

技術紹介

6 ドローン向け電波距離計 JRE-30 の開発

The development of Radio Distance Meter JRE-30 for drones

小林 義幸	Yoshiyuki Kobayashi	航機事業部 第三技術部 主任
栗原 寛典	Hironori Kurihara	航機事業部 第三技術部 主任
鈴木 浩行	Hiroyuki Suzuki	航機事業部 第三技術部 主任
和田 拓磨	Takuma Wada	航機事業部 第一技術部

キーワード： 準ミリ波、レーダー、FM-CW(周波数変調連続波)、ドローン、対地高度、防水性、防塵性、高信頼性

Keywords : Submillimeter wave、Radar、FM-CW (Frequency Modulated Continuous Wave)、Drone、Altitude above ground level、Waterproof、Dustproof、High reliability

要 旨

ドローンの産業利用が本格化しており、特に、農薬散布、水上飛行、高所部点検等では、対地高度を安定して計測することが必要となってきました。現在のドローンでの対地高度計測は、レーザーや赤外線を使用したものが主流ですが、天候(雨、霧等)、周辺環境(粉塵等)、水上、樹木上といった環境下にて、精度劣化や測定不能となる欠点を持っています。

一方、航空機では電波を使用した対地高度計が一般的に使用されていますが、大きさ、重量の面からドローンへの搭載は困難でした。このたび、長年に渡る航空宇宙製品開発で培われた経験/実績を活かし、産業用ドローン向け電波距離計「Flight Brain™」JRE-30を開発しました。

本稿では、「Flight Brain™」JRE-30 の特長、機能、性能等について紹介します。

SUMMARY

Industrial use of drones is gaining momentum, and it is becoming necessary to stably measure altitude above the ground, especially for purposes such as pesticide spraying, flying over water, and inspecting high places.

Currently, most ground altitude measurements by drones use lasers or infrared rays, but they have the disadvantage that the accuracy deteriorates and measurement becomes impossible in weather conditions (rain, fog, etc.), in the surrounding environment (dust, etc.), above the water, and above the trees.

On the other hand, ground altimeters using radio waves are commonly used in aircraft, but it has been difficult to mount them on drones due to their size and weight.

We have now developed the JRE-30 radio distance meter "Flight Brain™" for industrial drones, leveraging the experience and track record cultivated over many years of aerospace product development.

This paper introduces the features, functions, and performance of the "Flight Brain™" JRE-30.

1. はじめに

近年ドローンは、建築、土木、農業などの産業用途にとどまらず、離島や山岳地帯への物資搬送など、より人々の生活を豊かにする用途にも使われ始めています。2022 年 12 月からは、法制度が整備され有人地帯の自律飛行（レベル 4 飛行）が可能になり、市街地の物流、災害救助、イベント警備など、さらに活用範囲が広がりつつあります。このような状況の中、ドローンの自律着陸や農薬散布等の低空での飛行、山岳部における地面からの一定高さでの飛行等、対地高度が必要となる場面が数多くあります。

現在、ドローンで対地高度計測に使用されている高度計は、レーザーや赤外線を利用していますが、これらのセンサの特性として、雨、霧、粉塵などの環境下では計測が不安定になること、また、水上や樹木の上空では、計測不能となる弱点を持っています。他方、当社は長年に渡り航空機搭載用の電波高度計の開発、生産を行ってきました。電波を使用して高度を計測しますので、上述の弱点は克服できますが、大きさ、重量の観点から、ドローンへの搭載は困難でした。

このたび、ドローンに搭載が可能な大きさ、重量の電波距離計「Flight Brain™」JRE-30（図 1）を開発しましたので、概要と特長を紹介します。



図 1 JRE-30 外観写真

2. JRE-30 の仕様

電波距離計「Flight Brain™」JRE-30 仕様と他社製品の対比を表 1 に示します。

2.1 測定距離

最小測定距離は 0.1 m として、小さな機体でも着地状態で高度測定を可能としました。また最大測定距離は 95 m として、高い高度を飛行するドローンにおいても対地高度計測を可能としました。

2.2 寸法、質量

ドローン搭載機器において、小型軽量は飛行距離/飛行時間と密接に関連する重要な要素です。JRE-30 は様々な機体に搭載できるように小型、軽量化を図り 110 g を実現しました。

2.3 動作温度

産業用ドローンは極寒地や真夏の炎天下で使用することが求められることから、「Flight Brain™」シリーズである当社ドローン用フライトコントローラー JFB-100 および JFB-110 の動作温度範囲と同じ -40~+85℃として、広い温度範囲を確保しました。

2.4 電波法

電波機器は、電波送出に際して、許可や免許が必要になる場合があります、許可や免許取得には手間と時間がかかります。JRE-30 は、免許の必要のない特定小電力機器に対応させ技術基準適合証明を取得し、ユーザーが入手後すぐに使用できるようにしました。

2.5 環境条件

JRE-30 は、通常、機体外部に露出して設置されることから、防水防塵規格を IP66 および IP67 に満足させると共に、耐環境性を担保するため、民間航空機向け耐環境性能基準である DO-160 準拠の環境試験を実施して、製品としての高い耐環境性を実現しています。

表 1 JRE-30 仕様

項目	JRE-30	他社同等製品
周波数	24 GHz	24 GHz
バンド幅	190 MHz	190 MHz
測定距離/高度	0.1～95 m	0.5～50 m
寸法	75 × 77 × 19 mm (図 2)	108 × 79 × 20 mm
質量	110 g (ケーブル 1 m 込み)	110 g (ケーブル無し)
温度	-40～+85℃	-20～+65℃
電波法	技術基準適合証明	対応無し
防水・防塵性	IP66、IP67	IP67
環境試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ DO-160 準拠 (振動、衝撃、温度、湿度、高度) ・ 1000 H、+85℃ 高温耐久 	対応無し

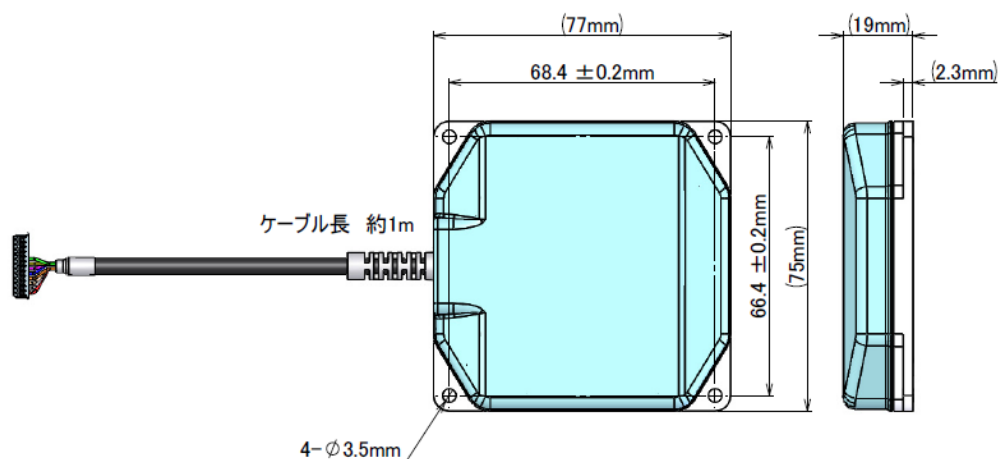


図 2 外観図

3. 開発のポイント

3.1 測距方式と周波数

電波による測距方式には、パルス方式と FM-CW 方式があります。パルス方式は、ターゲットに向けて電波パルスを放射し、そのパルスが物体に反射し返ってくるまでの時間から、距離/高度を求める手法です。短距離/低高度の測定時は、非常に短い時間を計測するため高い時間分解能が必要になり、回路規模が増大します。

FM-CW 方式は、周波数変調した連続波を送信し、受信した電波の周波数との周波数差（ビート信号）を利用して、高度を算出します。周波数の差を計測するため、低高度になるほど周波数の差は小さくなり、高速のサンプリング処理が不要となるため、回路規模を抑えられます。ドローン着陸時には低高度での精密な高度測定が必要となるため、FM-CW 方式が適しています（表 2）。

当社では航空機向け 4.3 GHz 帯パルス方式電波高度計の開発、生産を行っていますが、JRE-30 では、24 GHz 帯を使用することで波長が短くなるため、アンテナを小型化することができ、製品の小型化と軽量化が見込めます。また、4.3 GHz 帯の無線設備を使用するためには免許が必要でしたが、24 GHz 帯には移動体検知センサ用の割り当てがあり、技術基準適合証明を取得することでユーザーの利便性の向上も見込めることから、24 GHz 帯の FM-CW 方式の製品開発を実施することとしました。

表 2 測距方式

測距方式	パルス方式（時間差）	FM-CW 方式（周波数差）
方式	固定周波数の電波を、短時間パルス状に送信し、送信してから受信するまでの時間を計測し、距離を測定する	電波の周波数を変化させながら送信し、送信している周波数と受信した周波数の差を計測し、距離を測定する
特徴	測定する距離が短くなるほど、計測する時間が短くなる	測定する距離が短くなるほど、計測する周波数が低くなる

3.2 アンテナ開発

24 GHz の電波の送受信には、パッチアンテナと呼ばれるアンテナを使用します。アンテナ面の四角いパッドが電波を送受信する部分です。アンテナのパッチの数を増やすと、電波のビーム幅が絞られ、測定できる距離/高度が伸びますが、製品が大きくなってしまいます。パッチ数を 6×4 にして測定距離/高度を確保しながら、アンテナ一体の基板構造にしました（図 3）。

視野角は 31°（左右方向）×23°（前後方向）に設計し、機体が傾いた時でも高度計測が可能となるようにしました（図 4）。

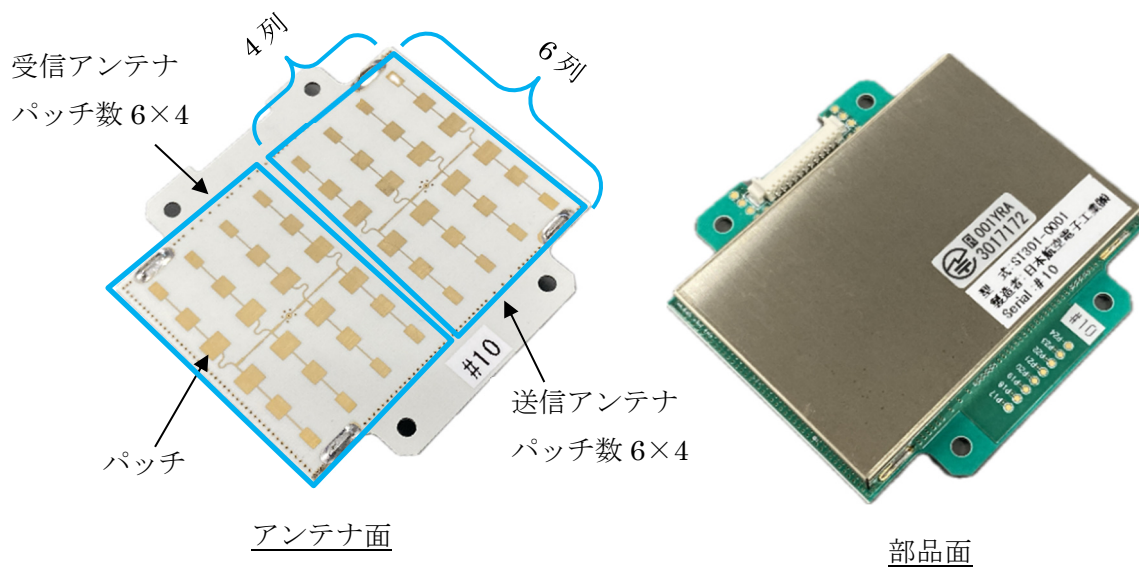


図3 アンテナ体のレーダーモジュール基板

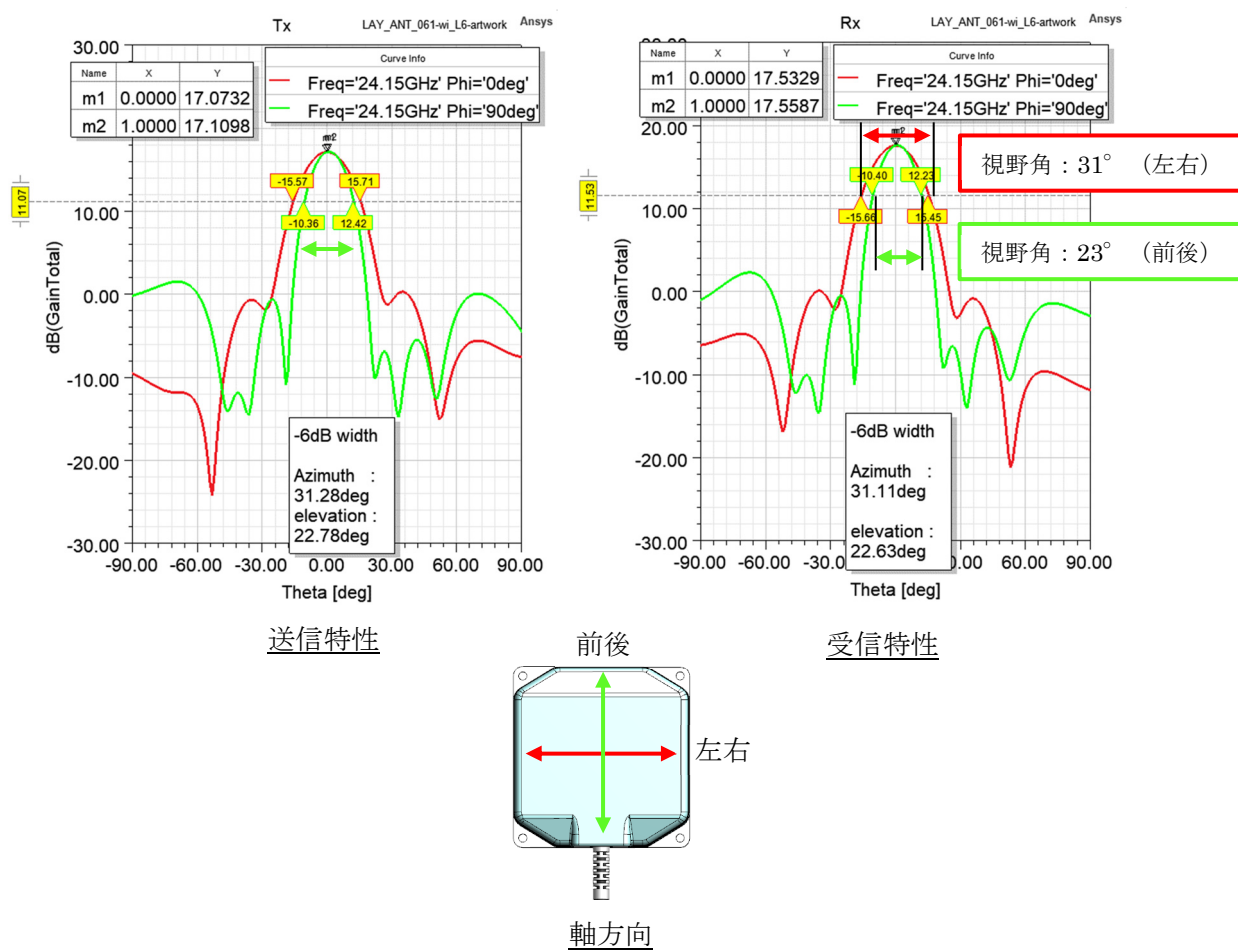


図4 アンテナ特性

3.3 測距アルゴリズム開発

JRE-30 のソフトウェアブロック図を図 5 に示します。

- ① A/D 入力で取得したビート信号にシステムノイズ除去と低域ノイズフィルタの処理を行い、低周波に発生するノイズ除去を行います。この低域のノイズ除去に独自のアルゴリズムを適用し、最小測定距離/高度 0.1 m を実現しました。
- ② FFT 処理では各周波数にどれほどの振幅が存在するかを検出します。FFT 処理では、窓関数で時間信号の連続性を確保した後、データ拡張処理により分解能を向上させる前処理を行った後、FFT 演算を行います。その後、ローパスフィルタでデータのばらつきを抑制します。
- ③ ピーク検出では振幅が大きいピークを 5 ポイント取得します。次に IF ゲイン調整でピーク検出の振幅を常時モニターし、反射の弱い環境下でも正しく高度を計測できるようにゲイン調整を行います。このアルゴリズムにより、最大測定距離/高度を実現しています。最後にメディアンフィルタでノイズを取り除き、データを出力します。

以上のような独自のアルゴリズムにより高性能な電波距離計を実現しています。

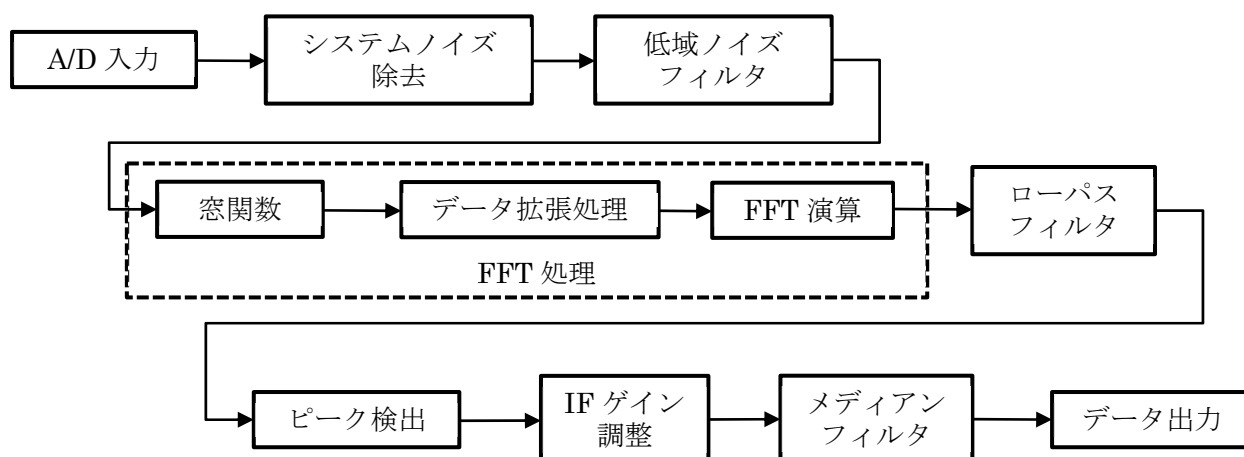


図 5 ソフトウェアブロック図

3.4 近距離測距性能の向上

JRE-30 は、送信アンテナと受信アンテナが一体型の製品です。そのため送信した電波を直接受信（リーク電波と呼びます）するため、常に近距離を測定している状態と同じ状況が発生します。このリーク電波の強度は温度等の環境変化により値が変化するため、フィルタ処理を行っています。一般的に、本事象に対しては、低周波信号を取り除くためのハイパスフィルタを用いますが、リーク電波による検出距離よりも近い距離はさらに減衰され、計測することが困難になります。こ

の現象に対して、当社では独自の低域ノイズフィルタを使用することにより、リーク電波の影響を排除しながら、近距離計測能力の保持を実現しています。なお、この低域ノイズフィルタは、特許出願中です。

3.5 レドームの開発

レドームとは、レーダーのアンテナを保護するためのケースのことです。ドローンでは、常に小型で軽量のものを要求されます。そのため、小型・軽量で電波特性に優れたレドームの開発を行う必要があります。

レドームの材料には、自動車用の 24GHz レーダーでの使用実績と、農薬への耐性を考慮し、PBT（ポリブチレンテレフタレート）樹脂を採用しました。レドーム厚さとアンテナ距離は、実機評価から理論値との差を求め、安定した電波特性が得られかつ小型軽量なレドームとなる寸法を決定しています（図 6）。

また、雨や埃などの環境下でも使用可能とするため、防水・防塵設計とし、IP66 および IP67 を取得しました。組立て易い構造にするため、パッキンと防水シールによる封止としています（図 7）。

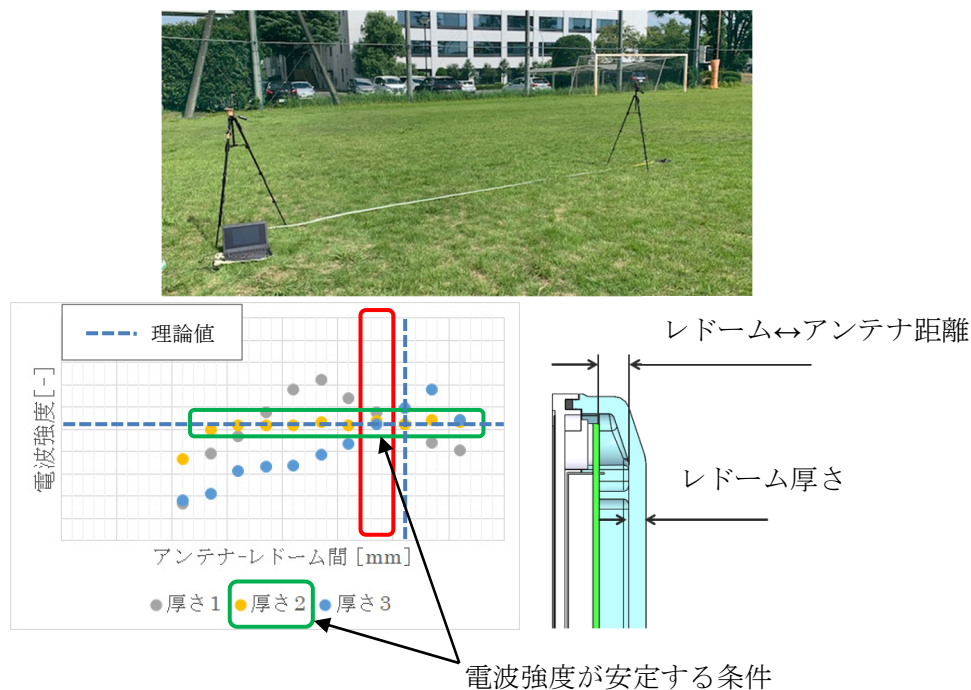


図 6 レドーム実機評価

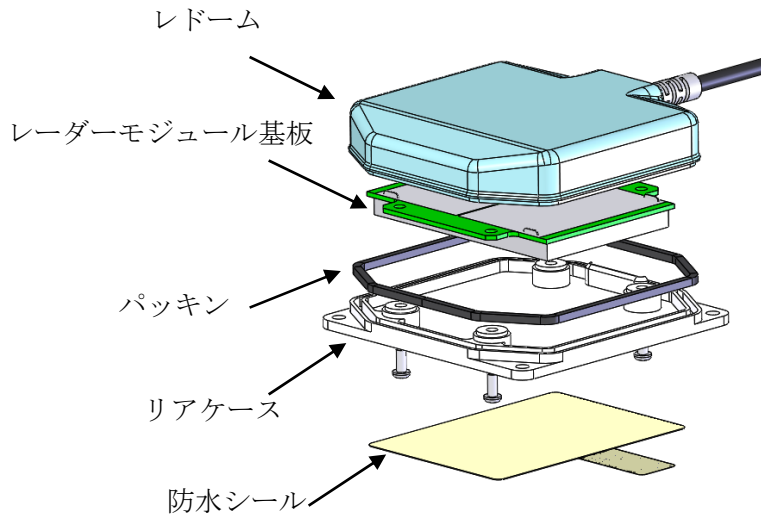


図 7 防水・防塵構造

4. JRE-30 の性能

4.1 測定性能

ドローンに搭載して最大測定高度を確認した結果を図 8 に示します。JRE-30 が最大高度 98 m を測定できることを確認しました。

水上での測定高度を LiDAR と比較した結果を図 9 に示します。JRE-30 は常時高度を計測できますが、LiDAR は測定不能や不安定な出力となっていることが分かります。

このように JRE-30 の高度測定性能が LiDAR よりも優れていることを確認できました。

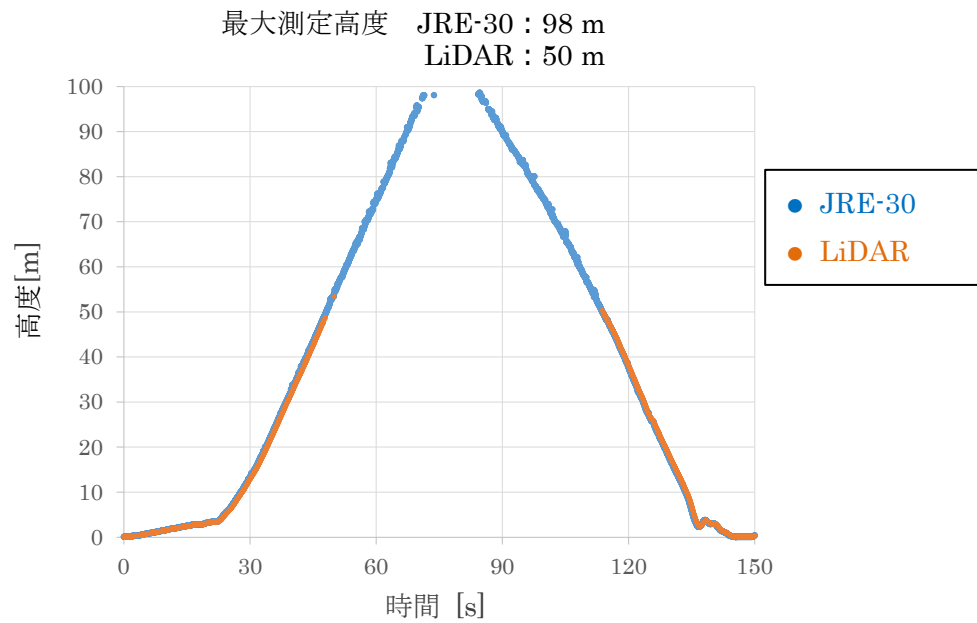


図 8 最大測定高度（土の上）

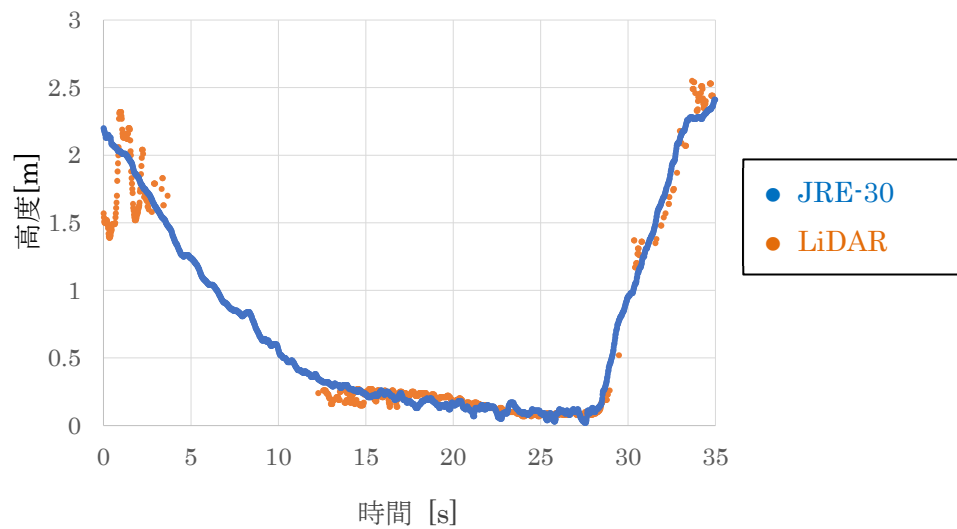


図 9 水上の測定高度

4.2 降雨試験

0 dBsm のリフレクタとコンクリート壁に向けて計測し、降雨試験を実施しました（図 10）。最大雨量 180 mm/h でもリフレクタおよびコンクリート壁までの距離を安定して測定することが可能であることを確認しました（図 11）。

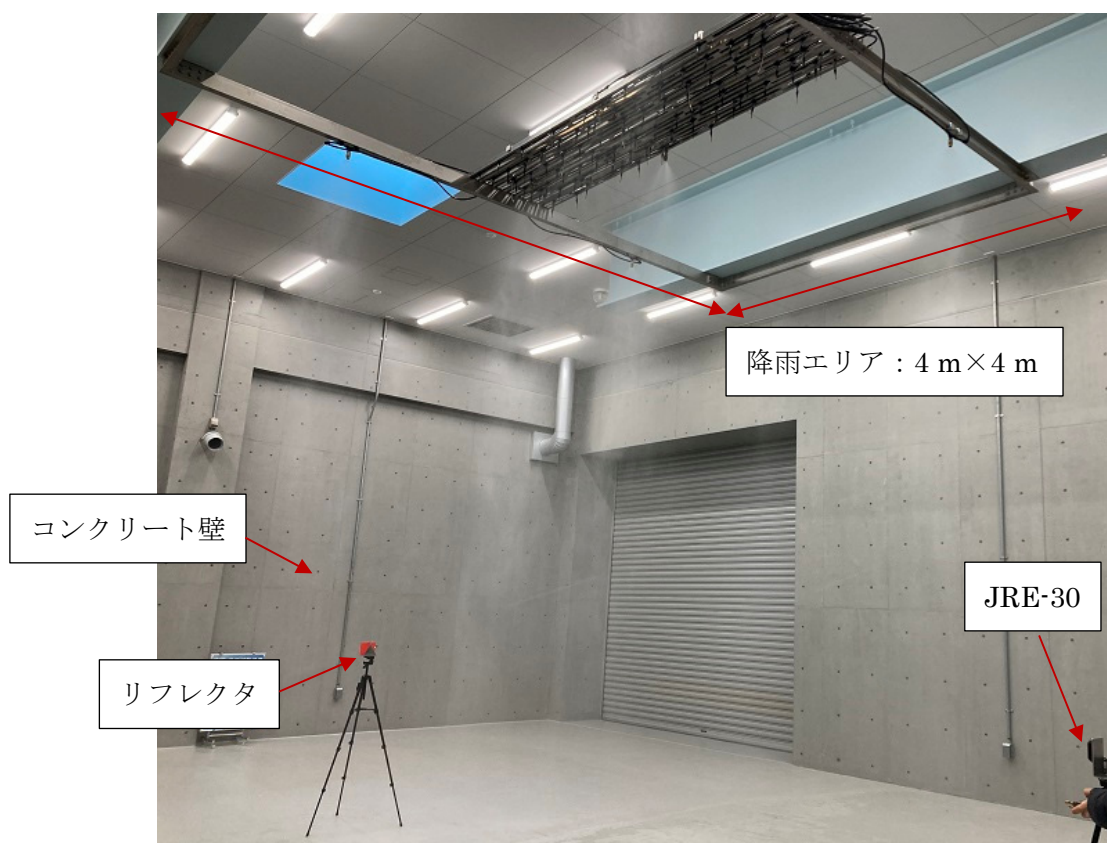


図 10 降雨試験（霧雨状態）

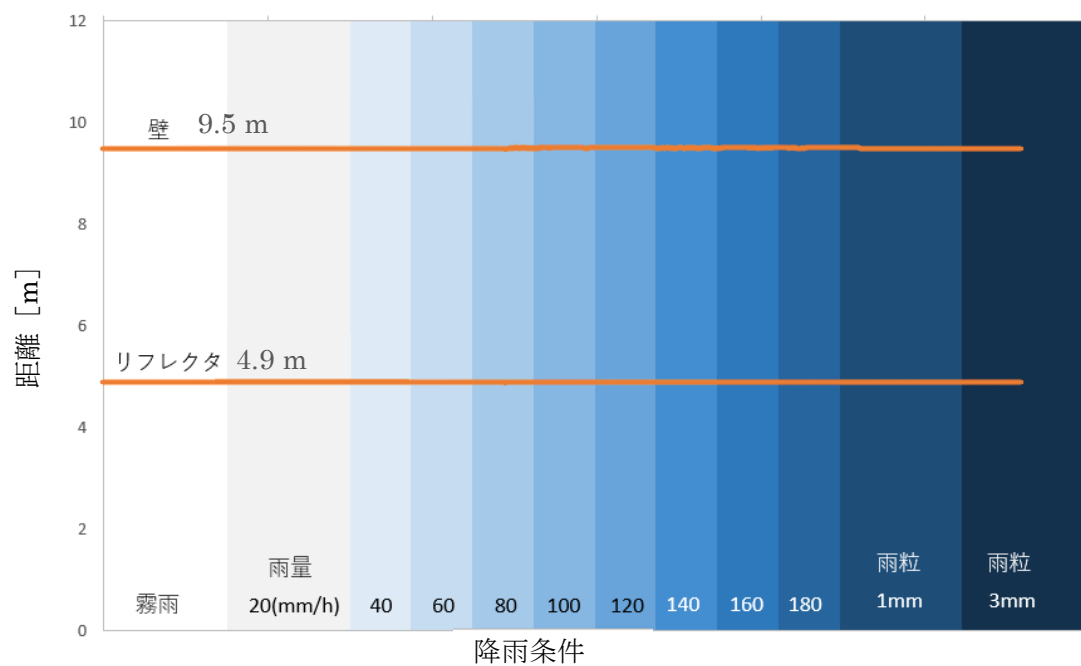


図 11 降雨試験結果

4.3 フライトコントローラーとの接続

ドローンのフライトコントローラーに繋げて JRE-30 を使用するためには、ドライバソフトが必要となります。そのため当社で ArduPilot 用のドライバを開発しました。このドライバは、ArduPilot に認定・承認されたため、ArduPilot 搭載のフライトコントローラーと簡単に接続ができます。インターネットで「ArduPilot JRE-30」を検索すると、詳細を確認することができます。¹⁾

5. 今後の計画

JRE-30 は、当初電波高度計として開発を開始した製品ですが、アンテナの向きを変えて設置すれば障害物センサや距離計測を行う電波距離計として使用可能です。しかしながら地上からの高度を計測する用途とは異なり、電波距離計として使用するには様々な大きさの障害物を検出するため、計測機能にはさらなる工夫が必要です。ドローン用途以外の様々な分野に応用できるように、アルゴリズムのブラッシュアップを図っていきます。

6. まとめ

ますます活用の方が広がることが見込まれるドローン市場に向けて、レーザーや赤外線を用いた距離センサの弱点を克服する、電波を用いた距離センサを開発しました。

当社は、今回ご紹介しました電波距離計 JRE-30 の他、すでに販売中のフライトコントローラー JFB シリーズに加え、今後リリース予定のドローン向け新製品と共に、産業用ドローンユーザーが安心して使用できる製品ラインナップを拡充し、空の安心、安全に貢献していきます。

Flight Brain™ は、日本航空電子工業株式会社の登録商標です。

ArduPilot は、Software in the Public Interest, Inc.の商標です。

【参考文献】

1) ArduPilot. “JAE JRE-30 Radar” .<https://ardupilot.org/copter/docs/common-rangefinder-jae-jre-30.html>, (参照 2024-03-01) .