

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
同	テクニカルス タッフ	手操佳子	
株式会社 翔エンジニアリング	代表取締役	藤原暉雄	
同	取締役	今津吉昭	
同	取締役	勝亦正晃	
株式会社 セシアテクノ	代表取締役	足立忠司	
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	

(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免許を取得して、屋外地上における伝送実験を行い、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、屋外における地上データ回収実験を行う。

無人航空機の飛行位置精度の向上を目指すため、自律航法装置の改良を行う。自律航法装置に用いられている GNSS 装置を、現在日本が整備を進めている準天頂衛星「みちびき」を使うものに設計変更することにより、位置決定精度が数 cm に向上することが期待される。また地上からのビーコン誘導による位置精度向上についても検討・実験を行う。

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。また地上からのビーコン誘導による位置精度向上の検証実験を行う。

5) 平成 32 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) 平成 33 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) 平成34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) 平成35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) 平成36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) 平成37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。桜島や富士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 29 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WiFiSDカード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、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・試作をするるとともに、電波暗室内での伝搬実験を実施して改良を繰り返す。また屋外でのマイクロ波送電免許取得に必要な無線局工事データを取得する。

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を試作して室内実験を行う。この装置は、GNSS センサーや地震センサーと接続し、GNSS 観測装置・地震観測用装置として使用できる。桜島等の活火山に設置し、屋外データ回収実験を行う。遠隔データ回収装置の試作作業は外注する。

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、無人航空機の屋外飛翔実験を行い、火山地域における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およびその改良方法を検討する。

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

無人航空機（ドローン）技術と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進めた。

平成 28 年度に導入した大型の無人航空機（自律制御システム研究所製 Minori-Double）の飛行試験および訓練を実施するとともに、その自律航法時の位置決定精度を 2 回の実際の飛行実験において測定・検討した。

活火山に設置された地震および GNSS 観測装置のデータを効率よく回収するための遠隔データ回収装置の試作業務をシモレックス株式会社に委託した。地上および大型無人航空機からのデータ回収実験を実施し、地震波形や GNSS 観測データを遠隔回収することできるデータ送信および回収装置を試作することができた。

エネルギー変換効率の高い、狭ビームの送電アンテナの設計・試作を行った。室内実験を実施して、その変換効率を測定するとともに改良点を検討した。

(b) 業務の実施方法

1) 印旛沼 UAV フィールドにおける自律型大型無人航空機フライト試験

a) 目的

平成 28 年度に購入した自律型大型無人航空機のフライト試験および運用の検討

b) 日程・場所

平成 29 年 5 月 17 日 13:00 ~ 15:00

印旛沼 UAV フィールド（千葉県成田市大竹干拓地）

c) 参加者

松島、藤原、今津

伊藤（測位衛星技術）、大谷・奥澤（京都大学）

武田・福留・宋（自律制御システム研究所）

佐々木・前川（宇宙システム開発利用推進機構）

d) 使用機材

自律制御システム研究所製 16 翅反転ロータ式 ACSL-MN1 Minori Double

最大径：1522mm

積載重量：10 kg（7 分間飛行の場合）、7 kg（10 分間飛行の場合）

e) 実施内容

導入した自律型大型無人航空機について、自律制御システム研究所が実施したフライト試験の立会および運用の打合せを行った。自律航法の精度を確認するために、4 回の離着陸を繰り返して、離陸位置と着陸位置を測定した。位置精度が正確であれば離陸地点と着陸地点は同一になるはずである。1 回のフライトでは 150m 先まで進んで折り返してくるコースを取った。

最初のフライトでは、10 kg のダミーロードを搭載して離発着したが、着陸時の降下速度が予測より速かったため、着陸直前に自律航法を解除して手動で着陸させた。

2回目以降はダミーロードを乗せずに実験を行った。

自律航法による着陸では、着陸位置が1~4m程度ずれることが分かった。フライト時でも予定航路よりは同程度ずれている可能性がある。これらのずれは自律航法に使用しているGNSS装置の精度に強く依存しているものと推定された。

表1 無人航空機を自律航法で離発着させた場合の位置のずれ。

飛行回	時刻	着陸位置
1回目	13:35-13:40	手動着陸
2回目	14:05-14:09	3 mずれる
3回目	14:12-14:15	1.5 mずれる
4回目	14:22-14:26	2 mずれる

f)まとめ

大型無人航空機の運用について、飛行は自律型ではあるが、その動作監視および緊急時のプロポ（コントローラ）対応のために、常時2名の訓練された者が運用する必要があることが分かった。

無人航空機の自律航法の精度は現状では1~3m程度であり、これらは自律航法に使用しているGNSS装置（GPS + GLONASSの単独測位）の精度に依存するものと考えられる。



写真1：導入した自律型大型無人航空機。



写真 2 : 第 2 回目のフライトの結果。無人航空機は離陸地点（緑のシート
の場所）から約 3 m 離れたところに自律航法で着陸した。

2) 大型無人航空機による送受電・データ回収の室内公開実験

a) 目的

平成 28 年度に購入した自律型大型無人航空機を用いて、空中マイクロ波送受電およびデータ回収の室内実験を行う。本実験は革新的イノベーション創出プログラム「活力ある生涯のための Last 5X イノベーション拠点」の京都大学サイトビジット展示会において、空中マイクロ波送電技術を用いた火山観測・監視装置の開発における公開実験の一環としても実施する。

b) 日程・場所

平成 29 年 7 月 26 ～ 28 日

京大大学生存圏研究所 高度マイクロ波エネルギー伝送実験棟

c) 参加者

松島、手操、藤原、今津、篠原

重田・小室（プロシエア）

小野（オリエンタマイクロウェーブ）

岩佐（九州大学理学部）

武田・福留・宋（自律制御システム研究所）

d) 使用機材

自律制御システム研究所製 16 翅反転ロータ式 ACSL-MN1 Minori Double

平成 28 年度作成の空中マイクロ波送電装置およびマイクロ波受電アンテナ付き温湿度計測ユニット、FlashAir 対応遠隔 GNSS データ回収装置。

e) 実施内容

7 月 26 日

午後に参加者が集合し、実験概要の確認、機材の開梱・設置準備、動作試験を実施した。

7 月 27 日

翌日実施される空中マイクロ波送電技術の公開実験のため、無人航空機のフライト試験やマイクロ波送電のテスト、地上に設置するデータ送信装置のテストを数回にわたって実施した。なお、今回の実験はマイクロ波送受電のための無線局開局を総務省に申請していないため、大型電波暗室で実施する。そのため、GNSS 電波を受信することができないため、大型無人航空機は、自律飛行モードではなく、手動操作にて、飛行実験を実施した。

7 月 28 日

公開実験の直前準備をおこなった。公開実験の予行演習を繰り返した。午後に約 70 名のサイトビジット参加者のもとに公開実験を実施し、計画どおりに機器が動作し、マイクロ波給電およびデータ回収に成功した。

f) まとめ

購入した大型無人航空機に掲載して、無人航空機のフライト試験やマイクロ波送電のテスト、地上に設置するデータ送信装置を実施した。マイクロ波送受電・データ回収実験には、平成 28 年度に伊豆大島において日本で始めて実施された空中マイク

ロ波送電実験でされた機器を用いているが、伊豆大島実験では、操作性・保守作業が難しい1軸タイプのエンジン型無人航空機を使用したのに対し、今回は自律飛行が可能で、操作・安定性が良いマルチコプター型の大型無人航空機を使用している実験を行った。操作性がよいマルチコプター型の大型無人航空機は、今後の屋外実験では欠かせない機材であり、その有用性を十分に示すことができた。



写真3：電波暗室内での空中マイクロ波送電・データ回収実験



写真4：公開実験において、空中マイクロ波送電・データ回収実験の説明をうける参加者。

3) 大型無人航空機自律航法精度試験

a) 目的

大型無人航空機の自律航法において、その位置決定精度について検証を行った。

b) 日程・場所

平成 29 年 10 月 3 ～ 5 日

尾瀬ほたか高原スポーツパーク（群馬県片品村）

c) 参加者

松島、手操、藤原、今津

小野(オリエンタマイクロウェーブ)、岩佐（九州大学理学部）

岸本（翔エンジニアリング）、武田・福留・宋（自律制御システム研究所）

飯野・渡辺（シモレックス）、設楽、井岡、浅野（タイプエス）

d) 使用機材

自律制御システム研究所製 16 翅反転ロータ式 ACSL-MN1 Minori Double

トータルステーション・風速計・気圧計

e) 実施内容

10 月 3 日 午後に参加者が集合し、実験概要の確認、機材の開梱・設置準備を実施した。

10 月 4 日は大型無人航空機の組立を行い、試験飛行を数回繰り返したのち、午後から飛行実験を始めた。この日の実験は、自律航法の高度精度について検証を行った。自律航法プログラミングにおいて、一定高度でホバリングするように設定し、その時に無人航空機に取り付けた全方位反射鏡の位置をトータルステーションで測定し、その結果を表 1 に示す。無人航空機は所定の高度よりおよそ -1 ～ + 5 m の範囲で上下左右に揺れながらホバリングを続けた。この日は風が強く、風の変化も大きかった。今回使用した無人航空機の自律航法ユニットの位置決定は、水平方向には GNSS 単独測位決定法、上下方向には気圧センサーを用いている。無人航空機の高度のずれは、気圧センサーの精度の問題が大きいと判断された。実際に無人航空機を地上に置いたままの状態でも気圧センサーの出力を確認したところ、およそ ±2 m の範囲で変化を示していた。このことから高度のセンサーとしては、気圧高度計だけでなく、電波高度計や音波高度計などの他の種類の高度センサー併設も必要であると判断された。

表 2 無人航空機の自律航法ホバリング時の高さの変化。

フライト	離陸時刻	着陸時刻	自律航法プログラム	ホバリング時の実際の地上高	地上風速
1 回目	15:08	15:10	地上高 3 m ホバリング	3.7～4.2m	データなし
2 回目	15:29	15:31	地上高 2 m ホバリング	0.8～2.2m	2.7～7.8 m/s
3 回目	16:17	16:19	地上高 6 m ホバリング	6.4～9.5m	1.9～6.7 m/s
4 回目	16:28	16:30	地上高 6 m ホバリング	6.8～10.6m	3.8～8.1 m/s
5 回目	16:54	16:57	地上高 6 m ホバリングして前後に 20m 移動して戻る	5.3～8.4m	1.3～3.1 m/s

10月5日は引きつづき無人航空機の飛行精度の検討実験を行った。自律航法のプログラムを表3に記載した経路に設定し、無人航空機に取り付けた全方位反射鏡の位置をトータルステーションで測定した。その結果、水平誤差は最大約4m、高度誤差は最大で9mに及ぶことが分かった。特に最後の3回の実験は火山観測を想定して、長距離・標高差があるプログラムで実験を行った。実験場の関係から、高い地点から低い地点に降りていく条件で実施したが、着陸地点への侵入時には、予定高度より5～9m低く侵入する場合があり、地面に接触しそうになる場合もあった。これらの現象も気圧高度計の誤差によって生じるものであると考えられ、安全上においても、複数センサーによる高度監視が必要であることがわかった。

表3 無人航空機の自律航法の精度の検証

フライト	離陸	着陸	自律航法プログラム	無人航空機位置の誤差
1回目	10:28:31	10:31:20	30m 前進戻って着陸	水平誤差<2.8 m 高度誤差 < 4.1 m
2回目	10:40:21	10:43:03	50m 前進戻って着陸	水平誤差<2.4 m 高度誤差 < 1.2 m
3回目	10:53:56	10:57:18	50m 前進戻って着陸	測定ミス
4回目	11:29:24	11:32:10	10 m 四方を回って着陸	水平誤差< 1.0 m 高度誤差 < 7.5 m
5回目	11:42:53	11:45:37	10 m 四方を回って着陸	水平誤差< 1.6 m 高度誤差 < 6.5 m
6回目	11:55:22	11:57:51	10 m 四方を回って着陸	水平誤差< 1.5 m 高度誤差 < 2.7 m
7回目	13:51:20	13:53:28	30m 先に着陸	水平誤差< 2.2 m 高度誤差 < 0.8 m
8回目	14:01:21	14:03:41	30m 先に着陸	水平誤差< 3.7 m 高度誤差 < 0.8 m
9回目	14:13:23	14:15:41	30m 先に着陸	水平誤差< 3.9 m 高度誤差 < 1.9 m
10回目	15:09:32	15:12:36	500m 先から約70m下降着陸	着陸侵入時に予定高度より -6 m
11回目	15:26:36	15:29:32	500m 先から約70m下降着陸	着陸侵入時に予定高度より -9 m
12回目	15:54:25	15:57:58	500m 先から約70m下降着陸	着陸侵入時に予定高度より -5 m

f)まとめ

無人航空機の自律飛行を行うためのセンサーとしては、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おり、いずれも精度的には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。

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。現時点では実証実験中であるが、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みであり、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。また地上の観測装置側から、ビーコン信号を出して無人航空機にその位置や高度を知らせることも有効かと考えられる。いずれにしても、無人航空機の自律航法運用には、精度の高い位置情報ユニットのいち早い開発が望まれる。



写真 5：無人航空機のフライト試験。後方のトータルステーションで無人航空機の位置を測定する。また風向風速・気圧・温度の気象ステーションも実験場に設置した。



写真 6：無人航空機のフライト試験。500 m 離れた地点から離陸を行い自律航法で、70 m 低いグラウンドに自動着陸させた。

4) 無人航空機の運用訓練および遠隔データ回収装置の動作試験

a) 目的

大型無人航空機の運用を自前実施する訓練を行う。10月の実験に引きつづき、大型無人航空機の自律航法の位置決定精度について検証を行う。また試作中の遠隔データ回収装置の現地試験を行う。

b) 日程・場所

平成 29 年 12 月 11 ～ 13 日

旧栗野高校実験場（栃木県鹿沼市）（12 月 11 日）

とちぎ UAV フィールド（栃木県佐野市戸室町）（12 月 12～13 日）

c) 参加者

松島、手操、藤原、勝俣、今津

岩佐（九州大学理学部）、岸本（翔エンジニアリング）

井上・宋（自律制御システム研究所）

設楽・三森（タイプエス）

d) 使用機材

自律制御システム研究所製 16 翅反転ロータ式 ACSL-MN1 Minori Double

シモレックス製 遠隔データ回収装置 ScAirBackup ホストおよび ScAirBackup クライアント

自動追尾型トータルステーション

e) 実施内容

12 月 11 日は、10 月に無人航空機運用の訓練を受けた手操および岩佐が、自律制御システム研究所の指導の元で、大型無人航空機の自律航法運用のプログラム設定送信を行い、実際に飛行させる訓練を 4 フライト実施した。翌日以降の実験においても、手操および岩佐が大型無人航空機の飛行運用を行った。

12 月 12 日は、とちぎ UAV フィールドに移動し、離陸地点から約 100m 離れ、約 15 m 標高が高い堤防上の場所を火山観測点と想定して無人航空機の自律航法による機体の飛行精度を自動追尾型のトータルステーションを用いて行った。詳細なデータは現在解析中であるが、10 月の実験と同様に水平位置・高度値にそれぞれ 数 m の誤差が発生していた。また機体の自動離着陸の試験を実施し、挙動の安定性を確認した。また機体を通常の 2 倍の 10 m/s の高速で飛行させ、挙動の安定性を確認した。いずれも、機体の位置精度以外には、問題は生じなかった。

12 月 13 日は、堤防上に遠隔データ回収装置 ScAirBackup ホストを設置し、無人航空機に ScAirBackup クライアントを搭載することで、データ回収装置の動作・性能確認を行った。その結果を表 4 に示す。ホスト・クライアント間の距離が 30m 以内であれば、データ回収が可能であることがわかった。データ回収に要する時間は、1 日分の地震波形データ（3ch100Hz サンプリング 24bit の win ファイルで約 28MB）の回収に要する時間は、約 2 分間であった。このうち純粋にデータ回収に使われる時間は 120～130 秒であるため、ScAirBackup ホストおよびクライアント間のデータ通信速度は 215 ～ 233 KB/s であることがわかった。

表4 遠隔データ回収の動作試験結果

ホスト・クライアント 間水平距離	無人航空機高度	データ回収
0 m	5 m	OK
10 m	5 m	OK
20 m	5 m	OK
30 m	5 m	OK
40 m	5 m	一部回収できたが 不安定
50 m	5 m	NG

表5 データ回収作業に要する時間

無線 LAN 検知から、無線 LAN 接続完了まで	15 ~ 20 秒
接続完了し、データの転送準備まで	5 ~ 10 秒
1 日分の地震波形データ転送 (27.9MB)	120 ~ 130 秒

f)まとめ

大型無人航空機の運用訓練を繰り返し、研究者チームのみでフライト実験を実施できる目処がたった。これまで、パイロードが大きい無人航空機は、高額の産業用エンジンヘリが主流であり、メーカーが認定した専用操縦者が運用する必要があった。そのため、火山噴火等の緊急観測が必要な場合でも操縦者の都合が付かなかつたり、資金が不足したりで、調査を見合わせる事がたびたび発生した。今後運用が簡単なマルチコプタータイプの大型無人航空機を研究者のみでフライト可能となれば、多くの火山観測で有効に使用することができる。

無人航空機を使用した遠隔データ回収の試作品の動作確認ができた。データ転送には、最初のネゴシエーション動作に 20~30 秒費やしたあとは、215 ~ 233 KB/s の通信速度でデータを回収することができた。この速度は、データ量が少ない GNSS データの回収には十分なスピードがあるが、データ量が多い地震波形データをすべての時間の分を回収するためには少々遅い。ドローン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、せいぜいである。したがって、現在の運用で地震波形データを回収するときには、遠隔データ回収クライアントに、必要な時刻のデータのリストを与え、その指定された時刻のデータのみを回収ホストから送信してもらう必要がある。

また、現状では GNSS データについては NMEA データのみ蓄積送信する仕様となっているが、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。

次年度以降は、作成した機器に上記のデータリスト機能の実装、GNSS 位相データの蓄積送信機能、また、屋外における長期間の観測が可能なように、防水防滴ケースへの組込作業が必要となる。

本研究で試作した遠隔データ回収装置の仕様を以下に示す。完成物品は仕様を満たしている。なお、別紙に本試作委託で納品された、ScAirBackup ホスト と ScAirBackup クライアントの説明書を添付する。

仕 様 書

1. 請負事項

遠隔データ回収装置試作業務

一式

2. 完了期限

平成 30 年 2 月 28 日

3. 請負場所

九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター(長崎県島原市)とする。

4. 成果物等の納入場所

九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター (長崎県島原市新山 2-5643-29)

5. 請負作業の概要等

活火山など、観測者が容易に近づけない遠隔地に設置した観測機器のデータを、無人航空機(ドローン)に搭載した回収装置により自動的に回収する事を目的とする。今回の試作では、GPS、地震計の 2 種類のデータを対象とする。

6. 請負作業の仕様

本発注に必要な機能を下記に示す。請負者は以下の機能を実現するための作業を行うこと。

回収装置は地上に置かれるホスト側(以後、回収ホスト)と、無線(Wi-Fi)により回収を行うクライアント側(以後、回収クライアント)の 2 機で構成されること。回収ホストは、以下の機能を持つこととする。

- ・機能拡張(対象機器の追加等)を容易にするため、LinuxBox を用いて構成する。
- ・COM ポート、Wi-Fi、I/O を持ち、データを蓄積するストレージを持つ。
- ・I/O の IN に入力される信号により Wi-Fi を ON/OFF する。但し設定により、常時 Wi-Fi を ON とする。
- ・設定により、GPS (Septentrio GEM-2)、地震計ロガー(LS-8800)のどちらかの COM ポートから出力されるデータを受信し、1 分もしくは 1 時間毎に蓄積する。

回収クライアントは、以下の機能を持つこととする。

- ・ドローンに載せるため小型軽量でバッテリーを内蔵し Wi-Fi を搭載したものであること。(想定としては、SIM を載せないスマートフォンで Wi-Fi のみを使う)
- ・回収対象の種類、時刻範囲を設定出来ること。
- ・回収ホストの Wi-Fi を検知したら自動的に接続を行い、設定された範囲のデータ回収を行う。
- ・データ回収開始、完了を I/O により出力する。

セキュリティを考慮しデータを回収する方式として SSH を用いる。但し SSH はデータ量が増えるため、実験して通信が不安定な場合には、FTP による方式でも可とする。

7. 必要な業務スキル

本発注の請負者に必要な業務スキルを下記に示す。

既存の地震波形データ処理システムおよび GNSS 処理システムに関して知識を有しており、このシステムを当センターのデータ処理に支障なく組み込むことができること。

UNIX やネットワーク構築を熟知していること。

8. 権利の帰属

1. 本件により納入された納入物（以下、「成果物」という。）に関連する著作権（著作権法第 27 条および第 28 条に定める権利を含む）は、発注者に帰属するものとする。なお、請負者は成果物に係る著作者人格権を行使しないものとする。
2. 成果物の所有権は、発注者に帰属するものとする。
3. 成果物に関連する特許権、実用新案権、意匠権、及び前記各権利の登録を受ける権利、その他知的財産権は、発注者に帰属するものとする。

上記に相当する外国における権利は、発注者に帰属するものとする。

9. 試験及び検査

1. 検査人立会いの上、試験及び検査を本仕様書及び請負業者作成の基本操作説明書ならびに請負業者作成の詳細操作説明書に基づき実施する。
2. 請負業者作成のプログラムを利用し、本システムの処理状況の検査を実施する。
3. 試験及び検査方法の細目、日程などについては別途協議の上決定するものとする。

10. システムの設置調整による成果品及び関係書類の提出

1. 遠隔データ回収装置 1 式（回収ホスト、回収クライアント）
2. 操作説明書

システムの操作に関する基本的な方法などを記したもので、発注者が本システムの運用・管理作業を滞りなく実施可能なもの。納品媒体はすべて DVD-R とし、数量は一式とする。

11. 保証

検査終了後、1 年間は保証期間とし、本システムに障害が発生した場合はただちに無償にてその補修を行うこと。

12. 疑義

本仕様書及び請負業者作成の成果品および関係書類について疑義が生じた場合には、双方協議の上取り扱うものとする。

13. その他

1. 請負者は、契約締結後直ちに、連絡責任体制及び導入設置・調整作業担当責任者名簿を作成し、発注者に提出するものとする。
2. 請負者は、導入設置・調整スケジュールが決定次第、発注者に提出するものとする。なお、導入設置・調整作業担当責任者は、発注者と綿密な連絡をとるとともに、導入準備の状況を報告するものとする。

3. 請負者は、疑義が生じた場合は、開発作業担当責任者を通じ、発注者の指導、助言のもとに導入設置・調整作業を実施するものとする。
4. その他の詳細については、発注者の指示によるものとする。



写真 7：研究チームによる大型無人航空機の運用訓練

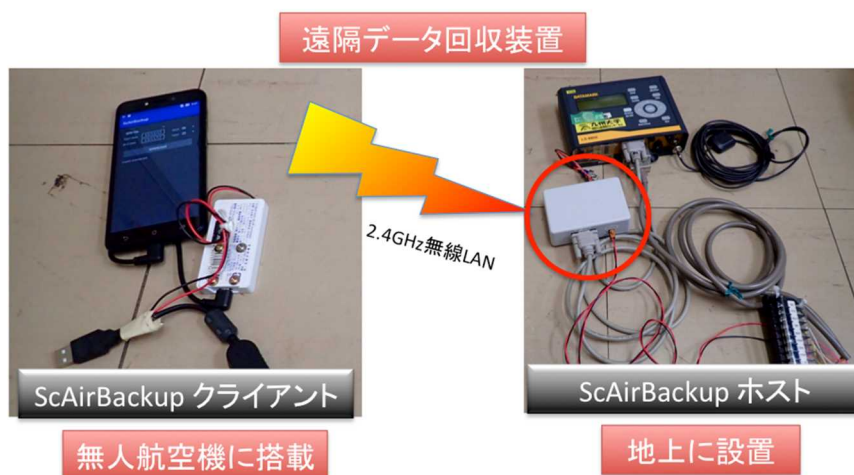


写真 8：試作した遠隔データ回収装置。

5) マイクロ波送受電アンテナの送電実験

a) 目的

空中マイクロ波送電で使用するために設計・試作した送電アンテナと受信アンテナの送電実験を行い、放射パターンを測定するとともに、空間電力伝達率を測定する。

b) 日程・場所

平成 30 年 3 月 18 ～ 20 日

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

c) 参加者

藤原、今津、勝亦、足立、岸本（翔エンジニアリング）

小野（オリエンタマイクロウェーブ）、重田・小室（プロシエア）

高林（京都大学）

d) 使用機材

2.4 GHz 帯送電機

2.45 GHz 32 素子マイクロストリップアレイ 送電アンテナ

2.45 GHz 37 素子レクテナアレイ 受信アンテナ

整流器

e) 実施内容

3 月 18 日 午後に参加者が集合し、実験概要の確認、機材の開梱・設置準備を実施した。翌 19 日より電波暗室内において、送電・受信アンテナの放射パターン測定および近距離送電実験を実施した。

本研究で作成された試作品の特性を以下に示す。（ ）内数字は要求条件である。すべて要求を満足する結果が得られている。

① 2.4GHz 帯送電機

- ・送電周波数 : 2.45GHz
- ・送電電力 : 50.1W (50W 以上)
- ・DC/RF 変換効率 : 55.1% (55% 以上)
- ・質量 : 2.1kg (2.5Kg 以下)

② 送電アンテナ

- ・送電周波数 : 2.45GHz
- ・アンテナ方式 : マイクロストリップアレイ
- ・素子数 : 32 素子
- ・最大動作利得 : 21.5dBi (21.0dBi 以上)
- ・偏波 : 右旋円偏波
- ・形状・サイズ : 510mm x 510mm (550mm 以下)
- ・質量 : 600kg (1kg 以下)

③ 受信アンテナ

- ・受信周波数 : 2.45GHz
- ・偏波 : 右旋円偏波
- ・アンテナ方式 : マイクロストリップレクテナアレイ
- ・素子数 : 37 素子

・動作利得： 6.89dbi～8.62dbi (7.5dBi 以上)

④ 整流器

・入力電力： 2W 以下

・RF/DC 変換効率： 83.01%～84.56% (70%以上)

送信・受信アンテナの各素子同一位相・同一振幅の送受電における放射・受信パターンをそれぞれ図 1、2 に示す。いずれも単体としての要求性能を上回っている。

次に送信・受信アンテナを対向させ、近距離無線電力伝送効率の測定を行った。測定実験の模式図を図 3 に、実験風景を写真 9 に示す。

アンテナ間の送電距離を 1、1.2、3m にした場合の測定結果を表 6 に示す。送電アンテナに送られる送電電力と受信アンテナから出力される受信電力の比が、アンテナ間の空間電力伝達率となる。アンテナ間が 3m の場合は、空間電力伝達率が 0.213 と求められた。

同様今回試作した 2.4GHz 帯の送電機の DC/RF 変換率は、0.551、受信側における整流器の RF/DC 変換効率は、0.830～0.846 と測定されており、距離が 3m の場合の総合的な電力送電効率は、0.097～0.099 となり、目標としている電力送電効率 10%にはわずかに及ばなかった。

f) まとめ

空中マイクロ波送電で使用するために設計・試作した送電アンテナと受信アンテナの送電実験を行い、各アンテナの放射パターンを測定するとともに、送電電力／受電電力比から空間電力伝達率を算出した。それぞれの機器の測定結果は、要求仕様を満たすものであった。

送電アンテナ～受電アンテナ距離が 3m の場合、送信機入力～送電アンテナ～受電アンテナ～整流器出力のトータルの電力送電効率は、9.7～9.9%と求められ、本空中マイクロ波送電技術の開発で目標としている 10%にはわずかに及ばなかった。

しかしながら、現在の送電アンテナアレイへの給電は各素子とも同一位相・同一振幅としており、いわゆるビームフォーミングを行っていない。これを次年度以降の研究で放射パターンを狭ビーム化すれば、さらに空間電力効率が上がり、目標としているトータルの電力送電効率 10%をクリアできるものと考えている。

また、屋外での実験が可能なように、無線局開局のための送電機や送電アンテナデータの取得も次年度以降の重要な課題と言える。

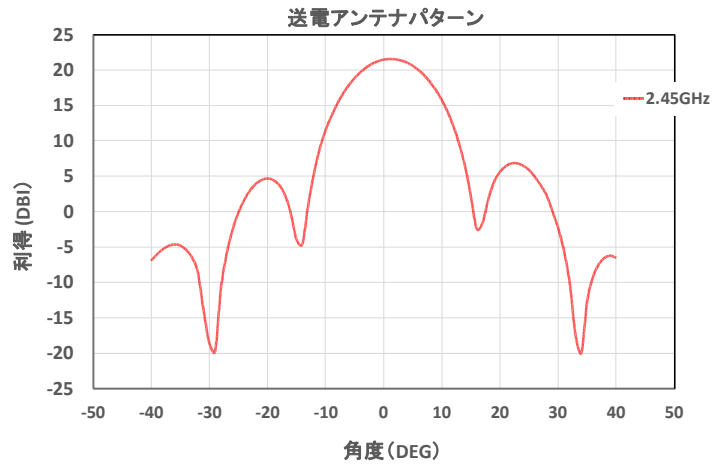


図1：試作した 2.45 GHz 32 素子マイクロストリップアレイ送電アンテナの放射パターン。最大利得は 21.5dBi を示し、要求 21.0dBi を満たしている。

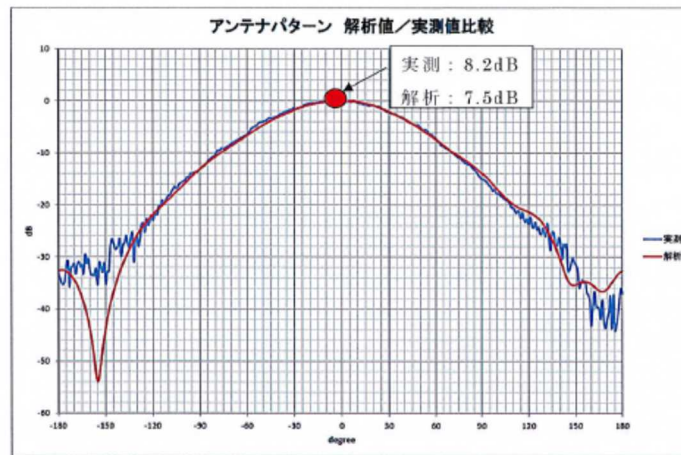


図2：試作した 2.45 GHz 37 素子レクテナアレイ受電アンテナの放射パターン。最大利得は 8.2 dB を示し、要求 7.5 dB を満たしている。

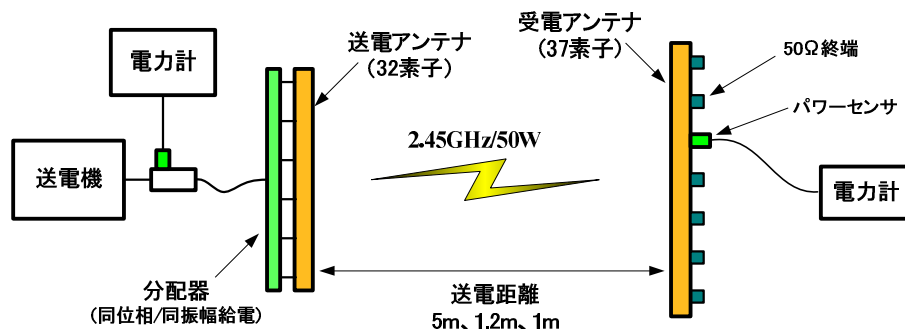


図 3：試作した送受信アンテナを用いた近距離送電実験の模式図。2つのアンテナを対向させ、距離 3m,1.2m,1m でそれぞれ受信電力を測定した。

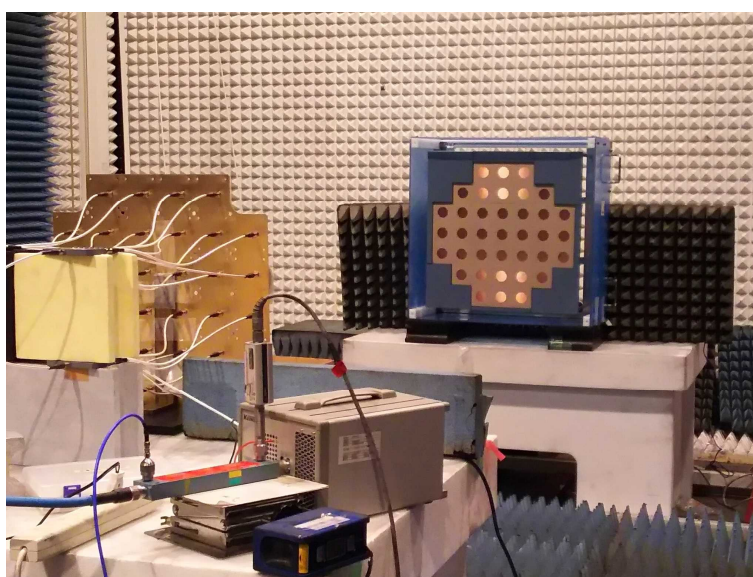


写真 9：試作した送受信アンテナを用いた近距離送電実験風景。手前が 32 素子送電アンテナ、奥が 37 素子受信アンテナである。2つのアンテナを対向させ、その間の距離を変えて送信電力と受信電力を測定した。

表 6：送電実験により得られた送受電電力および空間電力伝達率。

空間電力伝達率			
送電距離(m)	送電電力 (W)	受電電力 (W)	空間電力伝達率
3	57.3	12.2	0.213
1.2	57.6	26.2	0.455
1	51.2	30	0.586

(c) 業務の成果

1) マイクロ波送電に関わる技術実験

空中マイクロ波送電に使用する空間電力伝達効率の高い 2.45 GHz 送電アンテナおよび受信アンテナの設計・試作を行った。また、DC/RF 変換効率の高い送電機、RF/DC 変換効率の高い整流器の試作も行った。電波暗室内での近距離伝送実験(b 業務の実施方法-5)を行い、アンテナ間距離 3 mにおけるトータルの送電効率を 9.7~9.9%にすることができた。ただし目標としている 10%にはわずかに及ばなかった。

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を行った。当初の計画では開発費を安価にするために SD カードタイプ無線 LAN カードの使用を検討していたが、消費電力やプログラムの自由度の関係から、今年度から Linux Box 機をデータ蓄積・転送装置として使用する方針に変更した。無人航空機に搭載する回収クライアントは、OS に Android を使用する端末で、昨年度開発したソフトウェアを改良して作成した。これは SIM カードを挿入するとスマートフォンとして使える端末であり、軽量小型であるため、小型の無人航空機(ドローン)にも搭載可能である。

試作した遠隔データ回収システムを用いて、屋外においてのデータ回収実証実験を実施した(b 業務の実施方法-4)。実験の結果、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、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た。これは情報速度として、215 ~ 233 KB/s に相当する。

なお、当初計画では、桜島等の活火山において屋外データ回収実験を実施する予定であったが、平成 30 年 3 月 1 日に新燃岳の噴火が発生し、実験を実施する場所や時間の確保が困難になったことから、活火山においては実施しなかった。なお、上記のとおり屋外データ回収実験を実施しており(b 業務の実施方法-4)、技術開発に資する所要の成果が得られている。

3) 無人航空機運用技術検討

平成 28 年度に調達した大型無人航空機を用いて、空中マイクロ波送受電及びデータ回収の室内実験をおこなった(b 業務の実施方法-2)。また自律飛行時における無人航空機の位置精度の測定および検討を 3 回の屋外実験で実施した(b 業務の実施方法-1, 3, 4)。現在使用の自律航法ユニットに組み込まれた GNSS 単独測位受信機と気圧高度計では、水平に約 4 m、高度方向には約 9 m におよぶ誤差が含まれていることが判明し、空中マイクロ波送受電装置の搭載には現状では不十分な位置精度であることが分かった。

大型無人航空機の運用については、製造メーカーから無人航空機(ドローン)運用の講習会への参加がもためられており、研究開発チームおよび協力者のうち 5 名が講習会を受講し、大型無人航空機を研究チーム独自で運用する目処をたてることができた。

(d) 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

空中マイクロ波送電に使用する空間電力伝達効率の高い 2.45 GHz 送電アンテナおよび受信アンテナの設計・試作を行った。また、DC/RF 変換効率の高い送電機、RF/DC 変換効率の高い整流器の試作も行った。電波暗室内での近距離伝送実験を行い、アンテナ間距離 3 mにおけるトータルの送電効率を 9.7~9.9%にすることができた。ただし目標としている 10%にはわずかに及ばなかった。

今後は送電アンテナアレイのビームフォーミング設計を行い、送信アンテナの放射パターンをさらに狭ビーム化すれば、空間電力効率があがり、目標としているトータルの電力送電効率 10%をクリアできるものと考えている。

また、屋外での実験が可能なように無線局開局のための送電機や送電アンテナデータの取得も行い、無線免許取得して屋外における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を行った。

屋外においてのデータ回収実証実験を実施し、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た。

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。今後は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する。また、現在の GNSS データは NMEA データのみの収録・データ回収であるため、GNSS 測定の精度の向上のために、GNSS 位相データの収録・回収をできるように回収ホストの改修も行う。

来年度は装置を耐候性に改良し、活火山地域における屋外耐久試験を実施する。

3) 無人航空機運用技術検討

大型無人航空機を用いて自律飛行時における無人航空機の位置精度の測定および検討を実施したが、水平に約 4 m、高度方向には約 9 mにおよぶ誤差が含まれていることが判明し、空中マイクロ波送受電装置の搭載には現状では不十分な位置精度であることが分かった。

今後は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。また地上の観測装置側から、ビーコン信号を出して無人航空機にその位置や高度を知らせることも検討する。

(e) 引用文献

なし

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
松島 健・ 清水 洋・ 藤原暉雄・ 篠原真毅・ 井口正人	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	日本火山学会秋季大会	平成 29 年 9 月 21～2 3 日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成30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3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. 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て改良を繰り返し、無線局工事データを取得する。マイクロ波送電免許を取得して、屋外実験を実施する。

b. 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装置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データ回収装置接続して、屋外実験を実施する。桜島等の活火山に長期間設置し、屋外データ回収実験を行う。

c. 無人航空機運用技術検討の実施

無人航空機の位置精度1m以内を目標に、ビーコン誘導装置や「みちびき」対応の自律航法装置の開発を行う。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a～c.に示される技術開発の一環として、その計画の一部を変更して、開発技術実装に向けた実地の場となる緊急観測を実施協力する。