

### 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	森田卓司	
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、GNSS受信装置および地震観測装置の組み込みを当初目標とした。

11月上旬に伊豆大島で開催される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1m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1m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、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：

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%を目指す。

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う。

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

5) 令和2年度：

設計・試作したギガヘルツ帯マイクロ波送電・受電装置やGNSS観測・地震観測装置を実際の活火山での運用に耐えるような運用機への設計・試作を行う。火口周辺地域は、一度機器を設置すると定期的な保守点検作業が難しいことから、耐候性、耐雷性をもつ機器の開発が必要である。また多少の噴火被害にも耐えられるように、耐衝撃性、耐熱

性をもつ地上装置を設計することも必要である。

無人航空機の火山地帯における運用実験や改良を行う。平地における飛行と異なり、火山地域では、標高が高いことによる飛行能力の低下、強風による位置精度、姿勢制御の悪化がみこまれることから、無人航空機の機体の改良、自律航法装置の改良を行い、火山地域でも安定した飛行ができるようする。

6) 令和3年度：

運用機にむけて設計・試作したギガヘルツ帯マイクロ波送電・受電装置やGNSS・地震の観測装置を、実際の活火山での運用に耐えるように地上運用実験および耐久性の試験を行う。

引きつづき無人航空機の火山地帯における運用実験や自律航法装置や姿勢制御装置の改良を行って、火山地域でも安定した飛行ができるようする。

7) 令和4年度：

実際の活火山での運用に耐えるように試作・製作したギガヘルツ帯マイクロ波送電・受電装置やGNSS・地震の観測装置の無人航空機からのマイクロ波送電およびデータ回収実験を行い、運用機を完成させる。

引きつづき無人航空機の火山地帯における運用実験や自律航法装置や姿勢制御装置の改良を行って、火山地域でも安定した飛行ができるようする。

8) 令和5年度：

完成した運用機を用いて実際の活火山での地震・地殻変動観測を実施する。観測は桜島の2地点程度を想定している。桜島は活発な火山活動が継続し、火口周辺には立入禁止区域が設定されていることから、設置運用実験を実施しやすく、活発な地震・地殻変動の発生が予想されるため、試験・評価値としても適している。無人航空機を用いて1年に4回程度のマイクロ波送電とデータ回収を行う。

取得された観測データを逐次課題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。

9) 令和6年度：

完成した運用機を用いて実際の活火山での地震・地殻変動観測を実施する。桜島の観測を継続するとともに、本年度は新たに富士山等での観測を検討する。富士山は課題B-4においても集中的な火山観測を実施する計画となっており、B-4課題の一環として火山観測調査を実施できる。無人航空機を用いて1年に4回程度のマイクロ波送電とデータ回収を行う。

取得された観測データを逐次課題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。

10) 令和7年度：

完成した運用機を用いて実際の活火山での地震・地殻変動観測を実施する。桜島や富

土山の観測を継続するとともに、本年度は新たに新潟焼山等での観測を検討する。新潟焼山も活発な火山活動が継続し、多数の地震や微動・地殻変動の発生が予想されるため、試験・評価値としても適している。また課題 B-4 においても集中的な火山観測を新潟焼山で実施する計画となっており、B-4 課題の一環として火山観測調査を実施する。無人航空機を用いて 1 年に 4 回程度のマイクロ波送電とデータ回収を行う。

取得された観測データを逐次課題 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。

(e) 平成 30 年度業務目的

a. プロジェクトの総合推進のための技術検討会の開催

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検討会を 3 回実施する。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

送受信効率 10%以上を目標として、平成 29 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する。装置の改良を繰り返して必要な基礎データを取得し、マイクロ波送電無線局の申請を行う。

c. 火山観測・監視装置の開発

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デバイスの試作を引き続き行う。今年度は、屋外の観測に耐えるような筐体の作成やデータ送受信のためのファームウェアの改良等を行う。GNSS センサーや地震センサーと接続して、データ取得やデータ回収実験を実施する。

d. 無人航空機運用技術検討の実施

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う。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、無人飛行機の飛行精度の検証をおこなう。

なお、年度当初の予定では、b. においては屋外実験を実施するために無線局免許を取得する予定としていたが、総務省総合通信局の審査に時間を要しており、年度内に開局することができなくなったため、上記のとおり予定を変更した。また、d. においては準天頂衛星「みちびき」を使った無人航空機の自律航法装置の開発を行う予定としていたが、「みちびき」のサービスインの延期、及び前述の理由により屋外実験が不可能となったため、同様に予定を変更した。これらの変更については、平成 31 年 2 月に総合協議会でメール審議により承認された。

## (2) 平成 30 年度の成果

### (a) 業務の要約

#### 1) プロジェクトの総合推進のための技術検討会の開催

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検討会を 3 回実施した。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

送受信効率 10%以上を目標として、平成 29 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た。装置の改良を繰り返して必要な基礎データを取得し、マイクロ波送電無線局の申請のための基礎資料を作成した。

#### 3) 火山観測・監視装置の開発

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デバイスの試作を引き続き行った。今年度は、屋外の観測に耐えるような筐体の作成やデータ送受信のためのファームウェアの改良等を行った。GNSS センサーや地震センサーと接続して、データ取得やデータ回収実験を実施した。

#### 4) 無人航空機運用技術検討の実施

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

平成 29 年度の成果を基に、最適化ビームによる近距離送電系を形成することで空間伝達効率の目標値 (10%) の達成を図るために以下の試作・試験を行った。

1. 電力分配器の試作

最適化ビーム研究の成果として、送電アンテナの各素子に対して最適な電力レベルと位相の電力を給電してフラット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。

2. レクテナ制御器の試作

噴石防護付きレクテナアレイ(受電系)の構成要素であり、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。

3. 近距離送電用送電特性の評価試験 (屋内)

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。

【目標送電効率】

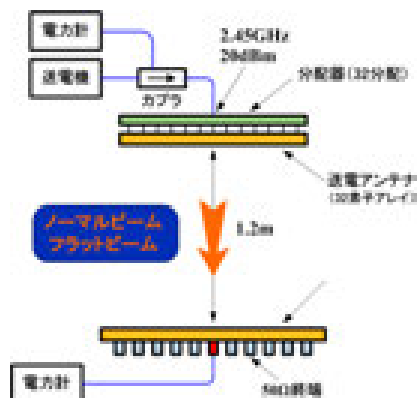
第 1 表に送電効率の定義とその損失要因の目標値を示す。損失要因のうち、送・受アンテナの対抗は、送電アンテナと受電アンテナの正対精度に依存するが、この精度は無人航空機の位置制御精度によって決定される。ここでは自律ホバリング制御技術の開発を待つものとし、今年度はこの損失要因を除外して、部分評価試験、総合評価試験と段階的に進める計画とした。またこれまで送電アンテナと受信アンテナ間の距離は、無人航空機の飛行高度精度の問題から 3m として試験開発を進めてきた。しかし、後述のビーコン誘導による自律ホバリング装置の開発に着手したことから、今後は安定した給電飛行高度は 1.2m と考え、この高度でのマイクロ波送受電を目標として実験を進めることとした。

第 1 表 マイクロ波送電効率 (アンテナ間 1.2m の場合)

構成品	効率説明	最終目標	部分評価試験	総合評価試験
電力分配器	伝達効率 (電力損失)	NA	NA	NA
送電機	DC/RF 変換効率	NA	NA	NA
送電アンテナ	伝達効率 (電力損失)	0.95	0.95	0.95
空間電波伝搬	空間伝達効率 (電力損失)	0.90	0.90	0.90
送・受アンテナ対抗	整流 / 伝達効率	0.50	NA	NA
シュルター	伝達効率 (電力損失)	0.90	NA	NA
受電アンテナ	捕集効率	0.90	0.90	0.90
整流器	RF/DC 変換効率	0.85	NA	0.85
レクテナ制御器	伝達効率	0.95	NA	0.95
総合効率		0.28	0.77	0.62
目標		0.10		

【部分評価試験】

送電アンテナ、空間電波伝搬、受電アンテナが評価対象である。送電アンテナと受電アンテナを木製枠に上下方向に 1.2m 離して配置し、送電アンテナに電力供給して受電アンテナで電力をアンテナ素子ごとに測定した。送電周波数は 2.45GHz で、送電アンテナは 32 素子パッチアンテナ、受電アンテナは 37 素子パッチアンテナである。



アンテナ取付木製枠



分配器  
(フラットビーム)



32 素子送電アンテナ  
510×510 mm

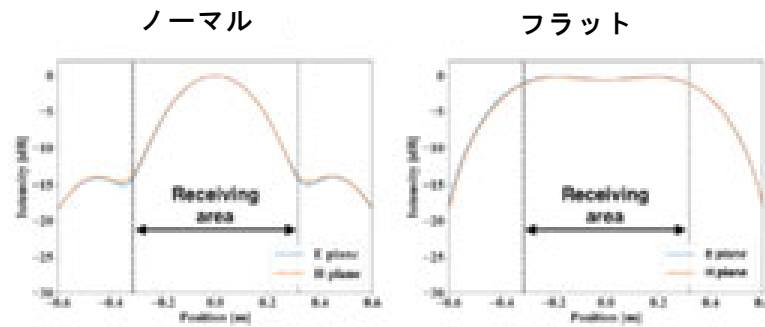


37 素子受電アンテナ  
630×630 mm

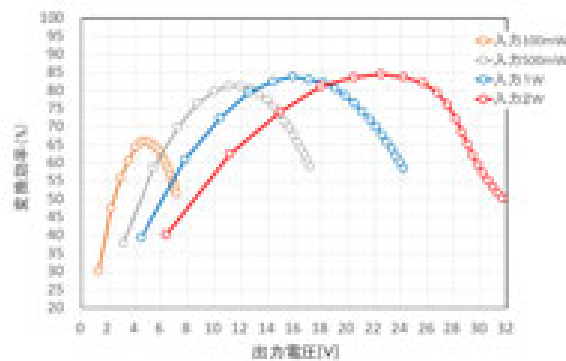
第 1 図 部分評価試験機器

ビームパターンはノーマルビームとフラットビームを評価対象とした。下図に試作したレクテナ整流器の RF/DC 変換効率(実測)を示す。入力電力によって RF/DC 変換効率が大きく変化するため、ビームは極力受電アンテナ面で均一な電力密度となるフラットパターンが望まれる。

なお、フラットビームは送電アンテナの各アンテナ素子に電力を配る電力分配器において、各々の素子に給電する電力の位相と振幅を調整することで形成される。



第 2 図 送信アンテナのビームパターン



第 3 図 レクテナ整流器の RF/DC 変換効率

### ノーマルビームの試験結果

送電アンテナから受電アンテナまでの電力伝達効率の実測値は、77%以上の目標値に対して 59.1%と 18%も低い値であった。

送電アンテナから受電アンテナまでの電力伝達効率は、

$$= (\text{送電アンテナ伝達効率}) \times (\text{空間伝達効率}) \times (\text{受電アンテナ捕集効率})$$

である。送電アンテナの伝達効率と空間伝達効率は、解析値や実測値からして目標は達成しており、上記の低い電力伝達効率は、受電アンテナの捕集効率によって生じていて、この時の捕集効率は約 70%と推定される。

その後の原因究明の結果、

- ① 受電アンテナ素子の捕集効率が大きい。(約 80%)
- ② アンテナ素子をアレイ状に配置した受電アンテナ ASSY において周辺の素子アンテナの利得が低下 (約 90%実測)
- ③ 受電アンテナ ASSY 上で内部配置の素子アンテナの軸比が劣化している。などが明らかになり、これ等の要因により捕集効率が低い値であったと思われる。



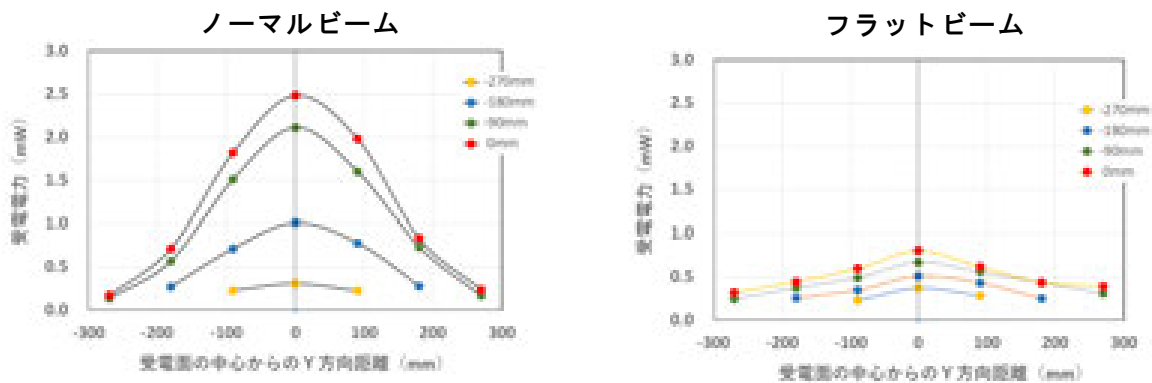
## フラットビームの試験結果

フラットビーム用電力分配器を試作し、これを用いてノーマルビームと同様の方法で実施したフラットビームによる伝送効率の評価試験結果をノーマルビームとの比較に示す。

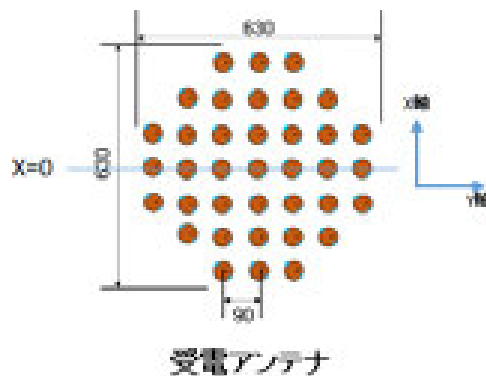
下図はノーマルビームとフラットビームでの受電アンテナの受電電力パターンを示している。X=0ラインで受電アンテナの中心と端の受電電力比がノーマルビームでは14倍であるが、フラットビームでは2.4倍である。

下表は送電アンテナへの給電電力に対する受電アンテナでの受電電力の比で定義される伝達効率に関してノーマルビームとフラットビームの比較を示している。フラットビームの伝達効率はノーマルビームの約半分となっている。これはフラットビームでは、ビームを平坦にすることで放射電力が広範囲に拡散したためである。

高効率な電力伝達のためには、限られた範囲内でフラット化を行う必要があるが、そのためには現在の32素子組み合わせている送電アンテナの素子をさらに2倍4倍に増やすことが必要である。素子数を増やすことにより送信アンテナの径が大きくなってしまうため、安定した無人航空機の飛行を行うためにも、電波を現在の2.45GHzより高い周波数を選択して、送信アンテナ径の拡大をおさえるのが有力な対策と思われる。



### X=0における 受電電力パターン



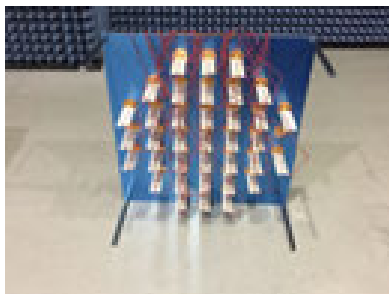
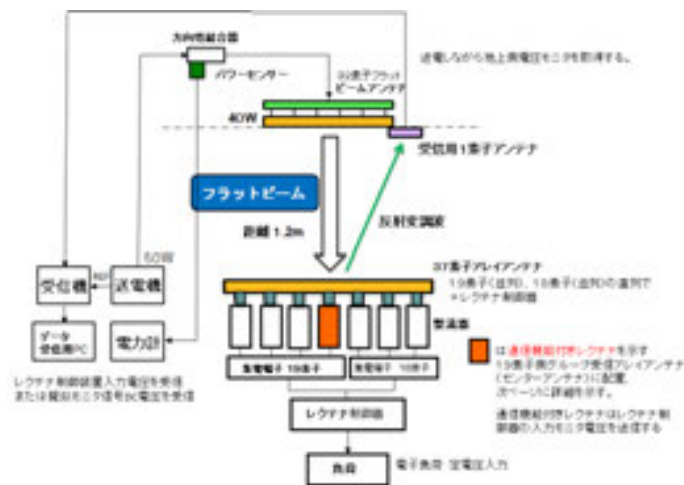
第4図 ノーマルビームとフラットビームの伝達効率の比較

第 2 表 ノーマルビームとフラットビームの伝達効率

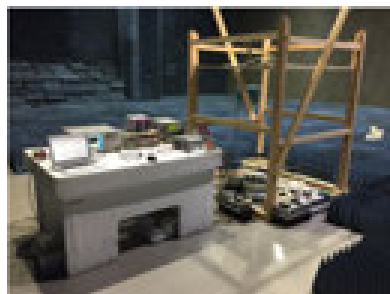
ビーム方式	送電電力	受電電力	伝達効率
	mW	mW	%
ノーマル 解析	47.5	30.2	63.6
実測	47.5	28.1	59.2
フラット 解析	47.5	12.7	26.7
実測	47.5	15.1	31.7

【総合評価試験】

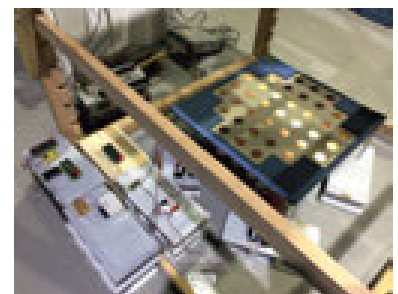
総合評価試験の試験構成を下図に示す。受電アンテナ、整流回路、レクテナ制御回路および通信機能付きレクテナからなる受電システムを木製枠の下部に配置し、フラットビームパターンを放射する送電アンテナを木製枠の上部に受電アンテナに 1.2m 離して正対させて送電実験を行い電力伝達効率の総合評価試験を行った。評価範囲は上述のとおり、送電アンテナから受電システムのレクテナ制御装置である。但し、送受アンテナの正対誤差に伴う伝達効率は除いている。なお、送電機には 50W 送電機を使用した。また、通信機能付きレクテナは受電状況を無人航空機側に伝える手段として使用している。



整流器 ASSY



総合評価試験風景



受電システム

第 5 図 総合評価試験における試験機器構成図

## 総合評価試験結果

送電機の出力 50W に対して受電システムのレクテナ制御装置の出力として 4.05W が得られた。電力伝達効率は、8.1% であり、解析値の 62% を大きく下回り、目標値の 10% にも満たない結果となった。

この総合電力伝達効率が低い原因として

- ① フラットビーム生成のための電力分配器での損失 (20%)
- ② フラットビーム化に伴う損失
- ③ 受電アンテナの捕集効率に伴う損失
- ④ 整流器での損失 (低い電力レベルのための整流器の能力を十分に利用できていない)

が想定される。

このことから、現在の 32 素子送信アンテナでは、フラットビームの効率を生かしておらず、逆に電力分配器やフラットビーム化に伴う電力損失のほうが大きいことが分かった。現在のアンテナ構成では、フラットビーム化せず、当初ままノーマルビームでの実装のほうの効率が良いという結論に至った。

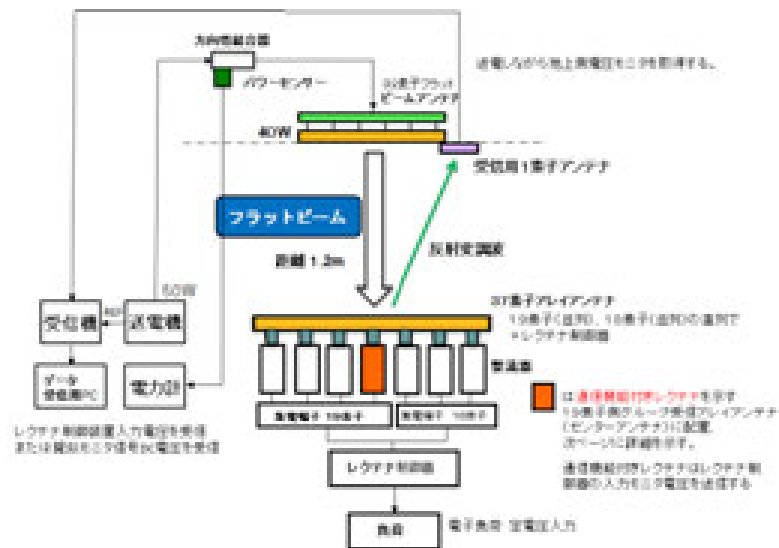
## 4. 空中マイクロ波給電実験

本実験は屋外において無人航空機の自律航法を用いて実施する計画であったが、無線実験局の取得が出来なかったため、計画を屋内実験に変更して実施した。屋内実験への変更に伴って GNSS 受信機、磁気センサーが利用できないため、無人航空機の自律飛行が困難となり、手動操作での実験となった。

下図に空中マイクロ波給電実験の構成を示す。基本的には総合評価試験で使用した送電側の機器を無人航空機に搭載して、京都大学生存圏研究所高度マイクロ波エネルギー伝送実験棟内で手動操作により飛行制御を行い、当該実験を実施した。

無人航空機が床面に配置された受電システム (噴石防護付き受電レクテナアレイ) の上空で高度を変えてホバリングしながら給電を行うと共に木製枠内に設置された受電システムの木製枠上面に着陸し、1.2m 高度の位置から給電を行った。

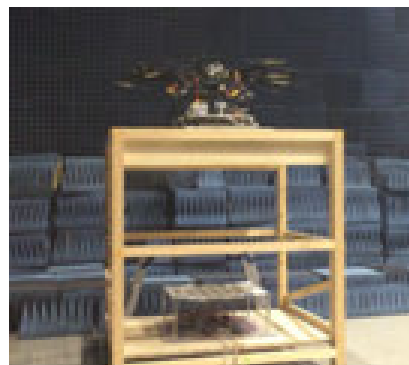
実験は計画どおり実施され、受電システムに電力が供給されたことを確認した。また送電中も無人航空機の操縦系には電波干渉の影響がなく、正常にフライトが可能であることが確認できた。空中マイクロ波給電による具体的な電力送電効率については、今回は無人航空機側に送電出力を計測する機器を搭載できなかったこと、室内での実験であったため手動操縦でのフライトとなり、送電アンテナをきちんと正置することができなかったことのために、計測ができていない。



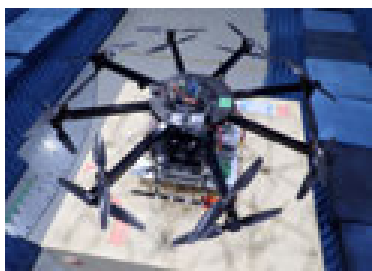
第 6 図 空中マイクロ波給電実験／実験構成図



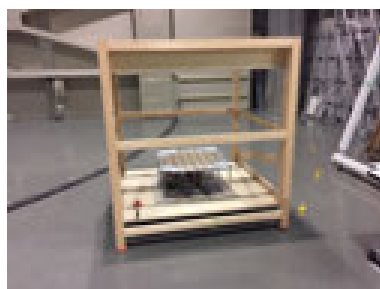
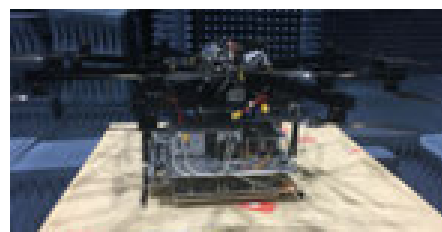
ホバリング給電



着地給電



給電装置搭載無人航空機



受信システムの配置



第 7 図 空中マイクロ波給電実験に使用した装置

## 2) 火山観測・監視装置の開発

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デバイスの試作を平成29年度に引き続き行った。今年度は、屋外の観測に耐えるような筐体の作成やデータ送受信のためのファームウェアの改良等を行った。GNSS センサーや地震センサーと接続して、データ取得やデータ回収実験を実施した。

データ蓄積送信デバイス (ScAirBackup ホスト) は、前年度の仕様では GNSS データについては単独測位による座標データである NMEA データのみ蓄積送信する仕様となっていた。そのためその位置精度は数m程度となり、微小な火山性地殻変動を観測するには精度が不足していた。更に精密な測位計算をするためには GNSS 位相データも必要になるため、これを現地に於て取得・回収しなければならない。

そこで使用している GNSS モジュール (Septentrio 社製 GNSS 受信ボード AsteRx\_m2 UAS) がシリアル通信 (RS232C) で 30 秒ごとに送信する GNSS 位相データを ScAirBackup ホストが蓄積することとした。それを ScAirBackup ホストの内部メモリーに収録すると共に、無人航空機上に搭載した遠隔データ回収デバイス (ScAirBackup クライアント) が上空に飛来した時に、1 時間ごとのファイルで送信するように改良を加えた。この改良にともない、回収した GNSS データは国土地理院の GEONET やその他の精密測地用 GNSS 装置の位相データと干渉測位計算を行うことで、水平成分数 mm、上下成分 2, 3cm の精度でその位置を把握できるようになった。

また、地震波形データは現在日本国内の大学や研究所で使用されている win フォーマットの場合、24 bit 3 成分 100 Hz で 1 日あたり 30 MB 程度となる。現在の 2.4 GHz 無線 LAN 方式によるデータ回収の場合、コンディションが良い条件で 215~230 KB/秒が実効通信速度であるため、1 日あたり 120~130 秒かかる計算となる。無人航空機が目的地の上空でホバリングできる時間は、現状では数分~10 分程度と想定されており、1 フライトで 3~4 日分のデータを回収するのが限界となる。したがって、観測期間が長期間に渡る場合には、すべての地震データを回収することはできない。そのため、火山周囲にある他の地震観測点の記録から必要な時刻のデータを判断し、その時刻のデータだけを確実に回収する仕組みを加えることとした。具体的には無人航空機に搭載する ScAirBackup クライアントに回収すべき日時分のデータを離陸前にテキストファイルで与えておき、観測点までフライトして ScAirBackup ホストに接近して無線接続が確立した際に、ScAirBackup クライアントが ScAirBackup ホスト内のデータから指定された日時分のデータを回収する方式とした。この仕組みを実装したことにより、重要な時刻の地震データを短時間で確実に回収できることとなった。

また、平成 29 年度で作成したデータ蓄積送信デバイス (ScAirBackup ホスト) は試作であったため、防水仕様にはなっておらず、屋外での観測には不向きであった。そこで今年度は ScAirBackup ホスト、GNSS モジュール (Septentrio 社製 UAS 対応 GNSS 受信ボード AsteRx-m2 UAS) もしくは地震計ロガー (白山工業株式会社製低消費電力データ収録装置 LS-8800)、蓄電池 (12V12AH 密閉型蓄電池)、チャージコントローラ (電菱社製 Solar Amp mini) を一体収納出来る防水型屋外観測用ケースを作成した。これにより屋外における観測・データ回収実験を実施することが可能と

なった。しかし、前述のとおりマイクロ波送電無線が今年度は免許されなかったため、屋外実験は来年度に持ち越すこととした。

本研究で試作した遠隔データ回収装置の主な仕様を以下に示す。完成物品は仕様を満たしている。

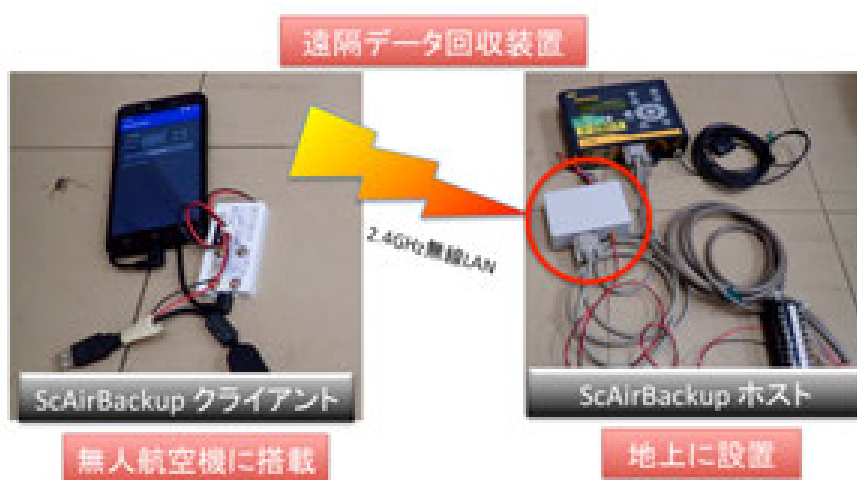
#### 遠隔データ回収装置改良作業の主な仕様

(1) GNSS モジュール (Septentrio 社製 GNSS 受信ボード AsteRx\_m2 UAS) から受信した位相データを収録し、無線 (Wi-Fi) により回収を行うクライアント側 (以下、回収クライアント) にて回収する機能を追加する。

(2) 回収するデータを、指定時間+何分という指定方式に変更し、複数指定可能とする。この機能は、イベント発生時間前後のみを対象とした回収を行うためのもので、これにより回収時間を短縮する。

(3) 回収ホスト (地上に置かれるホスト側)、GNSS モジュール (Septentrio 社製 UAS 対応 GNSS 受信ボード AsteRx-m2 UAS) もしくは地震計ロガー (白山工業株式会社製低消費電力データ収録装置 LS-8800)、蓄電池 (12V12AH 密閉型蓄電池)、チャージコントローラ (電菱社製 Solar Amp mini) を一体収納出来る防水型屋外観測用ケースを作成する。本ケースは、大きさ、防水性においてストームケース (iM2100) 相当品とし、GNSS アンテナ接続用 TNC コネクタ、地震計接続用 6 ピンコネクタ、電源及びチャージコントローラ用 4 ピンコネクタ、マイクロ波受電装置接続用 5 ピンコネクタの計 4 つのコネクタを加工し取り付けるものとする。

(4) 回収クライアントは、ドローン制御装置と USB 接続のシリアル通信 (ASCII キャラクタ) にて通信を行い、回収の開始、進捗状況、終了の通知、及びドローン制御装置からの開始、中断要求を行えるようにする。



第 8 図 改良した遠隔データ回収装置。

### 3) 無人航空機運用技術検討の実施

平成 29 年度までの屋外における無人航空機の自律航法運用試験の結果、水平で 4 m、高度で 9m の位置誤差が発生することが判明し、空中マイクロ送受信を行うための仕様を満たしていないことがわかった。これは無人航空機の自律飛行を行うためのセンサーとして、現状では水平位置は GNSS (GPS + GLONASS) の単独測位、高度は気圧センサーを使用しているためである。

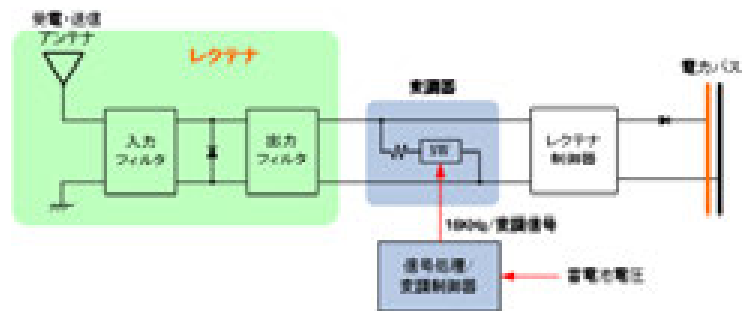
現在日本では、準天頂衛星「みちびき」を使ったセンチメートル級測位補強サービスの開発が進んでいる。これは、国土地理院の電子基準点のデータを利用して電子基準点を用いて補正情報を計算し、現在位置を正確に求めるための情報（センチメートル級測位補強情報）をみちびきから送信するものである。ユーザー側は専用の周波数 L6 信号に含まれる測位補強情報を受信し計算を行うことで、現在の位置を誤差数 cm で決めることができるようになる。当初「みちびき」のサービスインは平成 30 年 4 月とアナウンスされていたが、実際には 11 月までずれこみ、現時点ではまだ実証実験中である。しかしここ 1、2 年のうちに補強情報を受信して測位を行う GNSS ユニットが開発される見込であり、いち早く無人航空機の自律航法ユニットに組み込むことが望まれる。

また高度に関しては、火山活動により変化する場合があるため、電波や音波による高度計をとりつけて、実際の地表からの高度を把握する必要がある。そこで、今年度は無人航空機の位置や地上装置の蓄電情報を伝達する通信機能付レクテナの試作および評価試験、無人航空機からのパイロット信号を受信して、無人航空機の相対位置を計算する検出する位置検出器の試作・評価試験を実施した。

#### 1. 通信機能付レクテナの評価試験

通信機能付レクテナは、受電システムの 1 個のレクテナに通信機能を付けたものであり、火山観測機器の蓄電池の蓄電情報や、火山観測機器に対する無人航空機の相対位置情報を無人航空機側に伝送するために使用される。

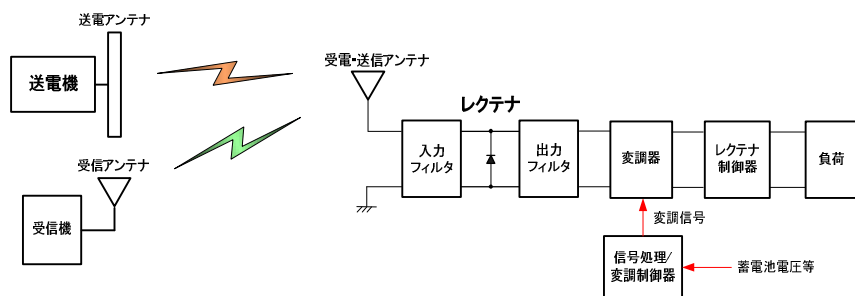
通信機能付レクテナの構成を下図に示す。通信機能付レクテナは、レクテナを最高効率で動作させる目的でレクテナの負荷を最適状態に制御するレクテナ制御器とレクテナの間に変調器を配置し、変調器で負荷抵抗を変化させてレクテナアンテナから変調再放射波を発生するバックスキタリング方式の通信方式である。



第 9 図 通信機能付レクテナの構成

試作した通信機能付レクテナに関して有線試験、無線試験を通じて通信機能の確認を行った。

下図は無線試験による通信機能の確認状況を示す。レクテナの最適負荷  $200\ \Omega$  を維持制御する状況で、変調器が  $16\text{kHz}$  の変調周波数で負荷抵抗を  $160\ \Omega \sim 200\ \Omega$  を変化して変調再放射波を発生する。レクテナでの受電状況下で信号処理/変調制御器でアナログ信号として  $0.7\text{V}$  を入力し、受信機で  $0.7\text{V}$  の出力を得ている。



第 10 図 無線試験による通信機能の確認



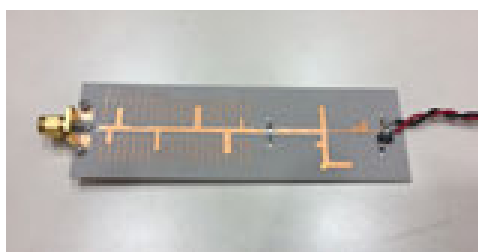
変調器



変調制御器



レクテナ制御器



レクテナ整流器



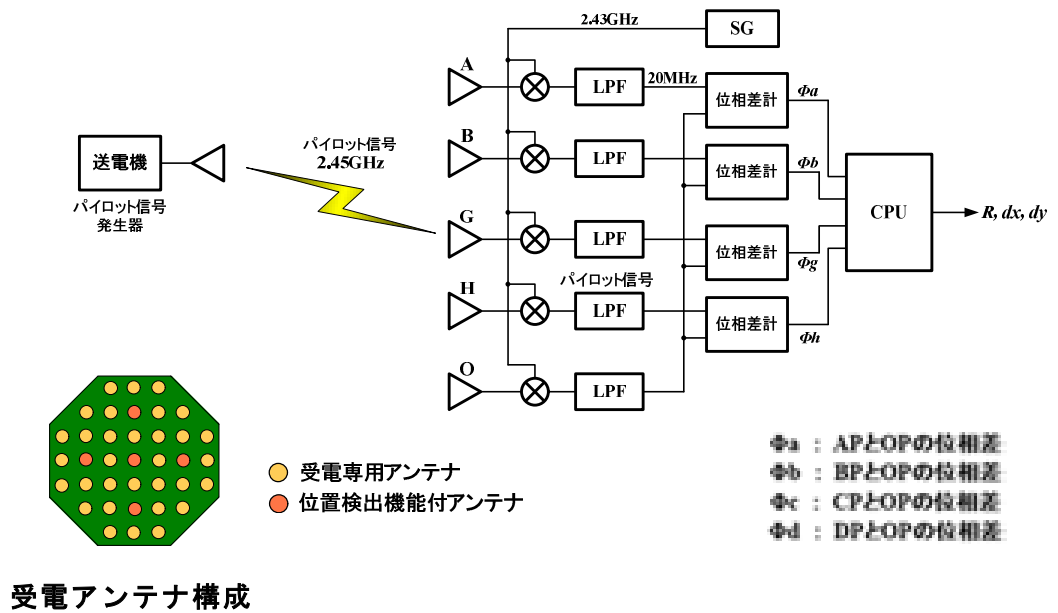
受信機

第 11 図 通信機能付レクテナの構成機器

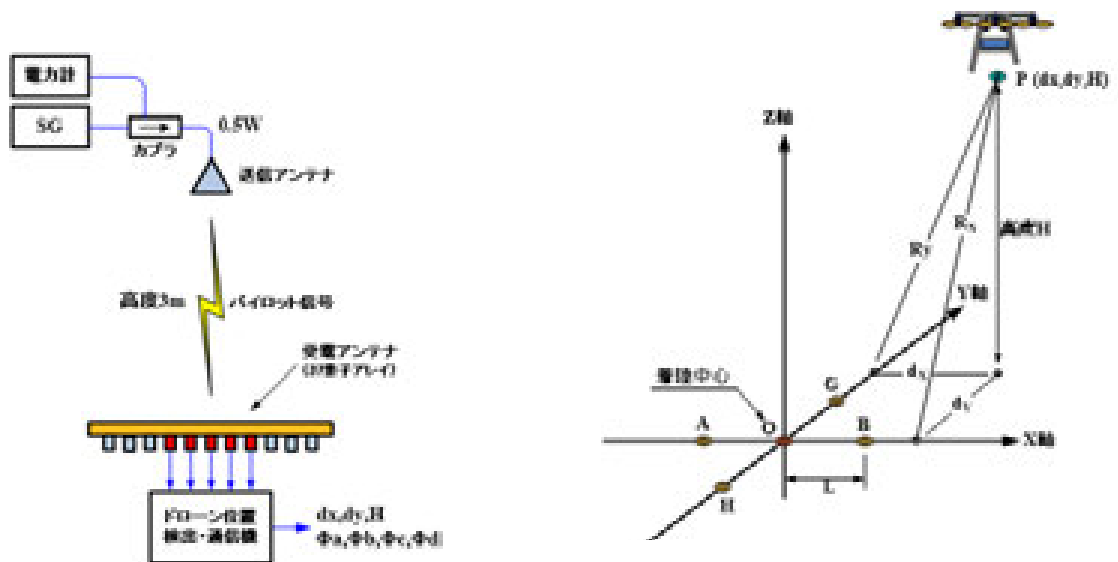


## 2. 位置検出器の試作・評価試験

位置検出器は、無人航空機の物理的中心に搭載されるパイロット信号源と地上配置される受電システムのアンテナパネル面に用意された5台の位相検出機能付きレクテナアンテナから構成され、これらのレクテナアンテナで受信されるパイロット信号の位相差より、受電システムの幾何学的中心に対する無人航空機の相対位置を演算によって求める位置検出器を試作し評価試験を行った。



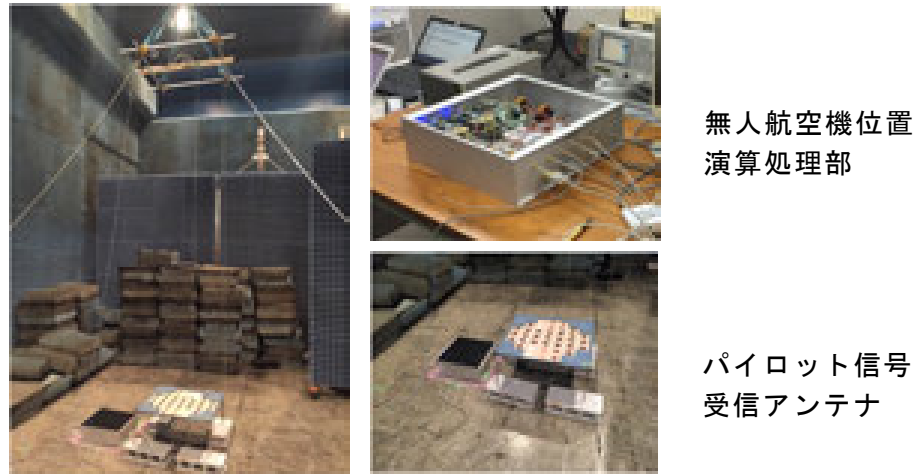
第 12 図 無人航空機位置検出システムの構成図



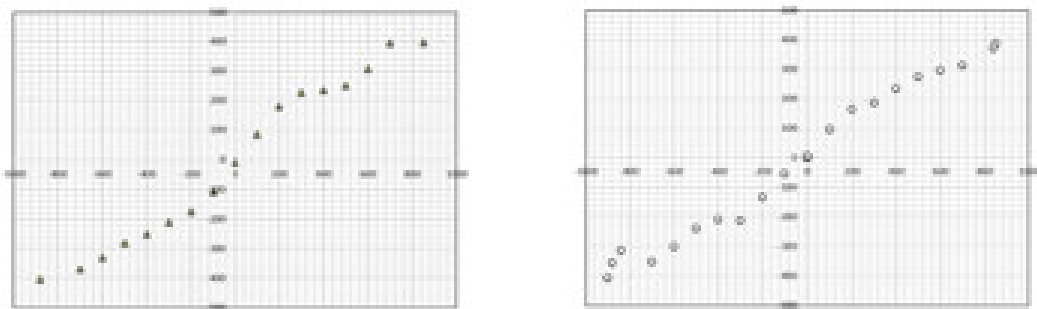
第 13 図 無人航空機位置検出システムの原理図

無人航空機位置検出器は、位置計測演算処理部と位置情報伝送部とから構成される。位置計測演算処理部ではパイロット信号の位相差 $\Phi_a$ 、 $\Phi_b$ 、 $\Phi_c$ 、 $\Phi_d$ を計測すると共にこれらの位相差データを用いて無人航空機の相対位置  $dx$ 、 $dy$ 、 $H$  を演算により求めている。

パイロット信号源をクレーンで空間上に固定し、その下方の床面に受信アンテナを配置し、X 軸方向、Y 方向に移動して 5 個のアンテナ(第 12 図)を用いて位相差 $\Phi_a$ 、 $\Phi_b$ 、 $\Phi_c$ 、 $\Phi_d$ を測定し、 $dx$ 、 $dy$ 、 $H$ を求めた。高度 3m 位置での結果を示す。



第 14 図 無人航空機位置検出器評価試験風景

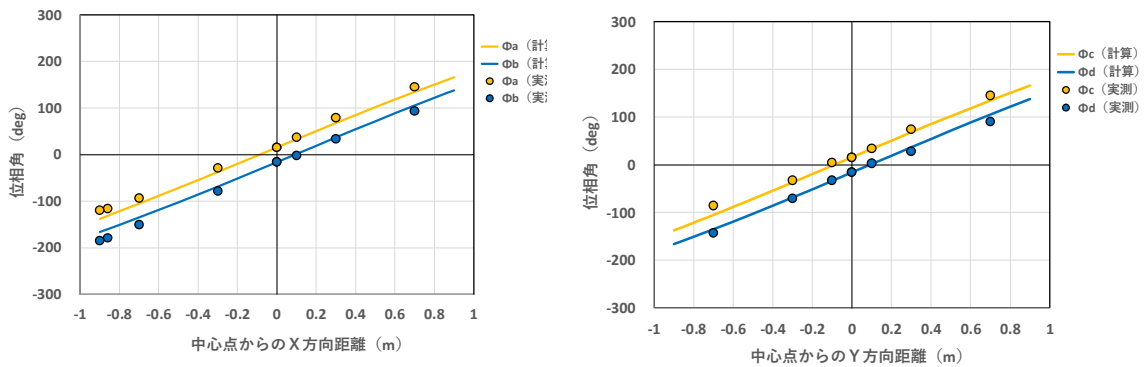


X 軸方向

横軸 : 実位置

Y 軸方向

縦軸 :  $dx$ ,  $dy$



X 軸方向

Y 軸方向

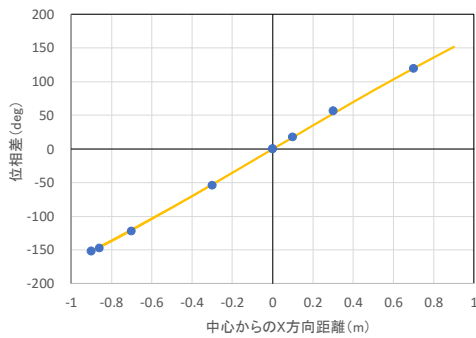
第 15 図 高さ 3m における水平位置の実測値と計算値の比較

位置測定系は高度 3m,  $dx=dy=0m$  で校正を行っている。無人航空機の相対位置 ( $dx$ ,  $dy$ ) の実測値は受電アンテナの中心から離れるに伴って実位置からの差違が増加し、実位置が 0.8m で実測値は 0.4m と約半分の値となっている。

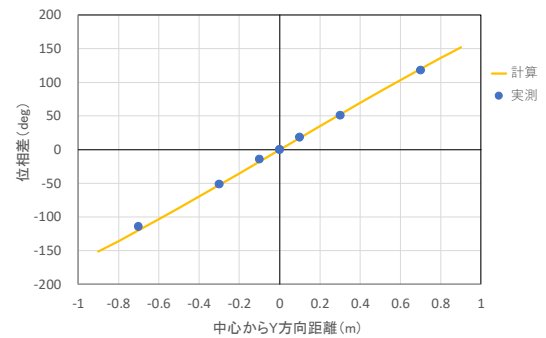
位相差  $\Phi_a$ ,  $\Phi_b$ ,  $\Phi_c$ ,  $\Phi_d$  の実測値をみると理論値に対して実測値は、受電アンテナの中心から離れるに従って徐々に理論値との差違が増加している。

$\Phi_a$ ,  $\Phi_b$  及び  $\Phi_c$ ,  $\Phi_d$  の各々の平均値、また  $\Phi_a$ ,  $\Phi_b$  及び  $\Phi_c$ ,  $\Phi_d$  の夫々の差違について理論値と実測値との差違を以下に示す。

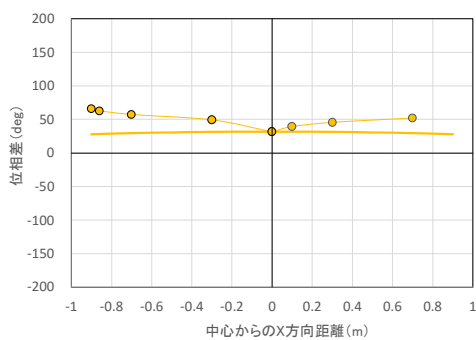
$\Phi_a$ ,  $\Phi_b$  および  $\Phi_c$ ,  $\Phi_d$  の各々の平均値については、実測値は理論値との一致性が極めていいが、 $\Phi_a$ ,  $\Phi_b$  および  $\Phi_c$ ,  $\Phi_d$  の各々の差違については受電アンテナの中心から離れるに従って理論値からのずれが増加している。即ち、 $\Phi_a$  と  $\Phi_b$  あるいは  $\Phi_c$  と  $\Phi_d$  は受電アンテナ中心から離れるに従って同じ割合で一方は増加し、一方は減少する性質を有している。



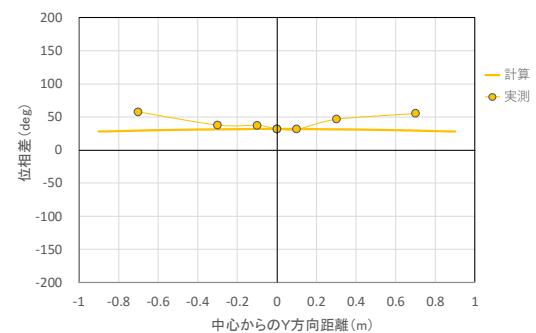
$\Phi_a$  と  $\Phi_b$  の平均値



$\Phi_c$  と  $\Phi_d$  の平均値



$\Phi_a$  と  $\Phi_b$  の差違



$\Phi_c$  と  $\Phi_d$  の差違

第 16 図 高さ 3m における水平位置と計測された位相差の関係

## 今後の対応

受電アンテナ中心から無人航空機が離れるに従って $\Phi_a$ 、 $\Phi_b$ 、 $\Phi_c$ および $\Phi_d$ の値が理論値から大きく外れ、位置  $d_x$ 、 $d_y$  並び  $H$  の実測値に大きな誤差を生じ実用上問題となる。

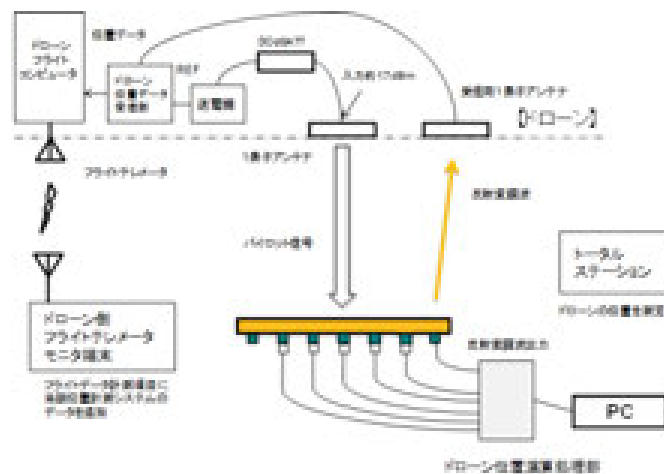
今後は $\Phi_a$ 、 $\Phi_b$ 、 $\Phi_c$ および $\Phi_d$  の実測値が、理論値と大きくずれる原因について更なる調査を進め、 $\Phi_a$ と $\Phi_b$ 、 $\Phi_c$ と $\Phi_d$  の中心値の実測値と理論値との一致性を考慮して位置演算のアルゴリズムの見直しを検討する。なお、位相差による位置測定系の校正方法についても見直しを行う。

### 3. 自律ホバリング制御及び自律着陸制御実験

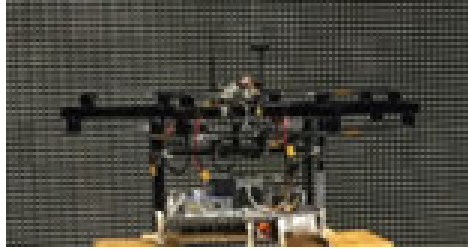
近距離電力伝送実験と同様に、無線実験局の取得ができなかったため、桜島で予定していた屋外実験を屋内実験に変更して実施した。

下図に自律ホバリング制御・自律着陸制御実験の構成を示す。本実験の目的は以下の通りである。

- (1) 無人航空機位置検出系の評価  
トータルステーションでの無人航空機位置測定の比較評価
- (2) 無人航空機相対位置情報の無線データ伝送機能の確認
- (3) 無人航空機相対位置情報の飛行制御装置へのデータ伝送機能の確認



第 17 図 自律ホバリング制御・自律着陸実験の実験構成



搭載機器実装

無人航空機位置データ受信部

第 18 図 無人航空機位置測定実験風景

### 実験結果

#### (1) 無人航空機位置検出系の評価

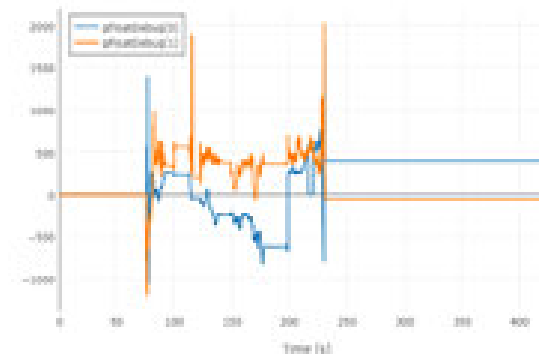
計測は正常に行われデータ取得されている。実験は 3 月中旬となったためデータの処理・解析は平成 31 年度に引きつづき行う。

#### (2) 無線データ伝送機能の確認

地上で算出された相対位置情報を無人航空機に無線データ伝送する機能の正常性を確認した。通信には無人航空機位置情報伝送部に内蔵する全反射方式のバックスキタリング通信系を使用した。

#### (3) 飛行制御装置へのデータ伝送機能の確認

地上で算出された相対位置情報を無人航空機の飛行制御装置へ伝送する機能の正常性を確認した。取得データを下図に示す。



第 19 図 無人航空機テレメータデータの位置データ出力例(X 軸方向移動時)

## (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

平成 29 年度に作成した 2.45 GHz 送電アンテナおよびレクテナアレイでは目標としていたトータルな電力伝達効率 (10%) にわずかに及ばなかったため、今年度は最適化ビームによる近距離送電系を形成することで目標値の達成を図るために以下の試作・試験を行った。

#### 1. 電力分配器の試作

送電アンテナの各素子に対して最適な電力レベルと位相の電力を給電してフラット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。

#### 2. レクテナ制御器の試作

噴石防護付きレクテナアレイ (受電系) の構成要素であり、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。

#### 3. 近距離送電用送電特性の評価試験 (屋内)

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。その結果、電力伝達効率の期待値の 62% を大きく下まわる 8.2% の効率しかえられず、目標値にも達することができなかった。この原因としては、① フラットビーム生成のための電力分配器での損失 (20%)、② フラットビーム化に伴う損失、③ 受電アンテナの捕集効率に伴う損失、④ 整流器での損失 (低い電力レベルのための整流器の能力を十分に利用できてない) などが考えられる。結論として、現在の 2.45GHz 32 素子送信アンテナでは素子数が不足なため、フラットビームの効率を生かしきれておらず、逆に電力分配器やフラットビーム化に伴う電力損失のほうが大きいことが分かった。現在のアンテナ構成では、フラットビーム化せずに、当初ままノーマルビームでの実装のほうの効率が良く、目標値も達成できていたという結論に至った。

#### 4. 空中マイクロ波給電実験

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。本実験は屋外において無人航空機の自律航法を用いて実施する計画であったが、無線実験局の取得ができなかったため、計画を屋内実験に変更して実施した。屋内実験への変更に伴って GNSS 受信機、磁気センサーが利用できないため、無人航空機の自律飛行が困難となり、手動操作での実験となった。

手動操作のため、アンテナ位置が微妙にぶれる等で理想的なマイクロ波送電とはならなかったが、地上部装置のレクテナでマイクロ波を受電し、電力供給することができた。また送電中も無人航空機の操縦系には電波干渉の影響がなく、正常にフライトが可能であることが確認できた。来年度は屋外での自律航法によるフライト実験が可能ないように無線実験局の取得を行い、火山地域において実際に送受電実験を実施する。

### 2) 小型省電力の火山観測装置の開発

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。

回収ホストとクライアントの距離が 30 m以内であれば安定したデータ回収が可能であり、1 日分の地震波形データを約 2 分で回収することができる（平成 29 年度に実施した試験による）。データ量が少ない GNSS データであれば、このデータ転送速度は十分であるが、データ量が多い地震波形データについては、すべての連続データを無人航空機で回収することは難しい。そのため回収クライアントのソフトウェアを改修して、必要な時刻だけのデータのみを回収できるように改良を加えた。装置の耐候性を考慮した筐体ケースを試作した。来年度は、活火山地域において無人航空機からのデータ回収実験や耐候性の試験を実施する。

### 3) 無人航空機運用技術検討

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、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。

その結果、無人航空機への通信には通信機能付レクテナが有効であること、ビーコン（パイロット信号）を用いた位置検出装置の精度には高度依存性があり、理論値と実測値に系統的な誤差が生じていることが分かったこと、位置検出装置のデータ出力は全反射方式のバックスキタリング通信系を用いることで、無人航空機の飛行制御回路に問題なく送信できることが分かった。

今後は地上に設置する位置検出装置の改良を行い、精度の良い位置情報を算出し、無人航空機の位置制御システムにフィードバックできるように進めて行く。

また無人航空機メーカーと協力して、精度の高い準天頂衛星「みちびき」を使ったセンチメートル級測位補強サービスの自律航法ユニットへの組込や電波や音波による高度計の組込を検討する。

#### (d) 謝辞

本課題を遂行するにあたり、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）からも資金援助を受けた。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。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

なし

#### (g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

### (3) 平成31年度業務計画案

空中マイクロ波送電・データ回収技術の開発のため、前年度から引きつづき以下の4項目について屋内・屋外実験を実施し、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研究を進めて行く。

#### 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。マイクロ波送電の無線実験局を申請し、免許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位置精度 1 m 以内を目標に、ビーコン誘導装置の開発を進める。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 b～d. に示される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。