

# 磁気探査用ペンレコーダのための 無線遠隔操作装置の開発

九州職業能力開発大学校 寺内 越三\*  
株式会社精巧エンジニアリング 儀保 五十一  
株式会社精巧エンジニアリング 玉城 幸憲

Development of the Wireless Remote Controller for a Pen Recorder used in Magnetic Prospecting  
TERAUCHI Etsuzou, GIBO Isokazu, TAMASHIRO Yukinori

**要約** 株式会社精巧エンジニアリングと共同で磁気探査用ペンレコーダの無線遠隔操作装置を開発した。先の大戦で激戦地となった沖縄県では、現在でもたくさんの不発弾が発見・処理されており、道路工事等での事前の磁気探査は重要な作業である<sup>(1)</sup>。磁気探査は探査員と記録員の2名以上により実施される。探査員はセンサを移動させながら、ペンレコーダを操作する記録員に無線機を用いて測定位置を示すマークの記入を指示する。しかし、磁気探査は広大な土地や掘削坑の中等において実施されるため、探査場所から記録場所までの距離が離れていたり、坑底から地表面までに高低差が生じていたりと作業環境の見通しは悪い。このような環境の下、各員の意思疎通が上手く行かないと、マークの記入が遅れ、記入位置と測定位置に誤差が生じる。そこで本研究は、磁気探査精度の向上と探査業務の効率化を目的に、探査員自身がマーク記入を遠隔操作することができる無線通信装置の開発を目標とした。開発する装置には、見通しが悪く高低差がある探査環境でも通信可能な無線性能と、送信機にて通信の成功・失敗を光と音と振動で確認できる受信応答機能が求められる。研究では、無線モジュールを選定するために探査環境に近い地形にて通信実験を行い、送信機が手持ちサイズに収まりかつ探査員が受信応答を確認できる小型のスピーカーや振動モータ等を選定し、装置を製作した後、実証実験を行った。

## I はじめに

戦後 75 年たった現在でも、沖縄県内には未だに約 2,000 トンの不発弾が埋没すると推定されている。年間の不発弾処理量は約 30 トンであることから、全ての処理を終えるには、70 年程度かかると推定されている<sup>(2)</sup>。平成 21 (2009) 年 1 月に発生した糸満市での不発弾爆発事故以降、不発弾等対策の更なる推進が図られ、処理をできるだけ早期に進める取り組みが行われている。公共工事においては不発弾探査を目的とした磁気探査が義務付けられており、また民間工事においても磁気探査の促進を図るための支援事業が実施されている<sup>(3)</sup>。埋没不発弾の一例として、2017 年に精巧エンジニアリングが発見した 5 インチ艦砲弾を図 1 に示す。

磁気探査とは、不発弾等の有無、埋没位置の把握を

目的として、不発弾等の危険物が主に鉄類で出来ていることを利用し、磁気変化を探査計で測定する不発弾等探査をいう。探査方法には、平坦地を探索し、解析を行い不発弾の有無と磁気異常点の位置を把握する「陸上水平探査」(以下、「水平探査」という。)、必要探査深度まで地表面の掘削と水平探査を繰り返す「経層探査」、把握した磁気異常点まで掘削し、磁気異常物を確認する「確認探査」等があり、探査範囲に応じて各種方法を採用する<sup>(4)</sup>。探査作業は、探査員と記録員の2名以上により実施される。探査員は測線に沿ってセンサを移動させながら、記録員に笛や無線機を用いて記録の開始、終了及び 10 m ごとの合図を送る。記録員は有線または無線により伝送されるセンサの信号をペンレコーダで記録しながら、探査員の合図に合わせてボタンを操作しマークを記入する。探査作業の様子を

図2に、記録操作の様子を図3に、マーク記入ペンを図4に、測定波形を図5に示す。

しかし、探査作業は広大な土地、狭く細長い道路及び掘削坑の中などで実施されるため、探査場所から記録場所までの距離が50—100 m程離れていたり、作業通路の確保が困難であったり、坑底から地表面までに3 m程の高低差が生じていたりと作業環境の見通しは悪い。掘削坑の様子を図6に示す。このような環境の下、探査員と記録員の意思疎通が上手く行かないとマークの記入が遅れ、測定後、磁気異常点を解析する際に、マークを記入した位置と現地で測定した位置に誤差が生じる。この課題を解決するためには、ペンレコーダの無線遠隔操作が有効であるが、機能を追加する市販の製品は無く、また、磁気探査装置を構成するアナログ無線送受信機を遠隔操作に利用することもできない。

そこで、探査員自身がマークの記入を遠隔操作することができれば、記入位置と測定位置の誤差が低減され、磁気異常点の位置解析精度を向上させることができ、その後の確認探査作業が短縮化され、探査業務を効率化させることができると考えた。

以上より本研究は、探査精度の向上と探査業務の効率化を目的に、磁気探査用ペンレコーダの無線遠隔操作装置を開発することを目標とする。



図3 記録員によるペンレコーダ操作

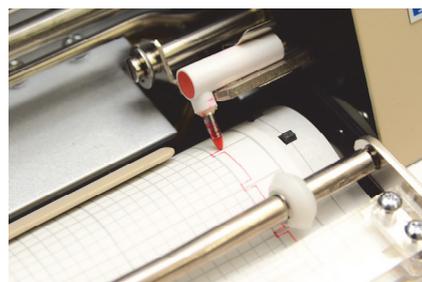


図4 別ペン式イベントマーカ

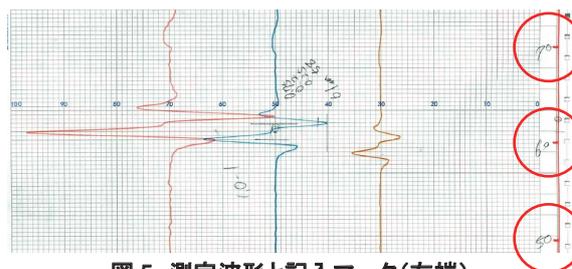


図5 測定波形と記入マーク(右端)



図1 5インチ艦砲弾



図6 掘削坑内での経層探査



図2 探査員による水平探査

## II 無線遠隔操作装置の概要と要求仕様

### 1 装置の概要

無線遠隔操作装置は送信機と受信機から構成され、受信機は磁気探査装置のペンレコーダに接続される。ブロック図を図7に示す<sup>(5)</sup><sup>(6)</sup>。送信機はマーク記入スイッチ、マイコン、無線モジュール及び通信の成否を表示するLED点灯回路・電子音再生回路・振動モータ駆動回路から構成される。また、受信機は無線モジュール、マイコン及びペンレコーダ制御回路から構成さ

れる。

探査員が送信機のマーク記入スイッチを押すと、マイコンは受信機にデータを送信する。受信機はデータを受信すると、ペンレコーダに接続されたマーク記入ボタンの代わりにペンレコーダを制御し、マーク記入を行う。同時に、送信機に通信の成功を応答するデータを返信する。送信機は応答データを受信すると、通信が成功したことを光と音と振動で探査員に伝える。また、送信機がデータを送信した後、一定時間内に応答データを受信できないと、通信が失敗したことを光と音と振動で伝える。

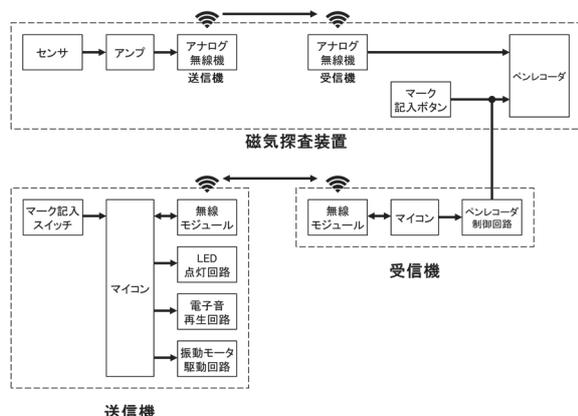


図7 無線遠隔操作装置のブロック図

## 2 要求仕様

無線遠隔操作装置には次の仕様が要求される。磁気探査ではセンサの信号をペンレコーダに伝送するために、最大通信距離が300mのアナログ無線送受信機が用いられる。また、電波伝搬経路は樹木、建設機械及び掘削坑等の障害物がある見通しが悪い環境であり、電波は樹木等に吸収され減衰したり、回折により干渉したりする<sup>7)</sup>。そのため、無線モジュールには見通しが悪い環境においても300m程度の通信が可能であり、免許を要さず使用できることが求められる。さらに通信機能として、自動車の施錠をランプの点滅や電子音で通知するアンサーバック機能の様に、送信機から受信機への通信の可否を探査員自身が確認できる仕組みが求められる。

また、送信機には次の仕様が要求される。探査作業では、探査員は右手でセンサを吊り下げ、左手で送信機を握り、移動しながらマーク記入スイッチを押すことが想定される。そのため、送信機のケースは片手で握れる程度のサイズであること。スイッチはボタン型

で、親指で押しやすいようにケースの左側面にあり、不用意に押さないように操作面は低く突き出していないこと。電源として乾電池を内蔵することが求められる。そして、探査員は作業中軍手を装着する。そのため、通信の可否を知らせる振動モータには、軍手越しでも振動を確認できる振動強さが求められる。さらに、測定は市民が往来する道路でも行われる。そのため、通信の可否を知らせる電子音が騒音にならないように、音量調節機能が求められる。

## III 通信実験

### 1 送受信機の試作

仕様を満たす無線モジュールを選定するために、送受信機を試作り、屋外で通信実験を行った。

無線モジュールの周波数帯は、免許を要しない特定小電力無線局に規定される429MHz帯、920MHz帯と、小電力データ通信システムの無線局に規定される2.4GHz帯とし<sup>8)</sup>、各周波数帯にて、小型で基板への実装が容易な製品を選定し、3種類の送受信機を試作した。選定した無線モジュールの仕様<sup>9)</sup>を表1に、試作した送信機(429MHz帯)を図8に、送信機(920MHz帯)を図9に示す。

送受信機の動作は3種類共通である。送信機のスイッチを押すと、マイコンは受信機にデータを送信する。受信機はデータを受信すると、送信機に通信の成功を応答するデータを返信する。送信機は応答データを受信すると、緑色LEDを点灯し通信の成功を示す。また、送信機が一定時間内に応答データを受信できないと、赤色LEDを点灯し通信の失敗を示す。

表1 選定した無線モジュールの仕様

製品名	周波数帯 (Hz)	空中線電力 (mW)	伝送速度 (bps)	アンテナ	メーカー名
SLR-429	429 M	10	4800	外付け	サーキットデザイン
FEP-01	920 M	20	50 k	外付け	双葉電子工業
XBee-Pro SI	2.4 G	10	250 k	ワイヤ	Digi

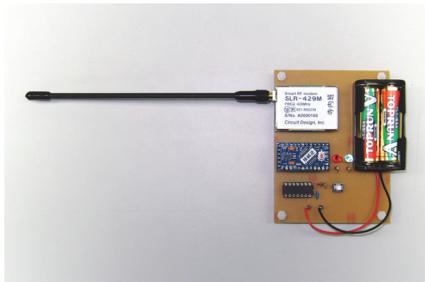


図 8 試作した送信機(429 MHz 帯)

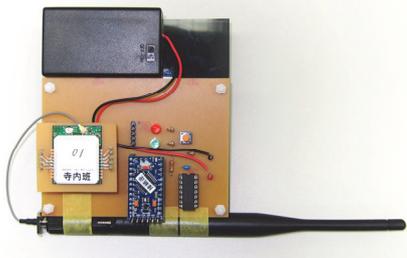


図 9 試作した送信機(920 MHz 帯)

## 2 実験方法

通信実験は、沖縄職業能力開発大学の敷地内から実際の磁気探査環境に近い 2 種類の地形と通信経路を設定し、送受信操作を 10 回試行し、試験結果を得た。

設定した通信経路は、300 m 長の長距離通信を模した「通信経路 1」と、掘削坑の中を模した「通信経路 2」であり、各経路には受信地点を 1 箇所と送信地点を複数箇所設定した。

通信経路 1 は東門を受信地点とし、樹木、自動車及び下り坂により見通しが悪い中、直線上 50 m ごとに 300 m まで 1 から 6 の送信地点を設定した。通信経路 2 では、崖の上を受信地点とし、樹木、建物及び崖により見通しが悪い中、4 m から 7 m 下がった土地に A から F の送信地点を設定した。

通信経路 1 の写真を図 10 に、地点 4 の写真を図 11 に、地点 6 の写真を図 12 に、通信経路 2 の写真を図 13 に、地点 A の写真を図 14 に、地点 F の写真を図 15 に示す。

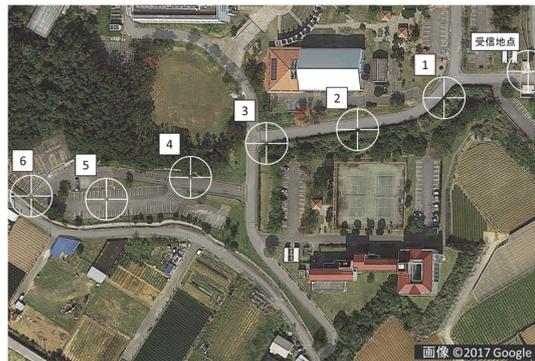


図 10 通信経路 1(通信経路 300 m 長)



図 11 地点 4:経路途中の樹木と坂



図 12 地点 6: 目前に建設機械

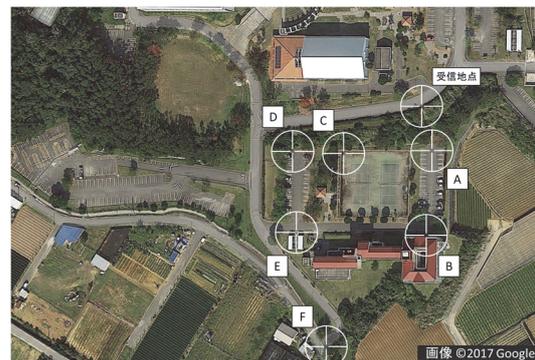


図 13 通信経路 2(崖の上下)



図 14 地点 A: 崖の上から 4 m 下った土地



図 15 地点 F: 前方に高さ 3 m の壁と下り坂

実験手順は次のとおりである。受信地点では受信機を地上 1.8 m の高さに設置し、送信地点では送信機を胸の高さに構えた。特性上、送受信機のアンテナの向きが同一でない場合、感度が低くなり通信距離が短くなるが<sup>(10)</sup>、実用を想定し、送信機は傾けたまま操作した。各送信地点にて送受信の準備の後、送信操作を 10 回行い、通信応答の有無を確認した。

### 3 実験結果

各送信地点における 10 回の通信応答の結果から PER (Packet Error Rate) を求めた<sup>(11)</sup>。PER が 10% であれば、10 回の送信操作のうち、応答が 1 回なかったことを示す。通信経路 1 の実験結果を表 2 に、通信経路 2 の実験結果を表 3 に示す。

表 2 通信経路 1 の実験結果

送信地点	距離 (m)	429MHz PER(%)	920MHz PER(%)	2.4GHz PER(%)
1	50	0	0	100
2	100	0	0	100
3	150	20	0	100
4	200	90	60	100
5	250	0	30	100
6	300	30	90	100

表 3 通信経路 2 の実験結果

送信地点	距離 (m)	429MHz PER(%)	920MHz PER(%)	2.4GHz PER(%)
A	25	0	0	50
B	50	0	0	90
C	50	0	0	100
D	75	0	10	100
E	100	0	20	100
F	150	0	100	100

### 4 考察

429 MHz 帯は 300 m 遠方や崖による高低差があっても通信可能であった。特に、地点 6 には建設機械が、地点 F には前方に高さ 3 m の壁と下り坂、さらに壁の上には 3 階建て建物があったが、0% から 30% と低いエラー率で通信は可能であった。しかし、地点 4 のみエラー率は 90% と高くなった。原因として、地点 4 は坂を下った低い土地であり、前方には密集した樹木が、左方には法面と樹木があり、電波を吸収減衰しやすい環境であったと考える。

920 MHz 帯は 150 m から 250 m まで 0% から 30% と低いエラー率で通信は可能であった。しかし、地点 4 の様に近傍に樹木が密集していたり、地点 6 や F の様に建設機械や構造物が目前にあたりするとエラー率は 90% から 100% と高くなった。

2.4 GHz 帯は 50 m 以上の通信は不可能であった。特に、地点 A の様に周囲が森であるものの、直線経路に障害物が無く受信機を見通すことができれば、エラー率は 50% と中程度であった。しかし、他の地点は受信機を全く見通すことができず、エラー率は 100% となり、通信は不可能であった。

以上のことから、装置には 429 MHz 帯の無線モジュールを採用するのが最適と考えた。また、製品を比較しても、920 MHz 帯よりも 429 MHz 帯のほうがモジュールとアンテナが軽量であり、アンテナも短いことから片手で握りやすい送信機が製作できると考えた。

## IV 無線遠隔操作装置の製作

### 1 送信機

はじめに、送信機の入出力装置であるマーク記入スイッチ、LED、スピーカー及び振動モータを選定した。マーク記入スイッチは仕様通り操作面が低い物を選定した。LED は点灯状態が正面からも側面からも視認できる凸形の物を選び、点灯色は、制御盤の表示灯等に

安い電源ランプには赤色を、通信成功には緑色を、通信失敗には赤色を選択した。スピーカーは3種類の候補を用意し、ケース上カバーと下カバー側の電池ボックスの隙間に固定できるように薄型のものを選定した。振動モータは4種類の候補を用意し、実際に駆動させ振動の強さと外形サイズから選定した。スピーカーの候補を図16に、モータの候補を図17に示す。

次に、ケース内で無線モジュール、各入出力装置及びその他の部品が干渉しないように配置し、通信制御回路を設計・製作した。送信機の外観を図18に、内部を図19に示す。



図16 スピーカーの候補

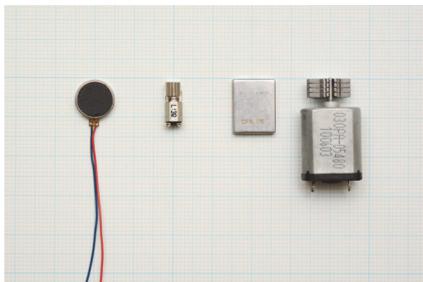


図17 振動モータの候補



図18 送信機 外観

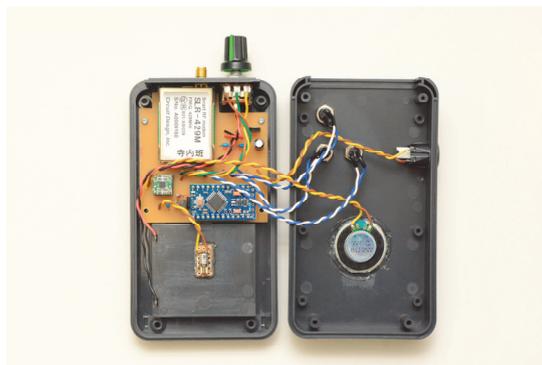


図19 送信機 内部

## 2 受信機

はじめに、受信機のペンレコーダ制御回路を試作した。これまでは、記録員がマークを記入する際、ペンレコーダにケーブルで接続されたマーク記入ボタンを操作していた。受信機では、ボタン操作による回路の開閉をマイコンから制御するために、ペンレコーダとマーク記入ボタンを繋ぐケーブルを延長する様な形で電磁リレーのメーク接点を介在させ、トランジスタアレイを用いてリレーを励磁した。

次に、送信機と同様に通信制御回路を設計・製作した。受信機の外観を図20に、内部を図21に示す。



図20 受信機 外観

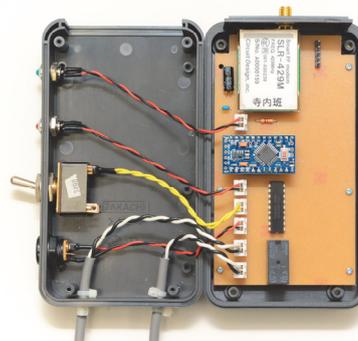


図21 受信機 内部

### 3 送受信プログラム

はじめに、無線モジュール間で送受信に掛かる時間を、プログラムを作成し測定した。その結果、データを送信し応答データを受信するまでに 178 ms 掛かることが分かった。

次に、送受信プログラムを作成した。送信プログラムは割り込み処理と繰り返し処理により構成される。マーク記入スイッチが押されると割り込み処理が実行され、受信機にデータを送信する。同時に送信時刻をミリ秒単位で保存する。繰り返し処理では、送信時から現在時刻と送信時刻の時間差を常に求めており、200 ms 以内に応答データを受信できれば受信成功処理を、受信できなければ受信失敗処理を実行する。

受信成功処理では緑色 LED を 1 回点滅させる間に、スピーカーから「ピンポン」と電子音を再生し、振動モータを 200 ms ほど 1 回振動させる。受信失敗処理では赤色 LED を 1 回点滅させる間に、スピーカーから「ブーブー」と電子音を再生し、振動モータを 400 ms ずつ 2 回振動させる。電子音の周波数はピンポンをそれぞれシb (1864 Hz) とソb (1479 Hz) とし、ブーをド# (277 Hz) とした。

また、受信プログラムは送信機からのデータの受信を完了すると、ペンレコーダのマーク記入を制御するためにリレーを励磁するとともに、送信機に応答データを返信する。

以上、送受信機の通信制御回路の設計・製作と送受信プログラムの作成により無線遠隔操作装置を製作した。無線遠隔操作装置の全景を図 22 に示す。

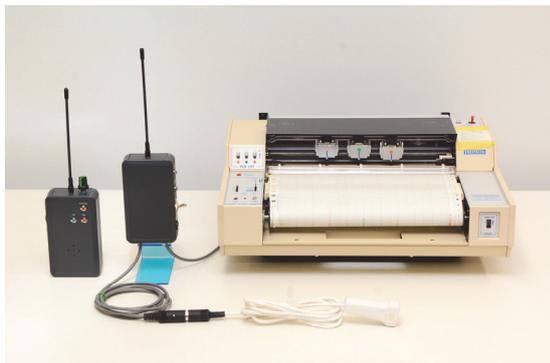


図 22 無線遠隔操作装置 全景

## V 実証実験

### 1 実験方法

製作した無線遠隔操作装置を 2 件の探査作業で使用

し、実証実験を行った。

実証実験は、探査場所から記録場所までの距離が 100 m 以上離れる「実験環境 1」と、探査場所から記録場所までの高低差が 2 m 以上ある「実験環境 2」で行った。各環境とも電波伝搬経路に樹木や建物などの障害物は無く、見通しは良い。

実験環境 1 は、記録場所から 15 m、46 m、105 m、135 m 離れた地点に 3 m 四方の探査区域があり、南北方向 3 m の探査測線を 1 m 間隔で 4 本設定し、1 名の探査員がセンサを吊り下げながら測線を一往復歩行し、記録の開始と終了時にマークの記入操作を行った。実験環境を図 23 に示す。

実験環境 2 は、記録場所から 2 m 以上崖を下り、6 m、41 m、53 m 離れた地点に南北方向 20 m の探査測線を 1 本設定し、2 名の探査員が測線を一往復半歩行し、記録の開始、終了及び 10 m 通過時にマークの記入操作を行った。実験環境を図 24 に示す。

実験の際、送信機は胸の高さでアンテナを水平方向に傾けながら構え、受信機は車の荷台に垂直に設置した。マーク記入操作の様子を図 25 に示す。



図 23 実験環境 1 の様子



図 24 実験環境 2 の様子



図 25 マーク記入操作の様子

## 2 実験結果

実験環境 1 の実験結果を表 4 に、実験環境 2 の実験結果を表 5 に示す。また、マークの記入動作の一例として、実験環境 2 の 41 m 地点にて記録された波形と記入マークを図 26 に示す。

表 4 実験環境 1 の実験結果

送信地点	距離 (m)	高低差 (m)	マーク記入回数	PER (%)
1	15	0.0	16	0
2	46	0.0	16	0
3	105	0.0	16	0
4	135	0.0	16	0

表 5 実験環境 2 の実験結果

送信地点	距離 (m)	高低差 (m)	マーク記入回数	PER (%)
1	6	2.64	9	0
2	41	3.56	9	0
3	53	2.98	9	0

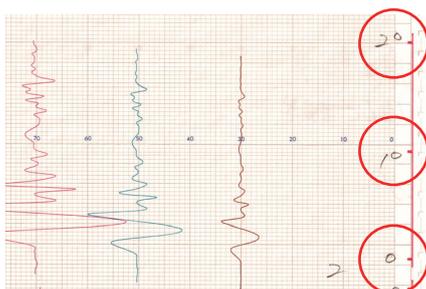


図 26 測定波形と記入マーク(右端)

## 3 考察

実証実験の結果から、共に見通しの良い 100 m 以上離れた地点と 2 m 以上の高低差がある地点において、0 %のエラー率にて通信できることを確認した。また、送信機の操作により受信機がペンレコーダを制御し、マークを記入できることを確認した。

## VI おわりに

本研究では、見通しが悪い磁気探査環境において確実な無線通信を行うために、探査環境に近い地形にて通信実験を行い、通信の成否を光と音と振動で表示する無線遠隔操作装置を製作し、実証実験にて確実な通信とマークの記入を確認したことから、磁気探査用ペンレコーダの無線遠隔操作装置を開発するという目標を達成した。

また、実証実験では次の感想を得た。『まず、探査員が笛を吹かなくてもペンレコーダの記録紙に直接マークを記入できるので良い。さらに、磁気異常点の位置誤差の低減につながり、その後の作業時間の短縮と作業の効率化になる』。感想を得たことから、本研究の目的を達成することができた。

しかし、実証実験中 2 つの問題が生じた。1 つ目が送信機のサイズである。今回使用したケースは片手で握れる程度のサイズではあったが、厚さが 35 mm と厚く、左手で握った際に第三指から第五指までの指先がケース前面まで届かず、握りにくい。今後は指先がケース前面に届く程度のサイズのケースを選定し、送信機の小型化を目指したい。

2 つ目が受信機への AC アダプタ誤接続による回路の破損である。受信機は電源として 5 V の AC アダプタを使用していたが、試用中に誤って空調服の電源である 12 V を接続してしまい、回路が破損した。今後は受信機から AC アダプタを取り外せないようにする仕組みや、受信機に降圧回路を内蔵する等の改良が必要であると考えられる。

そして、今後の目標はペンレコーダの完全遠隔制御である。マーク記入操作に加えて記録紙の送りと 3 つの記録ペンの上下も遠隔制御ができるようになれば、小規模な探査場所は探査と記録を 1 名で行えるようになり、探査費用の削減と探査作業の更なる効率化という目的を実現することができる。

開発した装置の導入により、日本、そして世界各国の残留不発弾処理の完了が早期実現することを願う。

### 【参考文献】

- (1) 沖縄県 暮らし・環境、「不発弾について」、[http://www.pref.okinawa.jp/site/somu/miyako/shinko/fu\\_hatsudan.html](http://www.pref.okinawa.jp/site/somu/miyako/shinko/fu_hatsudan.html)
- (2) 内閣府 第 2 回沖縄振興審議会会長・専門委員会合、「6. 不発弾対策」、平成 28 年、p.38

- (3) 内閣府沖縄総合事務局 沖縄不発弾等対策協議会、「沖縄における不発弾対策の取り組み」、平成 25 年
- (4) 内閣府沖縄総合事務局 開発建設部、「磁気探査実施要領(案)」、平成 24 年
- (5) 姫野哲治・儀保五十一ほか、磁気探査機器の無線化構造、登録実用新案公報(U)、2008
- (6) パントス、「アナログ無線送受信機 TRM-1650/REC-1650」、[https://www.pantos.jp.net/product/analog\\_radio\\_transceiver/](https://www.pantos.jp.net/product/analog_radio_transceiver/)
- (7) 進士昌明、無線通信の電波伝搬、電子情報通信学会、1992
- (8) 総務省電波利用ホームページ、「免許及び登録を要しない無線局」、<https://www.tele.soumu.go.jp/jadm/proc/free/>
- (9) 木村知史、「920MHz 無線モジュール・セレクション」、Interface、451 号、2015 年、p.33
- (10) モノワイヤレス、「アンテナの設置方法」、<https://mono-wireless.com/jp/products/TWE-ANTENNAS/design/range.html>
- (11) インタープラン、「IM920 見通し通信実験レポート」、平成 27 年

本文中で使用したメーカー名・製品名は、一般に各社の商標または登録商標である。