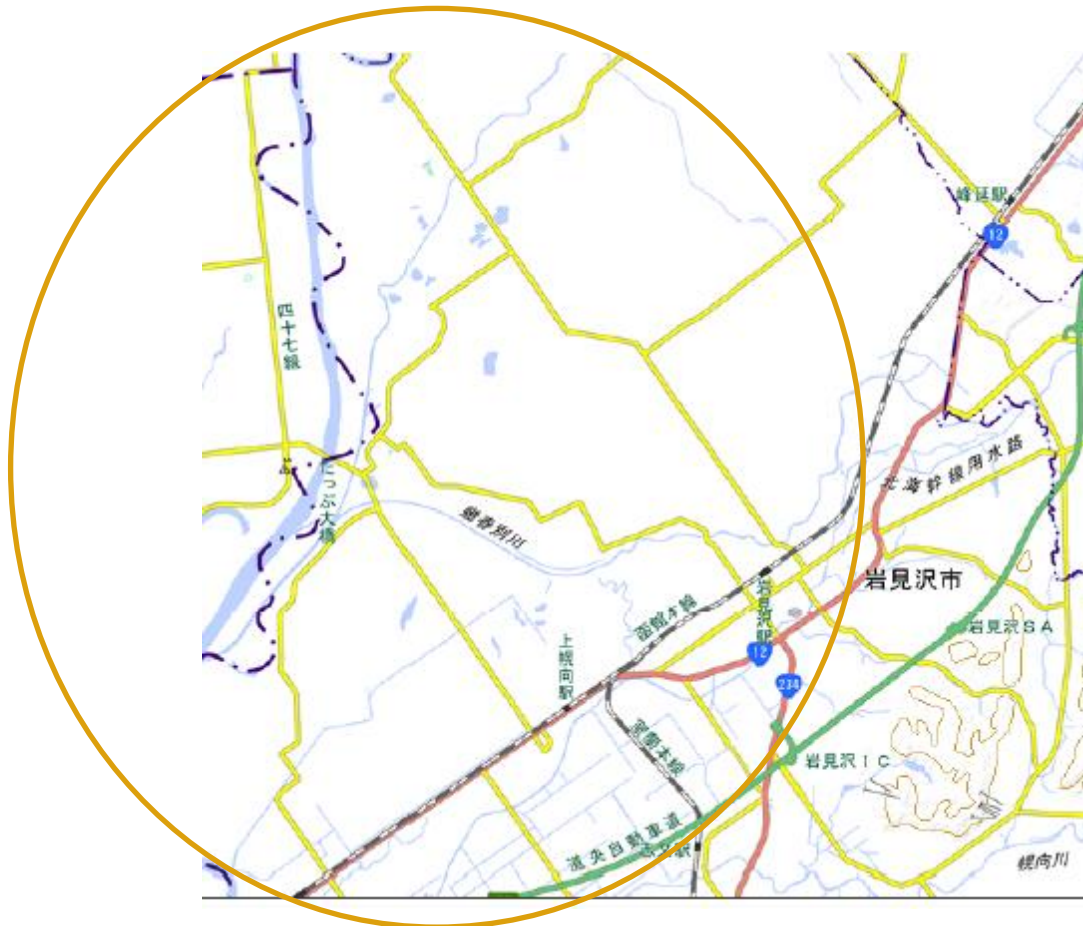
- 位置補正情報送信アンテナを地上高約 12m で設営する。
- RTK-GNSS 受信アンテナは上空に向け地上高約 13m で設置する。
- RTK-GNSS 受信機に仮想基準座標を PC で入力する。

② 移動局

- 自動車の上に RTK-GNSS 受信アンテナ、位置補正情報受信アンテナを地上高約 2m で固定する。

### 【実証試験場所】

実証試験の時期が真冬であるため、建造物や起伏が少ない広大なエリアで、除雪が行われる地域であることと調査検討会委員の協力が得られることから、試験場所として岩見沢市を選択した（基地局として北村支所を設定）。実証試験場所を図 3-13 に示す。



出所) 国土地理院地図

図 3-13 実証試験場所（岩見沢市郊外：北西部）

### 【実証試験機材】

実証試験に用いた機材の一覧を以下に示す。

- 基地局側
- ① RTK-GNSS 受信機（基準局） 1 台
- ② 位置補正情報送信機（2W/5W：実験試験局） 1 台
- ③ RTK-GNSS 受信アンテナ（基準局用） 1 本
- ④ 位置補正情報送信アンテナ（実験試験局） 1 本
- ⑤ その他電源・ケーブル類等 1 式

- 移動局側
- ① RTK-GNSS 受信機 1 台
- ② 位置補正情報受信機 1 台
- ③ RTK-GNSS 受信アンテナ 1 本
- ④ 位置補正情報受信アンテナ 1 本
- ⑤ ノートパソコン（記録用） 1 台
- ⑥ その他電源・ケーブル類 1 式
- ⑦ 自動車 1 台

【実証試験機材写真】

基地局側、移動局側それぞれの機材の設置状況を図 3-14～図 3-17 に示す。



図 3-14 基地局機材



図 3-15 基地局機材（アンテナ設置状況）



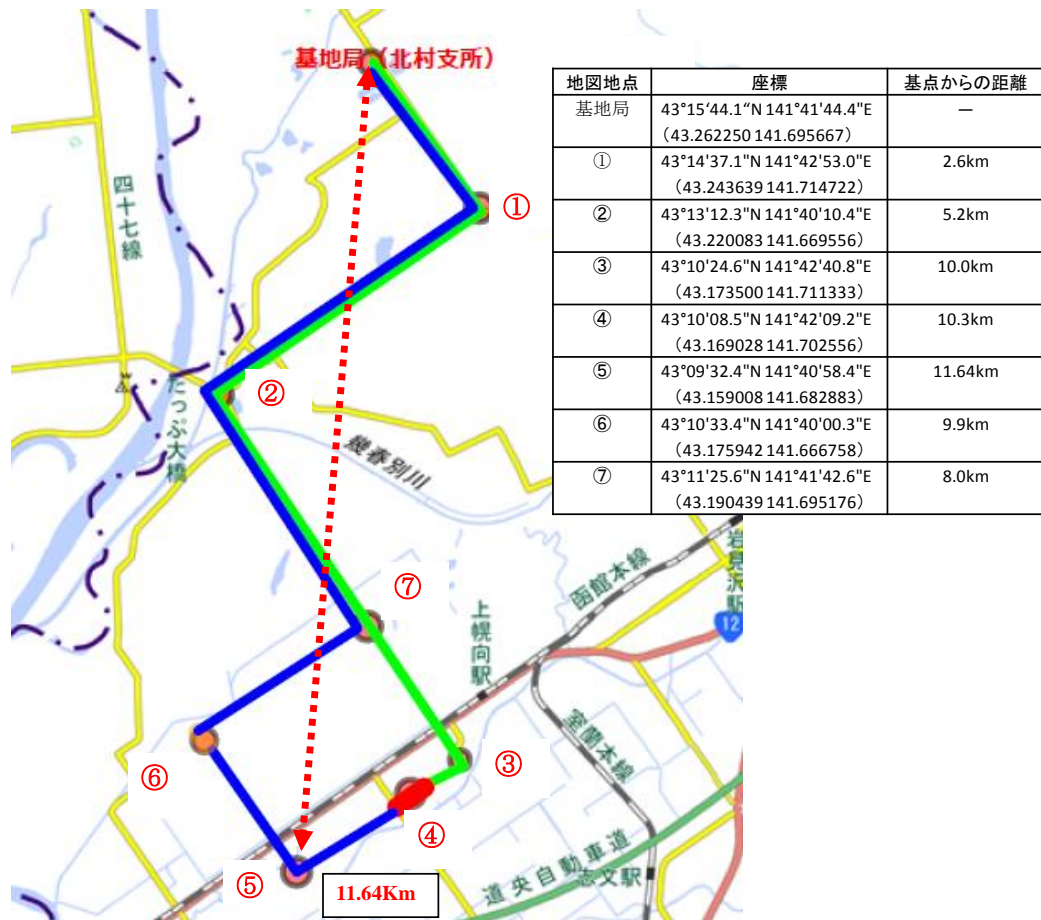
図 3-16 移動局機材



図 3-17 移動局機材（アンテナ設置状況：地上高約 2m）

【測定結果】

対象地域及び各測定地点における測定結果を図 3-18 及び表 3-3 に、また測定結果データのサンプルを表 3-4 に示す。



出所) 国土地理院地図 測定地域は海拔 9m~18m とほぼ平坦な地域である。

図 3-18 測定地点

表 3-3 測定結果 (ニコン・トリンプル SPS855)

経路	基地局出力	RTK 精度	周囲環境
緑線 <span style="color: green;">■</span>	2W	FIX 解 : 18mm 以下	見通し良好
④地点 (赤線 <span style="color: red;">■</span> )	2W	FLOAT 解 : 20cm 以下	ソーラ発電パネル横
④地点 (赤線 <span style="color: red;">■</span> )	5W	FIX 解 : 18mm 以下 基地局送信出力を 5 W にすることで FIX 解となった。	ソーラ発電パネル横
青線 <span style="color: blue;">■</span>	5W	FIX 解 : 18mm 以下	見通し良好
⑤地点 (青線 <span style="color: blue;">■</span> )	5W	FIX 解 : 18mm 以下	基地局より 11.64Km 点
⑥地点 (橙線 <span style="color: orange;">■</span> )	5W	FLOAT 解 : 20cm 以下	見通しは良いが通信路に送電線があった。

表 3-4 測定データ

PCの時計	協定世界時間	緯度	経度	位置特定品質	使用衛星数	水平精度低下率	海拔高	ジオイド高	データ更新時間
		ddmm.mmmm	dddmm.mmmm						
14:09:23.014	050923.00	4315.71387293	14141.73462882	4	13	0.8	10.725	32.393	2
14:09:24.013	050924.00	4315.71387252	14141.73463033	4	13	0.8	10.722	32.393	2
14:09:25.027	050925.00	4315.71387338	14141.73462861	4	13	0.8	10.722	32.393	2
14:09:26.025	050926.00	4315.71387289	14141.73462987	4	13	0.8	10.72	32.393	2
14:09:27.024	050927.00	4315.71387618	14141.73463065	4	13	0.8	10.735	32.393	2
14:09:28.022	050928.00	4315.71387717	14141.73462993	4	13	0.8	10.737	32.393	2
14:09:29.020	050929.00	4315.71387232	14141.73462762	4	13	0.8	10.753	32.393	2
14:09:30.019	050930.00	4315.71387266	14141.73462947	4	13	0.8	10.747	32.393	2
14:09:31.017	050931.00	4315.71387256	14141.73462443	4	13	0.8	10.746	32.393	2
14:38:57.018	053857.00	4310.15825120	14142.18782369	5	13	0.9	9.294	32.537	62.0
14:38:58.001	053858.00	4310.15523689	14142.18193751	5	13	0.9	9.326	32.537	63.0
14:38:58.999	053859.00	4310.15235481	14142.17626454	5	13	0.9	9.349	32.537	64.0
14:39:00.013	053900.00	4310.14957493	14142.17082365	5	13	0.9	9.350	32.538	65.0

※精度評価：位置特定品質 4：FIX 解 2 cm以下 5：FLOAT 解 20cm 以下

※無線品質：データ更新時間は通常 2 秒であり、この数値が 2 秒以上となると正しく受信できず、無線通信エラーが発生していることとなる。

④地点では基地局の送信出力を 2W から 5W にすることで FIX 解に収束した。また、⑥地点では 5W でも FLOAT 解であったが 10m 程度移動すると FIX 解に収束し、マルチパス環境の影響によるものと考えられる。

(参考) Ublox : M8P での測定について

計測開始時点から FLOAT 解のままで FIX 解に収束しなかった。

M8P を有線接続して FIX 解となる衛星数を確認すると捕捉衛星情報が 9 衛星必要であった。更に安定させるために実験設定は 1 衛星追加し 10 衛星でおこなったが、通信データ量は 2726bps を要した。無線機の実効レートが 3400bps であるため、データのオーバーフローは起きていないと考えられるが、FIX 解に収束しないことから、データ欠落が発生していると考えられる。無線機は送信する際にデータを分割して送信していることから、補正データとしてうまく再構成されておらず、そのため FIX 解に収束しないことが考えられる（ニコン・トリプル SPS855 は無線機が送信時にデータを分割しても、移動局側で再構成する機能を有する）。

**【考察】**

ニコン・トリプル SPS855 は測量・農業用に設計されていることもあり精度と補完などが最適化されていることから、広範囲での RTK 測位が可能となった。また復路において時速 40km で移動しても安定して FIX 解が計測された。基地局無線機の 1 パケット送信時間が 40ms となっており、365MHz 帯で時速 40km のフェージングピッチ（マルチパスの間隔）は 74ms であり 1 パケット内のフェージングディップの落ち込み頻度が下がるため、データ欠損発生が低減していると考えられる。送信速度を 2 倍の 9600bps に上げたことにより、付随効果として、フェージング耐性の向上が認められたといえる。

但し、現在の、Galileo が利用できない状況、また、QZSS も 2 衛星（完全配備ではない）であり、今後全ての衛星を利用する 3 周波の方式の場合には 500byte/秒以上が必要となり、最低でも実効レート 4000bps は必要であることから、送信速度 9600bps の無線機では数年後

対応できなくなる可能性がある。また、他の RTK-GNSS システムを利用するにも無線通信速度が障壁となってくることから、さらなる高速化が求められるものと考えられる。

なお、現行の 4 値 FSK 4800bps に対して、今回は 4 値 FSK 9600bps とデータが 2 倍になり、受信帯域幅も 2 倍となったことから、受信感度は 3dB 悪化することになる。現行無線システムと同等の通信エリアを確保するためには、アンテナ高を 10m から 15m にすることで可能である。一方、RTK-GNSS アンテナの設置安定性のためには設備の大型化を要することから、送信電力を 2W から 4W に増やし伝搬損をアンテナ高を高くした場合と同等とすることが効果的であるが、汎用無線機器を有効に利活用する観点から、標準的な 5W とすることが望ましい。なお、送信出力については他の同一周波数基地局との干渉や将来の基地局配置を考慮して決定することが適当である。

### 3.1.3 RTK-GNSS 補正データ量の検討

RTK のプロトコルにおける多種のパラメータの設定による、位置補正情報のデータ量と位置精度への影響を検証する。

#### (1) 机上検討

RTK-GNSS 補正データ量の検証方法を検討した。

RTK-GNSS 機器には Ublox の M8P 評価キットを用い、機器メーカーとも確認し、3.1.2 と同様に、測定地域を車（移動局）で移動し、測定地点（基地局から 0.1km 地点）における測位より求められる基地局からの移動距離とその地点での推定誤差をデータ記録することとした。また、パラメータ変更により位置補正情報のデータ量の変動することより、位置補正情報の送受信無線機として、送信速度の大きい 920MHz 特定小電力無線機を用いることとした。実証試験のイメージを図 3-19 に示す。



図 3-19 実証試験イメージ図



## (2) 実証試験

実証試験の系統図を図 3-20 に、また RTK-GNSS 受信機として用いた Ublox M8P 評価キットを図 3-21 に示す。

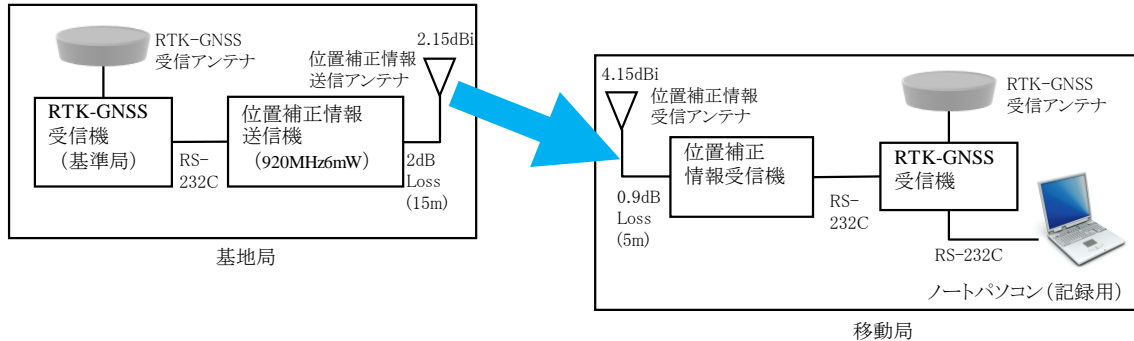


図 3-20 実験試験系統図

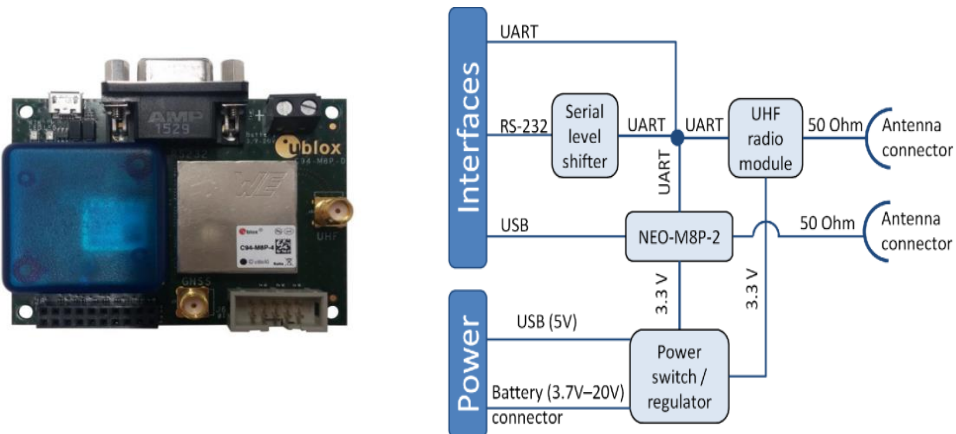


図 3-21 Ublox M8P 評価キット (基地局・移動局とも同じものを用いる)

出所) 「C94-M8P u-blox RTK Application Board Package User Guide」

Ublox M8P 評価キットの RTK に係わる仕様、及び、920MHz 特定小電力無線機の諸元を以下に示す。

### 【RTK 仕様】 Ublox M8P 評価キット

RTK 出力	:RTCM3.2 フォーマット 19.2kbps (有線)
利用衛星	:GPS, GLONASS
周波数	: L1 GPS(1575.42MHz), GLONASS (1598.062515~1605.375MHz)
コード	: C/A コード (1.023Mcps)

【無線機諸元】 920MHz 特定小電力無線局

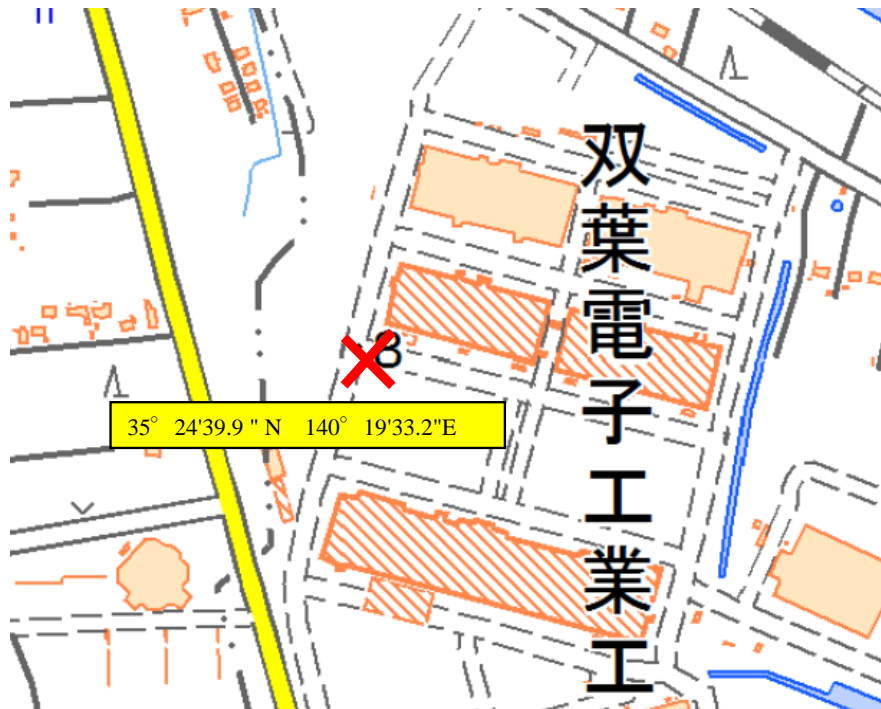
利用周波数 : 922.8~923.2MHz  
送信速度 : 48kbps  
空中線電力 : 6mW

【実証試験場所】

実証試験場所（千葉県長生郡長生村双葉電子構内）を図 3-22 及び図 3-23 に示す。



図 3-22 実証試験場所（双葉電子工業長生工場）



出所) 国土地理院地図

図 3-23 実証試験場所 (双葉電子工業長生工場構内 基地局設置場所)

【実証試験機材】

実証試験に用いた機材の一覧を以下に示す。

● 基地局側

- |                          |     |
|--------------------------|-----|
| ① RTK-GNSS 受信機 (基準局)     | 1 台 |
| ② 位置補正情報送信機 (920MHz 6mW) | 1 台 |
| ③ RTK-GNSS 受信アンテナ (基準局用) | 1 本 |
| ④ 位置補正情報送信アンテナ           | 1 本 |
| ⑤ その他電源ケーブル類             | 1 式 |

● 移動局側

- |                   |     |
|-------------------|-----|
| ① RTK-GNSS 受信機    | 1 台 |
| ② 位置補正情報受信機       | 1 台 |
| ③ RTK-GNSS 受信アンテナ | 1 本 |
| ④ 位置補正情報受信アンテナ    | 1 台 |
| ⑤ ノートパソコン (記録用)   | 1 台 |
| ⑥ その他電源ケーブル類      | 1 式 |
| ⑦ 自動車             | 1 台 |

### 【実証試験機材写真】

実証試験の機材の設置状況を図 3-24 に示す。



図 3-24 基地局・移動局機材

### 【試験手順】

920MHz 特定小電力無線局で送信速度 48kbps において RTK-GNSS 補正データ量を変えて送り約 100m を移動して位置精度を測定する。

基地局と移動局における設定を以下に示す。

(1)基地局を以下の場所に設置する。

基地局座標 35°24'39.9"N 140°19'33.2"E (35.411095497 140.325887201)

基地局用の RTK-GNSS 受信アンテナはずれないように固定し、上空に向けて設置する。

(2)RTK-GNSS 受信機（基準局）に仮想基準座標を PC で入力する。

Average データを RTK-GNSS 受信機（基準局）にインストールする。

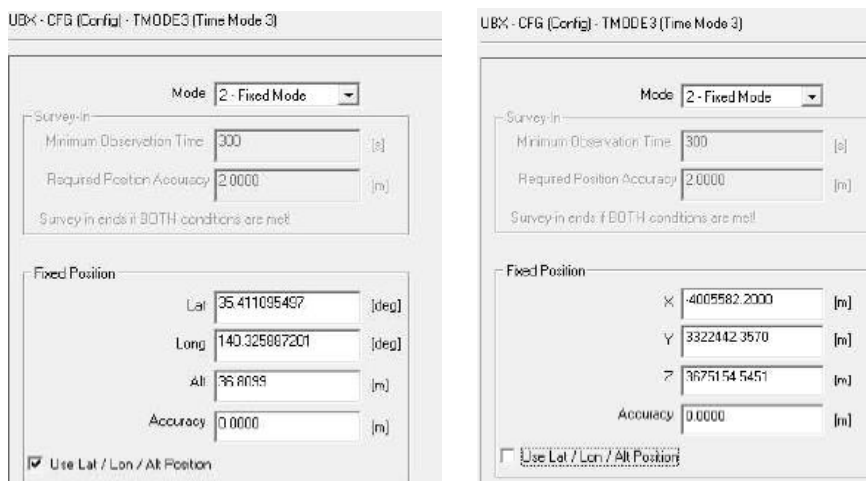


図 3-25 座標表示及びジオイド表示

出所) 「u-center u-blox AG GNSS Software」 デバイス評価ソフトウェア画面

(3)PC を外して通電する。

(4)移動局

- ① 車両に RTK-GNSS 受信アンテナと位置補正情報受信アンテナを設置する。
- ② 時速 1~20km 程度で移動し、データを PC に保存する

なお、データ記録を行うパラメータは、基地局から送信する位置補正情報のパラメータである MSM (※) と補正衛星数とし、以下の組み合わせを対象とした。

(※) 位置補正情報の RTCM フォーマットにおけるメッセージデータは MSM (Multiple Signal Messages) と呼ばれている。RTK には MSM1~7 まであり、MSM4 が現在一般的に利用されている。近年、基準局位置の移動補正と高解像データに対応した MSM7 もサポートされており、データ量も MSM7=MSM4×1.7 と大きくなっている。

- MSM4 衛星数 9 基
- MSM7 衛星数 9 基
- MSM4 衛星数 32 基 (32 が最大設定)
- MSM7 衛星数 32 基 (32 が最大設定)

【測定結果】

各パラメータ組み合わせに関する測定結果を表 3-5~表 3-8 に示す。

表 3-5 MSM4 衛星数 9 基

RTK-GNSS MSM4 補正衛星9基設定												
Index	UTC	relPosN	relPosE	relPosD	relAccN	relAccE	relAccD	PACC H	PACC V	PACC 3D	SoG	
	協定世界時	相対位置ベクトルの北成分	相対位置ベクトルの東成分	相対位置ベクトルの下位成分	相対位置ベクトルの北成分の精度	相対位置ベクトルの東成分の精度	相対位置ベクトルのダウン成分の精度	水平位置精度	垂直位置精度	位置精度 3D	対地速度	
	time_date	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m/s	Km/h
1	02:44:11.000 02/16/2018	8.4942	-2.9900	6.9748	0.0108	0.0109	0.0315	0.015	0.032	0.035	1.02	3.67
2	02:44:12.000 02/16/2018	8.0849	-3.5973	6.9716	0.0116	0.0118	0.0339	0.017	0.034	0.038	0.54	1.94
3	02:44:13.000 02/16/2018	8.0005	-3.6764	6.9706	0.0120	0.0122	0.0350	0.017	0.035	0.039	0.04	0.14
4	02:44:14.000 02/16/2018	8.3964	-3.3699	6.9841	0.0128	0.0130	0.0374	0.018	0.037	0.041	0.85	3.06
5	02:44:15.000 02/16/2018	10.0396	-2.5309	6.9646	0.0130	0.0132	0.0380	0.019	0.038	0.042	2.24	8.06
6	02:44:16.000 02/16/2018	12.8777	-1.8090	6.9676	0.0135	0.0138	0.0395	0.019	0.040	0.044	3.19	11.48
7	02:44:17.000 02/16/2018	16.2294	-0.9971	6.9669	0.0138	0.0141	0.0405	0.020	0.041	0.046	3.56	12.82
8	02:44:18.000 02/16/2018	19.8523	-0.1354	6.9858	0.0143	0.0147	0.0421	0.021	0.042	0.047	3.82	13.75
9	02:44:19.000 02/16/2018	23.9002	0.8246	7.0058	0.0144	0.0148	0.0423	0.021	0.042	0.047	4.29	15.44
10	02:44:20.000 02/16/2018	28.1084	1.7932	7.0274	0.0194	0.0199	0.0597	0.025	0.060	0.065	4.31	15.52

表 3-6 MSM7 衛星数 9 基

RTK-GNSS MSM7 補正衛星9基設定												
Index	UTC	relPosN	relPosE	relPosD	relAccN	relAccE	relAccD	PACC H	PACC V	PACC 3D	SoG	
	協定世界時	相対位置ベクトルの北成分	相対位置ベクトルの東成分	相対位置ベクトルの下位成分	相対位置ベクトルの北成分の精度	相対位置ベクトルの東成分の精度	相対位置ベクトルのダウン成分の精度	水平位置精度	垂直位置精度	位置精度 3D	対地速度	
	time_date	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m/s	Km/h
1	01:56:07.000 02/16/2018	-5.8873	167.5908	-0.8177	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	4.75	17.10
2	01:56:08.000 02/16/2018	-4.5121	162.7793	-0.8077	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.16	18.58
3	01:56:09.000 02/16/2018	-3.0436	157.5836	-0.7840	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.49	19.76
4	01:56:10.000 02/16/2018	-1.5776	152.1657	-0.8282	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.66	20.38
5	01:56:11.000 02/16/2018	-0.1267	146.8028	-0.8202	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.52	19.87
6	01:56:12.000 02/16/2018	1.2706	141.5543	-0.8524	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.43	19.55
7	01:56:13.000 02/16/2018	2.6720	136.3650	-0.8427	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.37	19.33
8	01:56:14.000 02/16/2018	4.0632	131.2803	-0.8507	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.20	18.72
9	01:56:15.000 02/16/2018	5.4456	126.3125	-0.8481	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.17	18.61
10	01:56:16.000 02/16/2018	6.8744	121.2361	-0.8463	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.33	19.19

表 3-7 MSM4 衛星数 32 基

RTK-GNSS MSM4 補正衛星32基設定											
Index	UTC	relPosN	relPosE	relPosD	relAccN	relAccE	relAccD	PACC H	PACC V	PACC 3D	SoG
	協定世界時	相対位置ベクトルの北成分	相対位置ベクトルの東成分	相対位置ベクトルの下位成分	相対位置ベクトルの北成分の精度	相対位置ベクトルの東成分の精度	相対位置ベクトルのダウン成分の精度	水平位置精度	垂直位置精度	位置精度 3D	対地速度
	time date	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m/s Km/h
1	02:28:21.000 02/16/2018	37.9616	6.3598	-0.8679	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	4.69 16.88
2	02:28:22.000 02/16/2018	38.6131	11.4355	-0.8723	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.32 19.15
3	02:28:23.000 02/16/2018	37.7048	17.0310	-0.8453	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.81 20.92
4	02:28:24.000 02/16/2018	36.1216	22.8955	-0.8629	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	6.19 22.28
5	02:28:25.000 02/16/2018	34.3241	29.0543	-0.8762	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	6.54 23.54
6	02:28:26.000 02/16/2018	32.4609	35.5269	-0.8694	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	6.82 24.55
7	02:28:27.000 02/16/2018	30.5720	42.2067	-0.8544	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	7.00 25.20
8	02:28:28.000 02/16/2018	28.6989	49.0213	-0.8610	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	7.11 25.60
9	02:28:29.000 02/16/2018	26.8494	55.9546	-0.8575	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	7.18 25.85
10	02:28:30.000 02/16/2018	25.0527	62.8142	-0.8559	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	6.99 25.16

表 3-8 MSM7 衛星数 32 基

RTK-GNSS MSM7 補正衛星32基設定											
Index	UTC	relPosN	relPosE	relPosD	relAccN	relAccE	relAccD	PACC H	PACC V	PACC 3D	SoG
	協定世界時	相対位置ベクトルの北成分	相対位置ベクトルの東成分	相対位置ベクトルの下位成分	相対位置ベクトルの北成分の精度	相対位置ベクトルの東成分の精度	相対位置ベクトルのダウン成分の精度	水平位置精度	垂直位置精度	位置精度 3D	対地速度
	time date	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m/s Km/h
1	01:05:09.000 02/16/2018	12.5376	101.4191	-0.8885	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	4.96 17.86
2	01:05:10.000 02/16/2018	13.8416	96.6580	-0.9057	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	4.98 17.93
3	01:05:11.000 02/16/2018	15.1541	91.5804	-0.8769	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.36 19.30
4	01:05:12.000 02/16/2018	16.6173	86.0901	-0.8474	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.81 20.92
5	01:05:13.000 02/16/2018	18.2091	80.2619	-0.8674	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	6.15 22.14
6	01:05:14.000 02/16/2018	19.8452	74.4253	-0.8719	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.97 21.49
7	01:05:15.000 02/16/2018	21.4018	68.9231	-0.8528	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.82 20.23
8	01:05:16.000 02/16/2018	22.9448	63.5521	-0.8578	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.58 20.09
9	01:05:17.000 02/16/2018	24.4921	58.1728	-0.8720	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.60 20.16
10	01:05:18.000 02/16/2018	26.0352	52.7399	-0.8549	0.0100	0.0100	0.0100	0.014	0.010	0.017	5.64 20.30

(1)MSM4 衛星数 9 基について

- FIX 解を表示していたが精度が 1~2 cm とばらついていた。
- FIX 解に精度が収束するまで 5 分以上を要した。
- 衛星の配置により FIX 解に収束しない時間帯があった。
- 移動速度が大きくなると、位置精度が低下した。

(2)MSM7 衛星数 9 基について

- MSM4 衛星数 9 基と比較すると、FIX 解への収束と安定性は良かった。
- 移動速度の変化に対して位置精度に変化はなかった。

(3)MSM4 衛星数 32 基について

- MSM7 衛星数 9 基と比較して、FIX 解への収束と安定性は同等であった。
- 移動速度の変化に対して位置精度に変化はなかった。

(4)MSM7 衛星数 32 基

- 他の設定より、FLOAT 解から FIX 解までの収束は早かった。
- 移動速度の変化に対して位置精度に変化はなかった。

以上の測定結果も踏まえ、RTK-GNSS 受信機として Ublox M8P 評価キット及びニコン・トリンプル SPS855 を用いて、無線通信におけるデータ量の測定を行った。試験の系統図を図 3-26 及び図 3-27 に示す。

【試験系統図】

〔Ublox M8P 評価キット〕

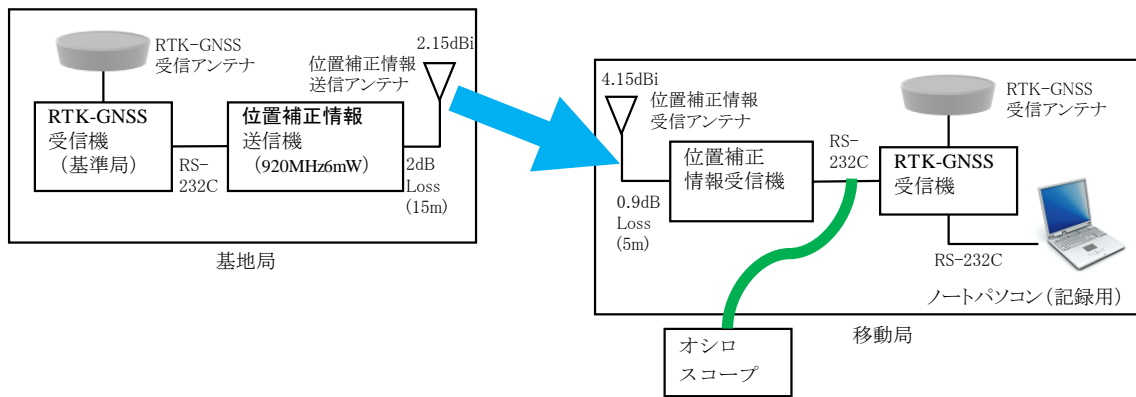


図 3-26 実証試験系統図 (Ublox M8P 評価キット使用)

〔ニコン・トリンプル SPS855〕

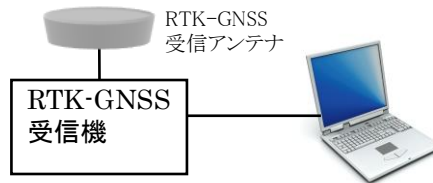


図 3-27 実証試験系統図 (ニコン・トリンプル SPS855 使用)

【測定結果】

Ublox M8P 評価キット及びニコン・トリンプル SPS855 の測定結果を、表 3-9 及び表 3-10 に示す。

表 3-9 測定結果 (Ublox M8P 評価キット)

Ublox M8P 1秒間の補正データ量

RTCM 3.2	GPS+Glonass	GPS+Glonass	GPS+Glonass	GPS+Glonass
	M SM 4使用時9衛星	M SM 7使用時9衛星	M SM 4使用時32衛星	M SM 7使用時32衛星
1005 Standard coordinates (\$tatic) 152 [bits]	152	152	152	152
1074 M SM 4 GPS observations 169+n*214 [bits]	1453		4449	
1077 M SM 7 GPS observations 169+n*360 [bits]		2329		7369
1084 M SM 4 GLONASS observations 169+n*214 [bits]	1025		2737	
1087 M SM 7 GLONASS observations 169+n*360 [bits]		2329		4489
1230 GLONASS code-phase biases 96 [bits]	96	96	96	96
合計 (理論値)	2726	4906	7434	12106
実測値	1608	2320	2090	2928

表 3-10 測定結果（ニコン・トリンプル SPS855）

ニコン3周波RTK 1秒間の補正データ量

GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS 3周波方式 GPS L1/L2/L2C/L5, GLONASS L1/L2C/A, Galileo, BeiDou, QZSS		実測値
CM Rx 400B リミット（今回実証試験での設定）	捕捉衛星36基	317B (2536b it)
CM Rx リミットなし	捕捉衛星36基	364B (2912b it)
RTCM 3.2 400B リミット	捕捉衛星36基	653B (5224b it)
RTCM 3.2 リミットなし	捕捉衛星36基	664B (5312b it)
CM Rx GPS GLONASS 2種衛星 リミットなし	捕捉衛星16基	176B (1408b it)
RTCM 3.2 GPS GLONASS 2種衛星 リミットなし	捕捉衛星16基	366B (2928b it)

【考察】

UbloxM8P 評価キットについては、データ量が多くなれば安定性と FIX 解への収束時間は早くなることが分かった。オープンスカイ状態であれば捕捉衛星数が少なくても精度は維持できるが、移動局が山、谷、構造物などにより捕捉衛星数が少なくなり、基地局・移動局間の送信速度の制限から基地局側と移動局側の捕捉衛星データがマッチしなくなると、FIX 解から外れる可能性は高くなる。理論値と実測の乖離はあるが、実測値は補足衛星数に依存し衛星配置によって変化するため、伝送する無線機を検討する場合は理論値で行うことが適当と考えられる。

ニコン・トリンプル SPS855（3周波 RTK）については、補正データ量を制限なしで送ると、RTCM3.2 ではデータ圧縮できず 600 バイト（4800bit）を超えたデータが送信されるため、捕捉衛星を少なく設定することが必要となる。CMRx は RTCM3.2 と比べると高い圧縮率で伝送している。RTCM3.2 において GPS と GLONASS の 2 種衛星で 3 周波使用する場合でも 366 バイト（2928bit）であることから、現行の送信速度 4800bps の無線機では捕捉衛星数によっては、移動局に位置補正情報を送りきれないことより、パケットエラーが発生する可能性があるものと考えられる。

以上より、現行の送信速度 4800bps の無線機を利用する場合には、伝送プロトコル、衛星種類と衛星数等の調整を最適化する必要があることが分かった。400MHz 帯無線機送信速度と RTK フォーマットの利用区分について、表 3-11 にまとめる。



表 3-11 400MHz 帯無線機送信速度と RTK フォーマットの利用区分

RTK フォーマット	4800bps	9600bps	備考
CMRx 400B リミット 3 周波 マルチ衛星受信	◎	◎	現行無線機でも利用可能。
CMRx リミットなし 3 周波 マルチ衛星受信	△	◎	現行無線機では場合によってはエラーが発生する可能性がある。
RTCM3.2 3 周波 マルチ衛星受信	×	○	現行 4800bps の無線機では対応は難しい。 9600bps では将来 QZSS 等が本稼働した場合、データ量が増大することから、無線の伝送容量不足によりパケットエラーが発生する可能性があるが、補正衛星数の制限設定で対応することは可能と考えられる。
RTCM3.2 3 周波 GPS+GLONASS 2 種衛星	△	◎	現行無線機では場合によってはエラーが発生する可能性があるが、補正衛星数の制限設定で対応することは可能と考えられる。

### 3.1.4 RTK-GNSS 補正データの連続送信の必要性及び間欠送信の実現性の検討

#### 【目的と概要】

現行の RTK-GNSS における位置補正情報の送信は連続送信を前提としているが、電波の占有時間を低減し周波数の有効利用を図る観点から、例えば、Duty10%程度（1秒間のうち 100msec 程度のデータ送信）の実現可能性について検討を行う。

無線方式としては、400MHz 帯 5W 免許局による大セル方式と、920MHz 帯 250mW 移動局（登録局）による小セル方式との比較を行う。

#### 【検討内容】

##### (1)間欠送信の検討について

現行通信における連続通信状態を把握するとともに、間欠送信の可能性を検討した。

##### (2)400MHz 帯 5W 免許局による大セル方式と 920MHz 帯 250mW 移動局による小セル方式との比較について

(1)の検討を踏まえ、受信帯域幅により受信感度を算出して最大通信距離を算出した。なお、400MHz については、「3.2.2 位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等データの伝送検討」において 398MHz の実験試験局を用いたため、その結果を採用した。920MHz については、920MHz 帯 20mW の特定小電力無線機の電波伝搬実験を千葉県九十九里浜にて行ったデータ（双葉電子工業株式会社より提供）を用いた。

400MHz 及び 920MHz 双方の系統図を図 3-28 に示す。

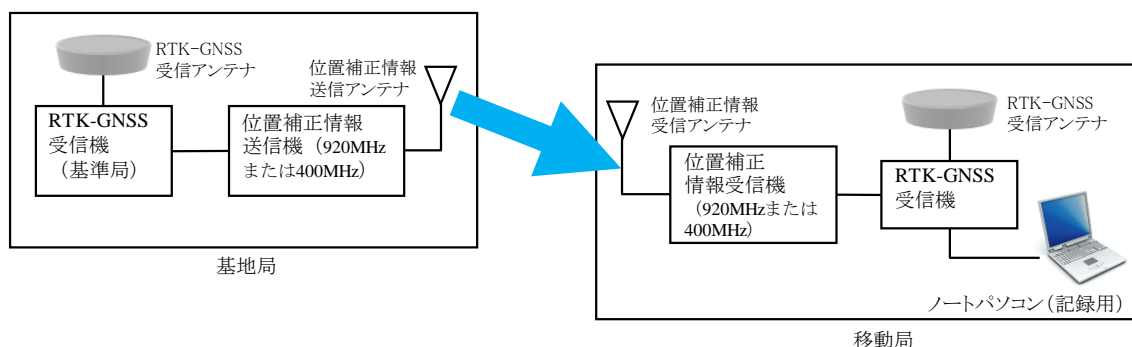


図 3-28 実証試験系統図

(参考) 奥村-秦カーブについて

奥村-秦カーブは、自動車電話の電波伝搬特性について、開放地、郊外、中小都市、大都市の各エリアで実際に試験を行い伝搬特性近似式としたものであり、電波伝搬特性の貴重な基礎データとして活用されている。

市街地

$$\text{基本 } L_p = 69.55 + 6.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_b - a(hm) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \log_{10} r \quad \text{dB}$$

$$\text{中小都市 } a(hm) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) hm - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8)$$

$$\text{大都市 } a(hm) = 8.29 (\log_{10} 1.54 hm)^2 - 1.1 \quad ; f_c \leq 400 \text{ MHz}$$

$$= 3.2 (\log_{10} 11.75 hm)^2 - 4.97 \quad ; f_c \geq 400 \text{ MHz}$$

郊外

$$L_{ps} = 69.55 + 6.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_b - (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) hm - (1.56 \log_{10} h_c - 0.8) \\ + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \log_{10} r - 2 (\log_{10} f_c / 28)^2 - 5.4 \quad \text{dB}$$

開放地

$$L_{p0} = 69.55 + 6.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_b - (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) hm - (1.56 \log_{10} h_c - 0.8) \\ + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \log_{10} r - 4.78 (\log_{10} f_c)^2 + 18.33 \log_{10} f_c - 40.94 \quad \text{dB}$$

f<sub>c</sub>; 周波数 150~1500MHz

h<sub>b</sub>; 基地局アンテナ高 30~200m

h<sub>m</sub>; 移動機アンテナ高 1~10m

r; 距離 1~20km

## 【検討結果】

(1) 間欠送信の検討について

### ① 現行通信の把握

今回の実証試験で用いたニコン・トリンプル SPS855 のデータ量と無線機の実効レートで計算を行った。

・ RTK-GNSS 補正データ量 : 317B (2536bit) /秒

・ 今回の実験試験局の実効レート : 3400bps

送信時間は、2536bit/秒 ÷ 3400bit = 0.75 秒となり、約 75% とほぼ連続送信していることが分かった。

### ② 間欠送信の検討

送信パケットサイズを大きくし、符号化率を 35% から概ね 50% にすることで、Duty50% (実効伝送レート 4800bps 相当) までは実現可能であるが、送信時間は 2536bit/秒 ÷ 4800bit = 0.528 秒となり、100ms (Duty10%) は実現できないことが分かった。

(2)400MHz 帯 5W 免許局による大セル方式と 920MHz 帯 250mW 移動局（登録局）による小セル方式との比較について

400MHz 帯 5W 免許局について、北海道岩見沢市における 398MHz での測定結果と奥村・秦カーブとの対応を図 3-29 に示す。

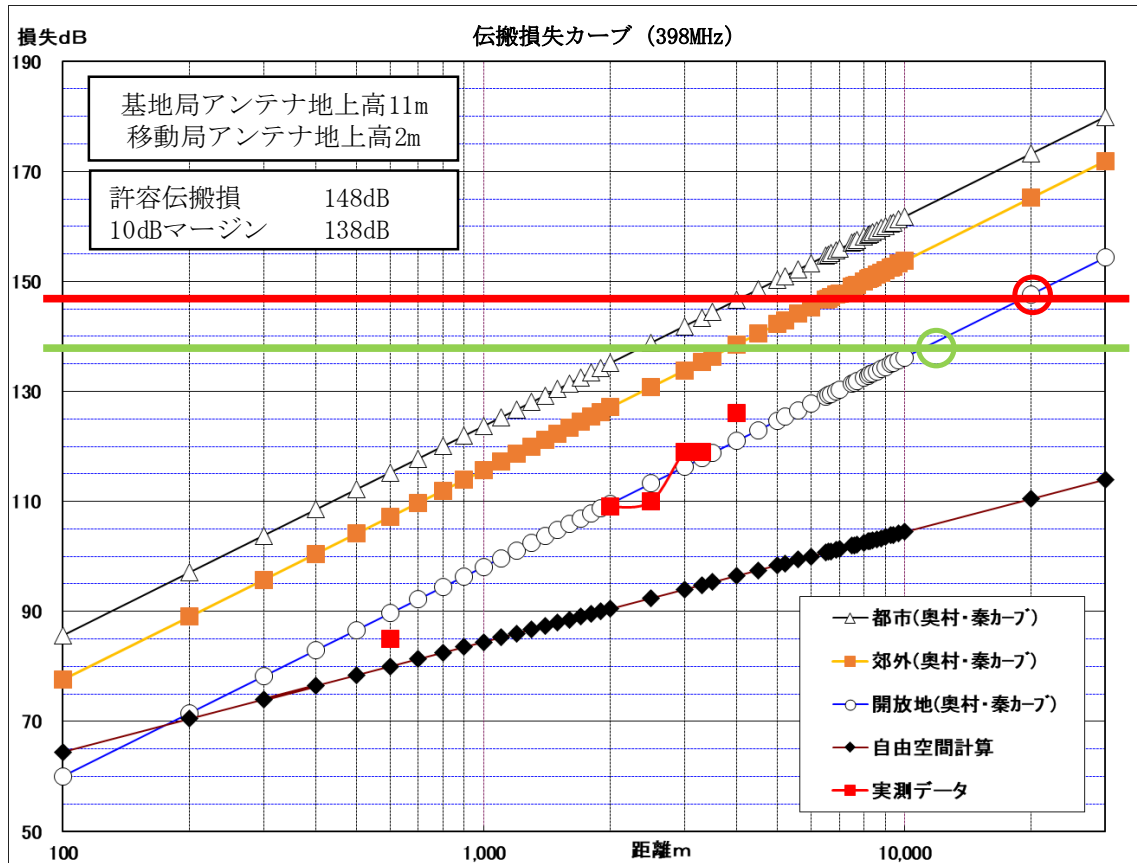


図 3-29 400MHz 帯の実測伝搬損失と奥村・秦カーブ（北海道岩見沢市）

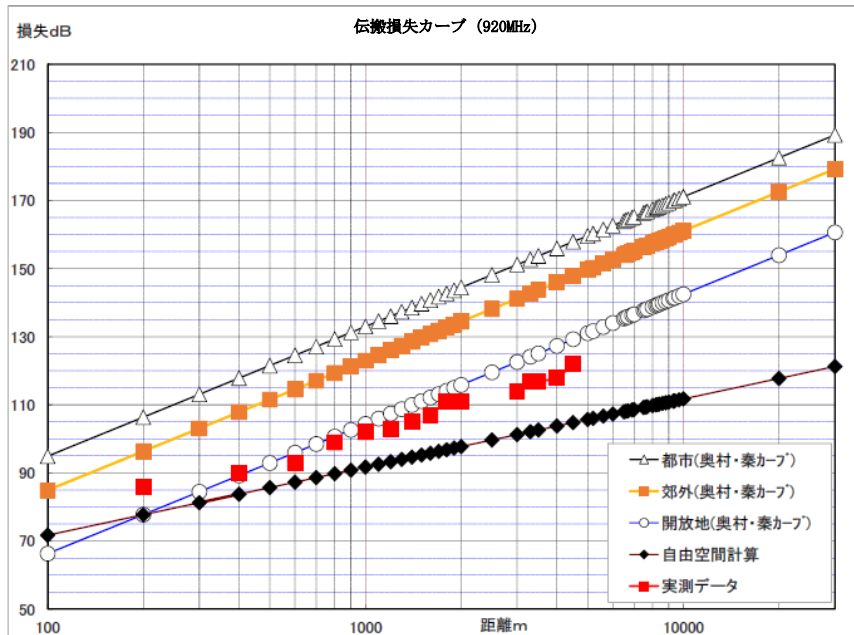


図 3-30 920MHz 帯特定小電力の実測伝搬損と奥村・秦カーブ（千葉県九十九里海岸 基地局アンテナ地上高約 4m 移動局アンテナ地上高 1.5m）

千葉県九十九里浜での測定結果である図 3-30 の 920MHz 帯特定小電力の実測伝搬損と奥村・秦カーブとの対応より、奥村・秦カーブ（開放地）が適用できることが分かる。この奥村・秦カーブ（開放地）に対する、アンテナ地上高等の今回検証設定におけるシミュレーション結果を図 3-31 に示す。

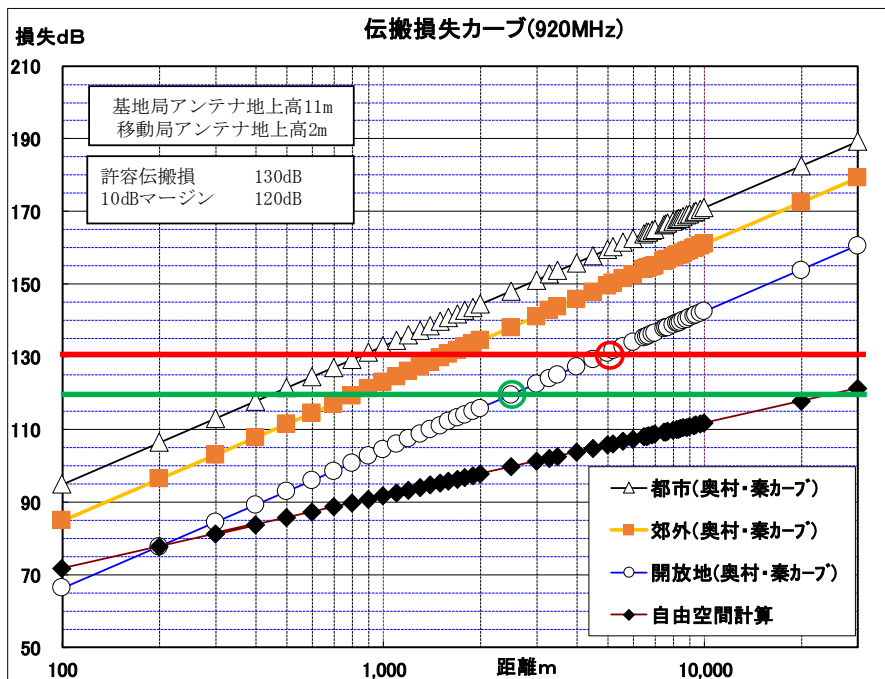


図 3-31 920MHz 帯伝搬損失（奥村・秦カーブ）のシミュレーション結果

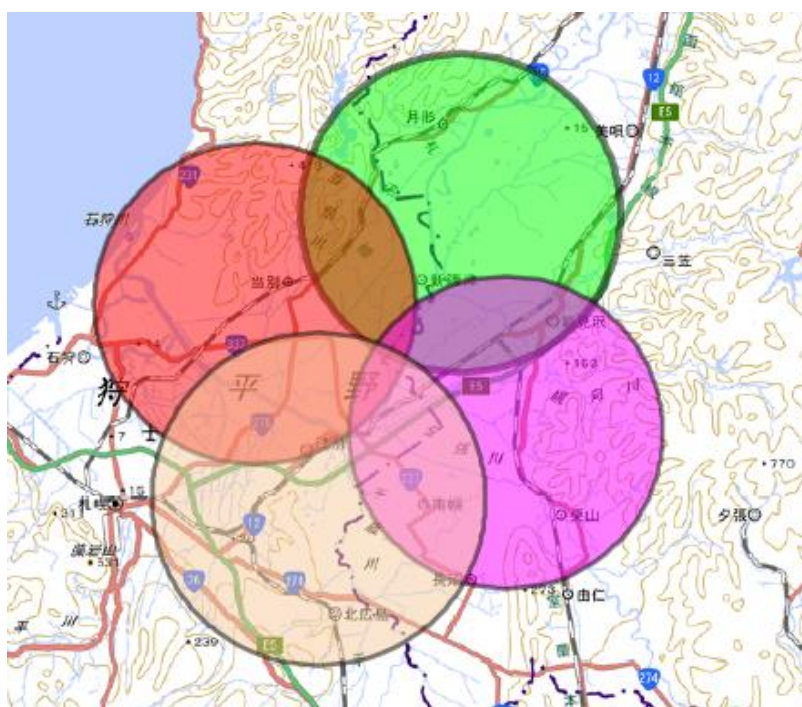
400MHz 帯と 920MHz 帯双方について、許容伝搬損失と奥村・秦カーブ（開放地）との対応より、推定通信距離及び回線設計マージン 10dB の場合の推定通信距離を表 3-12 にまとめる。

表 3-12 許容伝搬損失及び推定通信距離の検討

周波数 MHz	送信速度 bps	空中線電力 dBm	送信ケーブル損失 dB	送信アンテナ利得 dBi	受信アンテナ利得 dBi	受信ケーブル損失 dB	受信感度 dBm	許容伝搬損失 dB	推定通信距離 km	回線設計マージン 10dB の場合の推定通信距離 km
398	9600	37	2	4.1	2	0.9	-116	148	約 21	約 11
920	50000	23.9	0	2	2	0	-105	132.9	約 5	約 2.6

① 400MHz 帯 5W 免許局による大セル方式について

400MHz 帯 5W 無線システムでの配置を検討してみると、伝搬路上に遮蔽がない場合においては、計算上は通信距離 21km と推定される。一方、実効的には回線設計マージン 10dB を見込むことが適当であり（移動体におけるアンテナ位置や角度変動を考慮）、概ね 11km と想定される。このことから、400MHz 帯 5W 無線システムは広域エリアに適したシステムと言える。



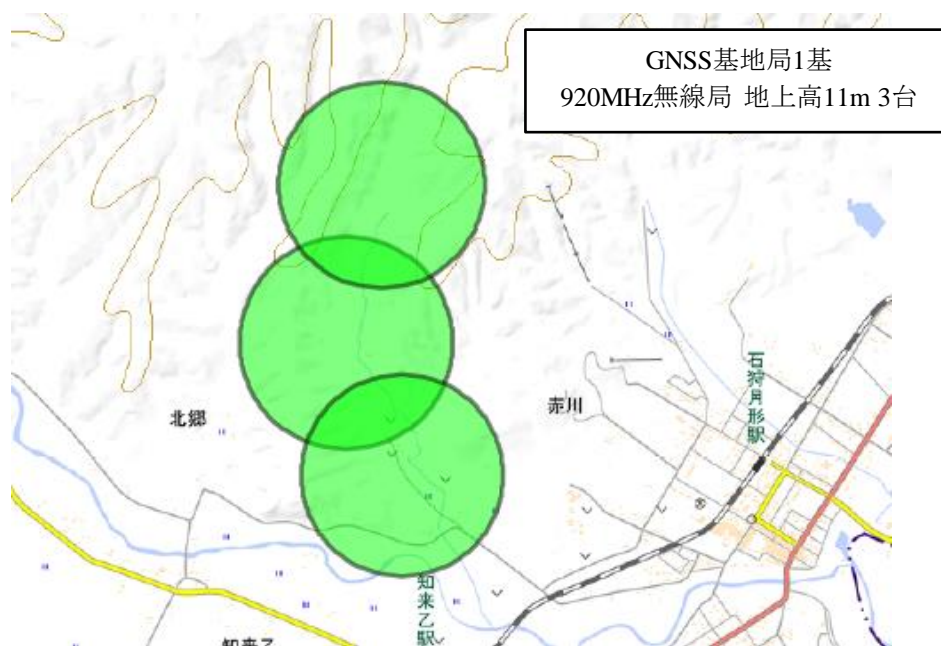
出所) 国土地理院地図

図 3-32 400MHz 帯 5W 無線機 置局エリア構成例（岩見沢市内）

400MHz 帯各種業務用無線局 5W 出力では、図 3-32 に示すとおり、今回実証試験を行った岩見沢市を例とすれば管内を4波でカバーできるものと想定される。詳細については3.1.6において述べる。なおこの場合、無線機1局にGNSS 無線機も必要となる。

② 920MHz 帯 250mW 移動局（登録局）による小セル方式について

920MHz 帯 250mW の通信距離は約 5km、10dB 回線設計 マージンを考慮すると約 2.6km での運用となる。920MHz 帯は 400MHz 帯に比べて通信距離は 1/5 と短いが送信速度は 5 倍と大きいことから、山間部や谷合地域において大量の補正データが必要な場合、500byte の送信時間は  $4000\text{bit} (500\text{byte}) \div 25000\text{bps} (\text{符号化率 } 50\%) = 160\text{ms}$  となる。北海道月形町の山間部を例とした場合、手前の平野から山間部の中までは、400MHz 帯 5W の 1 基地局では遮蔽が大きく電波が届かず位置補正情報サービスの提供が難しい地域でも、920MHz 帯 250mW の中継局を山中腹に設置し中継局間で位置補正情報をリレーできるように設置することで1秒間に5転送することが可能となる。これにより、GNSS 基地局1局、中継局3局で山間部をカバーできることが分かる。920MHz 帯 250mW は開放地など広大な面積をカバーするより、山間部や谷合地域などで補正データを多く送る RTK システムに適していると考えられる。



出所) 国土地理院地図

図 3-33 920MHz 帯 250mW 同一周波数による置局エリア構成例（北海道月形町を例として）

### 3.1.5 伝送方式、変調方式の検討

#### 【目的と概要】

伝送方式、変調方式、帯域幅等の関係において、どの伝送方式、変調方式が最適なものの比較検討を行う。

#### 【検討内容】

9600bps 以上の送信速度で比較的通信距離が期待できる無線局種として、以下の無線局を検討対象とする。変調方式は、市場において各周波数で運用されている方式を対象とする。

- 400MHz 帯各種業務用無線局
- 920MHz 帯特定小電力無線局
- 920MHz 帯移動局
- 2.4GHz 帯小電力無線局

検討は、所要のデータ容量を伝送可能な変調方式及び占有周波数帯域幅に対して、(所要回線品質を得る) 所要受信入力電力を求め、空中線電力及びアンテナ利得・アンテナ地上高等から期待される通信距離を検討する。なお、所用受信入力電力の計算に関しては、以下の「電波法関係審査基準(平成 13 年総務省訓令第 67 号)の一部を改正する訓令」が参考とできるが、現状製品化されている無線局におけるデバイス性能を考慮するものとした。

#### 受信帯域幅とノイズの関係

$$\text{Noise} = kTB + NF + \text{Gain}$$

Noise : Noise Power Density [dBm/Hz]

kTB : Thermal Noise [dBm/Hz]

$k = 1.380 \times 10^{-23}$  J/K (ボルツマン定数)

T : Temperature [K]

B : bandwidth [Hz]

NF : Noise Figure [dB]



【検討結果】

表 3-13 に、検討対象とした 9600bps 以上の送信速度の無線局間の通信距離のシミュレーション比較結果を示す。

表 3-13 9600bps 以上の送信速度の無線局間の通信距離の比較

無線局種	空中線電力 W	変調方式	所要送信速度 bps	占有周波数帯幅 kHz	所要受信入力電力 dBm	通信距離： 奥村・秦カーブ (開放地) km
400MHz 帯 各種業務用 無線局	5	2 値 FSK	9600	17	-104	10
		4 値 FSK	9600	8.5	-107	12
		$\pi/4$ シフト QPSK	9600	5.8	-110	14
920MHz 帯 特定小電力 無線局	0.02	2 値 FSK	50000	60	-100	1.2
		4 値 FSK	50000	30	-103	1.4
920MHz 帯 移動局	0.25	2 値 FSK	50000	60	-100	2.3
		4 値 FSK	50000	30	-103	2.8
2.4GHz 帯 小電力無線局	0.24 FH 方式	2 値 FSK	50000	60	-100	1.6
		4 値 FSK	50000	30	-103	1.9

※諸元出所) 無線設備規則 第 57 条の 3 ( $\pi/4$  シフト QPSK 5.8kHz、4 値 FSK 8.5kHz)

※所要受信入力電力については、市場製品実機による BER=1×10<sup>-3</sup> (静特性) における実測値を用いた。

なお、400MHz 帯各種業務用無線局については、「デジタル簡易無線のデータ伝送における周波数の有効利用に資するための調査検討」報告書 (総務省北陸総合通信局) における値を採用した。

※通信距離の計算については、基地局アンテナ地上高 12m 移動局アンテナ地上高 2m アンテナ利得 2dBi ケーブル損 0dB 回線設計マージン 10dB の設定で、奥村・秦カーブ (開放地) を用いた。

9600bps 以上の送信速度において比較的通信距離が期待できる無線局間の比較結果より、400MHz 帯各種業務用無線局は送信出力が 5W であることから、他と比べて通信距離が優位に確保できる。一方、920MHz 帯移動局は、通信距離が 2.8km であるが、送信速度 50kbps と設定した場合の 500byte の送信時間は 4000bit (500byte) ÷ 25000bps (符号化率 50%) = 160ms であり、一周波数による多段リピータ機能の実装により山間部における補間的な利用が考えられる。なお、変調方式としての  $\pi/4$  シフト QPSK については、今後、低廉な無線装置が市場投入されることが期待される。

### 3.1.6 混信保護比、繰り返し距離等の検討

#### 【目的と概要】

400MHz 帯各種業務用無線局の周波数（352.0875～352.1125MHz 及び 352.2875～352.3125MHz の 6.25kHz 間隔の合計 10 波）に対して、今回検討における 2 波束ねで 2 倍の帯域を利用した場合の（図 3-35 を参照）、同一周波数及び隣接周波数における干渉及び繰り返し距離等について検討する。

干渉検討における基地局・移動局間の配置関係のイメージを図 3-34 に示す。

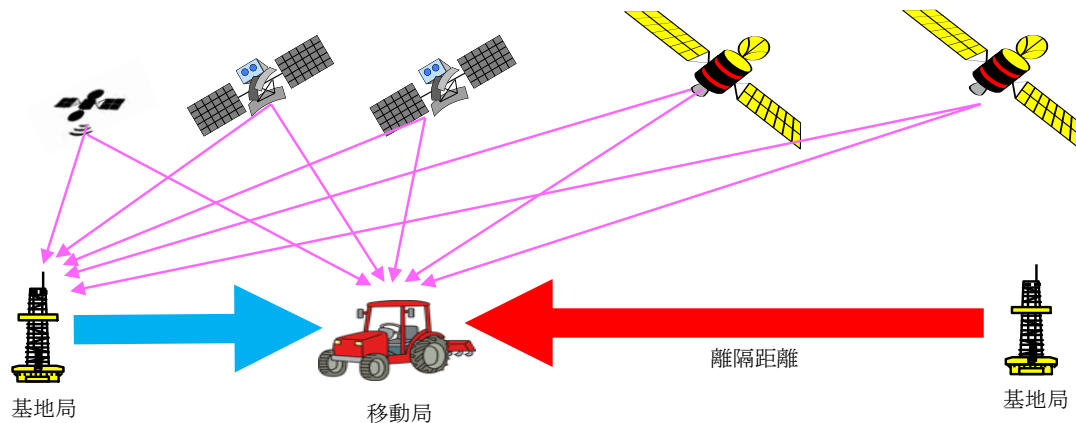


図 3-34 干渉検討 隔離距離イメージ図

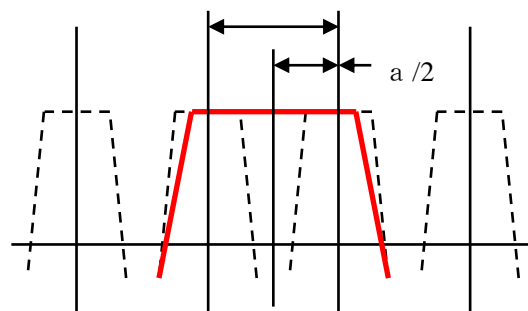


図 3-35 400MHz 帯各種業務用無線局周波数の 2 波束ねイメージ図

#### 【検討内容】

検討における計算に用いた設定及び手順を以下に示す。

使用環境（伝搬損失）	: 開放地（奥村・秦カーブ）
サービスエリア	: 4km
送信電力	: 5W（37dBm）
CIR（同一周波数干渉比）	: 10dB
アンテナ地上高	: 基地局12m／移動局2m
アンテナ利得	: 2dBi
ケーブル損	: 0dB

- ① 基地局（アンテナ地上高 12m）から 4km 離れたトラクター（アンテナ地上高 2m）が受信する受信電力を算出する。
- ② 他局の同一周波数からの干渉の許容値は前記算出した電界強度より 10dB 低い値でなければならない：干渉許容値＝受信電力－10dB
- ③ 他局を離隔し干渉許容値となる離隔距離を求める。

上記の計算より同一周波数による繰り返し距離が算出される。なお、BER=1%における CNR=11.3dB（※1）、BER=0.1%における CNR=14.0dB（※2）と報告されていることより、 $CNR=CIR \div D/U$  の特性になるものと想定し計算した。

（※1）「防災情報を住民へ伝達する簡易な無線システムのための周波数有効利用に関する調査検討」報告書（総務省北海道総合通信局）

（※2）「デジタル簡易無線のデータ伝送における周波数の有効利用に資するための調査検討」報告書（総務省北陸総合通信局）

## 【検討結果】

### (1) 干渉検討

#### ① 同一周波数における離隔距離

同一周波数における D/U：14dB、許容干渉電力（受信電力-14dB）より、

- ・ 4km 離れたときの伝搬損失は 121dB であり、トラクターの希望波受信電力は、  
 $(\text{送信電力}) 37\text{dBm} + (\text{送信空中線利得}) 2\text{dBi} - (\text{伝搬損失}) 121\text{dB}$   
 $+ (\text{受信空中線利得}) 2\text{dBi} = -80\text{dBm}$

- ・ 同一周波数の許容干渉電力は、  
 $(\text{トラクターの希望波受信電力}) - 80\text{dBm}$   
 $- (\text{同一周波数における D/U}) 14\text{dB} = -94\text{dBm}$

- ・ 妨害波の所要伝搬損失は、  
 $(\text{送信電力}) 37\text{dBm} + (\text{送信空中線利得}) 2\text{dBi} + (\text{受信空中線利得}) 2\text{dBi}$   
 $+ (\text{同一周波数の許容干渉電力}) 94\text{dBm} = 135\text{dB}$

となり、開放地（奥村・秦カーブ）において距離約 9.3km に相当する。

#### ② 隣接周波数における離隔距離

隣接チャネル漏えい電力は搬送電力より 55dB 以上低い値又は  $32 \mu\text{W}$  (-15dBm) 以下であることより（無線設備規則第 57 条の 3）、

出力 5W の場合には  $5\text{W}$  (37dBm)  $- 55\text{dB} = -18\text{dBm}$  となり、 $-18\text{dBm}$  を隣接チャネルの干渉電力として用いる。

①の計算式を用いると所用伝搬損失は、

$$(\text{隣接チャネル漏えい電力}) - 18\text{dBm} + (\text{送信空中線利得}) 2\text{dBi} + (\text{受信空中線利得}) 2\text{dBi} + (\text{同一周波数の許容干渉電力}) 94\text{dBm} = 80\text{dB}$$

となり、開放地（奥村・秦カーブ）において距離約 0.3km に相当する。

- 同一周波数における離隔距離は 9.3km となる。(図 3-36)

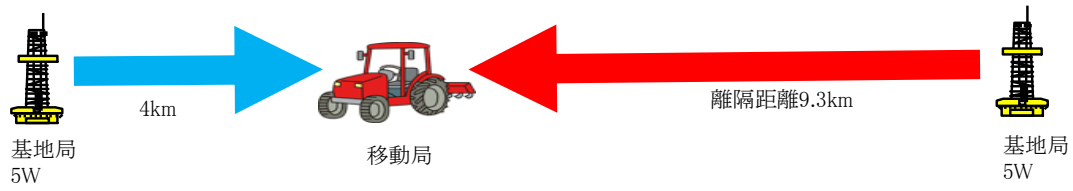


図 3-36 同一周波数 離隔距離イメージ図

- 隣接周波数における離隔距離は 0.3km となる。(図 3-37)

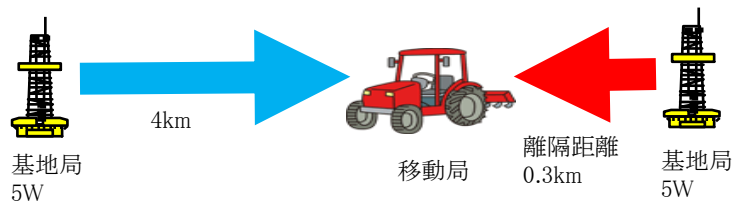


図 3-37 隣接周波数 離隔距離イメージ図

(2) 繰り返し周波数の検討

前項より同一周波数の繰り返し利用は、基地局とトラクターの利用距離+同一周波数の他基地局のトラクターに対する離隔距離より、 $4\text{km}+9.3\text{km}=13.3\text{km}$  となり、同一周波数を利用する基地局同士は  $13.3\text{km}$  以上離隔する必要がある。

$352.0875\sim 352.1125\text{MHz}$  及び  $352.2875\sim 352.3125\text{MHz}$  の  $6.25\text{kHz}$  間隔の合計 10 波に対して、送信速度を  $9600\text{bps}$  とするために 2 波束ねとなることより、利用可能な周波数は 4 波となる。よってセル構成を 4 波で設計することとなり、その場合、正多角構成で隣のセルとの中心間隔が広く取れる正六角形ゾーン構成が適していると考えられる。サービスエリア  $4\text{km}$  における正六角形ゾーン構成を図 3-38 に示す。

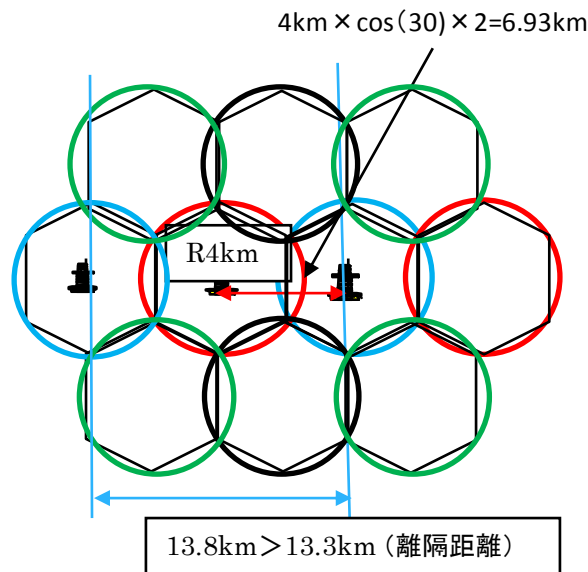


図 3-38 正六角形ゾーン構成 (4 波 サービスエリア  $4\text{km}$ )

4 波による正六角形ゾーン構成でサービスエリア  $4\text{km}$  の円を描くと、基地局間は  $4\text{km} \times \cos(30) \times 2 = 6.93\text{km}$ 、一つ飛びでの基地局間の距離は  $13.82\text{km}$  となり、同一周波数を利用する基地局の離隔距離は  $13.3\text{km}$  以上であるため約  $0.5\text{km}$  の余裕がある。但し、基地局配置については必要に応じて位置や出力の調整対応が必要である。

(参考) 基地局—トラクター間 10km の場合

10km での伝搬損失は 136dB であり、受信電力-95dBm より、離隔距離は以下となる。

- ① 同一周波数の場合 150.2dB (136+14.2) の離隔距離：約 22km
- ② 隣接周波数の場合 94.2dB (-15+95+14.2) の離隔距離：約 1.5km
- ③ 繰り返し周波数 10km+22km=32km の離隔距離が必要

正六角形ゾーン構成の場合でサービスエリア 10km で円を描くと基地局間は  $10\text{km} \times \cos(30) \times 2 = 17.3\text{km}$ 、一つ飛びでの基地局間の距離は 34.6km となり、同一周波数を利用する基地局の離隔距離は 32km 以上であるため約 2.6km 余裕がある。但し、基地局配置については必要に応じて位置や出力の調整対応が必要である。

サービスエリア 10km における正六角形ゾーン構成を図 3-39 に示す。

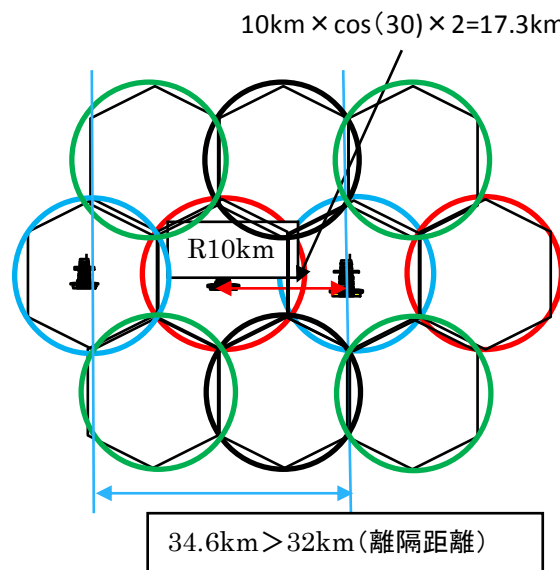


図 3-39 正六角形ゾーン構成 (4 波 サービスエリア 10km)

### 3.1.7 まとめ

今回の実証試験では、上空に遮蔽物がなく開いているオープンスカイ状況では、CMRx（ニコン・トリプルフォーマット）の400B データリミットで良好な結果が得られた。

ニコン・トリプル社では、現行送信速度 4800bps の無線機を使用する場合は 370B リミットで運用しているということである。また、様々な基地局（GPS 衛星のみ、GPS+GLONASS、すべての衛星等）がある。またデータフォーマットも RTCM3.2 と CMRx が利用されている。CMRx の約 2 倍のデータ量である RTCM3.2 で検討すると、補正データの衛星数を制限して移動局に送らないと現行送信速度 4800bps の無線機では利用が難しくなるが、今回の実証試験で用いた送信速度 9600bps 対応無線機であれば、衛星数を制限せずに送ることが可能と考えられる。また、今後トラクターの移動速度が速くなった場合の対応として、フェージングピッチ（マルチパスの間隔）を考慮した設計も可能となる。

ただし、山間部や谷間において、できるだけ多くの補正衛星データを送らなければ運用が難しい場合は、リミットなしで送ると RTCM3.2 の場合には 5400bit 以上を送らなければならないため、送信速度 9600bps の無線機では数年後には対応できなくなる可能性も想定される。その場合には帯域を広げるよりは、変調方式を  $\pi/4$  シフト QPSK 等の多値変調方式を安価に作成する技術革新に期待することも考えられる。

空中線電力については、実証試験を行った岩見沢市北西部において、2W で通信距離 10km が確保できることが検証された。また 5W であれば、ほぼ通信途絶なく安定に動作することが確認された。

出力 5W 化については、現行 4 値 FSK の 4800bps に対して今回 9600bps とデータが 2 倍、受信帯域幅も 2 倍となったことより、受信感度は 3dB 悪化することになる。よって、現行無線システムと同等の通信エリアを確保するには、アンテナ高を 10m から 15m にすればよいが、GNSS 用アンテナの設置安定性のためには設備の大型化を要する。よって、送信出力を 2W から 4W に増やし伝搬損をアンテナ高を高くした場合と同等とすることが効果的であるが、汎用無線機器を有効に利活用する観点から、標準的な 5W とすることが有効であるものと考えられる。なお、出力については他の同一周波数の基地局との干渉や将来の基地局配置を考慮して決定することが望ましい。

## 3.2 ロボットトラクターの状態観測データの伝送

### 3.2.1 作業画像データ（アップリンク）の伝送検討

#### 【目的と概要】

ロボットトラクターの作業場所から農家の自宅まで約 10km を想定した場合の画像品質・通信手段・リアルタイム性を検討する。

#### 【必要な画像データの検討】

ロボットトラクターの状態観測データとして求められるデータ項目と通信要件の検討結果を表 3-14 に示す。画像データは「6.前方映像」「7.後方映像」が該当する（図 3-40）。

表 3-14 想定されるロボットトラクターの状態観測データの種類と要件

	伝達項目	内容	通信要件			
			必要データ量	更新レート	許容遅延	
ロボットトラクター 固有のデータ項目	1	ロボット作業開始	通常：100kbyte/日 異常時：60kbyte/回	通常：1min イベント発生時 (異常時)：即	機械情報の配信になるので、許容という範疇のものではない。(このデータを用いてリアル制御しない)	
	2	ロボット作業停止				
	3	障害物検知信号				
	4	作業機の制御信号				
	5	センサー情報	車体四方の物体(人体)の接近	数バイト×4(四方センサー)	異常時のみ	
	6	前方映像	リアルタイム映像		常時	安全のため、限りなくリアルタイム
	7	後方映像	リアルタイム映像		常時	
	8	通信基地局との通信情報	リアルタイム位置情報確認	緯度・経度データ、高さ(cm) またはXYZ座標	1秒	一般的な遅延
	9	電波関係の通信状態情報	通信状態のリアルタイム監視		10秒	一般的な遅延
	10	地形情報	段差などの状況監視	±30～50cm	10秒	一般的な遅延
	11	肥料使用量 (車速：2～3m/s、散布量：100kg/反、 散布幅：24m)	肥料の散布量 残量の監視	80～150kg 2000kg	5～8秒	一般的な遅延



図 3-40 ロボットトラクター前方映像・後方映像のイメージ図

作業画像には、静止画伝送と動画伝送の 2 種類あるが、移動しているトラクターの前後の状態を監視することが目的であるからリアルタイム性がある動画伝送での検討を行う。

携帯電話や無線 LAN などによるネットワークカメラによる動画伝送は市場に普及しており、動画を伝送する場合は、連続したフレームを送ることになり膨大な伝送容量が必要となるが、狭帯域で伝送する場合は直前の画像との差分のみを送る方式が広く利用されている。近年の技術では 128kbps といった低速回線でも動画を送ることができ、市場に普及しているものは基本的に IP (Internet Protocol) 通信を採用している。

動画伝送システム構成のイメージと仕様の例を図 3-41、表 3-15 に示す。



【動画伝送システム構成及び仕様例】

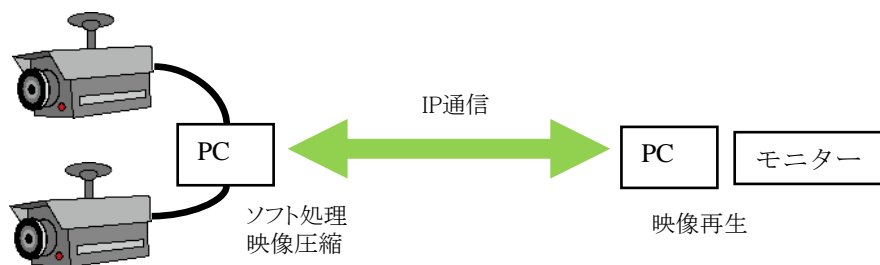


図 3-41 動画伝送システム構成イメージ

表 3-15 動画伝送システム仕様例

画質(画素数)	フレーム数	推奨送信速度
QVGA (320×240)	15	96kbps以上
VGA (640×480)	15	182kbps以上
XGA (1024×768)	15	220kbps以上
HD (1280×720)	5	256kbps以上
HD (1280×720)	30	1.3Mbps以上
フルHD (1920×1080)	60	2.8Mbps以上

出所) 市場製品の仕様を参考に作成。画質とフレーム数の組み合わせで送信速度が変わる。

### 【無線方式の検討】

検討する無線システムとしては200kbps (QVGA 画質で2カメラ使用) 以上で伝送できるデータ容量と、ロボットトラクターアンテナ地上高2m・中継器アンテナ地上高10m・農家アンテナ地上高10mのもとで開放地での伝送距離が数km以上確保できることを条件とし、無線機の候補としては、920MHz帯移動局、地域BWA、携帯電話、移動体画像伝送システム(169MHz、2.4GHz、5.7GHz)を比較した。検討結果を表3-16に示す。

表 3-16 無線方式の比較検討結果

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	備考
920MHz帯移動局	920MHz	200kbps	4値FSK	250mW	3km	6波 登録局
地域BWA	2.5GHz	10Mbps	OFDM	5W	10km	基地局経由
携帯電話	—	200k~20Mbps	OFDM	—	—	基地局経由
移動体画像伝送システム	169MHz	200kbps	4値FSK	3.25W EIRP	12km	2回線 免許局
移動体画像伝送システム	2.4GHz	5Mbps	OFDM	4W EIRP	2km	2回線 免許局
移動体画像伝送システム	5.7GHz	5Mbps	OFDM	4W EIRP	1.5km	21回線 免許局

広大な地域においては、地域BWA、携帯電話、移動体画像伝送システム(169MHz)が要件に合致する無線システムとして挙げられるが、移動体画像伝送システム(169MHz)は2回線と少なく複数システムが同一エリア内で稼働する場合は不向きであり、送信速度や伝送距離を考えると、地域BWA、携帯電話に集約される。なお、携帯電話のサービスエリア外地域の場合については、920MHz帯移動局、移動体画像伝送システム(169MHz、2.4GHz、5.7GHz)を用いて携帯電話のサービスエリアまで中継通信を構築することも考えられる。

### 3.2.2 位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等データの伝送検討

位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等のロボットトラクターの状態観測データの必要データ量と更新レート等の要件、及び、農家の自宅まで10kmを伝送する無線方式について検討する。ロボットトラクターの利用状態監視のイメージを図 3-42 に示す。

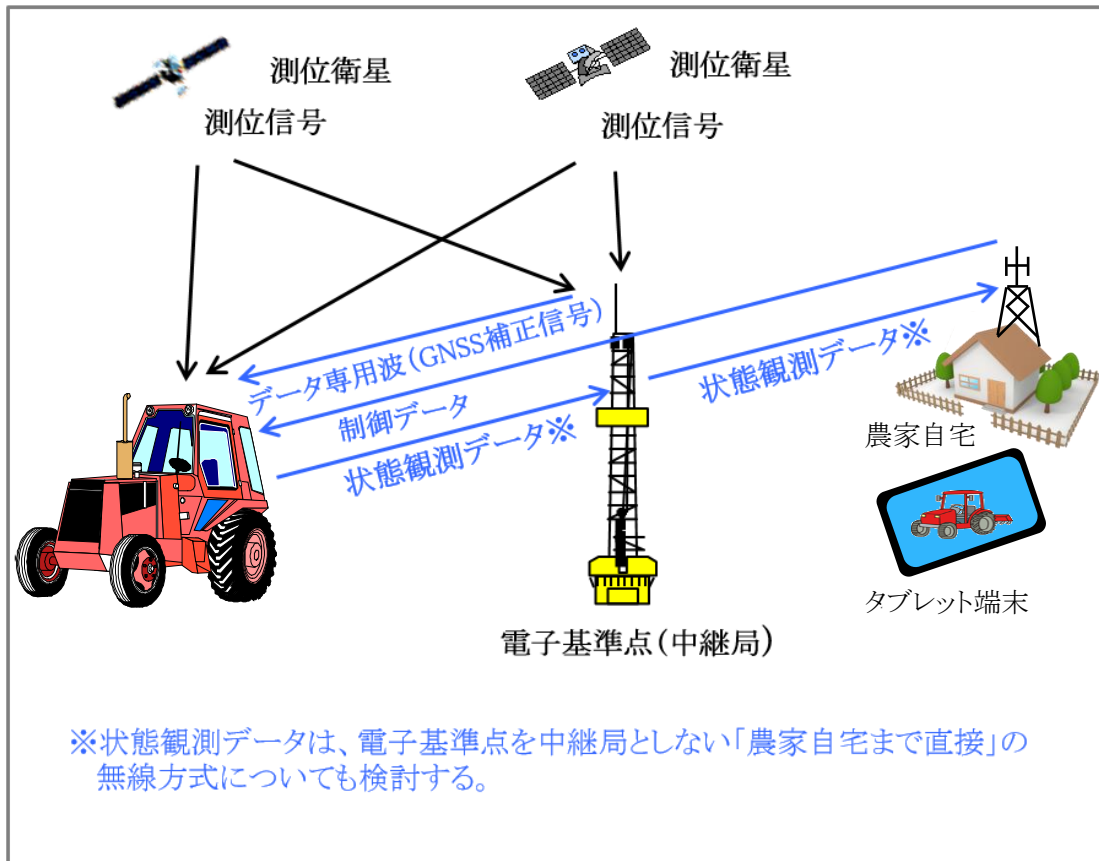


図 3-42 ロボットトラクターの利用状態監視イメージ図

## (1) 机上検討

### 1) 必要データ量と更新レートの検討

位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等のロボットトラクターの状態観測データの必要データ量と更新レート等の要件に関する検討結果を表 3-17 に示す。

表 3-17 想定されるロボットトラクターの状態観測データの種類と要件

	伝達項目	内容	通信要件			
			必要データ量	更新レート	許容遅延	
一般データ項目	1	位置情報	通常: 100kbyte/日 異常時: 60kbyte/回	通常: 1min イベント発生時 (異常時): 即	機械情報の配信になるので、許容という範疇のものではない。(このデータを用いてリアル制御するものではないので)	
	2	アワーメータ				エンジン稼働累計時間
	3	エンジン回転数				エンジン回転数
	4	バッテリー電圧				バッテリー電圧
	5	本機搭載センサー				走行部、作業機部、エンジン部、他
	6	本機搭載スイッチ				走行部、作業機部、エンジン部、他
	7	作業状態情報				作業開始、作業終了時間
	8	異常情報				各種異常情報(エラー、警報)
固有のデータ項目	1	ロボット作業開始	通常: 100kbyte/日 異常時: 60kbyte/回	通常: 1min イベント発生時 (異常時): 即	機械情報の配信になるので、許容という範疇のものではない。(このデータを用いてリアル制御しない)	
	2	ロボット作業停止				
	3	障害物検知信号				
	4	作業機の制御信号				
	5	センサー情報	数バイト×4(四方センサー)	異常時のみ		
	6	前方映像	リアルタイム映像	常時	安全のため、限りなくリアルタイム	
	7	後方映像	リアルタイム映像	常時		
	8	通信基地局との通信情報	リアルタイム位置情報確認	緯度・経度データ、高さ(cm) またはXYZ座標	1秒	一般的な遅延
	9	電波関係の通信状態情報	通信状態のリアルタイム監視		10秒	一般的な遅延
	10	地形情報	段差などの状況監視	±30～50cm	10秒	一般的な遅延
	11	肥料使用量 (車速: 2～3m/s、散布量: 100kg/反、 散布幅: 24m)	肥料の散布量 残量の監視	80～150kg 2000kg	5～8秒	一般的な遅延

常に情報が必要なのは画像と位置情報でありその他は、異常状態の場合や更新レートが低い場合、数回に一回の割合で伝送することでも問題ないものと考えられる。

画像情報以外の情報であれば次項で言及の位置情報システムの情報パケットの予備フィールド 19bit で伝送することは可能であり、位置情報を含め全体で 176bit あれば伝送可能と考えられる。なお、画像伝送に関しては「3.2.1 作業画像データ (アップリンク) の伝送検討」で検討を行った。

### 2) 農家の自宅まで 10km を伝送する無線方式の検討

10km 伝送については、「3.4 圃場の各種データの伝送」と同様であるが、検討する無線システムとして、センサーネット・無線 LAN・地域 BWA・業務無線などの汎用無線システム、低速送信速度の LPWA (Low Power Wide Area)、セルラー系の商用システム、今回実証試験で使用した位置情報システム用無線幾より、10km を直接伝送できる方式を検討した。

検討対象とした無線方式を表 3-18～表 3-21 に示す。

表 3-18 汎用無線システム

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	備考
センサーネット	920MHz	100kbps	GFSK	20mW	800m	有	小	特定小電力
無線LAN	2.4/5GHz	54Mbps	QPSK/16QAM/64QAM	8mW/MHz	100m	無	中	
地域BWA	2.5GHz	10Mbps	OFDM	5W	~10km	無	大	基地局経由
業務/簡易無線	400MHz	4.8kbps	FM・π/4DQPSK・4値FSK	5W以下	10km	無	小	

表 3-19 LPWA (Low Power Wide Area)

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	備考
LoRaWAN	920MHz	300~50kbps	チャープ変調	20mW	14km	有	小	伝送時間(公称値: 12Bbyte0.8秒) 特定小電力
SIG-FOX	920MHz	100bps	DBPS	20mW	36km	有	12B/分 1000/y	特定小電力、事業者契約 伝送時間(公称値: 12Bbyte6秒)
Wi-SUN	920MHz	50k~400kbps	FSK	20mW	1km	有	小	特定小電力
SONYLPWA	920MHz	80bps	π/2BPSKチャープ	20mW	36km	有	不明	特定小電力、移動体に利用可 伝送時間(公称値: 12Bbyte6秒)
Wi-FiHaLow	920MHz	150kbps	OFDM	20mW	1km	不明	不明	IEEE 802.11ah: 将来
RPMA	2.4GHz	40kbps	DS	10mW	8km	不明	不明	将来

表 3-20 セルラー系・商用システム

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	その他
NB-IOT	—	20kbps	OFDM	100mW	—	無	不明	将来
LTE Cat-1	—	10Mbps	OFDM	0.2~	—	無	不明	将来
LTE Cat-M	—	200k~20Mbps	OFDM	0.2~1W	—	無	不明	将来

表 3-21 位置情報システム用無線機 (今回実証試験で使用した無線システム)

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	備考
位置情報システム	400MHz	19.2kbps	2値FSK	1W	5km	有	小	

176bit の情報を送る場合の検討結果例を表 3-22 に示す。伝送距離の算出にあたっては、ロボットトラクターアンテナ地上高 2m・中継器アンテナ地上高 10m・農家アンテナ地上高 10m のもとで開放地 (奥村・秦カーブ) を条件とした。

表 3-22 176bit の情報を送る場合の検討結果例

無線方式	周波数帯	送信速度	実効レート 送信速度の50%	176bitの伝送時間	時速10kmにおける フェージングピッチ時間	時速10kmの移動体 における利用可否
業務/簡易無線	400MHz	4.8kbps	2.4kbps	72ms	270ms	○
LoRaWAN	920MHz	300bps	150bps	1.2s	120ms	—
SONYLPWA	920MHz	—	96bit/6s	11s	—	○ 移動体に対応
SIG-FOX	920MHz	—	100bps	1.8s	120ms	—
位置情報システム	400MHz	19.2kbps	9600bps	18ms	270ms	○

ロボットトラクターの情報を直接 10km 伝送できる方式としては、業務/簡易無線が確実に送ることが可能である。LoRaWAN 等については、詳細な検証を行わなければ可否判断は難しい。なお中継局を利用する場合は、地域 BWA、携帯電話、位置情報システム (中継機能設計) が候補として挙げられる。

(参考) 秘匿性について

現在、利用されているトラクターの状態情報は個人情報としてシステムメーカーが取り扱っていることから無線システムにおいても第三者が簡単に傍受できないようにしなければならない。現在のデジタル通信方式においては、データ通信における単信通信の場合、相互に識別信号のチェックを行っているので、安易に第三者が傍受することは難しくなっている。更に、任意のスクランブルを付加しているシステムも存在する。したがって、公開しなければならない情報については今後の課題であり、どのように公開するかの仕組みの検討が必要となるものと考えられる。

## (2) 実証試験

前項で無線システムの検討候補の1つとして上げた位置情報システム（400MHz帯）を用いた実証試験を行った。測定地域を車（移動局）で移動し、基地局からある離隔にある各測定地点における位置情報の受信状態を確認した。実証試験のイメージを図 3-43 に示す。

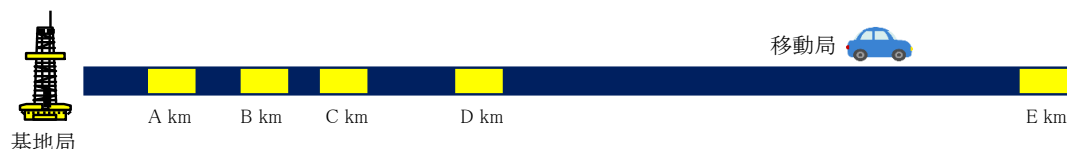


図 3-43 実証試験イメージ図

実証試験の系統図を図 3-44 に示す。

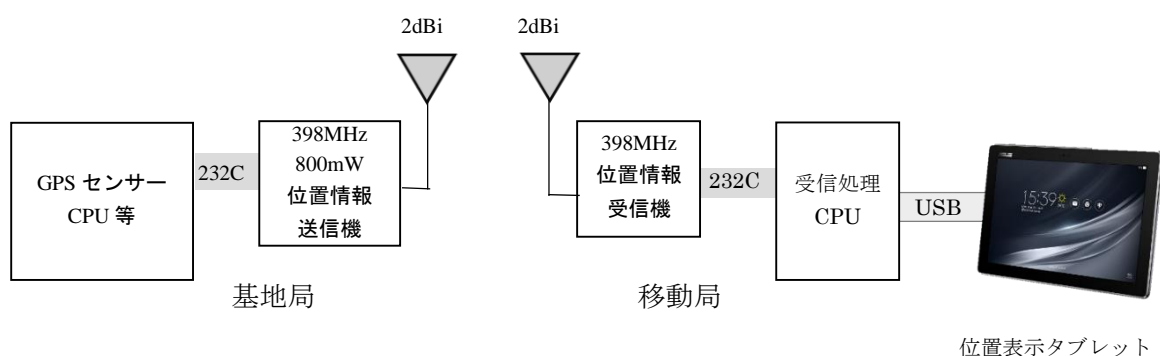


図 3-44 実証試験系統図

実験試験局である位置情報送信機の仕様を表 3-23 に示す。

表 3-23 実験試験局仕様

電波の型式	周波数	空中線電力	送信速度	実効レート
20K0 F1D	398.00MHz	1W	19200bps	9200bps

※変調方式について：変調方式は2値FSK方式とした。

$\pi/4$ シフトQPSK方式、4値FSK方式、2値FSKのいずれを採用することが適当であるか、デバイス価格や消費電力等の特徴を比較考量し検討を行った。まず $\pi/4$ シフトQPSK方式については、汎用デバイスがなく、DSP又はカスタムICとなり、高額な開発費用と単価となるため、検討から外した。4値FSK方式については、TI社、アナログ・デバイセズ社、シリコンラボラトリーズ社の4値FSKモード搭載デバイスを用いて調査を行った。その結果、DSPデバイスを用いて設計しない限り、通信の安定が保証できないことが分かった。DSPを用いて無線機を作成した場合は回路規模とデバイス単価が大きくなり、普及は難しいことが考えられる。2値FSKにおいては、正極性が負極性となることから、プリアンブル同期がとれれば、フレームシンクも異なるメーカーにおいても復調可能であるため有効な変調方式と考えられることより、2値FSKを選定することとした。

また、位置情報送信機の伝送内容を以下に示す。

【送信情報量】：352bit

バイナリデータ

端末 ID	: 32
位置情報	: 8
時刻	: 17
緯度	: 28
経度	: 28
高度	: 16
速度	: 10
方向	: 10
機体種別	: 8
予備	: 19

小計 176bit (22B)

無線通信に必要なデータ (プリアンプル、同期コード、識別符号、CRC など)

計 176bit

合計 352bit

送信速度 19.2kbps での送信時間

$352 \div 19200 = 0.018$  秒 (18ms)

今回の無線システムにおいては 50 台/秒の収容が可能である。

#### 【試験手順】

通信距離確認試験として、以下の手順で実施した。

- ① 移動局側において、受信アンテナを地上高 2m として車のルーフに固定。
- ② 基地局側において、送信アンテナを地上高 11m として屋上に固定。
- ③ 基地局から 10km 程度までの範囲を移動局で移動し、任意の地点において受信状況と位置座標を記録。

#### (参考) 複数移動局の位置情報確認試験

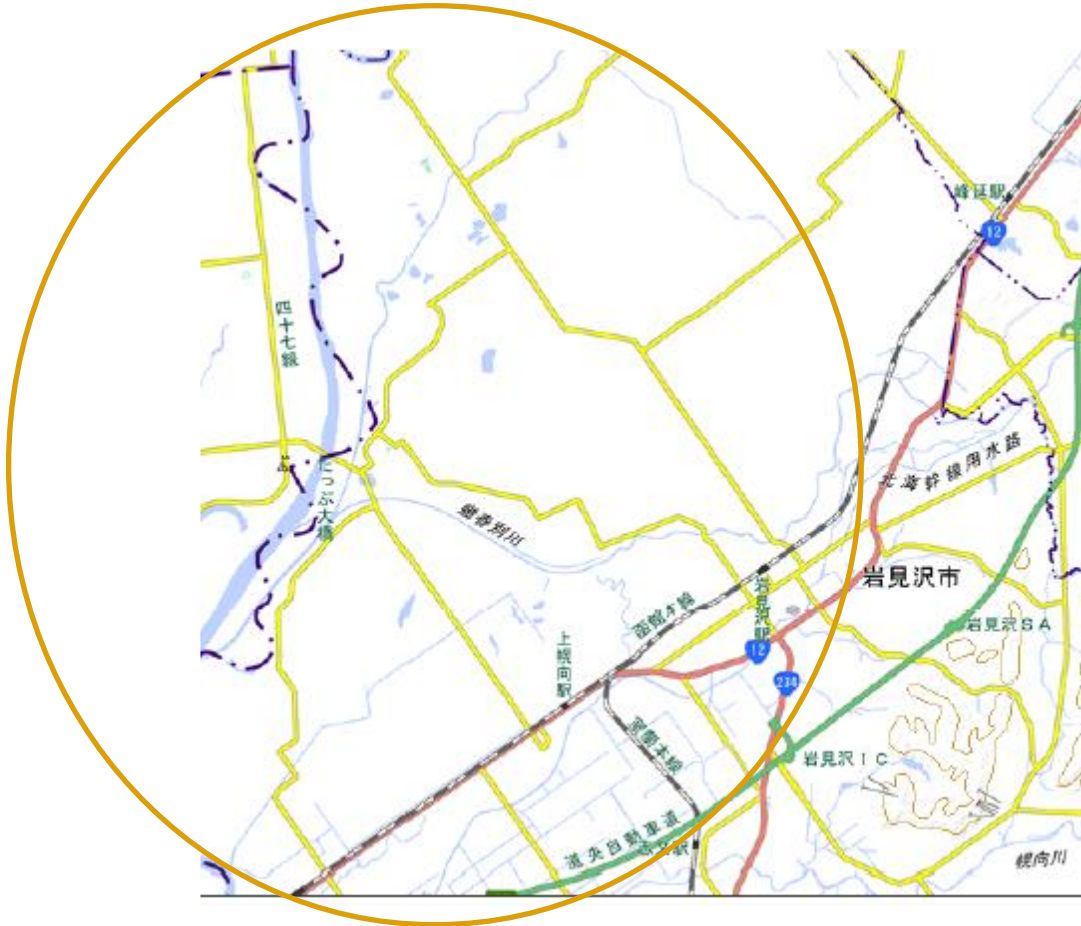
参考として、同時に複数台の移動局の位置表示が可能であるかの確認を、基地局・移動局の機材を入れ替えて行った。

- ① 基地局において、受信アンテナを地上高 5m に設置。
- ② 移動局として、位置情報送信機 2 台をそれぞれ基地局から概ね 1km 離隔見通し範囲内に置き、送信アンテナは地上高 2m で設置。
- ③ 上記複数移動局の基地局側での位置表示が同時に可能かを確認。



### 【実証試験場所】

実証試験の時期が真冬であるため、建造物や起伏が少ない広大なエリアで、除雪が行われる地域であることと調査検討会委員の協力が得られることから、試験場所として岩見沢市を選択した（基地局として北村支所を設定）。実証試験場所を図 3-45 に示す。



出所) 国土地理院地図

図 3-45 実証試験場所（岩見沢市郊外：北西部）

### 【実証試験使用機材】

実証試験に用いた機材の一覧を以下に示す。

- 基地局側
- ① 位置情報送信機 2 台
- ② 送信機用バッテリー 2 個
- ③ 送信アンテナ 1/2λ アンテナ 2 本
- ④ 脚立 1 台

● 移動局側

- |                      |     |
|----------------------|-----|
| ① 位置情報受信機            | 1 台 |
| ② 受信アンテナ 1/2λアンテナ    | 1 本 |
| ③ 受信機用バッテリー          | 1 個 |
| ④ 位置表示タブレット          | 1 台 |
| ⑤ 自動車                | 1 台 |
| ⑥ その他 電源、配線材、ガムテープなど |     |

【実証試験機材写真】

基地局側、移動局側それぞれの機材の設置状況を図 3-46～図 3-49 に示す。



図 3-46 基地局（岩見沢市北村支所：空中線は地上高約 11m に設置）

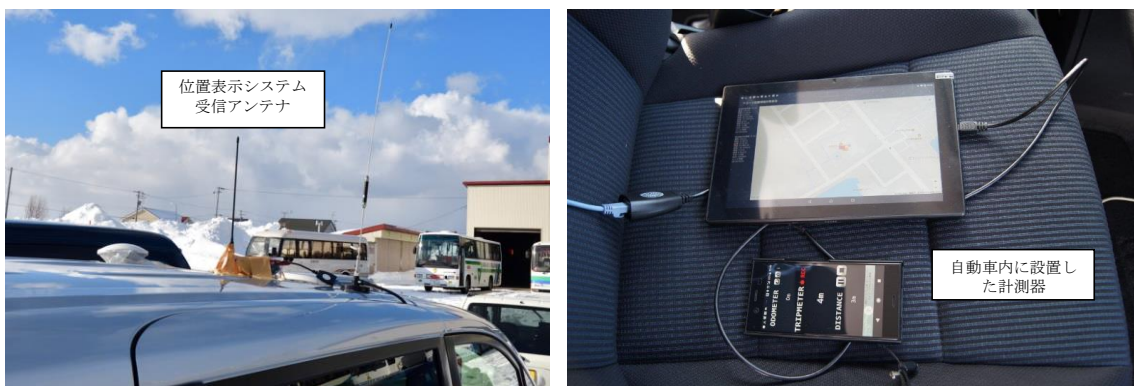


図 3-47 移動局

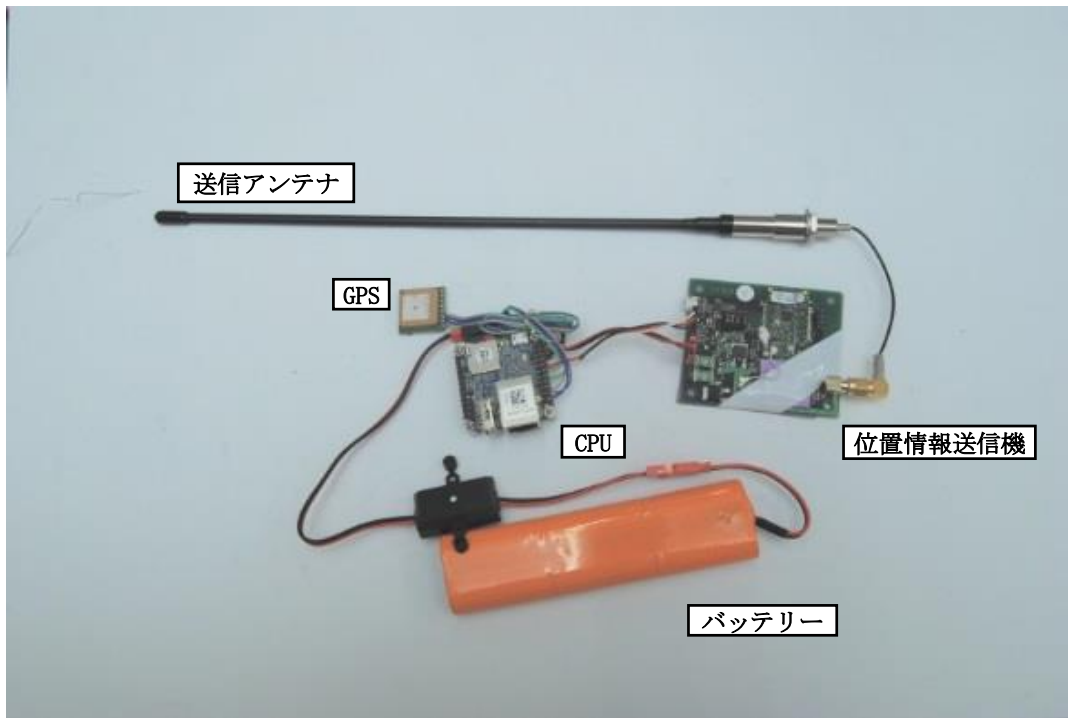


図 3-48 基地局側機材

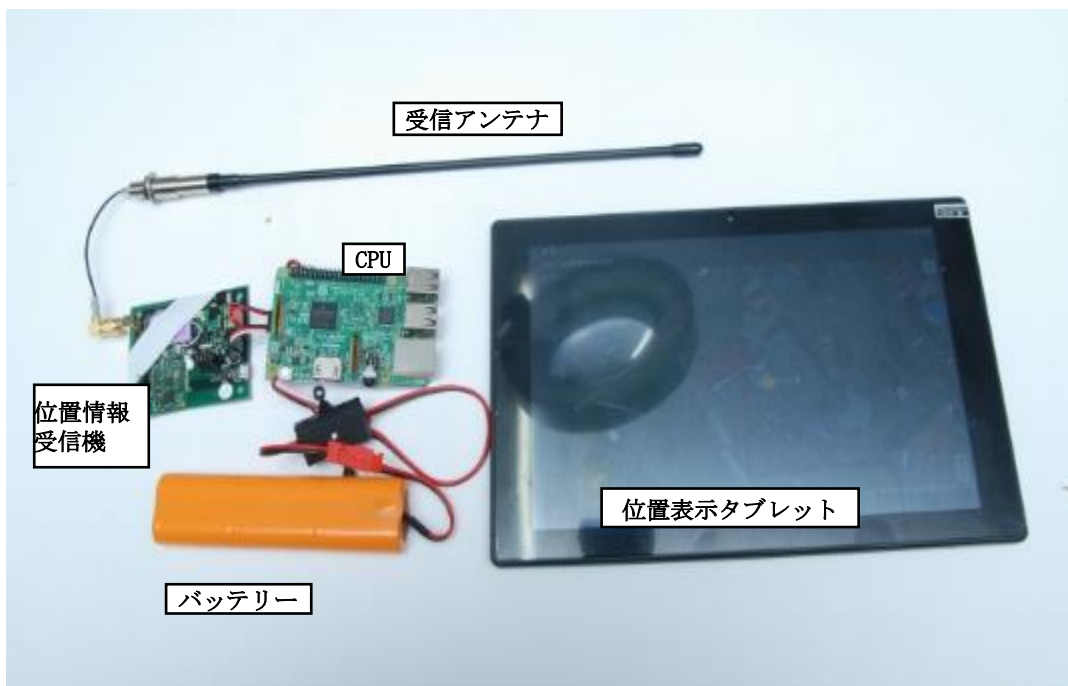


図 3-49 移動局側機材

【測定結果】

対象地域及び各測定地点における、通信距離確認試験の測定結果を図 3-50 及び表 3-24 に示す。

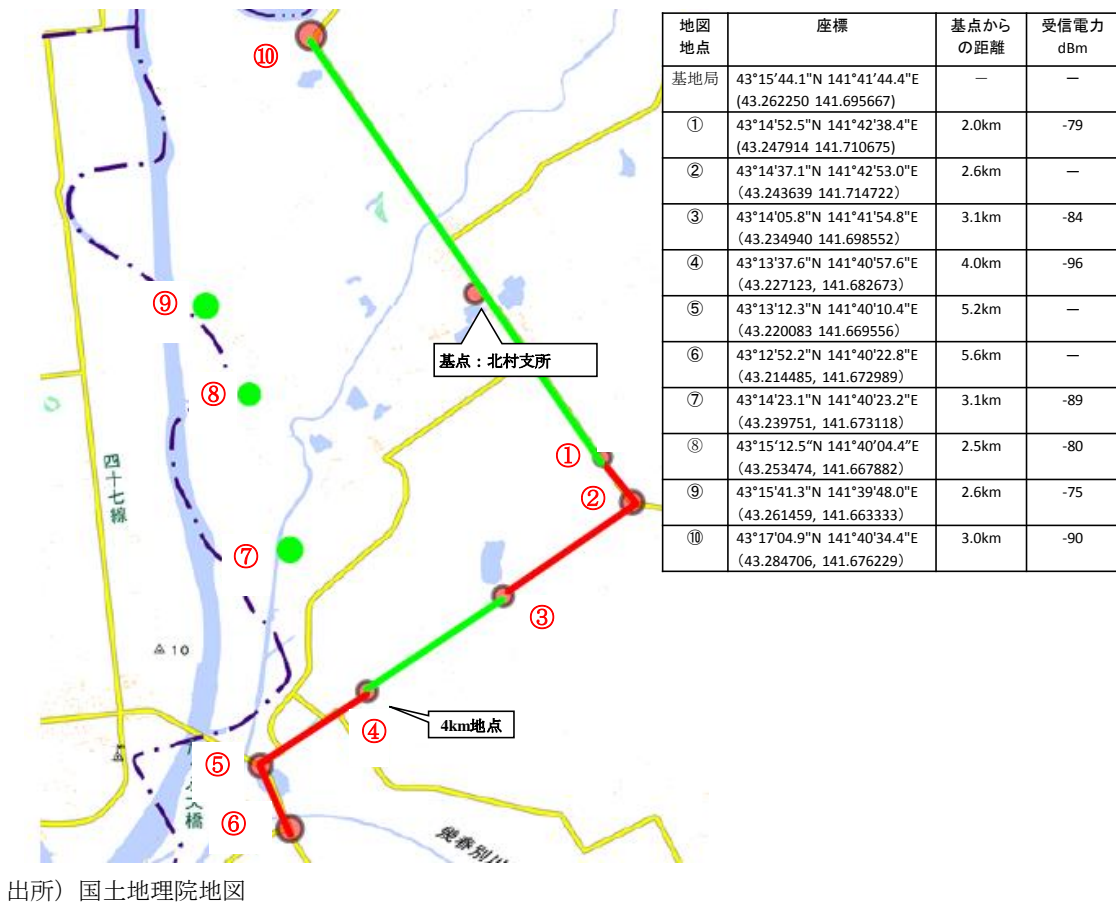


図 3-50 測定地点（岩見沢市北西部）

表 3-24 測定結果（位置情報システム）

経路	受信状態	周囲環境
緑線 <span style="color: green;">■</span>	受信良好	見通し良好
④地点 (緑線 <span style="color: green;">■</span> )	受信良好	見通し良好
⑦～⑩地点 (緑線 <span style="color: green;">■</span> )	受信良好	見通し良好
赤線 <span style="color: red;">■</span>	受信不可	建物による遮蔽と考えられる
①～③地点 (赤線 <span style="color: red;">■</span> )	受信不可	建物による遮蔽と考えられる
⑤～⑥地点 (赤線 <span style="color: red;">■</span> )	受信不可	建物による遮蔽と考えられる

屋上設置のアンテナ地上高が 11m と低かったため、建築物陰になる方向における 2km の①地点で通信断となり、そこから西方向に移動すると 4km の④地点では通信可能であった。今回のアンテナ地上高の設定や実験試験局仕様（空中線電力等）では 10km までの通信は難しい結果となった。

(参考) 複数移動局の位置情報確認試験の測定結果

参考として実施した、同時に複数台の移動局の位置表示が可能であるかの確認結果の例として、位置情報システムのログデータを表 3-25 に示す。

表 3-25 位置情報システムログデータ例

id	datetime	nodeid	type	time	latitude	longitude	velocity	bearing	altitude	bitdata	msgtype	rsst
計測番号	日時(PCがデータを受け取った時間)	機器識別番号	機器タイプ	GPS時間	緯度 ddd.dddd	経度 ddd.dddd	速度 Km/h	移動方向 北を0度	高度 m	オプションビット(19bit)	中継数(-1)	無線受信電力-dBm
1773	2018/1/24 13:26	16	v	13:25:47	43.262199	141.695786	0	0	21	000000010011001000110001	1	80
1774	2018/1/24 13:26	20	v	13:25:48	43.262226	141.695709	0	0	18	000000010011001000110001	1	52
1775	2018/1/24 13:26	16	v	13:25:48	43.262199	141.695786	0	0	21	000000010011001000110001	1	80
1776	2018/1/24 13:26	20	v	13:25:49	43.262241	141.695709	0	0	18	000000010011001000110001	1	52
1777	2018/1/24 13:26	16	v	13:25:49	43.262199	141.695786	0	0	21	000000010011001000110001	1	80
1778	2018/1/24 13:26	20	v	13:25:50	43.262241	141.695694	0	0	18	000000010011001000110001	1	52
1779	2018/1/24 13:26	16	v	13:25:50	43.262199	141.695786	0	0	21	000000010011001000110001	1	80
1780	2018/1/24 13:26	20	v	13:25:51	43.262241	141.695709	0	0	18	000000010011001000110001	1	51
1781	2018/1/24 13:26	16	v	13:25:51	43.262199	141.695786	0	0	21	000000010011001000110001	1	80
1782	2018/1/24 13:26	20	v	13:25:52	43.262241	141.695709	0	0	18	000000010011001000110001	1	52
1783	2018/1/24 13:26	16	v	13:25:52	43.262199	141.695786	0	0	22	000000010011001000110001	1	80
1784	2018/1/24 13:26	20	v	13:25:53	43.262241	141.695694	0	0	18	000000010011001000110001	1	52

上記ログデータにおいて、機器識別番号が 16 番、20 番が 1 秒ごとに記録されており、複数台の位置情報が受信できていることが分かる。参考に、位置表示タブレットでの複数移動局の表示イメージを図 3-51 に示す。



出所) 国土地理院地図

図 3-51 位置表示タブレット表示イメージ

【考察】

通信距離確認試験の実測データと、奥村・秦カーブとの対応を図 3-52 に示す。

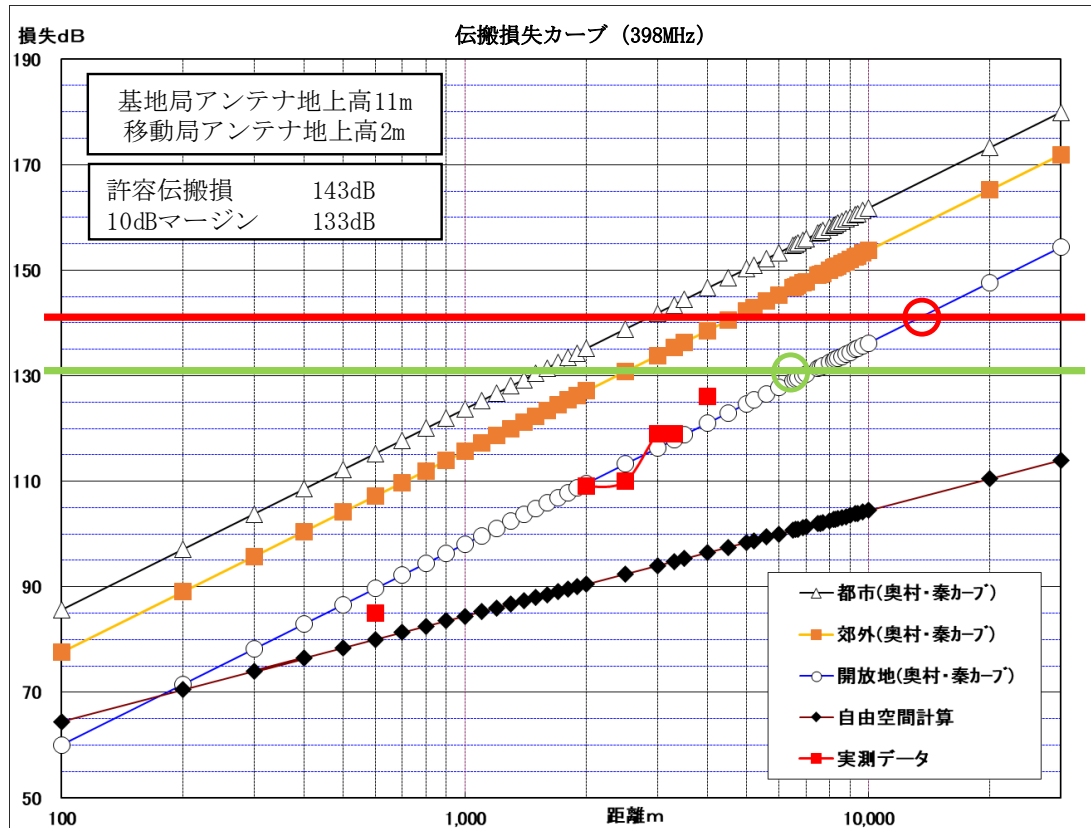


図 3-52 398MHz 帯の実測伝搬損失と奥村・秦カーブ（北海道岩見沢市）

通信距離確認試験の実測データからは、奥村・秦カーブの開放地モデルが適合している。この開放地を前提とした推定通信距離及び回線設計マージン 10dB の場合の推定通信距離を表 3-26 にまとめる。

表 3-26 推定通信距離の検討結果

周波数 MHz	送信速度 bps	空中線電力 dBm	送信ケーブル損失 dB	送信アンテナ利得 dBi	受信アンテナ利得 dBi	受信ケーブル損失 dB	所要受信入力電力 dBm	許容伝搬損失 dB	推定通信距離 km	回線設計マージン 10dB の場合の推定通信距離 km
398	19200	29	0	2	2	0	-110	143	約 10	約 6

今回の実験試験局である 398MHz 帯 1W 無線局においては、開放地として伝搬路に遮蔽が無い場合、計算上は通信距離 10km が期待できる結果となる。但し、ロボットトラクターの走行移動によるフェージング等による回線設計マージン 10dB を考慮した場合、通信距離は約 6km と考えられる。

ロボットトラクターの状態観測データ（位置情報等）の伝送イメージを図 3-53 に示す。今回の実験試験局での開放地における通信距離は約 6km という結果を踏まえ、送信局であるロボットトラクターから受信局である農家側までを直接通信する方法（約 10km）、及び、中継局を介して通信する方法（送信局・受信局から中継局まで 5km）、それぞれに必要な条件等について以下に示す。

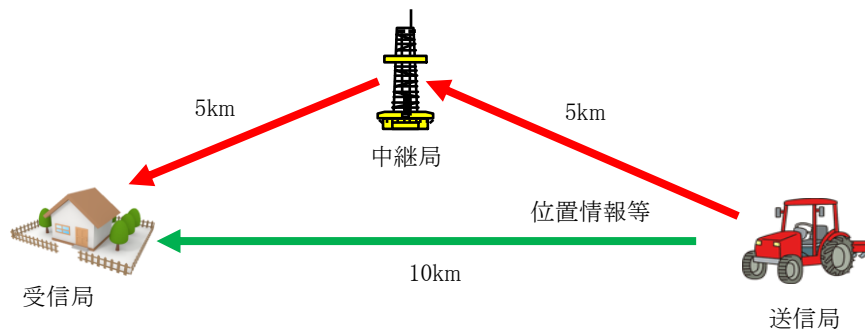


図 3-53 ロボットトラクターの状態観測データの伝送イメージ

〔直接通信（10km）の場合〕

ロボットトラクターの状態観測データの直接通信のイメージを図 3-54 に示す。



図 3-54 ロボットトラクターの状態観測データの直接通信イメージ

ロボットトラクターから農家側まで 10km を通信するために必要な送信機の空中線電力を算出する。

農家側受信機

- ①アンテナ高 : 10m
- ②アンテナ利得 : 4dBi
- ③ケーブル損 : 0dB
- ④受信感度 : -105dBm

ロボットトラクター側送信機

- ①アンテナ高 : 2m
- ②アンテナ利得 : 2dBi
- ③ケーブル損 : 0dB
- ④空中線電力 : 算出

開放地モデル（奥村・秦カーブ）で 10km の伝搬損は 143dB 以上となることより、送信機に必要な空中線電力は  $143\text{dB} - 4\text{dBi} - 105\text{dBm} - 2\text{dBi} = 32\text{dBm} = 1.58\text{W}$  と約 2W となる。

〔中継局通信（5km）の場合〕

ロボットトラクターの状態観測データの中継局通信のイメージを図 3-55 に示す。

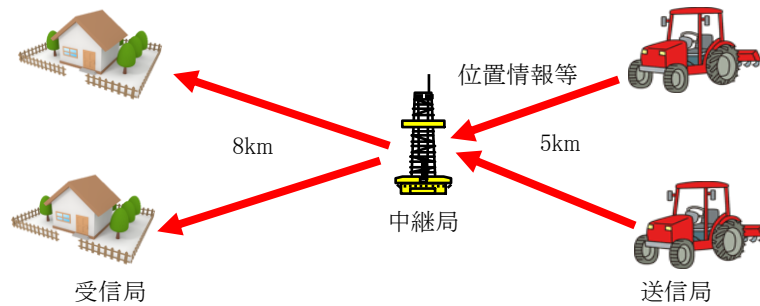


図 3-55 ロボットトラクターの状態観測データの中継局通信イメージ

今回使用した位置情報システムのデータ通信は 1 秒サイクルとなっている。ロボットトラクターの移動速度を 10km/h とすると 1 秒間で 2.7m 移動することとなるが、状態観測データ（作業画像データを除く）の特性を考えれば、問題ないものと考えられる。

また無線機の仕様として、1 秒間にロボットトラクター 50 台分のデータを送信可能であるが、農業利用においては 10km 範囲で 10 台程度の稼働と仮定すると、0.5 秒でトラクターの位置情報を収集し、0.5 秒でそのデータの中継して農家まで配信することが可能である。

伝搬損失を 133dB とすると、農家の受信アンテナ地上高が 10m であれば、

開放地での通信距離：約 22km

郊外での通信距離：約 8km

となり有効な方法といえる。また、中継局から携帯電話網に上げてインターネット回線でモニタリングする方法も考えられる。

前記の通り直接通信の場合には送信機の空中線電力 2W を要することからも、中継局を介する通信は適当と考えられる。



### 3.3 ロボットトラクターへの制御データの伝送

ロボットトラクターを農家自宅でリアルタイムにモニタリングしている等の状況において、利用者による停止信号等の伝送を検討する。送信局である農家から受信局であるロボットトラクターへの制御データ伝送のイメージを図 3-56 に示す。



図 3-56 ロボットトラクターへの制御データの伝送イメージ

#### 3.3.1 必要データ量と更新レートの検討

ロボットトラクターの制御データの通信に関する要件の検討結果を表 3-27 に示す。

表 3-27 ロボットトラクターの制御データと通信要件

	伝達項目	内容	通信要件		
			必要データ量	更新レート	許容遅延
制 御 デ ー タ	停止信号など	停止信号は1バイトで十分。プリアンブル、フレームシンク、識別符号、制御信号、CRC	128bit	発生都度	1秒以内

##### (1)必要データ量

停止信号を想定すると、1byte で十分である。

プリアンブル、フレームシンク、識別符号、制御信号、CRC を合わせると送信データ全体で約 128 bit が必要となる。

##### (2)要求レスポンス

ロボットトラクターを停止することが目的であるため、1 秒以内と仮定する。

(時速 4km の場合には 1 秒で 1.1m 移動することとなる)

上記必要データ量に関する、データレートと伝送時間の関係を表 3-28 に示す。

表 3-28 データレートと伝送時間

データレートbps	伝送時間 s
100	1.28
300	0.42
1200	0.11
2400	0.05
4800	0.027
9600	0.013
19200	0.0067

※128bit÷データレート bps=伝送時間 s

直接通信するならば、要求レスポンス 1 秒以内に対して、300bps のデータレートでも利用可能である。またその場合には、10km 範囲で 10 台程度のロボットトラクター稼動と仮定すると、10 回線が確保できる無線機が必要となる。

### 3.3.2 農家の自宅まで 10km を伝送する無線方式の検討

前項の検討結果より、300bps 以上の送信速度のもとで通信距離が期待できる無線機の比較結果を表 3-29 に示す。

表 3-29 300bps の通信とした場合の無線機検討

無線局種	最大出力 W	変調方式	必要送信速度 bps	通信帯域幅 kHz	受信感度 dBm (※)	通信距離 開放地モデル km	Ch 数
一般業務用無線 (400MHz 帯)	50W 以下	4 値 FSK	4800	5.6	-110	20km 以上	無線機免許局及び無線従事者免許が必要
400MHz 帯 デジタル簡易無線局	5	4 値 FSK	4800	5.6	-116	18	免許：65ch 登録：30ch
920MHz 帯 移動局	0.25	チャープ	300	—	-136	18	登録：6ch
920MHz 帯 特定小電力	0.02	チャープ	300	—	-136	10	29ch
429MHz 帯 特定小電力	0.01	2 値 FSK	2400	5.6	-115	3.3	40ch

※所要受信入力電力は実機による測定値およびデバイス仕様から算出した。なお、デバイス仕様と無線機実機組込時の差異はないものとした。また、通信距離は回線設計マージン 10dB マージンを含む。

表 3-29 より、一般業務用無線（400MHz 帯）、400MHz 帯デジタル簡易無線局及び 920MHz 帯移動局が、10km 離れたロボットトラクターに確実に制御信号を送ることができる。

### 3.3.3 複数台利用での共用について

表 3-29 より、農家の自宅からロボットトラクターまで通信距離 10km を伝送する無線方式としては、一般業務用無線（400MHz 帯）、400MHz 帯デジタル簡易無線局及び 920MHz 帯移動局が利用可能と考えられる。なお、約 10km という範囲では複数の農家が点在しており、その中で複数台のロボットトラクターが同時に作業することを考慮すると、確実な制御のためには、通信回線として 1 回線 1 周波数が安全と考えられる。

### 3.3.4 まとめ

移動しているロボットトラクターを短時間（1 秒内）で確実に停止させることが必要であり、利用者が不特定の 920MHz 帯移動局やデジタル簡易無線においては、「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」（平成 20 年総務省告示第 467 号）という送信時間制限の規定がなされていることより、農家から圃場への長距離直接伝送が可能な通信方式の内、免許局で干渉が少ない通信回線が確保できる一般業務用無線（400MHz 帯）の利用が適当である。

### 3.4 圃場の各種情報データの伝送

農場の作業状況・農場情報・鳥獣近接情報による農場の遠隔監視は様々な形で行われているが、北海道のように広大な地域では、無線 LAN では通信距離が短く、携帯電話網ではコスト及び通信不感地問題もある。本項では、必要なデータ量を長距離通信することで問題の解決を試みる検討を行った。

#### 3.4.1 必要なデータの種類、量、更新レートの検討

##### (1) 作業区分による主な伝送情報内容・情報種類・伝送量の検討

圃場データとしては、① 作業情報（農機具動態等に関する情報）、② センシング情報（天候・土壌・肥料等の農業に関する情報）、③ 外因情報（鳥獣被害・危険動物・不審者等に関する情報）、④ その他の情報と分類して検討を行った。

また、データ収集頻度については以下を想定した。

A：頻度小（数回／1日、イベント発生時伝送等）

B：頻度中（定時伝送、ポーリング）

C：頻度大（画像等）

圃場の各種データの種類とその通信要件に関する検討結果を表 3-30 にまとめる。

表 3-30 伝送情報および通信要件

区分	項目・内容・用途	伝送量	通信頻度	許容遅延
作業情報	農機具動態・作業状況 (GPS・画像)	接点～500kbps程度	A:作業時は常時	リアルタイム
	作業位置(GPS)	数百bit		リアルタイム
センシング情報	気象観測 (気温、湿度、雨雪量、積雪深、 風向、風速等)	32ビット (各情報)	B,C: 定時・イベント発生時	許容
	スプリンクラー作動、ハウス開 閉、ファン稼働	接点情報		許容
	水門開閉	接点情報		リアルタイム
外因情報	危険動物検出	接点情報	A:常時	リアルタイム
	外柵センサー	接点情報		リアルタイム
	監視カメラ	2.4k～500kbps		リアルタイム
	土砂崩れ等	32ビット (各情報)		リアルタイム
その他	各種センサー制御情報(上り)	接点～100kbit程度	B,C: 定時・イベント発生時	リアルタイム

## (2) 伝送データ量の検討

無線回線で送信される伝送データ量を検討した。具体的には、システム構成イメージ、データ収集シーケンス、データ伝送フォーマットおよび誤り検出・訂正について想定し、伝送されるデータ量について検討を行った。

### ① システム構成イメージ

想定するシステム構成イメージを図 3-57 に示す。

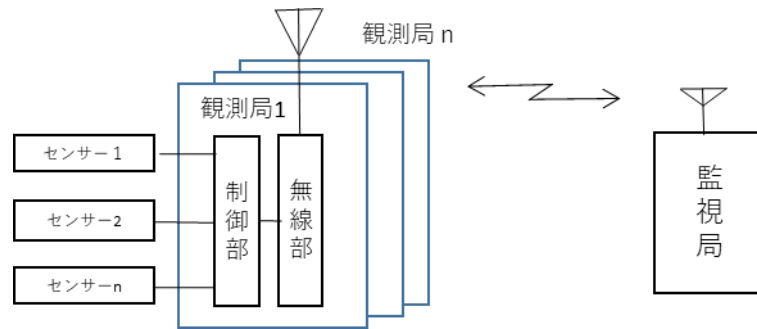


図 3-57 基本システム構成イメージ

### ② データ収集シーケンスの種類

データ収集シーケンスの種類を表 3-31 に、その概念図を図 3-58～図 3-60 に示す。

表 3-31 データ収集シーケンスの種類

方式	内容	特徴
個別呼出	監視局からn局の観測局へデータ送信要求を順次行う方式。	監視局と1対1の通信を行うためデータを確実に収集可能である。
一括呼出	監視局から全監視局へデータ送信要求を一回のみ送り、監視局は決められたタイミングで監視データを送出する。	送信要求が1度のみであるため個別呼び出しに比べデータ収集時間が短い。
自律送信	イベント発生時等監視局の判断でランダムに監視局から監視データを送出する。	災害等のイベント発生時に即時にデータ収集可能。複数の観測局送出データの衝突が発生する可能性あり。

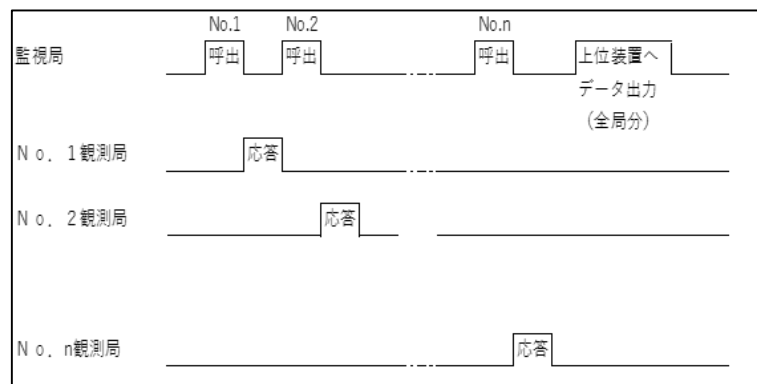


図 3-58 個別呼出方式

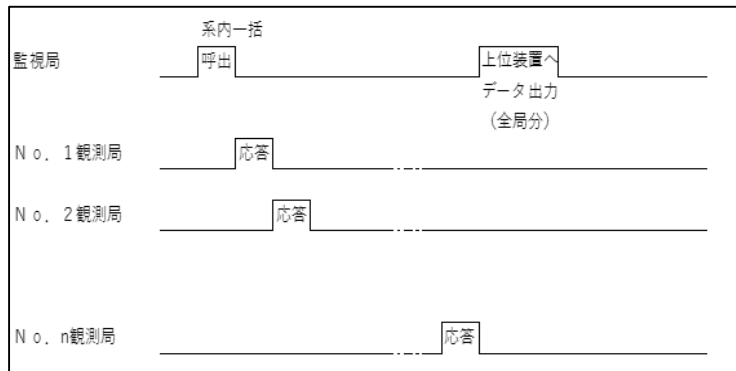


図 3-59 一括呼出方式

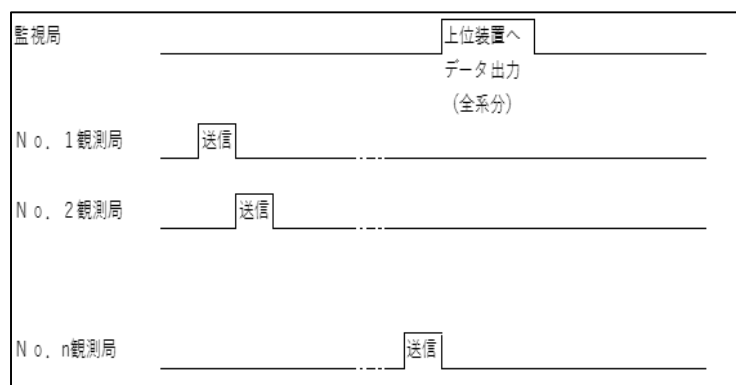


図 3-60 自律送信方式

### ③ データ伝送フォーマットと必要な付加情報の検討

圃場データを伝送する場合、計測された情報の他に制御情報等の付加情報が必要である。また、無線伝送区間では誤り訂正を行い通信品質の確保を行う必要がある。これらには様々な方法があるが、ここでは、国土交通省のテレメータ装置に用いられている方式（国電通仕 21 号、54 号他）を参考に検討を行った。

#### ● 基本伝送フォーマット

図 3-61 に基本伝送フレームフォーマット例を示す。n 個のセンサー情報を一括で伝送可能である。なお、監視局からの監視要求では本フォーマットの内の情報部は送出しないものとして検討を行った。

ヘッダスペース	同期ビット 16ビット	フラグシーケンス 8ビット	アドレス 24ビット	制御部 8ビット	情報部 8ビット × n	フレーム検査シーケンス 16ビット	フラグシーケンス 8ビット
ヘッダスペース : 無線立上り時間(任意時間) 同期ビット : 復調器のビット同期 フラグシーケンス: フレームの開始/終了を示す アドレス : 局番号、システム番号等 制御部 : 伝送方式、呼び出し/応答種別等 情報部 : 4bit × n 監視(最大10監視) フレーム検査 : 誤り検出							

図 3-61 基本伝送フレームフォーマット例

出所) 「国電通仕第 21 号 (暫定仕様) テレメータ装置標準仕様書 (平成 13 年 1 月)」、「国電通仕第 54 号 テレメータ装置 (自律型) 標準仕様書 (平成 23 年 7 月)」 (国土交通省)

● 伝送データ量の試算

1 システムにおいて、1 監視局あたり 10 センサーとして 100 監視局収容した場合を想定し、試算した伝送データ量を表 3-32 に示す。個別呼出方式では約 48kbit の伝送データ量が必要である。

表 3-32 伝送データ量の試算

方式	送信要求(a)	監視データ(b)	トータルデータ (a)+(b)	情報部誤り訂正加味 (量み込み符号等符号化率0.5想定)
個別呼出方式	80bit × 100局 = 8000bit	( 80bit+ 80bit) × 100局 = 16000bit	24000bit	<b>48000bit</b>
一括呼出方式	80bit	( 80bit+ 80bit) × 100局 = 16000bit	16080bit	<b>32160bit</b>
自律送信方式	—	80bit+ 80bit × 10 = 880bit	880bit	<b>1680bit( 1 発呼あたり)</b>

### 3.4.2 無線方式に関する検討

近年の多様化するロボットの電波利用ニーズに応えるために「ロボットにおける電波利用の高度化に関する技術的条件」が2016年度に策定された。そこで取り上げられた無線方式は圃場データの伝送にも適用可能である。圃場の各種データ伝送のために、汎用無線システム及びLPWA（Low Power Wide Area）等も含めて検討を行った。（なお、携帯電話事業者等の回線を使用するシステムは参考とし、検討対象からは除外した）

ロボットに利用されている主な無線方式を表 3-33 に示す。

表 3-33 ロボットに利用されている主な無線方式

無線方式	周波数帯	送信出力	送信速度	利用形態	無線局免許
ラジコン操縦用微弱無線	73MHz	※1	5kbps	操縦	不要
特定小電力無線局	400MHz	10mW	5kbps	操縦	不要※2
特定小電力無線局	920MHz	20mW	～27Mbps	操縦	不要※2
携帯局	1.2GHz	1W	(アナログ方式)	画像伝送	要
小電力データ通信システム	2.4GHz	10mW/MHz (FH方式は 3mW/MHz)	～54kbps	操縦 画像伝送 データ伝送	不要※2
無線アクセス	4.9GHz	250mW	～54kbps	画像伝送 データ伝送	要
小電力データ通信システム	5GHz	10mW/MHz	～6.93Gbps	画像伝送 データ伝送	不要※2
簡易無線局	50GHz	30mW	(アナログ方式)	画像伝送	要
移動体画像伝送システム	169MHz	3.25W EIRP	～200kbps	画像伝送 データ伝送	要
移動体画像伝送システム	2.4GHz	4W EIRP	～27Mbps	画像伝送 データ伝送	要
移動体画像伝送システム	5.7GHz	4W EIRP	～54Mbps	画像伝送 データ伝送	要

出所) 総務省「ロボットにおける電波利用の高度化に関する電波政策と今後の取り組み」平成28年12月19日、

諮問第2036号「ロボットにおける電波利用の高度化に関する技術的条件」、

諮問第2034号「災害対応ロボット・機器向け通信システムの技術的条件」、

情報通信審議会 情報通信技術分科会陸上無線通信委員会報告書 平成28年1月26日陸上無線通信委員会、より作成

(※1) 500mの距離において、電界強度が200μV/m以下

(※2) 免許を要しない無線局については、無線設備が電波法に定める技術基準に適合していることを事前に確認し証明する「技術基準適合証明又は工事設計認証」を受けた無線設備を使用する場合に限る。



その他、検討対象とした無線方式を表 3-34～表 3-36 に示す。

表 3-34 汎用無線システム

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	備考
センサーネット	920MHz	100kbps	GFSK	20mW	800m	有	小	特定小電力
無線LAN	2.4/5GHz	54Mbps	QPSK/16QAM/64QAM	8mW/MHz	100m	無	中	
地域BWA	2.5GHz	10Mbps	OFDM	5W	～10km	無	大	基地局経由
業務／簡易無線	400MHz	4.8kbps	FM・n/4DQPSK・4値FSK	5W以下	10km	無	小	

表 3-35 LPWA (Low Power Wide Area)

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	備考
LoRaWAN	920MHz	300～50kbps	チャープ変調	20mW	14km	有	小	伝送時間(公称値: 12Byte0.8秒) 特定小電力
SIG-FOX	920MHz	100bps	DBPS	20mW	36km	有	12B/分 1000/y	特定小電力、事業者契約 伝送時間(公称値: 12Byte6秒)
Wi-SUN	920MHz	50k～400kbps	FSK	20mW	1km	有	小	特定小電力
SONYLPWA	920MHz	80bps	n/2BPSKチャープ	20mW	36km	有	不明	特定小電力、移動体に利用可 伝送時間(公称値: 12Byte6秒)
Wi-FiHaLow	920MHz	150kbps	OFDM	20mW	1km	不明	不明	IEEE 802.11ah: 将来
RPMA	2.4GHz	40kbps	DS	10mW	8km	不明	不明	将来

表 3-36 セルラー系・商用システム

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	その他
NB-IOT	—	20kbps	OFDM	100mW	—	無	不明	将来
LTE Cat-1	—	10Mbps	OFDM	0.2～	—	無	不明	将来
LTE Cat-M	—	200k～20Mbps	OFDM	0.2～1W	—	無	不明	将来

送信速度と伝送距離の関係の概念図を図 3-62 に示すとともに、以下にまとめる。

① 単区間でのデータ収集について

要件である伝送距離 5km から 10km を単区間で伝送できる無線方式としては、以下が使用可能である。

- ・ 地域 BWA
- ・ 業務／簡易無線
- ・ LoRaWAN

センサー情報が低速かつ即時性が低い場合は業務／簡易無線や LoRaWAN 等が適しており、動画等の高速データ伝送が必要な場合には地域 BWA や、また上記検討対象にて上げていないが携帯電話が適している。必要な圃場データの伝送量により適している無線方式の選択を行う必要がある。

② 多段接続、アドホック接続による距離確保について

①で述べた地域 BWA、業務／簡易無線においても多段接続によるさらなる長距離伝送のためのシステム構築は可能であるが、規模が大きくなり莫大な費用を要することが予想される。多段接続による長距離伝送を実現する無線方式としては、以下が使用可能である。

- ・ LoRaWAN
- ・ センサーネット
- ・ 無線 LAN

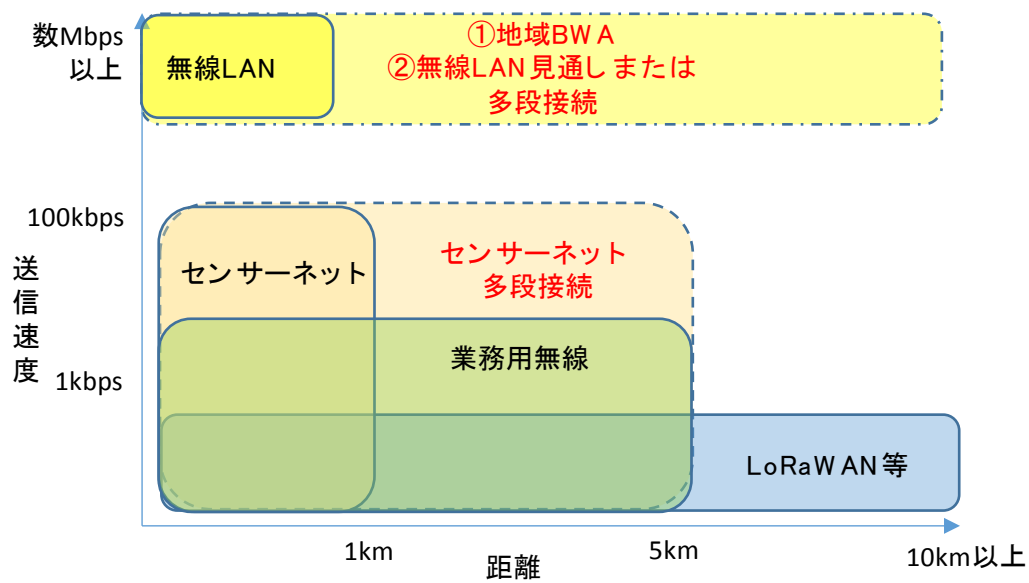


図 3-62 無線方式による送信速度と距離の関係概念図

### 3.4.3 ネットワークシステム併用について

3.4.1 で圃場データの伝送情報についてまとめたが、伝送量については、接点情報のような数 bit のデータがある一方で、動画等は数百 kbps の伝送量が必要である。

また、3.4.2 で述べたように伝送距離においても、個別無線方式で単区間で伝送可能なシステムや、長距離伝送を確保するために多段接続により伝送できる場合等がある。

圃場データを効率的に収集するためには、対象とする各圃場データの通信要件により、これら無線方式によるシステムを最適に組み合わせて併用することが望ましいと考えられる。

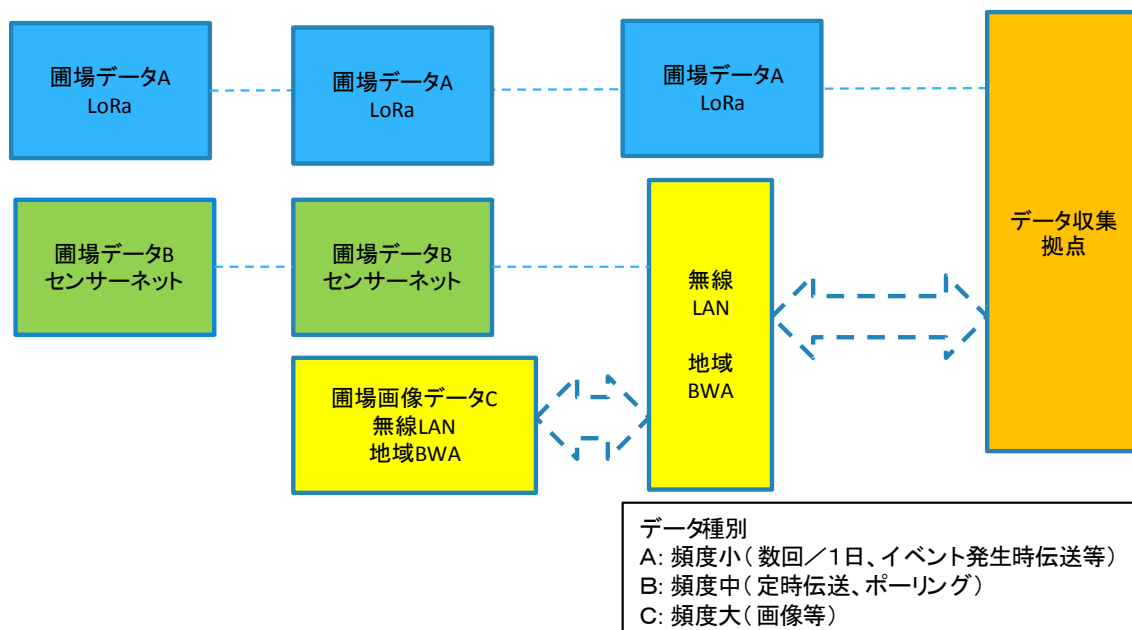


図 3-63 システム併用ネットワークイメージ例

システムを併用したネットワークのイメージ例を図 3-63 に示す。これは、圃場の各センサー情報がある地点で集約し高速データ伝送が可能な無線 LAN や地域 BWA によりデータ収集拠点まで伝送を行うイメージを示している。(データの種別は 3.4.1 で定義した A、B、C で扱うものとする)

### 3.4.4 監視データ収集頻度の検討

3.4.1 で 48kbit のデータ量とした場合の各無線方式による 1 時間あたりの監視可能な回数について算出した結果を表 3-37 に示す。

なお、計算の前提としては、無線装置の立上りに 1 秒程度要するとした時の 1 時間あたりの監視（データ収集）回数であり、データ誤りによる再送制御は考慮していない。

表 3-37 データ収集回数

無線方式	送信速度	1 監視あたりの必要時間 (無線立上り 1 秒と仮定)	1 時間当たりの 監視回数	備考
センサーネット	100kbps	1.48sec	2,432	設備規則54条の5 関係 告示・平成23 年度第541、542号で定める送信時間制 限、キャリアセンス時間は含んでない
LoR aWAN	300bps~50kbps	161~1.96sec	22~1,837	
業務/簡易無線	1.2~9.6kbps	41~6sec	87~600	
無線LAN	54Mbs	1.1	3,300	
地域BWA	220Mbps	1.1	3,300	

### 3.4.5 圃場の各種情報データの伝送のまとめ

#### (1) 想定される伝送情報内容及び通信要件の検討

##### ① 主な伝送情報

作業情報、農業情報、外因情報等が挙げられる。

##### ② 必要な通信要件

- ・ 伝送データ量
  - ・ 画像以外では、センサー一つ当たりおおよそ数十 bit のデータが多い。
  - ・ 複数のセンサーをまとめて無線回線で伝送することが可能。
  - ・ ヘッダ、誤り検出、誤り訂正等考慮すると情報データの倍以上のデータが必要。
- ・ データ収集方式
  - ・ 個別呼出、一括呼出、自律送信方式がある。
- ・ データ遅延について
  - ・ 無線立ち上がり時間、センサー情報のデータ変換時間、データエラー時のデータ再送時間およびアドホック接続には処理時間等を加味する必要がある。

## (2) 無線方式に関する検討

### ① 伝送距離について

- ・地域 BWA、業務／簡易無線、LoRaWAN 等が適合する。
- ・センサーネット、無線 LAN、LoRaWAN 等は中継接続することにより 10km 以上の長距離伝送およびネットワーク化も可能である。

### ② 伝送データ量について

センサー情報が低速かつ即時性が低い場合は業務／簡易無線や LoRaWAN 等が適しており、動画等の高速データ伝送が必要な場合には地域 BWA や携帯電話が適している。

圃場データの各種伝送情報に対する各無線方式の適合を表 3-38 にまとめる。

表 3-38 圃場データ伝送情報に対する適合無線方式

無線方式	作業情報 (画像)	作業情報	圃場データ	外因情報	監視情報	監視カメラ (画像)	その他併用 (見守り等)	備考
センサーネット	×	○	○	○	○	×	○	
LoRaWAN	×	○	○	○	○	×	△	
業務／簡易無線	×	×	○	○	○	×	×	
無線LAN	○	○	○	○	○	○	○	
地域BWA	○	○	○	○	○	○	○	

### ③ 圃場データ収集のためのネットワーク構築について

圃場の状況確認のためにはカメラ等による画像情報も欠かせないものとなっており、センサー情報、画像情報を収集可能なネットワークが求められる。これらは無線回線で収集後にインターネット等の回線で伝送することが多く、IP プロトコルとの親和性が求められる。以上のことから、圃場のセンサー情報収集のための業務／簡易無線・LoRaWAN・センサーネットワーク等に加えて、監視画像・IP 伝送等の高速データ伝送に対応可能な携帯電話・無線 LAN・地域 BWA 等と複合したネットワークシステムが望ましいと考えられる。

### 3.4.6 圃場の各種情報データの伝送の課題

圃場の各種情報データの伝送及びその利活用において想定される課題を以下にまとめる。

#### (1) 社会基盤づくり

現在は農作業人口の減少、高齢化等が進んでいる。IoTを駆使しこれらの状況を打破し日本農業の生産性の革命を具体化するにあたり、きめ細かな圃場データ、農作業の自動化を目指す上で情報ネットワークをきめ細かく構築する必要がある。このためには既に先行している地域のみならず、国内全ての農地で必要となる社会基盤作りが重要である。

#### (2) 圃場データ伝送の標準化

様々なセンサーには独自のデータフォーマット、誤り訂正等の手法が用いられており異なった種別のセンサーを組み合わせる際には専用のプラットフォーム、アプリケーションを開発することが必要であり時間と費用がかかる。圃場データについてもデータの標準化の枠組みが必要と考える。これにより複数のセンサー情報のある枠組みの中で容易に伝送することが可能となり細やかなセンサーの配備、情報の収集一元化により圃場データ収集の効率化が実現できるものと考えられる。

#### (3) インターネット環境の構築

圃場データおよびカメラ監視画像情報を無線回線で収集する場合、無線回線ではデータ伝送量を極力減らすため測定データ、誤り訂正情報の伝送に特化したプロトコルを使用することが多い。一方、データの蓄積、分析にはインターネットを介したサーバが必須となる。インターネット環境構築の検討が必要と考えられる。

#### (4) 圃場データの共有による効率的なデータ活用

地域の共通データ（気象観測等）と個々の圃場固有データの連携方法の確立が必要と考えられる。

#### (5) データの蓄積、共有、有効活用

収集した圃場データについてインターネットを介して全世界で共有が可能である。類似環境の圃場のデータを活用し役立てる仕組みが必要と考えられる。

### 3.5 自営ブロードバンドの構築について

#### 3.5.1 スマート農業ネットワークのあり方について

ロボット技術導入を含め、日本におけるスマート農業の普及促進には、圃場へのブロードバンドネットワーク構築が不可欠である。

現代社会において不可欠な社会基盤であるブロードバンドネットワークについては、通信事業者による構築・運用（サービス）が基本と考えられるが、一方で、（都市部とは異なり）通信事業者による地方部でのブロードバンドサービスの実施は経済面から考えても非常に難しい状況がある。このため、幹線系を行政（地方自治体等）が整備するなど、いわゆる「公設民営型」の自営のネットワーク構築が望まれるものと考えられる。

スマート農業の社会実装にあたり、構成される利活用区分は以下の通りである。

- 農作業の省力化・効率化を図るためのロボット技術等の導入（位置情報、テレコントロール）
- 作業を最適化するための各種センシング技術等の導入（各種センサー、ドローン等）
- 営農者との情報送受信機能（作業履歴）

これらを包含するブロードバンドネットワークを効率的に構築することが望まれるが、伝送する情報種別等により求める機能が異なるものであり、また、帯域幅等に配慮する必要がある。構築にあたって留意すべき点で、特にロボットトラクターの走行についてテレコントロールする際には、ネットワークの接続性への配慮が重要である（通信が遮断された場合はトラクターが緊急停止する機能が来ているものの、可能な限り遮断されない形が望ましい）。このため、できるだけ占有できるネットワーク環境構築が望ましい。また、経済性（低コスト）、汎用性（普及面で課題ある独自規格等）の観点にも留意が必要である。

#### 3.5.2 スマート農業ネットワークの整備・運用のあり方について

公設民営型を推し進める形での「自営ブロードバンドネットワーク」構築として、行政としても妥当な説明が行いやすいと想定される利用内容としては以下が挙げられる。

- ① デジタルデバイド解消（条件不利地域解消）
- ② 地域経済活性化への寄与
  - ・一次産業への活用（農業、林業、水産業等）
  - ・在宅就業（テレワーク）など働き方改革を具体化するための社会基盤
- ③ 安全・安心な地域社会構築に向けた社会基盤
  - ・災害非常時における（行政区域内の）送受信機能  
被災情報の収集伝達、支所や避難所等との連絡機能
  - ・在宅生活ケア機能  
ICT活用による地域包括ケア機能、緊急通報等

前述のように、本来は通信事業者による構築・サービス展開が望ましいが、地方部によっては困難な地域があり、行政が積極的に関与する自営ブロードバンド環境構築は不可欠で

あるものと考えられる。但し、利用者（今回の場合は「営農者」）ニーズがあつてこそその整備とする必要があり、このような前提で、行政と民間事業者との関わり方（体制）のひとつとしては「公設民営型による展開」であり、その地域の状況に応じて最適な体制づくりが望ましいと考えられる。

例)

- ・ 幹線系をある程度自治体が保有する地域  
幹線部分を民間事業者提供（IRU等により）、ラスト部位（無線基地局等）を新たに整備し提供
- ・ 幹線部分を含め自治体が保有していない地域  
幹線部分の整備を含め自治体実施し民間事業者提供（IRU）

行政からの支援のあり方としては、条件不利地域における格差解消を前提に、地方自治体が社会基盤としての整備運用を予定する事業への支援スキームの創設や、また、自営ブロードバンドの必要性はあるものの、例えば財政面やユーザー数確保等において単独自治体では困難な地域が多く所在することが想定されることを鑑みて、例えば行政区域を跨ぐ形での展開（協働展開）を可能とするなどの制度や支援スキームの構築が考えられる。



## 4. 技術的条件案の策定

3章の実証試験結果を踏まえ、400MHz帯を用いる、「RTK-GNSS位置情報補正データ伝送用無線機」、及び「ロボットトラクターの状態観測データ（位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等データ）伝送用無線機」の技術的条件案を以下に示す。

### 4.1 RTK-GNSS 位置情報補正データ伝送用無線機

400MHz帯各種業務用無線設備の内、「RTK-GNSS位置情報補正データ伝送用無線機」の技術的条件については次のとおりとすることが適当である。

#### 4.1.1 一般的条件

##### (1) 使用周波数帯

335.4MHz ～ 470MHz とする。

##### (2) 周波数の数

12.5KHz ステップで4周波が必要。（セル設計において最小で4周波必要となる）

##### 【案1】

他周波からの干渉を低減する帯域制限フィルタを低廉に構成する上から、400MHz帯の帯域を考慮し、概ね1MHz幅内での配置が望ましい。

##### 【案2】

現在6.25kHzステップで制度化されている周波数のワイドバンド化であり、400MHz帯各種業務用無線局の周波数（352.0875～352.1125MHz及び352.2875～352.3125MHzの6.25kHz間隔の合計10波）に対して、2倍の帯域を利用する。3.125kHzオフセットして352.090625MHz、352.103125MHz、352.290625MHz、352.303125MHzを中心周波数としての合計4波。（図4-1及び表4-1、表4-2）

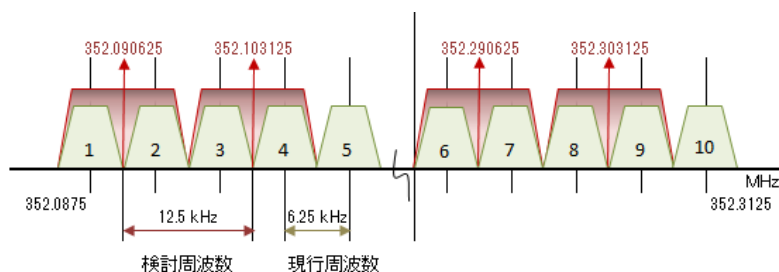


図 4-1 案2の周波数配置案

表 4-1 案 2 の周波数配置 (1/2)

使用周波数	
現行周波数 MHz	要望周波数 MHz
352.08750	352.090625
352.09375	
352.10000	352.103125
352.10625	
352.11250	

表 4-2 案 2 の周波数配置 (2/2)

使用周波数	
現行周波数 MHz	要望周波数 MHz
352.28750	352.290625
352.29375	
352.30000	352.303125
352.30625	
352.31250	

【案 3】

現在 6.25kHz ステップで制度化されている周波数におけるワイドバンド化であり、400MHz 帯各種業務用無線局の周波数（352.0875～352.1125MHz 及び 352.2875～352.3125MHz の 6.25kHz 間隔の合計 10 波）に対して、2 倍の帯域を利用する。現行周波数の中で 12.5kHz ステップで規定する。（図 4-2 及び、表 4-3、表 4-4）

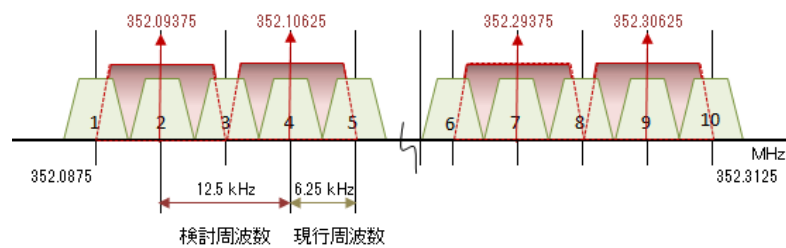


図 4-2 案 3 の周波数配置

表 4-3 案 3 の周波数配置 (1/2)

使用周波数	
現行周波数 MHz	要望周波数 MHz
352.08750	352.09375
352.09375	
352.10000	352.10625
352.10625	
352.11250	

表 4-4 案 3 の周波数配置 (2/2)

使用周波数	
現行周波数 MHz	要望周波数 MHz
352.28750	352.29375
352.29375	
352.30000	352.30625
352.30625	
352.31250	

### (3) 変調方式

現行、狭帯域デジタル通信方式の無線局の無線設備規則の範囲で準用する。

変調方式は、四値デジタル変調（四分のπシフト四相位相変調、オフセット四相位相変調又は四値周波数偏位変調をいう。）又は、一六値デジタル変調（一六値直交振幅変調又はマルチサブキャリア一六値直交振幅変調をいう。）（設備規則 57 条の 3 の 2）

### (4) 隣接周波数との共用

共用対象となる現行システムが 4 値 FSK（6.25kHz）の場合には、「(2)周波数の数」における案 2 の 5ch 及び 10ch に 4 値 FSK（12.5kHz 希望波）を数値上配置できず（※）、周波数配置においては留意が必要である。

（※）「小電力の無線システムの高度化に必要な技術的条件について」のうち「小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係わる技術的条件」に関する一部答申（平成 14 年 9 月 30 日付 情報通信技術分科会諮問第 2009 号）の情報通信審議会 情報通信技術分科会 小電力無線システム委員会報告（平成 20 年 3 月 26 日）より

## (5) 通信方式：単信・単向・同報通信方式

現行、狭帯域デジタル通信方式の無線局の無線設備規則の範囲で準用する。

### 4.1.2 無線設備の技術的条件

#### (1) 送信装置

##### ア. 周波数の許容偏差

将来、9600bps で不足となり更にデータ量が必要になることを考慮して 2 倍の 19200bps を考慮する。

送信速度が毎秒 8k ビットを超え 20k ビット以下の変調信号を使用するもの

(ア) 1W 以下のもの ±100 万分の 2 以内

(イ) 1W を超えるもの ±100 万分の 1.5 以内

とすることが望ましい。

イ. 占有周波数帯幅 : チャネル間隔が 12.5kHz のもの 11.5kHz

設備規則別表第 2 号 (第 6 条関係) 第 37 項に準拠する。

ウ. スプリアス発射又は不要発射の強度の許容値

設備規則別表第 3 号 (第 7 条関係) 第 19 項に準拠する。(表 4-5)

表 4-5 不要発射強度の許容値

空中線電力	帯域外領域におけるスプリアス発射の強度の許容値	スプリアス領域における不要発射の強度の許容値
50W を超えるもの	2.5 $\mu$ W 以下又は基本周波数の平均電力より 60dB 低い値	50 $\mu$ W 以下又は基本周波数の搬送波電力より 70dB 低い値
1W を超え 50W 以下		2.5 $\mu$ W 以下又は基本周波数の搬送波電力より 60dB 低い値
1W 以下	25 $\mu$ W 以下	25 $\mu$ W 以下

##### エ. 空中線電力及びその許容偏差

(ア) 空中線電力 : 上限規定なし

ただし、証明規則第 2 条第 25 号の 4 において 50W 以下のものが証明規則の対象となる。

(イ) 許容偏差 +20% -50% (無線設備規則 第 14 条)

オ. 隣接チャンネル漏洩電力

(ア) 四値デジタル変調の場合は、次の値であること。

チャンネル間隔が一二・五 kHz のものにあつては、搬送波の周波数から一二・五 kHz 離れた周波数の(±)R の帯域内に輻射される電力が、搬送波電力より五五デシベル以上低い値又は三二マイクロワット以下の値であること。ただし、一ワット以下の無線局の場合は四五デシベル以上低い値であること。

(イ) 一六値デジタル変調の場合は、次の値であること。

チャンネル間隔が一二・五 kHz のものにあつては、搬送波の周波数から一二・五 kHz 離れた周波数の(±)R の帯域内に輻射される電力が、搬送波電力より五五デシベル以上低い値又は三二マイクロワット以下の値であること。ただし、一ワット以下の無線局の場合は四五デシベル以上低い値であること。

(無線設備規則 第 57 条の 3)

## (2) 受信装置

現行、狭帯域デジタル通信方式の無線局の無線設備の規定を準用する。

### 4.1.3 その他の技術的条件

現行、狭帯域デジタル通信方式の無線局の無線設備の規定を準用する。

#### 4.2 位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等データの伝送用無線機

400MHz 帯各種業務用無線設備の内、「ロボットトラクターの状態観測データ(位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等データ) 伝送用無線機」の技術的条件については表 4-6 のとおりとすることが適当である。電波法令に根拠を有するものは括弧で関連規定を記載している。

表 4-6 ロボットトラクターの状態観測データ伝送用無線機の技術的条件

技術的条件の項目	内 容	備 考
周波数帯	347.7MHz～420MHz の範囲において選定	
通信方式	単信・単向・同報通信方式	
周波数の許容偏差	±100 万分の 3 以内	(無線設備規則 第 5 条、別表第 1 号)
占有周波数帯幅の許容値	20kHz 以内	(無線設備規則 第 6 条、別表第 2 号)
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：2.5 μW 以下 スプリアス領域における不要発射の強度の許容値：2.5 μW 以下	(無線設備規則 第 7 条、別表第 3 号)
空中線電力及びその許容偏差	空中線電力：1W	許容偏差：上限 20%、下限 50% (無線設備規則 第 14 条)
隣接チャンネル漏えい電力	変調信号の送信速度が毎秒 8 キロビットを超えるものにあつては、搬送波の周波数から 25kHz 離れた周波数の(±) 8kHz の帯域内に輻射される電力が、搬送波電力より 60dB 以上低い値であること。	(無線設備規則 第 57 条の 3)
送信空中線利得	3dBi 以下	
変調方式	2 値 FSK	汎用性の高い 2 値 FSK 方式を採用
送信時間	20ms 以下	
休止時間	980ms 以上	
電気通信回線設備に接続可能	接続可能とする。	
キャリアセンスの必要性	あり	
再送制御	なし	情報鮮度を保つために古いデータは廃棄。

## 5. 調査検討のまとめ

本調査検討では、ロボット農業の高度化に適したシステムの構築について提言し、電波の有効利用の促進に資することを目的として、以下の項目に関する検討を行った。

- 400MHz 帯各種業務用データ専用デジタル波を利用する RTK-GNSS システム
- ロボットトラクターの状態観測データの伝送
- ロボットトラクターへの制御データの伝送
- 圃場の各種情報データの伝送
- 自営ブロードバンドの構築について

「400MHz 帯各種業務用データ専用デジタル波を利用する RTK-GNSS システム」については、現状、補正データの無線伝送は送信速度 4800bps の 400MHz 帯各種業務用無線局の周波数を使用しているが、谷合地域等では、トラクター側の捕捉衛星数が少なくなるため基地局から送られてくる衛星数との差異により精度が得られない場合があり、送信速度 4800bps では十分な補正データが送信できないことから、送信速度を 2 倍の 9600bps にすることでの有効性を検証し、技術的条件として取り纏めた。

なお、準天頂衛星については、センチメートル級精度公表値は水平方向・移動時で 12cm 以下とされているが、今後の本格稼働によりどの程度の精度が確保され、ロボット農業に適用可能かを検討していくことが必要である。加えて、地域によっては地盤自体が年数センチ動いていることから地殻変動等の地域特有の補正が必要な場合は RTK との併用が必要と考えられる。

ロボットトラクター関連及び圃場関連のデータ伝送については、伝送が求められるデータ項目及びその通信要件（データ量・更新レート・許容遅延）の洗い出しを行った上で、想定される無線方式との適合を評価した。

「ロボットトラクターの状態観測データの伝送」については、まず、「作業画像データ（アップリンク）の伝送」については、適合する無線方式として、地域 BWA・携帯電話・移動体画像伝送システム（169MHz）が挙げられるが、回線数と IP 対応を考えると、地域 BWA・携帯電話に集約されることが分かった。「位置情報、燃料残量、作物収穫量、農薬・肥料の使用量等データの伝送」については、圃場から農家への長距離直接伝送（10km 程度）の場合は実証試験の結果も踏まえ業務／簡易無線が適合し、中継伝送を利用する場合は、地域 BWA・携帯電話・業務／簡易無線（中継機能設計）が適合することが分かった。

「ロボットトラクターへの制御データの伝送」については、移動しているロボットトラクターを停止させることから考えて他局からの干渉が少なく確実に伝送できる一般業務無線局（400MHz 帯）の利用が望ましい。「停止信号」は安全の根幹である。例えば産業用ロボットにおいては、通信回線がつながっている状況において停止信号を送ることで停止するとともに、通信回線が切れた場合においても停止することで安全が保たれる等の仕組みを有しており、この産業用ロボットの仕組みを参考に無線利用していくことは想定される。

「圃場の各種情報データの伝送」については、圃場のセンサー情報収集のための業務／簡易無線・LoRaWAN・センサーネットワークに加えて、監視画像・IP伝送等の高速データ伝送に対応可能な携帯電話・無線LAN・地域BWAと複合したシステムが望ましいことが分かった。また、現在の圃場データ（センサー）に係わる様々な独自のデータフォーマットや誤り訂正等の手法に対するデータ標準化の必要性等の課題を考察した。

これらの検討より、通信の可用性や低遅延が求められるデータ（位置情報、ロボットトラクター制御データ等）に対する適切な無線方式を採用するとともに、画像を中心とした大容量伝送が可能なブロードバンド網との、複合システムが求められる。

なお、ブロードバンド網の整備については、通信事業者による構築・運用が基本と考えられるが、一方で、通信事業者による地方部でのブロードバンドサービスの実施は経済性から考えても非常に難しい状況がありうる。

このような背景のもと、「自営ブロードバンドの構築について」の検討においては、行政からの支援のあり方として、行政としても妥当な説明が行いやすいと想定される、デジタルデバイド解消／地域経済活性への寄与／安全・安心な地域社会構築に向けた社会基盤、といった利用名目のもとでの、（財政面やユーザー数確保等において単独自治体では困難な地域に対する行政区域を跨ぐ形での展開（協働展開）を可能とするなどの制度や支援スキームを含む）公設民営型のネットワーク構築の必要性を提言した。



## 資料編

### 資料 1 ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会 開催趣旨

近年、北海道の主要産業の一つである農業は、営農戸数の減少、就業者の高齢化による労働力不足が課題となっている。

このような課題の解決に向け、無人化によるロボット農業が注目されており、地域及び研究機関からは、ロボットトラクターの安全な自律走行の確保や、農作業の省力化・効率化を図るため各種データの自動観測・収集等をはじめとするロボット農業の高度化に適したシステムの構築について強い要望が寄せられている。

以上のことから、本調査検討会においては、農業分野での利活用を見据え、400MHz 帯各種業務用データ専用デジタル波等を利用する RTK-GNSS システム等について、伝送距離と誤差精度、伝送方式、必要とするチャンネル数及び占有周波数帯幅等の必要な技術的条件やシステム構成に係る検討を行い、ロボット農業の高度化に適したシステム構成等について提言し、電波の有効利用の促進に資することを目的として開催するものである。

## 資料2 ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会 設置要領

### 1 名称

本調査検討会は、「ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会（以下「調査検討会」という。）」と称する。

### 2 目的

北海道の主要産業の一つである農業において無人化によるロボット農業が注目されており、地域及び研究機関からは、ロボットトラクターの安全な自律走行の確保や、農作業の省力化・効率化を図るため各種データの自動観測・収集等をはじめとするロボット農業の高度化に適したシステムの構築について強い要望が寄せられている。

このようなことから、本調査検討会では、農業分野での利活用を見据え、400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波等を利用するRTK-GNSSシステム等について、伝送距離と誤差精度、伝送方式、必要とするチャンネル数及び占有周波数帯幅等の必要な技術的条件やシステム構成に係る検討を行い、ロボット農業の高度化に適したシステム構成等について提言し、電波の有効利用の促進に資することを目的とする。

### 3 検討項目

調査検討会の目的を遂行するために、ロボット農業の高度化に適したシステム構築に関する次の項目について、調査検討する。

- (1) ロボット農業の現状と課題
- (2) RTK-GNSSシステム等におけるロボット農業の高度化に必要な技術的条件等
- (3) ロボット農業の高度化に適したシステム構成等の提言
- (4) その他必要な事項

### 4 構成

調査検討会の構成は、次のとおりとする。

- (1) 調査検討会は、北海道総合通信局長が委嘱した委員により構成する。
- (2) 調査検討会に、座長1名を置く。
- (3) 座長は、委員の互選により選出する。
- (4) 座長は、調査検討会を代表し、会務を総理する。
- (5) 座長は、委員の中から副座長を指名する。
- (6) 副座長は、座長を補佐し、座長に事故あるとき又は座長が欠けたときは、その職務を代理する。
- (7) 調査検討会には、具体的な検討を行う作業班（WG）を置くことができる。
- (8) 作業班の構成は、調査検討会で定める。
- (9) 調査検討会には、必要に応じて専門家の参加を認めることができる。
- (10) 調査検討会の事務局は、北海道総合通信局無線通信部企画調整課に置く。

## 5 運 営

調査検討会の運営は、次のとおりとする。

- (1) 調査検討会は、座長が招集し、主宰する。
- (2) 調査検討会は、必要に応じ電子メール等による運営を行う。
- (3) 作業班の開催に必要な事項は、別途定める。
- (4) その他運営に関して必要な事項は、調査検討会において定める。

## 6 開催期間

設置の日から報告書を取りまとめる日までとする。

## 7 その他

- (1) 調査検討会における調査検討事項に関する成果を公表するときは、あらかじめ北海道総合通信局の承認を得るものとする。
- (2) 調査検討会の成果物に関する権利（例えば、調査検討結果を記した著作物等）は、原則として北海道総合通信局に帰属する。

資料3 ロボット農業の高度化のための技術的条件等に係る調査検討会 委員構成

(五十音順)

阿辺 一郎	農林水産省 北海道農政事務所 生産経営産業部 生産支援課 課長
姉齒 章	双葉電子工業株式会社 システムソリューション事業センター技術部 主管技師
石垣 悟	日本無線株式会社 事業本部 事業統括部 担当部長
岡本 幸一	ホクレン農業協同組合連合会 管理本部 経営企画部 ICT推進課 課長
岡本 博史 (座長)	北海道大学 大学院農学研究院 ビークルロボティクス研究室 准教授
香川 譲司	ヤンマーアグリジャパン株式会社 北海道カンパニー アグリサポート部 ICT推進グループ 専任部長
加藤 数衛	株式会社日立国際電気 映像・通信事業部 技師長
岸 恵純	株式会社ニコン・トリンプル 顧問
黄瀬 信之	岩見沢市 企画財政部 企業立地情報化推進室 室長
草薙 忍	国土交通省 北海道開発局 農業水産部 農業振興課 課長
小林 伸行	株式会社スマートリンク北海道 常務取締役
佐藤 光泰	北海道経済連合会 産業振興グループ総括部 部長 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
澁谷 幸憲	北海道農業研究センター本所 水田作研究領域 水田機械作業グループ長
白旗 哲史	北海道 農政部 生産振興局 技術普及課 課長
竹平 吉彦	NTT データカスタマーサービス株式会社 営業本部 営業戦略部 部長
竹村 秀和	北海道農業協同組合中央会 営農指導支援センター 営農指導課 課長
筒井 弘 (副座長)	北海道大学 大学院情報科学研究科 情報通信ネットワーク研究室 准教授
西谷内 智治	いわみざわ地域ICT農業利活用研究会 会長
三木 啓嗣	総務省 北海道総合通信局 無線通信部 部長
渡川 洋人	株式会社JVCケンウッド 無線システム事業部 国内システム開発部 シニアマネジャー

資料 4 検討経過報告

会合	日程	場所	議題
第1回	2017年9月5日(火)	北海道総合通信局 第一会議室	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 調査検討会の設置について</li> <li>● 座長・副座長の選出について</li> <li>● 調査検討概要 <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 総務省が実施する技術試験事務</li> <li>➢ RTK-GNSS システムの現状</li> <li>➢ ロボットトラクターの状態観測・制御に関するシステムの現状</li> <li>➢ 圃場ビッグデータ収集に関するシステムの現状</li> </ul> </li> <li>● 技術試験の実施項目について</li> <li>● 全体スケジュールについて</li> </ul>
第2回	2017年11月22日(水)	北海道総合通信局 第一会議室	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 作業班(WG)の設置について <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ RTK-GNSS WG</li> <li>➢ ロボットトラクター WG</li> <li>➢ 圃場データ WG</li> <li>➢ 自営ブロードバンド整備 WG</li> </ul> </li> <li>● 実証試験の中間報告について</li> <li>● プレゼンテーション <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 北海道における農業と本会のスマート農業への取り組み</li> <li>➢ 準天頂衛星 L6 信号対応 GNSS 受信機紹介</li> </ul> </li> </ul>
第3回	2018年2月1日(木)	北海道大学農学部 会議室 S103	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 実証試験結果速報</li> <li>● 作業班(WG)からの報告 <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ ロボットトラクター WG</li> <li>➢ 圃場データ WG</li> <li>➢ 自営ブロードバンド整備 WG</li> </ul> </li> <li>● 報告書骨子について</li> </ul>
第4回	2018年3月5日(月)	北海道大学農学部 会議室 S103	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 報告書(案)について</li> </ul>
成果発表 報告会	2018年3月28日(水)	ホテルポールスタ ー札幌 2F コンチェルト	<p>ICT/IoT で切り拓く北海道農業の未来</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 第1部：ロボット農業の高度化 <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ スマート農業の現状と調査検討会の成果</li> <li>➢ 安定した自動走行を実現する高度化 RTK-GNSS</li> <li>➢ トラクターの農作業をサポートする無線システム</li> <li>➢ 農業 ICT/IoT の基盤として期待する地域ブロードバンド環境</li> </ul> </li> <li>● 第2部：スマート農業の取組事例(プレゼンテーション) <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 地域連携の取組み～アグリガールから IoT デザインガールへ</li> <li>➢ 農業現場で使える ICT ソリューション事例(パネルディスカッション)</li> </ul> </li> <li>➢ スマート農業への期待</li> </ul>