

3. 研究報告

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 空中マイクロ波送電技術を用いた火山観測・監視装置の開発

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人 九州大学 大学院理学研究院	准教授	松島 健	mat@sevo.kyushu-u.ac.jp
同	教授	清水 洋	hshimizu@kyudai.jp
株式会社 翔エンジニアリング	代表取締役	藤原暉雄	
同	代表取締役	古川 実	
国立大学法人 京都大学 生存圏研究所	教授	篠原真毅	
国立大学法人 京都大学 防災研究所	教授	井口正人	
国立大学法人 東京大学 地震研究所	助教	及川 純	
国立大学法人 九州大学 理学部	技術専門職員	内田和也	
国立大学法人 九州大学 大学院理学府	修士課程	岩佐優一	

(c) 業務の目的

近年急速に技術革新が著しい無人航空機（ドローン）技術と、実用化に向けて着々と実験が進んでいるマイクロ波送電技術を組み合わせ、活火山等の到達不可能地域における観測・監視装置の設置と給電・データ回収を効率的に行う機器の開発を行い、実際の活火山地域に設置して火山研究・監視業務に資する。

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成28年度：

ギガヘルツ帯マイクロ波送電・受電装置を組み立て、火山観測用デバイスに組み込んだ。火山観測用デバイスとしては温度センサーを使用した。GNSS受信装置および地震観測装置の組込のための検討をおこなった。

11月上旬に伊豆大島で開催された無人観測ロボットシンポジウムに参加して、屋外でのマイクロ波送電・データ回収実験を実施した。

多素子のマイクロ波送受電アンテナを使用し、屋内試験において送電効率の計測を実施した。

2) 平成 29 年度 :

送電効率を向上するために、ギガヘルツ帯マイクロ波送電・受電装置のアンテナの設計試作をするとともに、免許取得が不要な室内での実験を実施した。火山観測用デバイスとして、GNSS 観測・地震観測用装置に接続するデータ送信装置の設計・製作を行った。

無人航空機の運用の訓練を行うとともに、無人航空機の自律航法精度の検証を行った。上空からマイクロ波を送電して地上で効率良く電力を受けるためには、無人航空機の位置精度が 1 m 以内であることが望ましい。現状の自律航法装置の位置決定精度を実際の飛行実験で検証し、精度向上方法について検討をおこなった。

3) 平成 30 年度 :

設計試作したギガヘルツ帯マイクロ波送電・受電装置のアンテナのビームを改良し、フラットビームを実現するための電力分配器を試作して送電アンテナに組み込んだ。レクテナの整流器からの直流電力を集電すると共にレクテナと負荷(蓄電池)との整合調整機能を有するレクテナ制御器を試作し、噴石防護付きレクテナアレイに組み込んだ。試作した電力分配器およびレクテナ制御器を使って伝送効率の評価試験を実施した。マイクロ波送電装置を実際の無人航空機に搭載し、空中からのマイクロ波送電実験を実施した。

既存の地震観測装置や GNSS 受信機に接続して、観測データを蓄積するとともに、無人航空機が飛来したときにはデータを転送する装置の試作・改良を行った。GNSS データに関しては精度の高い測位が可能な位相データの収録回収機能の追加を行った。装置の耐候性を考慮した筐体ケースを試作した。

無人航空機の位置精度 1 m 以内を目標に、ビーコン誘導装置を用いた自律航法装置の開発を行った。無人航空機の室内での飛翔実験を行い、無人飛行機の運用方法を検討するとともに、通信機能付レクテナの評価試験、位置検出器の試作・評価試験、自律ホバリング制御及び自律着陸制御実験を行った。

4) 平成 31 年度 (令和元年度) :

設計・試作したギガヘルツ帯マイクロ波送電・受電装置のアンテナの免許を取得して、無人航空機に搭載して上空からの伝送実験を行い、送電効率 10% を目指した。

設計・製作した GNSS 観測・地震観測用装置を用いて、無人航空機を使用した上空からのデータ回収実験を行った。

改良した自律航法装置を用いた無人航空機の飛翔実験をおこない、飛行位置精度の検討を行った。またビーコン誘導による位置精度向上の検証実験を行った。

5) 令和 2 年度以降

空中マイクロ波を使った送電技術に関しては技術的にはほぼ目処がたったが、活火山における観測において必要な高伝送効率の送電装置を開発するためには、現状の開発研究体制ではさらに長い時間と技術力が必要なことから、本課題におけるマイクロ波送電装置の開発研究を中止することとする。また損失の少ない送電のために、無人航空機の送

電アンテナと地上のレクテナを精度よく正対させることが必要である。そのため無人航空機のビーコン信号を用いた誘導装置の開発も並行してすすめてきたが、近い将来に実用化されることになっている準天頂衛星による cm 級位置決定サービスを用いた GNSS 装置を無人航空機に搭載することで技術的解決が可能となるため、本課題における無人航空機の誘導技術の開発も中止することとする。

一方地上に設置した GNSS 観測・地震観測装置のデータを無人航空機で回収する技術に関してはほぼ完成の領域に達しており、作成した GNSS 観測・地震観測装置を実際の活火山での運用試験を行う。

霧島や草津白根山等の火口周辺へのアクセスに危険がある活火山において、課題 B との連携を深め、地震観測用装置や GNSS 観測装置を長期間設置して、無人航空機による上空からのデータ回収を定期的におこなう。取得された観測データを課題 A のプラットフォームで公開し、全国の火山研究者や防災関係者に提供する。

完成した無人航空機+データ回収システムは、市販品として広く火山研究機関の火山研究者や気象庁などの防災関係機関に実際に活用してもらうように働きかける。多くのユーザーに実際に使ってもらうことで、そのニーズ・意見を聞いて改良して、安定したシステム、できる限り安価で大量生産可能な装置に組み上げる。

(e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

a. プロジェクトの総合推進

マイクロ波送電装置および無線 LAN を用いたデータ回収装置の技術開発のため、課題参加者と連絡を密にし、本課題の総合推進を行う。屋内・屋外実験結果を集約して検討し、今後のマイクロ波送電の高効率化、観測データ回収の高確実化を目指す。

b. マイクロ波送電に関わる技術開発

屋外における送受信効率 10%以上を目標として、平成 30 年度から引きつづきギガヘルツ帯マイクロ波送電・受電装置のアンテナの電波暗室内での伝搬実験を実施して改良を繰り返す。マイクロ波送電免許を申請し、取得後速やかに屋外実験を開始する。

c. 火山観測・監視装置の運用実験の実施

マイクロ波受電およびデータ送信可能な遠隔データ回収デバイスの運用実験を行う。今年度は、桜島等の活火山において GNSS センサーや地震センサーと接続して屋外観測実験を開始する。また無人航空機による観測データ回収実験を行う。

d. 無人航空機の誘導および運用の技術検討の実施

無人航空機のマイクロ波送電時のホバリング位置精度 1 m 以内を目標に、誘導装置の開発を行う。無人航空機の屋外飛行実験を行い、無人飛行機の運用方法を検討するとともに、無人飛行機の飛行経路の精度の検証をおこなう。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

(a) 業務の要約

1) プロジェクトの総合推進

マイクロ波送電装置および無線 LAN を用いたデータ回収装置の技術開発のため、課題参加者と連絡を密にし、本課題の総合推進を行った。屋内・屋外実験結果を集約して検討し、今後のマイクロ波送電の高効率化、観測データ回収の高確実化を目指した。

2) マイクロ波送電に関わる技術開発

屋外における送受信効率 10%以上を目標として、平成 30 年度から引きつづきギガヘルツ帯マイクロ波送電・受電装置のアンテナの電波暗室内での伝搬実験を実施して改良を繰り返した。マイクロ波送電免許を申請したが、免許交付が 3 月にずれ込んだため実験の日程を確保できず、マイクロ波送電の屋外実験は実施できなかった。

3) 火山観測・監視装置の運用実験の実施

マイクロ波受電およびデータ送信可能な遠隔データ回収デバイスの運用実験を行った。今年度は、桜島火山において地震センサーと接続して屋外観測実験を実施した。また無人航空機による観測データ回収実験を行った。

4) 無人航空機の誘導および運用の技術検討の実施

無人航空機のマイクロ波送電時の位置精度 1 m 以内を目標に、ビーコン誘導装置の開発を行った。無人航空機の屋外飛翔実験を行い、無人飛行機の運用方法を検討するとともに、無人飛行機の飛行経路の精度の検証をおこなった。

(b) 業務の実施方法およびその成果

1) マイクロ波送電に関わる技術開発

1. 送電系の改良

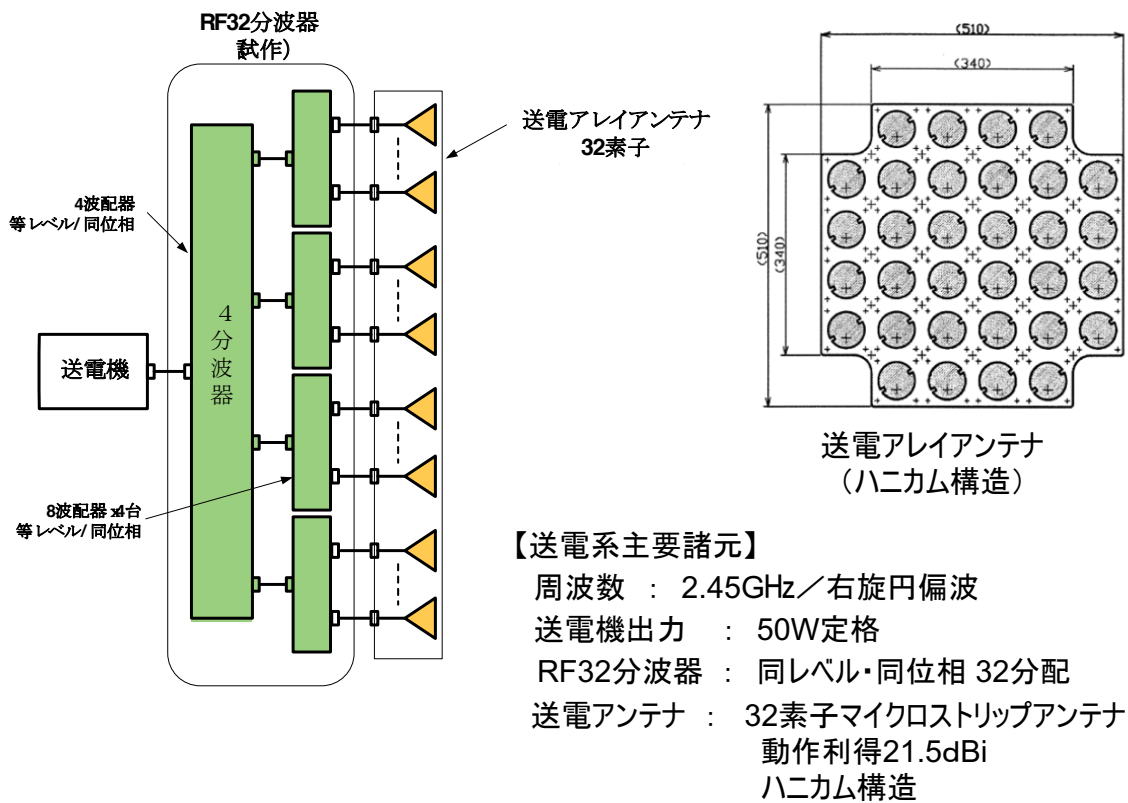
平成 30 年度の成果を基に、最適な近距離送電系を形成することで電送効率の目標値（10%）の達成を図るために以下の試作・試験を行った。

送電アンテナアレイの放射パターンについて、最適化ビーム研究の成果として、受電領域で均一の電力密度分布を形成できるフラットビーム化を当初めざしてきた。一方、フラットビームではビーム幅が広がるために、現在のサイズのレクテナ（受電アンテナ）では空間電送効率が悪くなるのが平成 30 年度の研究成果でわかった。そのため今年度は送電アンテナアレイのノーマルビームを実現するための電力分配器を試作し、送電アンテナに組み込んだ。第 2 図に送電系の模式図および主要諸元を示す。送電機は昨年度の実験でも使用した出力 50 W 周波数 2.45GHz のものを使い、その出力を 32 素子の送電アレイアンテナからマイクロ波として送信する。今年度の実験ではノーマルビームを用いるため、同レベル・同位相の分波器が必要となる。無人航空機に搭載する送電系は重量をできる限り軽量化にする必要がある。そのため分波器も軽量化を図り、新設計の 8 分波器（ウィルキンソン方式）4 台を送電アレイアンテナの背後に直結し、それを市販の 4 分波器 1 台から分波する方式をとった（第 3 図）。8 分波器をアンテナアレイ背後に配置することにより、経路の減衰を最小限に抑えている。また送電アレイアンテナはハニカム構造にして軽量化を図っている。市販の 4 分波器は単体で 925 g の重量があるが、作成した送電アレイアンテナと 8 分波器 4 台の合計重量は 2000 g 程度であり、無人航空機の積載重量の軽減に大きく貢献している。

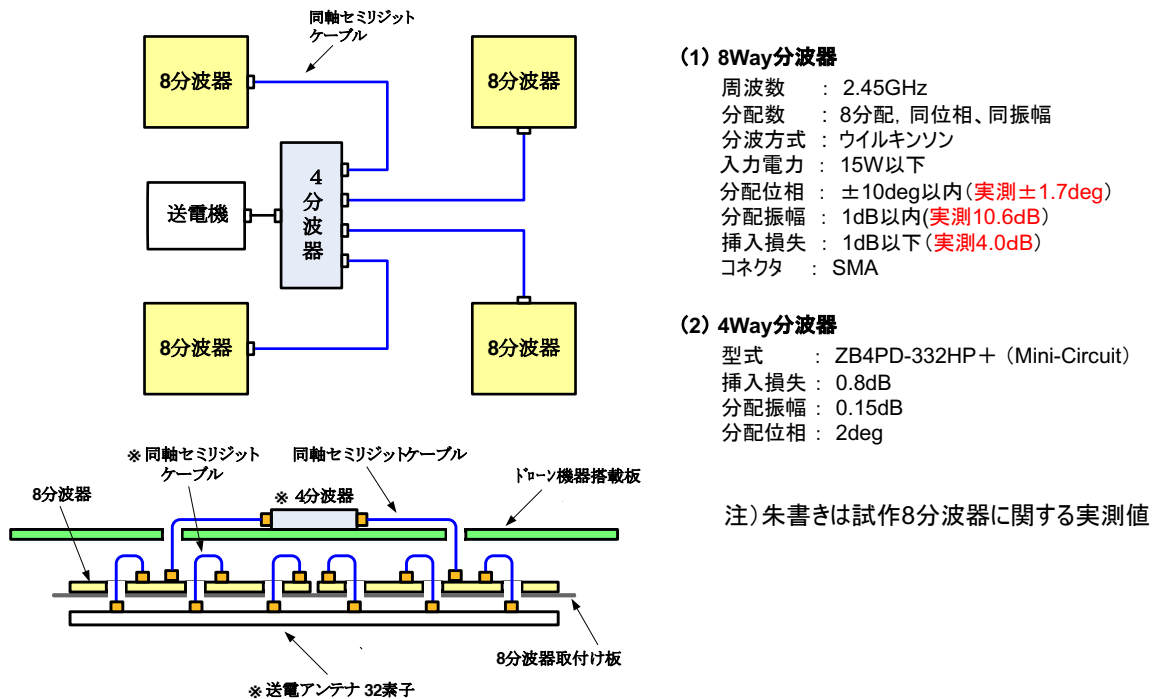
送電系および受電系の総合試験を、令和 2 年 1 月下旬に京都大学生存圏研究所のマイクロ波送受電実験棟の大型電波暗室内で実施した。この試験は送電系（送電機・分波器・送電アンテナ）と受電系（受信アンテナ・整流器・レクテナ制御器）を間隔 1.2 m 離して設置し、送電電力 50 W に対して、レクテナ制御器の出力が何 W になるかを測定する試験であった（第 4 図）。当初計画では、50 W の入力に対し、11.5 W の出力となり、送電効率は 23.0 % となる想定であった。しかしながら総合試験準備中に送電機に不具合が発生し、送信が不可能となってしまった。現場での復旧を試みたが成功せず、総合試験は実施できなかった。故障した送電機はメーカーに修理を依頼したが、復旧に約 2 週間を要し、大型電波暗室内の実験ができなかった。

しかしながら、部分的な測定は実施済みであったので、その値を使って送電量を計算した（第 4 図下）。その結果、送電電力 50 W に対して、レクテナ制御器の出力は 3.65 W となり、送電効率は 7.3 % と想定約 1/3 となってしまった。これは、作成した 8 分波器の分配損失が実測値 4.0dB であり、計画の 1dB 以下より大幅にロスが発生しているためである。何らかの設計・製作ミスが発生したためと考えられるが、設計見直し・新たな分配器の製作には、長い日数と大きな費用が発生すること、市販の 8 分配器は高価かつ重量があるために導入は難しい。また、受信アンテナ（レクテナ）の整流器出力を集電してからレクテナ制御を行っているが、このときの集電損失が予想以上に大きく、効率が 0.7 であることがわかった。

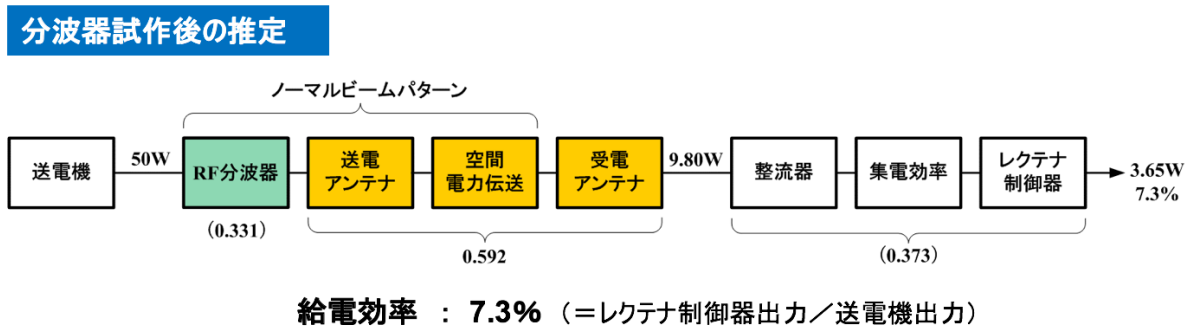
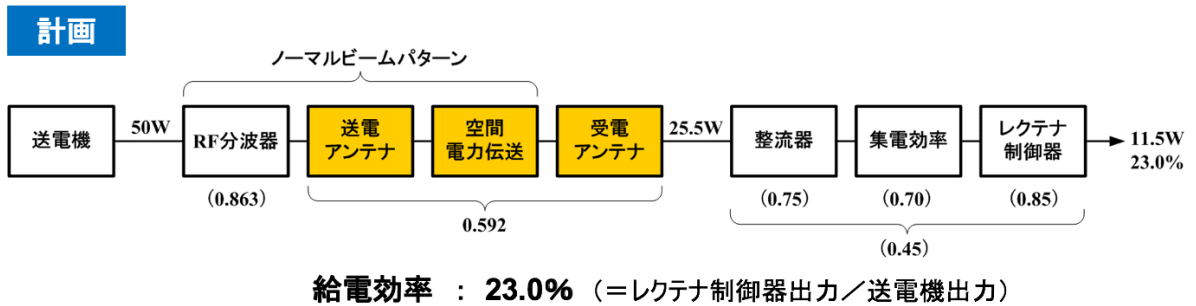
以上のことから本年度の送電効率 10 % 達成は見送らざるをえなかった。



第2図 送電系の模式図および主要諸元



第3図 送電系 RF32 分波器の構成および諸元

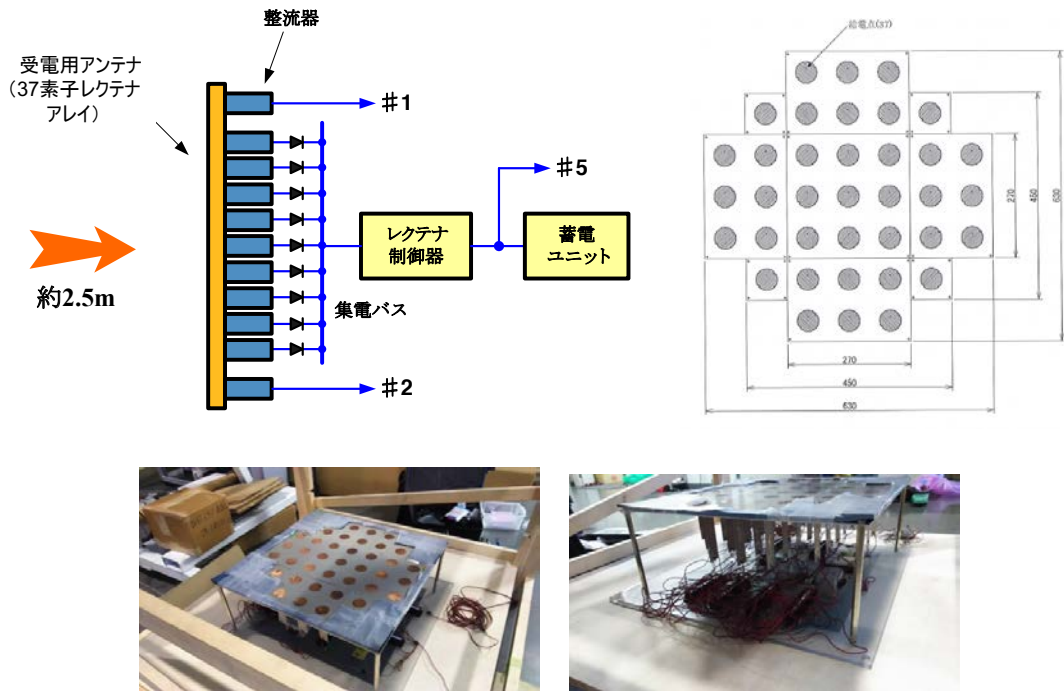


第4図 ノーマルビームによる室内送電実験結果

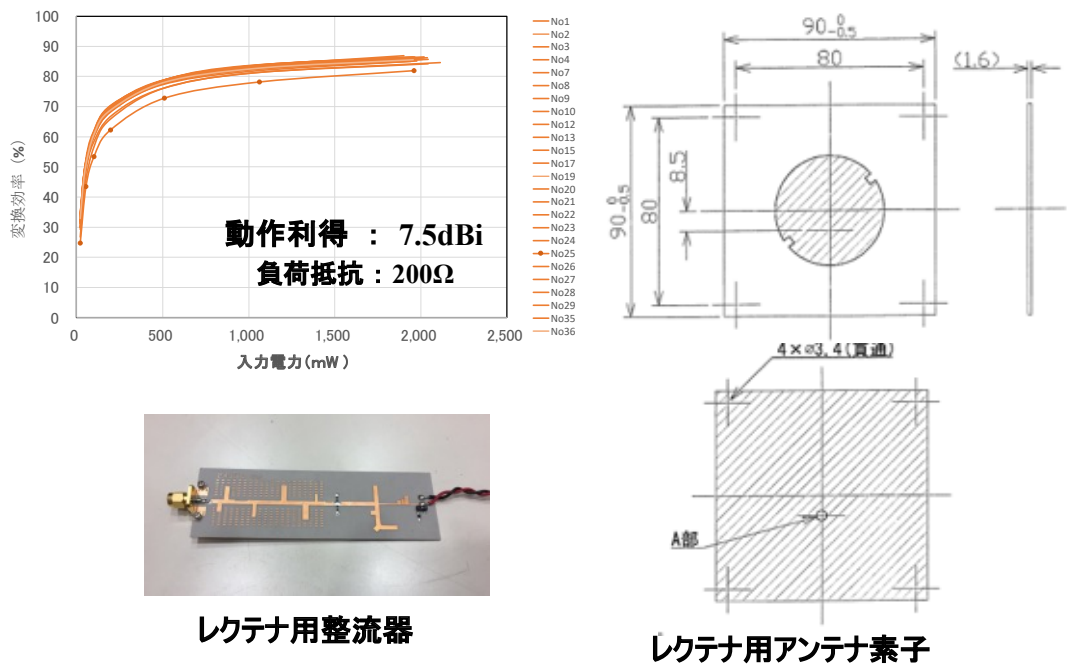
これらの実験と並行して、屋外での送電実験を実施するために、総務省総合通信局に無線免許（実験局）の申請を行った。令和元年9月から近畿総合通信局と事前調整を始めたが、特に使用周波数および運用場所についての調整に多く時間を要した。使用する予定の2.45GHzは無線LAN等の近距離間無線通信の周波数と干渉する可能性があるため、無人の火山地域でも見晴らしの良い場所での運用には問題があるとの意見があり、実験場所を桜島引ノ平山から桜島東側の黒神砂防用地内に移動させることとなった。近畿総合通信局からの予備免許申請の指示は12月末となった。令和2年1月7日に予備免許の申請をおこない、予備免許は2月3日に通知された。1月末の室内実験中に送電機が故障しその修理に2週間を要したこともあり、送電機の落成検査は2月14日に福岡市において実施した。2月19日に工事落成届を作成して本申請を行ない、無線免許（無線局検査結果通知書）は3月4日に通知された。しかし、3月中の屋外実験は日程的に難しいため、4月に実施する計画であったが、新型コロナウイルス感染症対策のために実施できなかった。実験局の無線免許は申請時から6ヶ月以内であるため、令和2年6月に免許が失効となった。新たな屋外実験のためには、再度無線免許を申請する必要があるが、総合通信局からは2.45GHzにおけるマイクロ波送電実験は他の無線通信との干渉問題のため好ましくなく、5.8GHz帯に移行するようとの指示が出ており、送電系・受電系とも大きな設計変更が必要となっている。

2. 受電系蓄電ユニットの試作

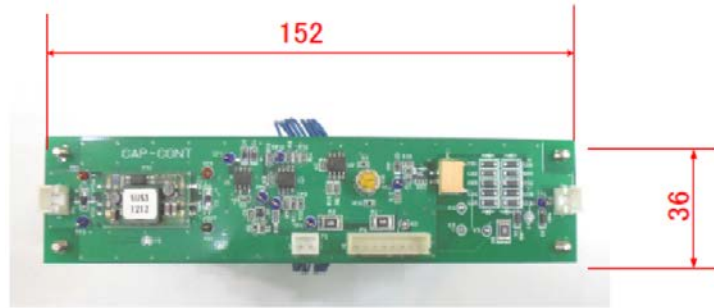
地上に設置する噴石防護付き 37 素子レクテナアレイ (受電系) (第 5, 6 図) に組み込まれた構成要素であり, レクテナアレイで受電した電力を蓄電して, 地上の火山観測装置のデータ送信ユニットに電力を供給する装置である. 平成 30 年度に試作したレクテナ制御器を介して, レクテナの整流器からの直流電力を蓄電する (第 7 図).



第 5 図 37 素子レクテナアレイユニット



第 6 図 レクテナおよびレクテナ整流器



第7図 蓄電ユニット(単位 mm)

試作した蓄電ユニットの諸元を第1表に示す. 蓄電ユニットは電気二重層コンデンサを使用した. 蓄電ユニットが駆動するデータ送信装置の消費電力は約 1 W (80 mA @ 12.8 V)であり, 動作電圧範囲は 6.5 ~ 32 Vとなっている.

コンデンサの放電時間(t 秒)は, コンデンサ蓄電容量(C F), 充電電圧 (V_0 V), 放電電圧 (V_1 V), 出力 (P W)とすると,

$$t = 0.5 \times C \times (V_0^2 - V_1^2) / P$$

で求められる.

無人航空機から出力 50W, 送電効率 10%で 120 秒間充電すると, 蓄電ユニットには 16.0 F の容量を蓄積することができる. この電力で消費電力 1 W のデータ蓄積送信デバイスを電圧が 6.5 V になるまで動作させると, 約 460 秒間継続させることが可能である.

第 1 表 試作した蓄電ユニットの諸元

コンデンサ素子

コンデンサ方式	:	電気二重層コンデンサ
素子静電容量	:	47 F
素子端子電圧	:	2.5V

蓄電ユニット

素子構成	:	7 直 3 並列
最大端子電圧	:	17.5 V
ユニット容量	:	20.1 F

蓄電ユニットのその他の機能

充電モードで端子電圧を 5V に保持できるトリクル充電機能
端子電圧のモニタ機能
放電機能

受電時の充電特性

充電電力	:	5 W (仮定)
初期端子電圧	:	5 V
終期端子電圧	:	10 V
充電時間	:	120 秒
蓄電容量	:	16.0 F

($= (2 * 5 \text{ W} * 120 \text{ 秒}) / (10\text{V}^2 - 5\text{V}^2)$)

2) 火山観測・監視装置の開発

1. 遠隔データ回収システムの試作

マイクロ波送電によって得られた電力を使い、データ送信可能な遠隔データ回収装置の試作を平成 30 年度に引き続き行った。

開発した遠隔データ回収装置は、データ蓄積送信デバイス (ScAirBackup ホスト) と無人航空機に搭載する遠隔データ回収デバイス (ScAirBackup クライアント) である。

前者は火山の火口近傍に設置して地震波形ロガーや GNSS 受信機からのシリアル通信データ (RS-232C 規格) を逐次 SD カード内に蓄積する装置である。普段はソーラパネル等の外部電源 (80mA@12.8V) で動作するが、噴火等で外部電源が失われた際には、空中マイクロ波送電装置を搭載した無人航空機により電力が供給され、その電力を使って、蓄積してあった火山観測データを送信する。

後者は無人航空機に搭載された、Android 端末で、重量は 200g 程度であり、小型の無人航空機にも十分搭載可能である。遠隔データ回収デバイスは無人航空機により運搬され、火口周辺に設置されたデータ蓄積送信デバイスの 2.4GHz 無線 LAN を探し出して、アドホックモードで接続し、ftp または sftp により SD カード内に蓄積されたデータのうち、あらかじめ指定された期間分を回収する。

両者の間は 2.4GHz の無線 LAN を使用するため、マイクロ波送電中は電波干渉が生じてデータ回収ができない。マイクロ波送電が終了し、十分な電力が蓄電装置に溜まったあと、データ蓄積送信デバイスへ電源が供給され、データ送信が可能となる。両者の間の実効通信速度はコンディションが良い条件で 215~230 KB/秒である。この速度では 30 MB のファイル (約 1 日分の地震波形データに相当) の電送に 120~130 秒程度時間がかかる。それぞれの装置の詳細については、平成 29 年度および平成 30 年度の報告書を参照されたい。



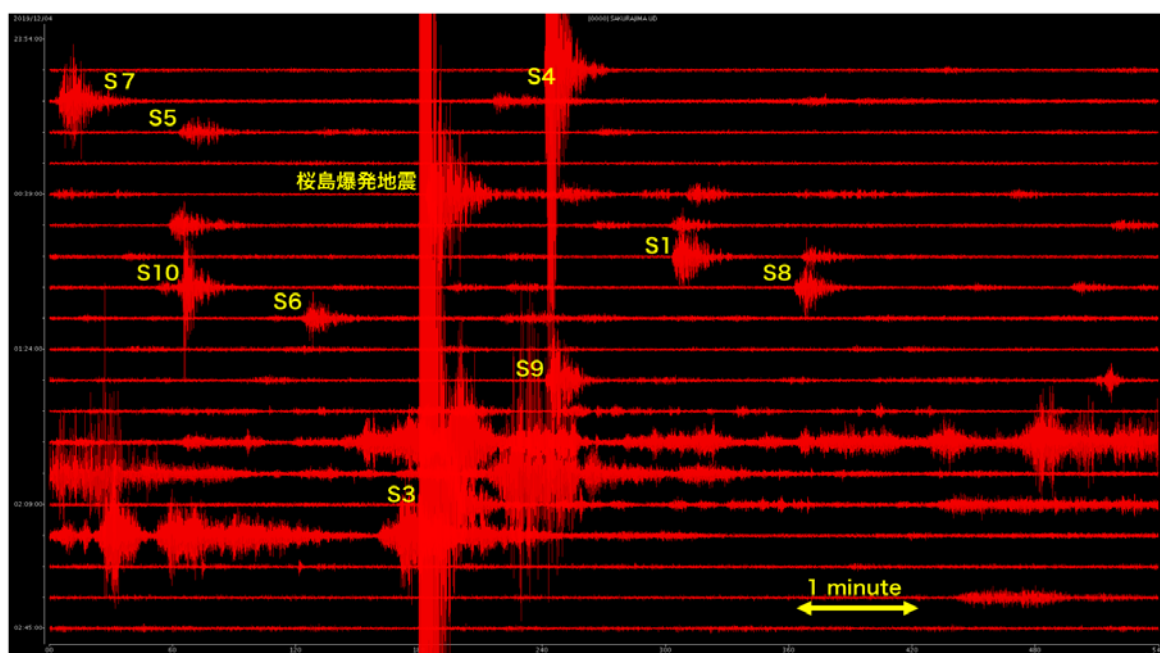
第 8 図 改良された遠隔データ回収システム

今年度の改良点としては遠隔データ回収デバイス（ScAirBackup クライアント）の操作を Bluetooth で接続された Windows PC から行えるようにした（第 8 図）。Android 端末である ScAirBackup クライアントは、これまで端末の画面上でデータ回収期間の設定を行っていた。しかし、無人航空機のペイロードに搭載されてしまうと脱落防止のためしっかりと固定されてしまうため、設定変更や動作確認が難しかった。そこで windows PC と Bluetooth 接続することで、パソコン画面から ScAirBackup クライアントを操作することができるようになった。回収データの期間の設定、回収データのコピー、ScAirBackup クライアントの状態モニターがノート PC 上で可能となったため、非常に利便性が向上した。

2. 屋外観測試験

令和元年 12 月に桜島火山において人工地震を用いた探査が実施されたが、その際に遠隔データ回収システムの試験運用を行った。この際、空中マイクロ波送電装置が無線免許の関係で屋外使用ができなかったため、電源は小型の鉛蓄電池を使用している。センサーには固有周期 2Hz の上下動 1 成分の地震計を使用した。地震波形のデジタルへの変換には白山工業社製 LS8800 を使用し、シリアルポートでデータ蓄積送信デバイス（ScAirBackup ホスト）に波形データを蓄積した。データ回収には無人航空機の準備ができなかったため、手動で遠隔データ回収デバイス（ScAirBackup クライアント）を接近させ、無線 LAN 接続により波形データを回収した。

第 9 図に実際に観測され、遠隔データ回収装置で回収された人工地震および桜島爆発地震の波形を示す。データの回収に要する時間は無線 LAN の信号強度に依存するが、良い条件の場合は 3 時間分の波形データの回収に、接続手続に約 15 秒、データダウンロードに約 10 秒であった。



第 9 図 桜島人工地震探査における黒神地獄河原での観測波形。アルファベットは発破番号を示す。（令和元年 12 月 5 日 0 ～3 時）

令和2年2月10～13日に鹿児島市桜島の黒神地獄河原において、無人航空機の飛翔実験とデータ回収実験を実施した。当初の計画では、空中マイクロ波送電の実験も実施する計画であったが、マイクロ波送電の無線免許が間に合わなかったため、大型無人航空機には送電機材を搭載したが、マイクロ波送電は実施しなかった。

黒神地獄河原は、国土交通省大隅河川国道事務が管理する砂防用地となっており、今回は許可を取得して無人航空機の飛翔実験を行った。

使用した大型無人航空機は京都大学生存圏研究所所有の自律制御システム研究所製ACSL-17RA01であり、積載重量10kgで7分間飛行可能である。第2表に大型無人航空機の諸元、第3表に搭載機器の種類と重量（総重量9.9kg）、および第10図に搭載機器のブロックダイアグラムを示す

第2表 大型無人航空機（ドローン）諸元

メーカー：自律制御システム研究所

型式：ACSL-17RA01

用途	観測データ回収および、観測機器の運搬・設置
飛行方式	完全自律プログラム飛行 (事前に飛行予定地域を空撮飛行し、その結果に基づき飛行経路を設定。離陸→移動→ミッション飛行→着陸までを完全自律プログラム飛行する)
飛行距離	片道1km(京都大学桜島火山を想定)
飛行時間	最大7分を想定 ※1
ミッション飛行中の高度	4～5m(約7分、空中無線給電時)
移動飛行速度	40km/h以上(無風時※2、水平移動)
飛行軌道位置精度	±50cm(空中無線給電時/着地無線給電時、無風時)
サービス領域	見通し内領域(1km以内)
標高	最大1,000m ※3
積載重量	10kg(WPDT機器)
環境条件	小雨小雪
UAV飛行監視	機体における搭載物とは別途、独立した飛行監視機能(地上局モニタリング)を有する
UAV不具合対応の条件	上記で定めた用途・仕様の条件下でのみ対応
無線給電特性	送電周波数5.81GHz帯または2.45GHz ※4 送電電力50W(公称) ※5
GPS周波数	1
機体構造	全長(プロペラ範囲)1024mm、高さ480mm 本体重量7.5kg

備考

※1

PL10kg搭載時、飛行時間最大7分を想定。バッテリーは10000mAhを6本搭載。

PL7kg搭載時、飛行時間最大10分を想定。バッテリーは10000mAhを6本搭載。

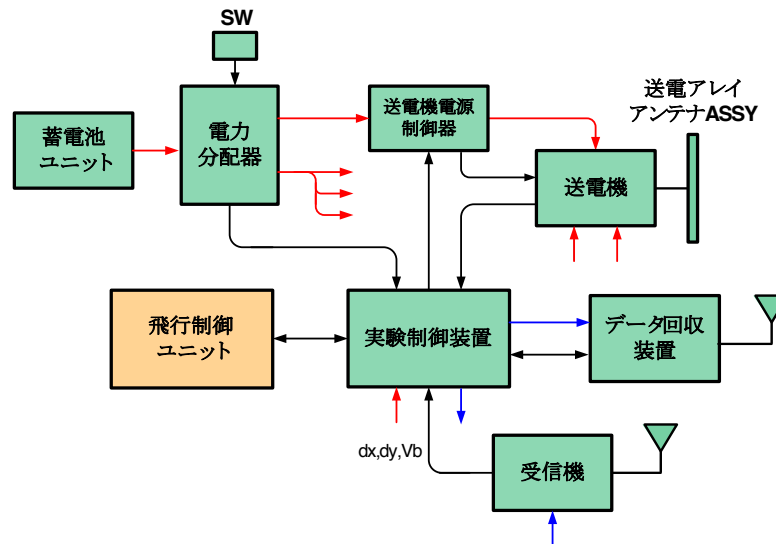
PL5kg搭載時、飛行時間最大14分を想定。バッテリーは10000mAhを6本搭載。

※2 無風の定義は風速2m/s以下とする。

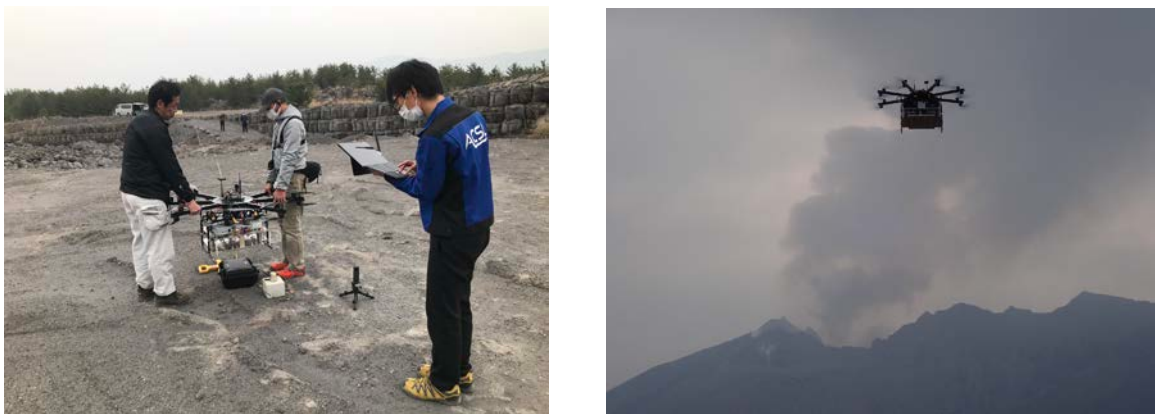
※3 ただし、気象環境(気圧、気温)によって変動。

第3表 無人航空機搭載機器およびその重量

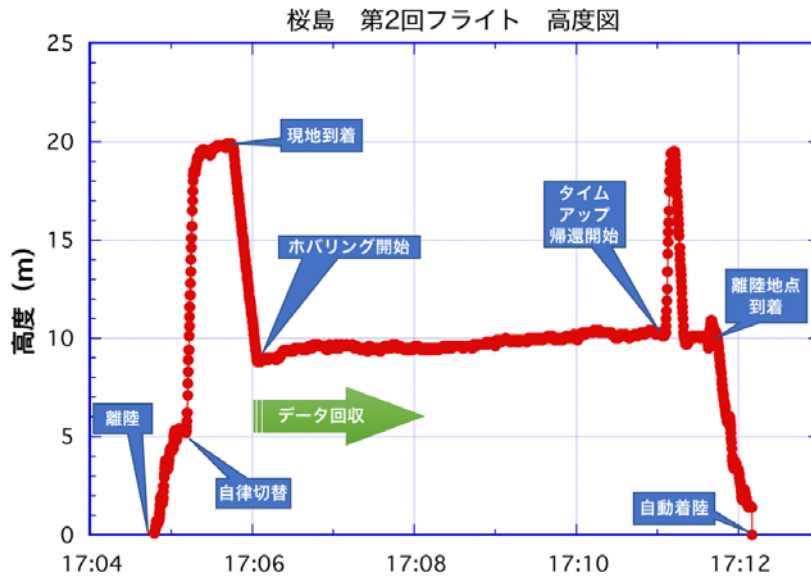
No	機器名称	質量(g)	備考
1	送電アンテナ+8分配器	2,125	
2	4Way分配器	925	
3	送電機	2,100	
4	実験制御装置	800	
5	蓄電池ユニット	846	
6	電力分配器	767	
7	受信機	23	
8	送電機電源制御器	150	推定
9	機器取付け板	1,015	
10	ドローン取付け金具	470	
11	スペーサ	150	
12	データ回収装置	200	推定
13	ケーブル類	400	推定
	Σ	9,971	



第10図 搭載機器のブロックダイヤグラム



第11図 飛行実験風景. 左:フライト前に人力でドローンを移動させ, 飛行経路のチェックを行った. 右:桜島南岳火口を背後に自律航法で飛翔する大型無人航空機.



第 12 図 無人航空機の第 2 回飛行実験の高度推移

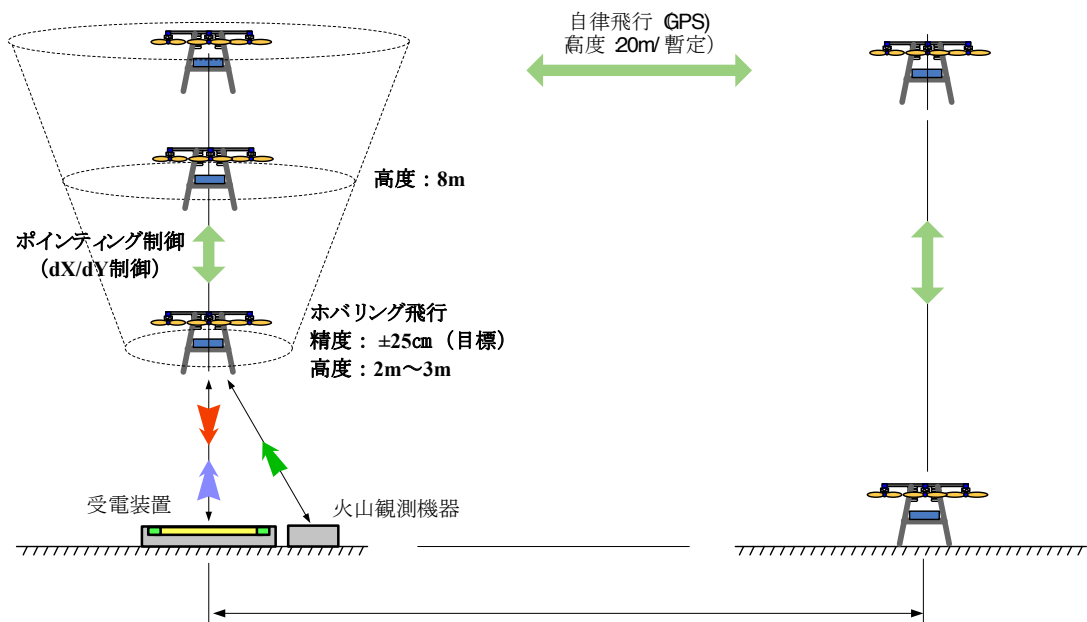
第 11 図に飛行実験の際の写真を示す。使用した無人航空機や搭載機器はまだ試作段階であるためシールドがなく、電気配線が剥き出しのままになっているため、降雨や火山性ガス、火山灰などの対策が必要になる。

飛行実験は実施日に降雨や強風が見込まれたため、当初予定より繰り上げて実施したため、フライトは 2 回しか実施できなかった。第 12 図に第 2 回目の飛行実験における高度推移を示す。無人航空機は最初に手動で離陸させ、高度 5 m で動作確認や積載物の固定を確認したあと、自律モードに切り替えてプログラム通りに飛行を開始する。100m 先にある観測点上空に高度 20 m で移動したのちに降下を開始する。本来であれば、高度 2 m 程度まで誘導信号を受信して下降し、120 秒程度マイクロ波送電したのちに、高度 10m に上昇してデータ回収を開始することになるが、今回は無線免許の関係でマイクロ波送電ができなかったため、この部分を省略し、高度 10 m ですぐにデータ回収作業に入った。回収するデータはあらかじめデータ蓄積送信デバイスに保存しておいた 1 日分の地震波形データを使用した。予定では 2 分間程度で遠隔データ回収デバイスの作業が終わり、無人航空機に帰還指示を出す予定であった。しかし、帰還指示のロジックに設計ミスがあり、無人航空機は帰還せず、ホバリング状態を続けた。5 分後に安全な帰還のバッテリー残量保持のために無人航空機はデータ回収作業を打ち切り、自動帰還モードに入った。離陸地点上空に到達したあと、高度 10m から徐々に高度を下げ、離陸した地点から 1~2m の誤差で自動着陸した。回収された地震波形データは正常であり、データ回収の実験は一部のロジックミスをのぞいて成功することができた。

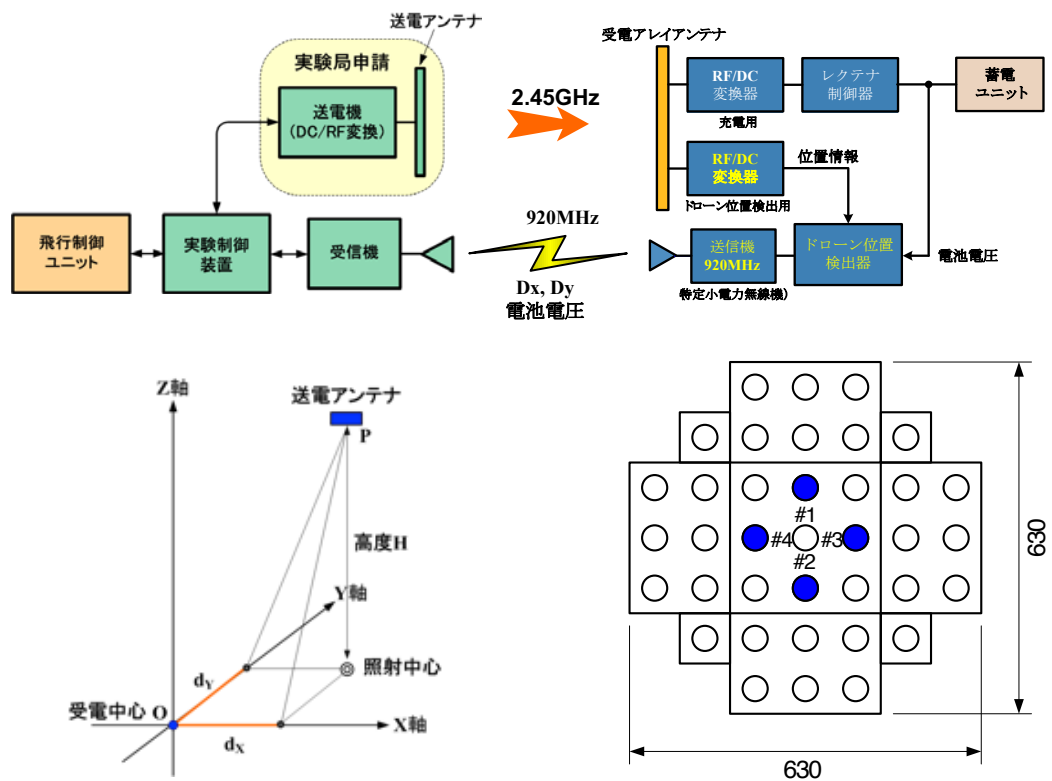
3) 無人航空機運用技術検討の実施

無人航空機から地上の装置にマイクロ波送電する場合、送電効率を上げるためには送受信のアンテナをなるべく近い距離で正対させ、充電時間中は姿勢安定してホバリングさせる必要がある。しかしながら、現在無人航空機に搭載されている位置センサーはGNSS（GPS + GRONASS）および高度気圧計のみであり、水平位置および高度で2, 3mの誤差が生じる。そこで、無人航空機をGNSSによる自律航法で離陸地点から火山観測装置がある受電装置上に飛来させて高度8mまで下降したのちは、高度2~3mかつホバリング精度±25cmで安定にホバリングさせることを目標とする（第13図）

ホバリング位置の検出制御は、平成30年度は、通信機能付きレクテナを使う方式を検討した。この方式は送電を開始する前の位置制御に有効であるが、送電を開始すると、送電波との電磁干渉が懸念され、給電中のホバリング制御に使用するのは難しかった。そこで送電波を直接に利用し、無人航空機の位置を検出する新規の方式を採用することとした。受電装置の上空において無人航空機搭載の送電系から地面に向けて照射される送電波の強度を受電中心に対してX軸、Y軸上に対象位置に配置される4個のアンテナで検出し、これ等の測定値より無人航空機位置と受電装置中心とのずれ、 dx , dy を求める。この dx , dy の値を無人航空機側に別途920MHz帯の無線装置で伝送し、 dx , dy が零になるように無人航空機が自律飛行制御することでドローン搭載送電アンテナと地上の受信アンテナを対面させる方式である。



第13図 無人航空機の自律飛行およびホバリング飛行の模式図



第 14 図 無人航空機位置検出の模式図

位置検出用アンテナは、受電用アレイアンテナの 37 個素子アンテナのうち、中心部に配置される 4 個を流用又は専用する。X 軸、Y 軸上のおおの 2 個のアンテナの間隔は 180mm である（第 14 図）。

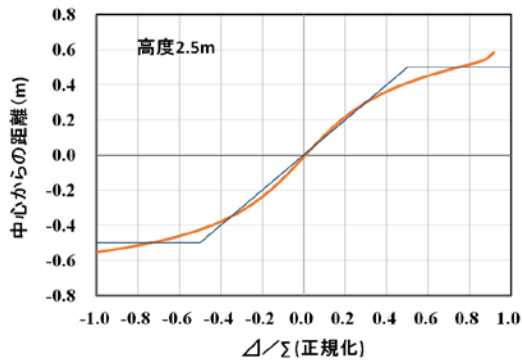
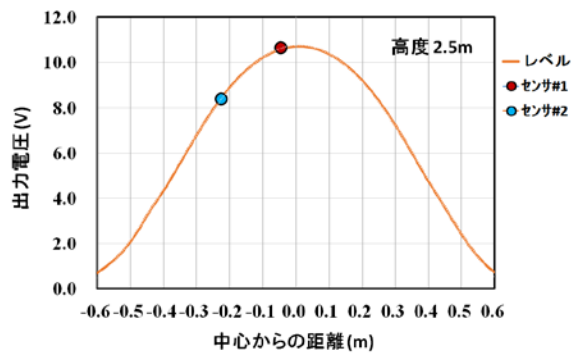
受信アンテナで検出された送電波の強度を RF / DC 変換器で DC に変換し、位置検出器において 0.1 秒間隔で AD 変換し、更に演算により dx , dy を求める。それを 920 MHz 無線で無人航空機側に送信し、無人航空機の飛行制御装置に位置補正項として与えられる。無人航空機はその補正項を使って位置を補正し、精度が高く安定したホバリングを実施する。

地表高度 2.5 m での電圧距離変換の実測例を第 15 図に示す。実際には高度によってこの電圧距離変換の係数が変わってくる。

開発・試験の結果を以下にまとめる。

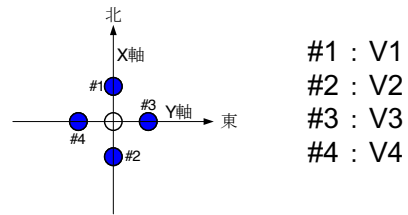
1) 送電アンテナの放射パターン特性の実測値をベースとしてドローン位置データ dx , dy を理論値として設定することができた。但し、それぞれの特性について仮定が含まれているため、試験により校正が必要である。しかし校正は、非線形要素が含まれているため、小電力レベルでは十分に精度が得られない。本研究課題期間においては送電機の不具合が発生し、校正作業は実施できなかった。

2) 無人航空機の位置データ、 dx , dy を用いて、 $\pm 25\text{cm}$ の位置制御を達成するためには、高度情報、風の影響、デッドバンド設定等について、ドローン側との共同での検討が必要である。



高度2.5mでのdx, dyの距離変換

- $\Delta/\Sigma > 0.5$
 $dx=0.5m$
 $dy=0.5m$
- $-0.5 < \Delta/\Sigma < 0.5$
 $dx=(1.0)*(\Delta/\Sigma)$
 $dy=(1.0)*(\Delta/\Sigma)$
- $\Delta/\Sigma < -0.5$
 $dx=-0.5m$
 $dy=-0.5m$



- #1 : V1
- #2 : V2
- #3 : V3
- #4 : V4

V1 < V2 ドローン北側に存在

第 15 図 高度 2.5 m での出力電圧・距離変換の模式図

(c) 結論ならびに今後の課題

1) マイクロ波送電に関わる技術実験

1. 送電系の改良

平成 30 年度の成果を基に、最適な近距離送電系を形成することで電送効率の目標値 (10 %) の達成を図るために送電アンテナのノーマルビーム化を図った。軽量の 8 分波器を設計・作成して、送電アンテナの直後に設置した。

送電系および受電系の総合試験を、令和 2 年 1 月下旬に大型電波暗室内で実施した。この試験では送電系 (送電機・分波器・送電アンテナ) と受電系 (受信アンテナ・整流器・レクテナ制御器) を間隔 1.2 m 離して設置し、送電電力 50 W に対するレクテナ制御器の出力の値を測定した。設計段階の送電効率は 23.0 % となる想定であった。しかし実際の送電効率は 7.3 % と想定約 1/3 となってしまった。これは、作成した 8 分波器の分配損失が設計値よりも 3 倍も大きかったためであった。設計見直し・新たな分配器の製作には、長い日数と大きな費用が発生すること、市販の 8 分配器は高価かつ重量があるために導入は難しく、本年度の送電効率 10 % 達成は見送らざるをえなかった。

また同時並行して、総務省総合通信局にマイクロ波送電のための実験局の開設申請をしたが、使用周波数や実験地等で調整が難しく、最終的に免許されたのが 3 月になってしまったため、屋外における空中マイクロ波送受電の実験は実施できなかった。

今後は総務省からの要請もありマイクロ波送電周波数は 5.8GHz 等の高い周波数に移行する必要がある。また送電アンテナも現在使用しているパッチアンテナアレイでは分波器による損失が非常に大きいことから、分波器が不要なラジアルスロットアンテナ等に設計変更をする必要がある。

2. 受電系蓄電ユニットの試作

地上に設置するレクテナアレイで受電した電力を蓄電し、地上の火山観測装置のデータ送信ユニットに電力を供給する装置を作成した。

無人航空機から出力 50W、送電効率 10% で 120 秒間充電すると、蓄電ユニットには 16.0 F の容量を蓄積することができる。この電力で消費電力 1 W のデータ蓄積送信デバイスを約 460 秒間継続させることが可能である。

今後は蓄電容量の増加・筐体の小型化が望まれる。また本課題では蓄電素子として電気二重層コンデンサを使用した。Li イオンキャパシタなど新しい蓄電素材の使用も期待される。

また現在は受電レクテナから整流器 DC 出力を集電してからレクテナ制御を行っているが、すべてのレクテナ出力に整流器とレクテナ制御器をとりつけて集電損失を排除する検討が必要である。

2) 小型省電力の火山観測装置の開発

マイクロ波受電およびデータ送信可能な遠隔データ回収装置の試作を平成 30 年度に引き続き行った。

開発した遠隔データ回収装置は、データ蓄積送信デバイス (ScAirBackup ホスト)

と無人航空機に搭載する遠隔データ回収デバイス（ScAirBackup クライアント）である。

今年度の改良点としては遠隔データ回収デバイス（ScAirBackup クライアント）の操作を Bluetooth で接続された Windows PC から行えるようにした。回収データの期間の設定、回収データのコピー、ScAirBackup クライアントの状態モニターがノート PC 上で可能となったため、非常に利便性が向上した。

改良した機器を用いて、屋外観測試験を桜島火山において 2 回実施した。1 回目は令和元年 12 月の桜島火山人工地震探査であり、その際に遠隔データ回収システムの試験運用を行った。回収されたデータには、桜島人工地震および桜島爆発地震の波形が明瞭に記録されていた。

令和 2 年 2 月 10～13 日に鹿児島市桜島の黒神地獄河原において、無人航空機の飛行実験とデータ回収実験を実施し、一部のロジックミスを除いてほぼ計画通りの性能を発揮できることがわかった。

来年度は、遠隔データ回収システムを屋外に長期間設置観測をつづけて耐候性の試験や小型の無人航空機からのデータ回収実験を実施する。

3) 無人航空機運用技術検討

送電効率の高いマイクロ波送電をするためには、送受信のアンテナをなるべく近い距離で正対させ、充電時間中は姿勢安定してホバリングさせる必要がある。

高度 2～3 m で、かつホバリング精度 ± 25 cm で安定にホバリングさせることを目標として、送電波を直接に利用し、無人航空機の位置を検出する新規の方式を採用した。位置検出用アンテナは、受電用アレイアンテナの 37 個素子アンテナのうち、中心部に配置される 4 個を流用又は専用する。演算により dx , dy を求める。それを 920 MHz 無線で無人航空機側に送信し、無人航空機の飛行制御装置に位置補正項として与えられる。無人航空機はその補正項を使って位置を補正し、精度が高く安定したホバリングを実施する。

本年度の成果としては、送電アンテナの放射パターン特性の実測値をベースとしてドローン位置データ dx , dy を理論値として設定することができた。但し、それぞれの特性について仮定が含まれているため、試験により校正することが必要である。しかし校正は、非線形要素が含まれているため、小電力レベルでは十分な精度が得られない。本研究課題期間においては送電機の不具合が発生し、校正作業は実施できなかった。

今後もこのような無人航空機の誘導技術は技術的に重要な研究テーマであるので開発の継続が望まれる。一方、近い将来に実用化されることになっている準天頂衛星による cm 級位置決定サービス用いた GNSS 装置を無人航空機に搭載することで技術的に解決する可能性もあるため、本課題における無人航空機の誘導技術の開発は一時中断することとする。

(d) 謝辞

本課題を遂行するにあたり、平成 25～30 年度文部科学省革新的イノベーション創出プログラム (COI STREAM) 拠点名「活力ある生涯のための Last 5X イノベーション拠点」(中核機関：京都大学) からも協力を受けた。特に 1) マイクロ波送電に関わる技術開発 および 3) 無人航空機運用技術検討 は両資金の共同成果である。

また屋外実験に使用した大型無人航空機は、京都大学生存圏研究所より借用した。ここに記して感謝の意を表す。

(e) 引用文献

なし

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

Takabayashi, N., N. Shinohara, T. Mitani, M. Furukawa, and T. Fujiwara (2020), Rectification Improvement with Flat-Topped Beams on 2.45-GHz Rectenna Arrays, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 68, 1151-1163. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2951098

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和 2 年度業務計画案

前述のとおり、本課題は空中マイクロ波送電および無人航空機の精密誘導装置の開発を中止し、無人航空機によるデータ回収技術の開発に特化して、課題 B サブテーマ 4 「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進の枠組みで研究を継続していく。令和 2 年度は開発した遠隔データ回収装置を用いて、霧島硫黄山または草津白根山で実証試験を行う。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのプロジェクト・リーダーが当該火山を対象とした緊急観測の実施を決定した際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、開発技術実装に向けた実地の場となる緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。