

3. システム要件の検討

3.1 はじめに

システム要件の検討にあたり、本システムには以下(1)～(4)の機能を含めることとした。

(1) 飛行位置情報等を計測する機能

実現方法としては、GPS の利用（通常 GPS あるいは RTK）、マルチ GNSS 利用、準天頂衛星の利用が考えられる。

GPS 利用の場合、市販品が多数（ドローン用には Ublox 製が一般的）あるが、誤差数 m 程度、かつ衛星数が少ない時間や場所があり、高度方向の誤差が比較的大きい。また、RTK（リアルタイム・キネマティック）は誤差数 cm 可能だが、高速移動では性能が低下することが想定され、コストも要する。

マルチ GNSS（グローバル・ナビゲーション・サテライトシステム）利用の場合、衛星数が多くとれるため、今後一般化されることが見込まれている。

準天頂衛星利用の場合、誤差数 cm と精度が高く、今後衛星数が増加する見込みである。

以上より、現時点で利用可能かつコスト観点より、本件検証用としては GPS 利用を採用することとした。地面近くでは、周囲環境によって誤差が増える可能性があるが、ドローンが上空に上がればその影響は減少し、ドローンの位置管理用としては当面十分な精度であるものと想定している。なお、高度方向の誤差は、気圧センサーと併用すれば改善できるが、当面は対応しないものとする。

将来、より高精度かつ低コストかつ小型軽量な手段が利用可能になれば、そちらに移行することも想定される。

(2) 計測した情報（信号）を伝送する機能

伝送方式としては、Wi-Fi 方式（コネクション型）、ZigBee あるいは Wi-SUN 方式（ツリー or メッシュ）、ドローンマッパー方式（IEEE802.15.8、分散同報型）¹が考えられる。

Wi-Fi 方式（コネクション型）の場合、安価かつ手軽だが、伝搬距離が短いことが懸念される。

ZigBee あるいは Wi-SUN 方式（ツリー or メッシュ）の場合、安価かつ手軽だが、移動体への適用が難しい可能性が考えられる（経路変更等）。

ドローンマッパー方式（IEEE802.15.8、分散同報型）の場合、インフラが不要であり、マルチホップ可能である。現時点では未市販だが、基本機能実証済みである。

以上より、ドローンマッパー方式（IEEE802.15.8、分散同報型）を採用することとした。すでに 920MHz 帯で機能実証済みのため、新規に開発するよりも、開発コストと開発期間を短縮することが可能である。400MHz 帯無線モジュールのみ新規に試作し、小型 PC に接続する構成とする。（図 3-4 参照）

¹ 内閣府革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の中で情報通信研究機構が開発の位置情報共有方式

なお、複数ドローンからの位置情報を、できるだけパケット衝突を避けつつ受信するための同期信号は、GPS 受信信号から得ることとする。

(3) 計測した情報（信号）を地上で受信する機能

実現方法としては、集中型（アクセスポイント or 基地局型）あるいは分散型が考えられる。

集中型（アクセスポイント or 基地局型）の場合、集中管理が容易かつ効率が高いが、インフラとその管理及び維持が必要であり、コストが大きい。また、ドローンやヘリなどローカルで受信するためには別の通信手段が必要となる。

分散型の場合、インフラが不要かつ、全ての端末が同じ機能で構成することが可能であり、集中管理及び維持が不要であるため低コストとなる。また、ドローン等ローカルでも受信可能である。加えて、ヘリのパイロットも周辺ドローンの位置把握が可能となる。

以上より、分散型を採用することとした。

(4) 地上で受信した情報をパソコン等の地図上に表示する機能

実現方法としては、国土地理院地図・航空写真利用あるいは Google Earth 航空写真利用が考えられる。

国土地理院地図・航空写真利用の場合、国産の公共地図であり無料で使用可能である。しかし、航空写真は解像度が低く機能も限定している可能性がある。また、API（アプリケーション・プログラム・インターフェース）が提供されていないため、新規開発が必要となることが考えられる。

Google Earth 航空写真利用の場合、海外製であるが Android タブレットを表示端末として利用すれば、API 経由でフリーで使用可能である。航空写真の解像度は高く、世界共通に使用可能であり最も普及している。

以上より、当面は Google Earth 航空写真利用を採用することとした。考慮すべき表示項目としては、周辺ドローンの位置の他、機体間の相対位置、相対速度、機体種別（アイコン表現等）、衝突リスク表示など想定する。将来、地図メーカー等によりドローン用の地図や航空写真の提供サービスが利用可能になれば、そちらに移行することも想定される。

3.2 システム要件の検討

システム検討に当たっては、異なるユーザーの複数の小型無人機が同一の飛行エリアを同時に飛行することを想定している。また、無線機器の製造の容易さ（低廉化・小型化・省消費電力化等）を勘案している。

(1) 飛行位置情報内容

飛行位置情報の内容としては、機体識別符号（ID）、日付時刻、緯度、経度、海拔高度、機体種別（マルチロータ、シングルロータ、固定翼、有人ヘリ）等が挙げられる。

なお、データ量削減のため、対地速度、進行方向、昇降度、警報等は、表示端末（タブレット PC を想定）にて GPS 情報を元に計算して出力することとする。

また、ID は無線局独自のものを付与し、機体の製造番号、フライトコンピュータのシリアル番号、MAC アドレス、IP アドレス、航空局登録番号等はそこから紐づけることを想定した。

(2) 送信情報量

ドローンマッパーで現在採用されているアスキー形式から、データサイズ圧縮のために、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 のバイナリ形式とした。

通信に必要なデータ（プリアンブル、同期コード、識別符号、CRC など）：小計 176bit と合わせて、1 機体からの送信情報量は計 352bit となる。

なお、端末 ID は 4byte で約 43 億台収容可能であり、3byte の場合 1677 万台となる。

(3) 所要通信距離

2.4 で検討の本システムの利用シーンと要件を踏まえ、飛行位置を把握できる範囲として半径 10km 程度を想定する。

なお、樹木、地形、建物等の遮蔽により、近距離でもデッドゾーンが発生（機体が消える）しうが、これを完全に解決するには、地上にギャップフィラーとなる中継モジュール（機能は通常のドローンマッパーモジュールと同等）を配置する必要がある、コストと手間を要する。一方、ドローン間でマルチホップする機能を活用すれば、デッドゾーンの減少は期待されるが、収容台数は減少することとなる。

(4) 同時運用機体数

2.4 で検討の本システムの利用シーンと要件を踏まえ、同時に飛行位置を把握できる機体数は、同一範囲内において同一周波数で（10 機以上）50 機程度までを想定する。

(5) 飛行位置情報データフォーマット

小型無人機から送信される飛行位置情報は、地上端末で受信され、地上端末に含まれる小型 PC のイーサポートより任意の地上ルータを経由して UTM（小型無人機運航管理）システムに出力する構成とする。なお、JUTM（日本無人機運行管理コンソーシアム）が実証実験に用いているデータ交換用フォーマットは CSV 形式であるため、当面、それに合わせることにした。

(6) 飛行位置情報更新回数

2.4 で検討の本システムの利用シーンと要件を踏まえ、飛行位置情報の更新回数は、毎秒 1 回を想定する。

(7) 飛行位置計測可能な機体速度

水平・垂直方向とも時速 100km 以上の移動時でも計測可能とする。ただし、ドローンの位置管理のみを目的とし、緊急時の衝突回避は想定しない。この時、時速 100 km での 1 秒間の移動距離は約 28m であり、時速 40 km でも約 11m の誤差が生じる。また、400MHz 帯の場合の時速 100 km でのドップラ周波数偏移は約 70Hz である。

(8) 飛行位置情報の誤差

通常 GPS の想定で、反射物に囲まれた環境でなければ、誤差 10m 以下は可能と想定（当面、補正信号は不要）される。

なお、高いビル等に囲まれた都市部等での低高度運用では、10m 以上の誤差が発生する可能性がある。

(9) 地図上表示遅延時間

把握したすべての小型無人機の飛行位置をパソコン等（タブレット PC の利用を想定）の地図上に表示可能とする。この場合の遅延時間は 1 秒以下（バースト信号の衝突による遅延は含めない。）とする。ただし、ドローン台数が増えてくると、パケット衝突の確率が増加することにより、個別のケースで 1 秒を超える場合も想定される。

(10) 地上での表示方法等

地図では情報量が少ないため、航空写真の表示を想定する。

具体的には、API が提供され、Android タブレットとの親和性がよい Google Earth の利用を想定（現状のドローンマッパーで使用中）する。

画面デザインとしては、航空写真上にドローンやヘリの位置（アイコン表示）、ID、進行方向、飛行速度、相対距離、相対方位、相対高度差（オプション）、着陸中か飛行中かの区別（オプション）等を表示することを検討する。

(11) プロトコル

ドローンからの情報については、例えば DJI 社、ArduPilot 系（エンルート社が使用）等、それぞれが別の API を使っており、プロトコルが合わないと実際に使うことができないという懸念があるが、これについては、ドローンの位置情報は、フライトコンピュータからではなく、位置情報送信装置が別に持つ GPS 受信装置より独自に得ることにより製造メーカーによって異なるフライトコンピュータに依存しない位置把握システムとする（ドローンマッパー方式）。この場合、GPS 受信機を各ドローンが複数台もつことになるが、万一、GPS が不時着あるいは墜落し、ドローン飛行システムが停止した場合でも、位置情報送信装置のみ生き残る確率が増え、ドローンの捜索に役立つことも考えられる。（バッテリーも、飛行システムとは独立した小型バッテリーにより位置情報送信装置を動作させる。）

3.3 無線機諸元

本調査検討において実施する伝搬特性等の実測調査や動作確認に使用するプロトタイプ（試作装置）に搭載される無線機の諸元を検討した。

3.3.1 変調方式に関する技術検討

(1) 変調方式に関する技術検討

変調方式については、4GFSK 方式と 2GFSK 方式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結果を以下に示す。

1) 4GFSK 対応のデバイスの調査

TI 社、アナログ・デバイセズ社、シリコンラボラトリーズ社にて 4GFSK モードを搭載しているデバイスを用いて調査を行った。

T1 社 CC1101 のシンボル例（公表値）を表 3-1 に、AD 社 ADF7021F のシンボル例（公表値）を図 3-1 に、各社シンボル例を同等数値に変換し比較したものを表 3-2 に示す。

表 3-1 と図 3-1（表 3-2 比較表）で各シンボルの周波数偏移位置が異なることから、通信のフレームシンクで異種間通信ができなくなり、結果データが抜けないことが分かる。

デバイス調査のまとめを表 3-3 に示す。表 3-3 のとおり、シリコンラボラトリーズ社については一般公開されていないことから通信できない可能性が高く、仮にできたとしても、保障されていないため通信の品質の安定性が担保できないことになる。

表 3-1 T1 社 CC1101 のシンボル例（公表値）

Format	Symbol	Coding
2-FSK/GFSK	'0'	- Deviation
	'1'	+ Deviation
4-FSK	'01'	- Deviation
	'00'	- 1/3- Deviation
	'10'	+1/3- Deviation
	'11'	+ Deviation

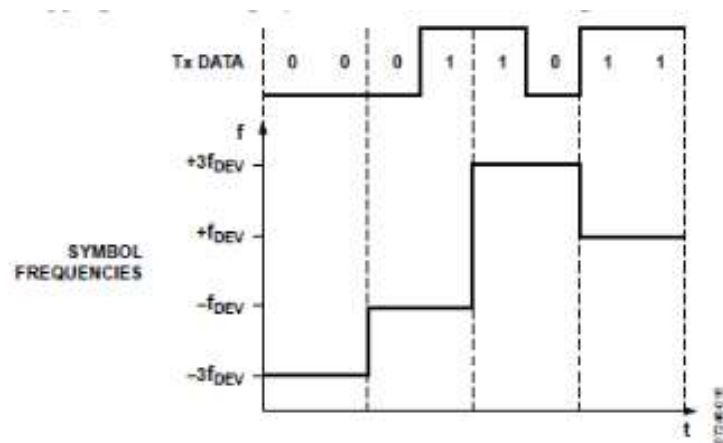


図 3-1 AD 社 ADF7021F のシンボル例（公表値）

表 3-2 各社シンボル例を同等数値に変換し比較

シンボル	T1 社 CC1101	AD 社 ADF7021F	Si 社
01	-3	-1	未公開
00	-1	-3	未公開
10	+1	+3	未公開
11	+3	+1	未公開

表 3-3 デバイス調査まとめ

メーカー	テキサス・インスツルメンツ・ セミコンダクター株式会社	アナログ・ デバイセズ社	シリコンラボラ トリーズ社
シンボル一般開示	△一部の製品は開示	○ 開示	× 未公開
相互互換	× 自社間	× 自社間	× 自社間

検討の結果、4GFSK を行うには、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。また、DSP を用いて無線機を作成した場合、回路規模とデバイス単価が大きくなり、普及は難しいと考えられる。2GFSK においては、正極性か負極性となることから、プリアンプル同期がとれば、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。

2) 2GFSK 方式による信号特性の確認

2GFSK 方式を使用した試験装置（双葉電子工業(株)試作）による 19.2kbps 信号の測定結果と SG で発生させた信号との比較を以下に示す。

- 周波数：400MHz 近辺
- 変調速度：19.2kbps
- 周波数偏移：4.5kHz（変調指数 $m=0.47$ ）

理論計算と目標値

最高変調周波数：9600Hz（19.2kbps）、最大周波数変移：4800Hz とすると、
変調指数(m)=最大周波数変移÷最高変調周波数=4800÷9600=0.5 となる。

FM 波受信側に必要な通過帯域幅は、 $2 \times (\text{最大周波数変移} + \text{最高変調周波数})$ となるので、
 $2 \times (9600 + 4800) = 28800\text{Hz}$ が求められるが、矩形波の伝送であることより側波帯が広がるため波形をガウスフィルタで鈍らす必要があり、結果、20kHz 程度となる。

400MHz 帯におけるチャンネル間隔は 25kHz であるが（他、6.25kHz, 12.5kHz）、当該帯域では狭帯域通信が利用されていることから、干渉影響低減のために、20kHz を目標とする。

測定の結果、試験装置と SG のどちらも占有周波数帯幅は 19.5kHz となり、概ね理論値に一致するとともに目標値を満足することが分かった。なお、試験装置のアイパターンは、デバイスの位相ノイズが起因しており FM 残留ノイズが大きいため SG に比べて狭く、対域外領域スプリアス発射強度も SG より悪かった。試験装置に用いている IC は 10 年前に設計されたものであり、近年作られたデバイスにおいては 18dB 程位相ノイズが改善されているため、SG に近い形の波形が期待できるものと考えられる。

試験装置の波形を図 3-2 に、SG 波形を図 3-3 に示す。

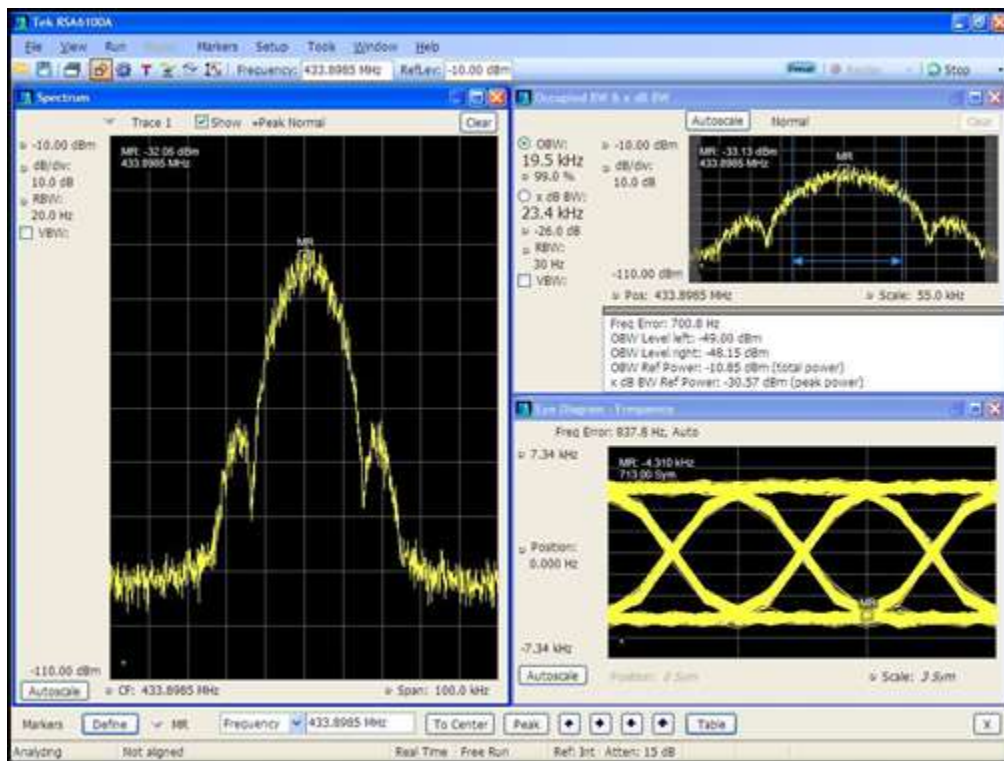


図 3-2 試験装置波形

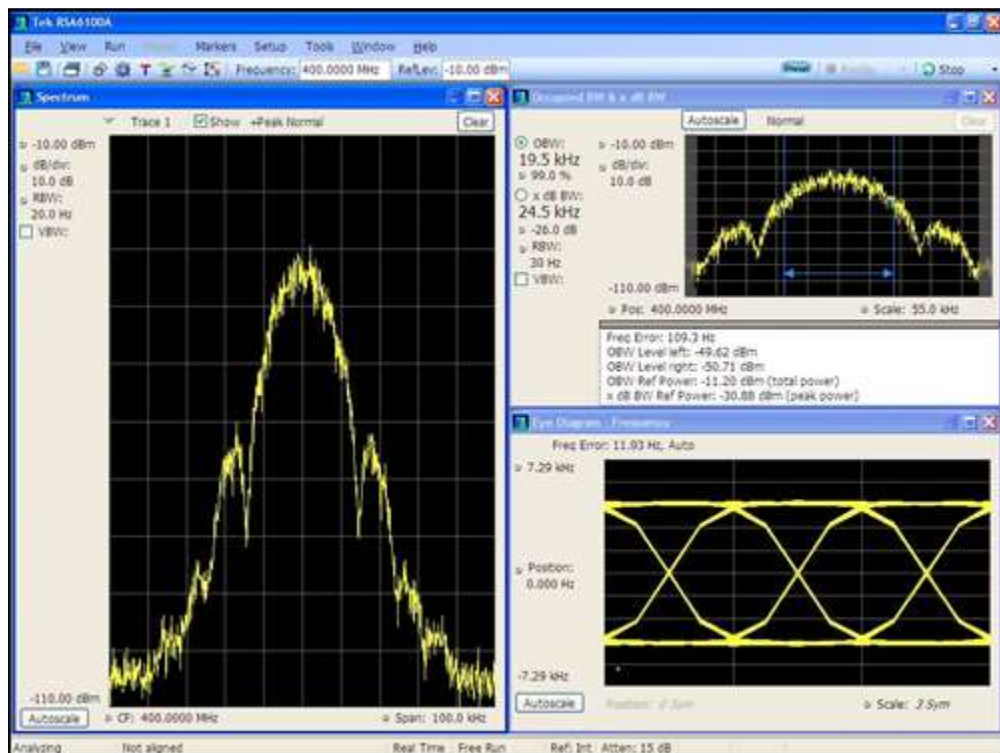


図 3-3 SG 波形

(2) 変調方式の決定

以上の検討の結果、回路規模やデバイス単価による普及の観点、及び、目標とする占有周波数帯域幅 20kHz 以内で変調速度 19.2kbps を確保可能であることが確認できたことより、2GFSK を採用することとした。

3.3.2 無線機諸元

本無線機の諸元を表 3-4 に示す。なお、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 3-4 無線機諸元

項目	内 容	備 考
周波数帯	398MHz (総務省告示第 178 号(H29.5.30)から 397.75MHz から 398.5MHz までの周波数で 東北総合通信局管内において空中線電力 10W 以下の指定を受けることが可能なこ とから上記周波数を選定。)	(347.7MHz～420MHz の範囲にお いて選定) 特定実験試験局で東北総合通信局 管内の陸上、沿岸水域及びその上 空。
通信方式	同報	今回の実験局申請では双方向通信 で電波伝搬試験を行うので単信の 申請で行った。
周波数の許容偏差	±100 万分の 4 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) *1
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 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	(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: 200mW 以下	許容偏差: 上限 20%、下限 50% (無線設備規則 第 14 条)
隣接チャネル漏えい電力	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	搭載アンテナは 0dBi
変調方式	2 値 FSK	汎用性の高い 2GFSK 方式とした。
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	位置情報送信装置がもつ小型 PC の LAN イ ンターフェースにより、接続可能とする。	
キャリアセンスの必要性	あり	送信パケットのスロット管理を併 用した自律分散システムによりパ ケット衝突確率低減を図るため。
再送制御	なし	位置情報データの鮮度を保つため に古いデータは廃棄。

※1 「無線設備規則 第 6 条 別表第 2 号」の該当する現行規定(第 13) は、1.4kHz、2.8kHz、3.16kHz の 3 種の規定と
なっていることより、占有周波数帯幅の許容値 20kHz 以内については規定の追加が必要である。以下に例示する。

例示: 「4: 変調信号の送信速度が毎秒 16 キロビットを超え 20 キロビット以下のもの 20kHz」

3.4 400MHz 帯ドローン位置把握システムの全体構成

今回、表 3-4 の諸元により新たに試作する 400MHz 帯無線モジュールにドローンマッパ
ー方式の既存 MAC (若干のカスタマイズは必要) を実装した小型 PC を USB で接続し、小
型 PC に GPS アンテナ及び表示用のタブレット PC を USB 接続する構成とした。

なお、ドローンに搭載する装置については、タブレット PC および外部ネット出力の接続
は行わない。

400MHz 帯ドローン位置把握システム全体構成を図 3-4 に、タブレット PC 表示画面の例

を図 3-5 に示す。

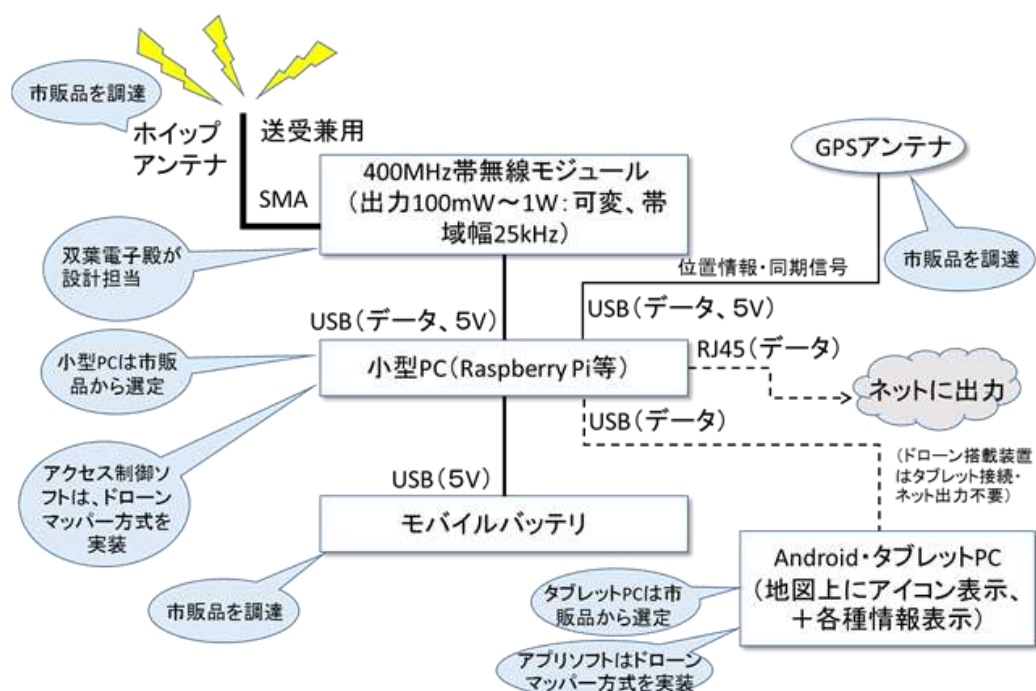
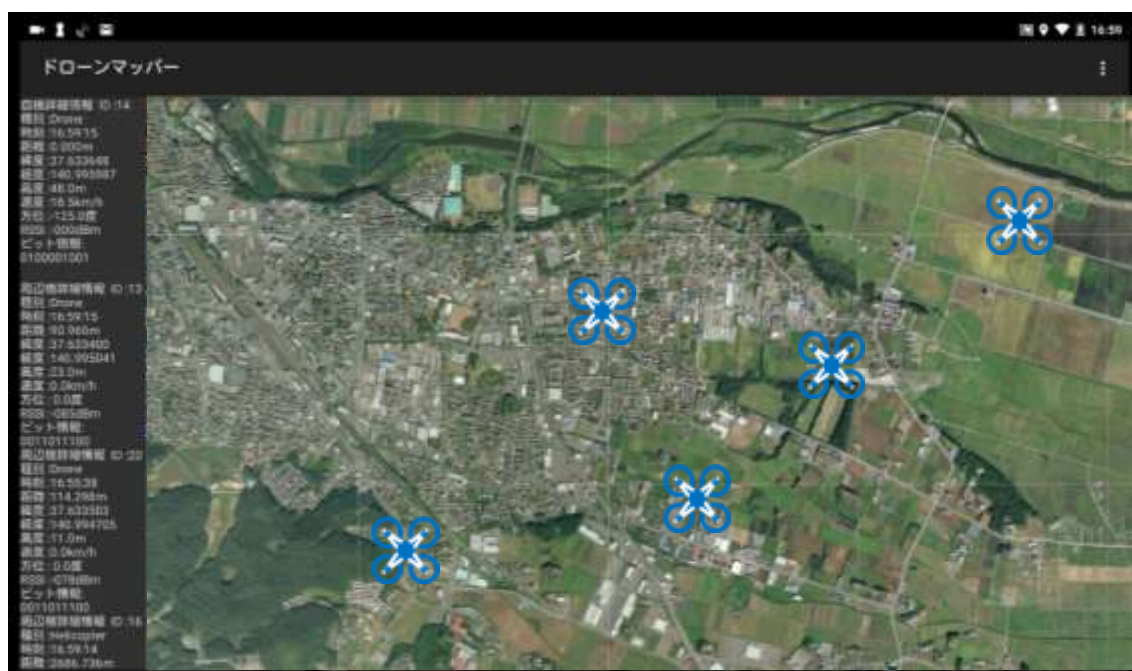


図 3-4 400MHz 帯ドローン位置把握システム全体構成
(ドローン搭載用、地上局受信用、有人ヘリ搭載用：全て同一モジュールで構成可能)



出所) 地理院地図

図 3-5 タブレット PC 表示画面の例