

## 無線 LAN を用いた GPS データ遠隔回収システムの開発

土井浩一郎<sup>1,2\*</sup>・青山雄一<sup>1,2</sup>・船木 實<sup>1,2</sup>・大園伸吾<sup>3</sup>・早河秀章<sup>1</sup>

## Development of GPS data remote retrieval system using wireless LAN

Koichiro Doi<sup>1,2\*</sup>, Yuichi Aoyama<sup>1,2</sup>, Minoru Funaki<sup>1,2</sup>  
Shingo Osono<sup>3</sup> and Hideaki Hayakawa<sup>1</sup>

(2012年5月16日受付; 2012年7月17日受理)

**Abstract:** A remote retrieval system, using a wireless LAN, was developed to retrieve dual-frequency GPS data. The system consists of a ground observation unit (comprising a dual-frequency GPS logger and a data transmission unit) and a data retrieval unit. In this system, we use the ZigBee communication protocol to transmit control commands (2.4 GHz, 250 Kbps) and a wireless LAN communication to transmit GPS data (2.4 GHz, 54 Mbps). Data of every 30 seconds to transmit to the data retrieval unit are re-sampled from 1-second data at 00 UT each day.

We conducted three data-transmission tests with the system: (1) a ground data retrieval test, (2) a data retrieval test from the atmosphere of a few hundred meters high using a small unmanned aircraft, and (3) actual GPS-data retrieval tests from a GPS buoy deployed on sea ice at Nisi-no-ura Cove, Syowa Station, Antarctica. In test (1), we successfully received all the data from the ground observation unit when situated at distances of less than 400 m from the data retrieval unit. In test (2), we obtained approximately 24.5 MB of data from the aircraft at heights of less than 250 m. In test (3), we obtained approximately 23.5 MB of data from the GPS buoy within 10 minutes. The proposed system has the advantage of enabling continuous measurements without aborting the measurement at the data retrievals.

**要旨:** 無線 LAN を利用した 2 周波 GPS データ遠隔回収システムを開発した。このシステムは、GPS ロガーとデータ送信装置からなる地上観測装置とデータ回収装置で構成され、コマンド送受信には ZigBee 通信 (2.4 GHz, 250 Kbps) を、GPS データの送受信には無線 LAN 通信 (2.4 GHz, 54 Mbps) を使用する。GPS ロガーで収録された 1 秒サンプリングデータから毎日作成される 30 秒サンプリングデータファイルが送信される。

これまで、(1)地上でのデータ回収試験、(2)小型無人飛行機によるデータ回収試

<sup>1</sup> 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>2</sup> 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻. Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>3</sup> 測位衛星技術株式会社. GNSS Technologies Inc., 4th Floor Matsuki Bldg. 6-12-5 Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 160-0022.

\* Corresponding author. E-mail: doi@nipr.ac.jp

験, (3)昭和基地・西の浦での実データ回収試験を実施した. (1)では, 最大 400 m 程度の距離で全データを回収でき, (2)では約 250 m 以下の高さで飛行する飛行機により約 24.5 MB のデータを回収できた. (3)では, 10 分以内に約 23.5 MB の GPS プイデータの回収に成功しており, 観測を止めることなくデータ回収が可能となった.

## 1. はじめに

南極域では, 海水上や氷床上に精密測位用 2 周波 GPS 観測装置を設置して, 海水の潮汐変位や氷床の流動速度の観測が実施されてきた (例えば, Aoki *et al.*, 2000; Doi *et al.*, 2002; 土井ほか, 2004). アクセスしやすい場所で観測する場合にはあまり問題とならないが, アクセスに時間のかかる場所やアクセス困難な場所に観測装置を設置した場合, 観測データの回収に困難が伴う. 特に氷床上に観測装置を設置した場合はアクセスに時間がかかるため, 小型無人飛行機にデータ回収装置を搭載し, 遠隔操作でデータ回収 (リモート回収と呼ぶ) を行うことができれば極めて有用である. また, 観測の無人化や自動化を進めるにあたっては, データのリモート回収は重要な要件の一つである. データの回収にあたっては通常, 収録装置の電源を落としてメモリを交換するか, 収録装置そのものを交換することが多い. しかし, 連続観測を中断することなくデータ回収ができれば, データの欠測を減らすことができる.

こうしたことから, GPS 観測データをその場に行かずにリモート回収できるシステムの開発を目指した. 本稿では開発したシステムの概要を示すと共に, これまでに実施したデータ回収試験についても紹介する.

## 2. システム概要

### 2.1. システム構成

GPS データ遠隔回収システムの開発要件は次の二つである.

- (1) 100 m 程度離れた場所から 360 MB 程度 (約 180 日分) のデータを 15 分以内に回収すること
- (2) 低消費電力型であること

今回開発した GPS データ遠隔回収システムは, 大きく分けて地上観測装置とデータ回収装置で構成される. 地上観測装置は GPS 観測装置とデータ送信装置からなり, GPS 観測装置には GPS 受信機を内蔵したデータロガー, GPS アンテナ, ZigBee 通信用アンテナが含まれる. データロガーは 8 GB の SD カードを 2 枚装着できるようになっており, 1 秒サンプリングデータを約 1 年間蓄積することができる. データ送信装置は制御用 CPU と無線 LAN アンテナで構成されており, GPS 観測装置に接続されている. 地上観測装置は 12 V バッテリーで稼働する. データ送信装置は省電力のため送信時以外は電源断となっており, データ回収装置が地上観測装置の近くに来た場合に動作を開始し, データを送信する. そして, データ送信完了後, 送信装置は再び電源断となる.

一方、データ回収装置は制御用 CPU と無線 LAN アンテナ、ZigBee 通信用アンテナから構成されており、12V バッテリーで稼働する。

本システムの概念図を図 1 に示す。図 2 (a) に地上観測装置、図 2 (b) にデータ回収装置の写真を示す。なお、無線 LAN アンテナは指向性のあるパッチアンテナと無指向性のポールアンテナの 2 種類を装着できる。

各装置の仕様を表 1 に示す。消費電力や通信距離を考えると近距離無線通信規格の一つである ZigBee 通信（諸元は表 2 に示す）が望ましいが、通信速度が遅い（最大 250 kbps）ため大容量の GPS データを短時間で送信することができない。そこで、大容量データを送信可能な無線 LAN（最大 54 Mbps）をデータ通信方法として採用した（諸元は表 2 に示す）。また、

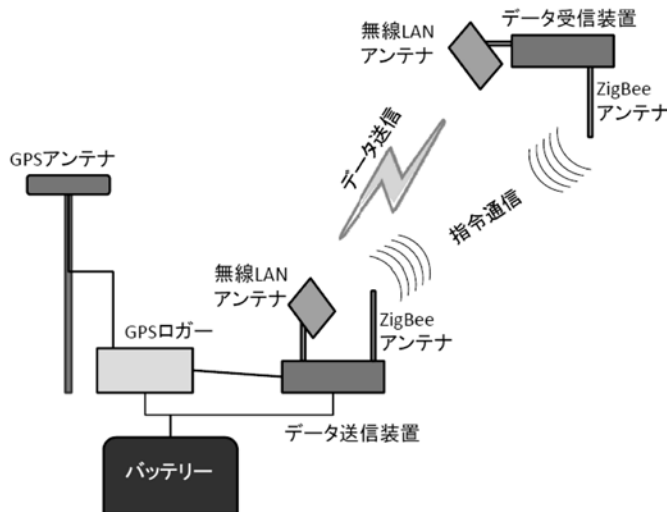


図 1 システム概念図

Fig. 1. Basic concept of the GPS data remote retrieval system.

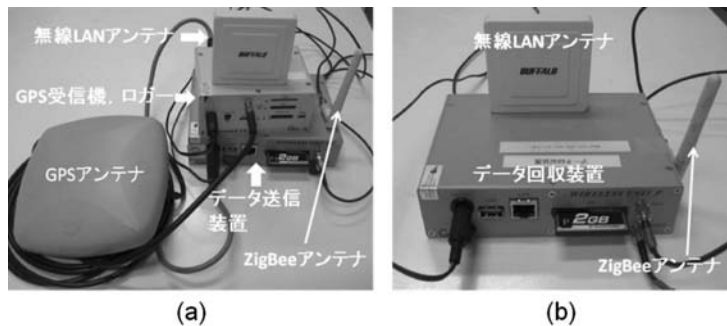


図 2 (a) 地上観測装置の構成、(b) データ回収装置の構成

Fig. 2. (a). Configuration of the ground observation unit, and (b) the data retrieval unit.

表 1 各装置の仕様

Table 1. Specifications of each unit.

GPS ロガー (GPS 受信機, CPU, ZigBee) <i>GPS logger (GPS receiver, CPU, ZigBee)</i>		送信装置 (CPU, 無線 LAN) <i>Data transmission unit (CPU, Wireless LAN)</i>	
受信機	JAVAD GNSS TR-G3T	記録媒体	CF カード
記録媒体	SD カード	消費電力	1.7 W
消費電力	2.5 W	電源電圧	5-12 V
電源電圧	4.5-16 V	動作温度	0°C~60°C
動作温度	-20°C~60°C		

回収装置 (CPU, 無線 LAN, ZigBee) <i>Data retrieval unit (CPU, Wireless LAN, ZigBee)</i>	
記録媒体	CF カード (2 GB)
消費電力	1.9 W
電源電圧	5-12 V
動作温度	0°C~60°C
重量	700 g

表 2 通信装置の仕様

Table 2. Specifications of communication devices.

無線 LAN <i>Wireless LAN</i>			ZigBee <i>ZigBee</i>	
到達距離	最大約 500 m		到達距離	約 1000 m
通信速度	最大 54 Mbps (理論値)		通信速度	最大 250 Kbps
帯域, 消費電力	2.4 GHz, 802.11 a/b/g	1.0 W (最大 入力電力)	帯域, 消費電力	2.4 GHz 0.2 W

消費電力を抑えるために電力消費の大きい (最大 1.0 W) 無線 LAN 装置は使用時のみ起動する仕様とし、電力消費の小さい (0.2 W) ZigBee 通信で起動コントロールを行う。

## 2.2. 動作順序 (シーケンス) 概要

GPS 観測装置で 1 秒サンプリング収録された GPS データは 1 日 1 回 00 UT に 30 秒でリサンプリングされ、送信用ファイルが自動生成される。送信用ファイルは GPS ロガー内の送信用フォルダに格納される。なお、現時点の設定では、データ回収装置でリモート回収されるデータは 30 秒サンプリングデータであるが、1 秒サンプリングデータの回収も可能である。

データ回収動作の概要は以下のようになっている。

- (1) データ送信装置は消費電力を抑制するために通常は停止 (電源断) 状態にある

- (2) データ回収装置から ZigBee 通信によって地上観測装置に指令を送り、データ送信装置が起動する。
- (3) データ送信装置は GPS ロガーから送信用ファイルをコピーする
- (4) データ回収装置とデータ送信装置の無線 LAN 装置間で通信が確立され、データのアップロードが開始される。なお、回収されるファイルの選択は、相互通信によりデータ送信装置内のファイルとデータ回収装置内のファイルとを比較して行われる。
- (5) 回収されるべきデータファイルのアップロードが終了すると、データ回収装置から地上観測装置のデータ送信装置に終了コマンドが送信され、データ送信装置は再び停止（電源断）状態になる。なお、現在の設定では、動作時間は最大 15 分間となっている。これは、30 日分のデータ（約 60 MB）を 2 分間程度で回収することを想定しており、1 回の接続で 6 か月間程度までのデータを回収することを想定した設定である。データ送信中であっても 15 分間で送信が中断されるが、次回に送信途中のファイルを再度最初から回収する設定となっている。

図 3 に動作シーケンスの詳細を示す。

### 3. データ回収試験

これまで、静岡県静岡市の三保飛行場において(1)地上データ回収試験および(2)小型無人飛行機によるリモート回収試験を実施し、第 53 次日本南極地域観測隊において昭和基地・

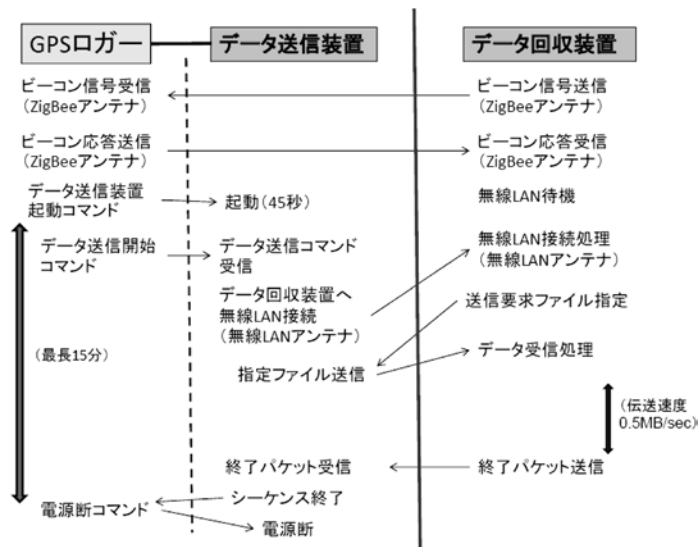


図 3 動作シーケンス詳細 (GPS データ回収システム動作マニュアル (測位衛星技術株式会社, 2009) に加筆)

Fig. 3. Detailed workflow of the proposed system.

西の浦の海氷上で(3)GPS ブイデータ回収試験の計3回の動作試験を実施した。ここでは各動作試験の概要と結果を述べる。なお、これらの試験を実施する前に(1)および(2)では2週間程度GPS測定を実施し、大きさ約2MB(1日分)の試験用データを16個取得した。また(3)では、実際に海氷上で取得したデータを試験に用いた。

### 3.1. 地上データ回収試験

地上においてどの程度の距離までデータ回収が可能かを調べた。地上においては、200m以上見通しのきく場所を確保することができなかつたため、26mおよび107.5m離して地上観測装置とデータ回収装置を設置し、データ送信装置の無線LANアンテナ前段に減衰器を挿入し、電波強度としては通信距離を長くした場合と同等の条件にして、より長い距離での動作試験とした。なお、この試験では指向性LANアンテナを使用した。

減衰器は6dB、12dB、20dBの3種類を用意し、それらを使用した場合の換算距離は実距離のそれぞれ2倍、4倍、10倍となる。各換算距離でそれぞれ1回ずつ試験を実施した。その結果を表3に示す。なお、送信装置にはUSBソケットにLEDを装着し、データ送信開始時刻と送信終了時刻を判別できるようにした。また、データ回収装置は、データ受信が始まると装置内部のLEDが点灯する。表3で示されている回収装置ON時刻は、データ回収装置からのウェイクアップコマンドの送信が開始された時刻とほぼ同じと考えてよい。

表3の試験結果から、100m程度までの距離ではほぼ想定どおりに1分以内でデータ回収できているが、200-400m程度の距離では8分程度かかる場合もあり、回収に要する時間にばらつきが出ている。原因として、周辺電波状態の変化や人などの遮蔽物の影響による伝送速度の低下、通信の中断が考えられる。距離1000mでは一応互いを認識し、データ伝送を

表3 地上試験結果(2010年3月9日、10日実施)  
Table 3. Result of ground data retrieval test at March 9 and 10, 2010.

換算距離 (m)	アッテ ネータ (dB)	伝送 ファイル数	伝送 データ量 (MB)	回収装置 ON時刻	送信LED 点灯時刻	送信LED 消灯時刻	回収所要 時間(秒)
2010年3月9日							
26	0	16	32	----	14:52	14:54	2
104	12	16	32	15:18	15:19	15:20	1
260	20	16	32	15:37:04	15:37:37	15:38:25	48
2010年3月10日							
107.5	0	16	32	14:20:50	14:21:20	14:22:10	50
215	6	16	32	14:33:47	14:34:17	14:42:20	483
430	12	16	32	15:08:51	15:09:50	15:13:47	237
1075	20	1以下	200kB	15:29:43	15:31:45	15:42:20	635

\*)なお、最初の試験は時刻の読み取りがうまくいかなかった。

開始するものの、伝送速度が遅いため回収に失敗した。

なお、回収に成功したファイルはすでにデータ回収装置内に存在するため、次の接続時には回収の対象とはならない。

### 3.2. 小型無人飛行機のリモコン飛行によるデータ回収試験

国立極地研究所で開発された小型無人飛行機（船木・Ant-Plane Group, 2006; Funaki *et al.*, 2008）にデータ回収装置を搭載し、地上観測装置から GPS データを回収する試験を実施した。試験は飛行機をリモートコントロール飛行の状態にして、地上観測装置の上空 120–250 m で半径 100–200 m 程度の円形を描かせながら行った。この試験では、飛行機と地上観測装置との位置・方位関係が時々刻々と変化するので、送信側、受信側に使用する無線 LAN アンテナの組み合わせを指向性同士、指向性と無指向性、無指向性と指向性、無指向性同士の 4 通りにして試験を行うことにした。図 4 にデータ回収装置を搭載した状態の小型無人飛行機の写真を示す。データ回収装置は機体ノーズ部分に搭載し、無線 LAN アンテナはノーズ底部に、ZigBee アンテナはノーズ先端に突き出す形でそれぞれ装着した。

試験は計 5 回の飛行で行われたが、5 回目の着陸時に機体に損傷が生じたため、以降の試験は実施できなかった。表 4 に試験結果を示す。表からわかるように、高度 200 m の上空から（仰角 55° の位置を高度 200 m で飛行する場合、距離は約 240 m となる。）GPS データの



図 4 データ回収装置の小型無人飛行機への搭載

Fig. 4. Data retrieval unit mounted on a small unmanned aerial vehicle.

回収は十分可能であろう。送信側の LAN アンテナを無指向性にした状態での試験は 1 回しかできなかつたため、アンテナの指向性、無指向性による違いを詳しく調べることはできなかつた。なお、回収可能なデータファイル数は全部で 16 個であったが、最大 12 個までしか回収できておらず、その原因は突き止められていない。また、表 4 で飛行高度 150-160m の場合と 200-250m の場合の回収所要時間がそれぞれ 230 秒と 70 秒となっており、飛行高度の低いほうがデータの回収に時間がかかっている。これは、この試験では飛行機を手動リモートコントロールで飛行させており、機体の姿勢が必ずしも安定していないため、アンテナの向きが送信側と回収側でうまく合わなかつたことが原因ではないかと思われる。

飛行機のリモコン操縦用の電波は、ZigBee や無線 LAN に用いられている電波周波数と同じ帯域 (2.4GHz) を使用しており、エンジンから発生する電波も含めて電磁干渉の可能性があった。このため、電磁干渉の有無についてもテストを行った。ここでは詳細は省くが、飛行機の制御用電波やエンジンから発生する電波、データ送受信の電波の干渉は特に見られなかつた。

使用した無線 LAN アンテナの仕様に記載された製造元のテスト結果によると、距離 200m 以内であれば約 24 Mbps (3 MB/s) の伝送速度が出るものの、それを超えると伝送速度は次第に低下する。小型無人飛行機を用いたデータ回収の場合、無線 LAN アンテナ同士がデータ通信可能な範囲にある時間は限られる上、伝送速度低下の影響も加わり、距離 200m を超えるとデータ伝送が次第に困難になると考えられる。今回の試験では、高度 200-250m からでもデータの一部は回収されているものの、現実的なデータ回収可能高度としては 200m 程度と考えるのが妥当であろう。

リモコン操縦による飛行では、飛行機を視認できる範囲でしか飛ばすことができないため、より遠方に設置された地上観測装置からのデータ回収を可能にするためには、自律飛行によるデータ回収が必要となる。本試験では自律飛行によるテストも計画したが、機体の損傷により実施を断念した。

表 4 小型無人飛行機搭載試験結果

Table 4. Result of retrieval test using a small unmanned aerial vehicle.

飛行高度 (m)	送信側アンテナ	回収側アンテナ	回収ファイル数	伝送データ量 (MB)	送信 LED 点灯時刻	送信 LED 消灯時刻	回収所要時間 (秒)
120	指向性	指向性	3 (16)	6.24	11:22:28	消灯せず	----
150-160	指向性	指向性	12 (16)	24.46	11:49:40	11:53:50	230.00
200-250	指向性	指向性	12 (16)	24.46	12:13:20	12:14:30	70.00
250	指向性	無指向性	----	----	点灯せず	----	----
160-190	無指向性	指向性	8 (16)	15.30	12:54:10	消灯せず	----

\*) 地上観測装置内に格納されている回収可能なデータファイル数は全部で16個(表3と同じ)である。



### 3.3. GPS ブイデータ回収試験

GPS ブイは海水に浮かべるブイの内部にバッテリーや GPS アンテナおよび受信機を格納し、海水の動きを観測するために開発した装置である（青山ほか，2011）。浮輪の周囲に太陽電池を取り付けて太陽光による充電を可能にし、また、低消費電力 GPS を使用することで長期間の観測を可能にしている。この試験では通常の GPS 受信機の代わりに、今回開発した無線 LAN 対応の地上観測装置一式を格納し、昭和基地・西の浦の海氷上に設置の上実施した。設置状況を図 5 に示す。

海氷上に設置した観測装置からデータを回収する際には危険や不便を伴う。この試験は実際に極域の厳しい自然環境下で使用し、海氷上に出ることなく地上から安全かつ簡便にデータ回収を行うために役立つことを示す狙いがある。また、データをリモート回収することができれば、観測を継続しながらデータの回収が可能な利点を示すことができる。

観測を 2011 年 12 月 28 日から開始して以来、現在（2012 年 7 月時点）も観測を継続している。様々な方向から回収試験を行うことを想定して、データ送信装置側は無指向性の無線 LAN アンテナを使用し、回収装置側は指向性アンテナを使用した。データ回収は 2011 年 12 月 31 日、2012 年 1 月 21 日および 2 月 17 日に実施した。

2012 年 2 月 17 日には、異なる距離での回収試験を実施した。海氷上の GPS ブイからそ



図 5 昭和基地・西の浦での GPS ブイの設置状況

Fig. 5. GPS buoy deployed on a sea ice at Nisi-no-ura Cove, Syowa Station.

それぞれ 62.5 m, 104 m, 151 m 離れた陸上からデータ回収装置を用いて回収試験を行ったところ、試験用に残しておいたすべての 30 秒リサンプリングデータファイル (16 ファイル) を回収することができた。それぞれの距離での回収試験結果を表 5 に示す。

いずれの距離においても、全データが問題なく回収できている。回収に要した時間は 62.5 m と 104 m では約 3 分間であったが、151 m では約 10 分かかっている。GPS ブイ (地上観測局) 側は無指向性アンテナを用いており、指向性アンテナに比べると電波到達距離が短く、遠方では電波強度も弱くなると考えられる。このため、指向性アンテナを用いた日本での地上試験よりも回収に時間がかかった可能性がある。

回収されたデータ例を図 6 に示す。日本南極地域観測隊 (JARE) 第 53 次夏隊では、2011 年 12 月 28 日～2012 年 2 月 16 日までの 51 日間のデータが回収されたが、図 6 では、2011 年 12 月 28 日～2012 年 1 月 7 日までの 11 日間をプロットしている。この図では、上から海水

表 5 昭和基地・西の浦での回収試験結果

Table 5. Result of data retrieval test from GPS buoy at Nisi-no-ura Cove, Syowa Station.

距離 (m)	伝送ファイル数	伝送データ量 (MB)	回収装置 ON 時刻 (LT)	回収装置 OFF 時刻 (LT)	回収所要時間 (秒)
62.5	16	23.5	14:31:40	14:34:16	156
104	16	23.5	15:00:02	15:03:14	192
151	16	23.5	15:45:31	15:55:15	584

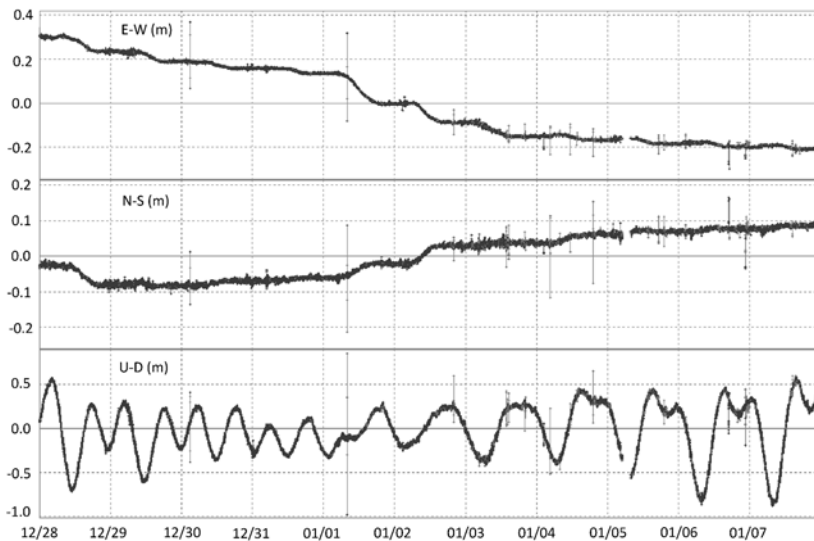


図 6 海氷上に設置した GPS ブイから回収されたデータ例

Fig. 6. Plot of retrieved data from the GPS buoy on a sea ice.

の東西方向の変位, 南北方向の変位, 上下方向の変位をそれぞれ示している. この期間中, 水平方向では西向きに約 50 cm, 北向きに約 20 cm の変位が見られる. また, 上下方向の変位では, 潮位変化に伴う海水の上下変位が明瞭に捉えられている. なお, この海水位置の変化は近傍の露岩に設置した GPS との相対測位で得られた結果である.

#### 4. まとめと今後の課題

無線 LAN を利用して GPS データを遠隔操作で回収するシステムを開発した. そのシステムを使って, 地上でのデータ回収試験, 小型無人飛行機を使ったデータ回収試験および海水上に設置した GPS プイデータの回収試験を実施した. 小型無人飛行機を使った GPS データの回収はおそらくこれまで実施されたことはなく, 250 m 以下の比較的低空からではあるが, データ回収ができたことは特筆すべき成果だと考えられる.

国内における送信装置, 回収装置を固定した地上試験では約 400 m の距離でも比較的短時間にデータ回収をすることができたが, 回収側が移動する小型無人飛行機からの回収では, 高度 200 m を超える上空からのデータ回収は, 高度が増すに従ってより困難になると考えられる.

昭和基地におけるリモート回収試験では, 海水上に出ることなくデータ回収ができた. データ回収時の観測中断を避けることが可能なことから, 実観測においても有用であると考えられる.

送信装置はあらかじめ場所がわかっている場合が多く, 回収装置の無線 LAN アンテナに無指向性アンテナを使用するメリットは少ないと考えられる. このため, 今後の指向性・無指向性アンテナの組み合わせによる試験では, 送信装置側は指向性または無指向性のアンテナを使用し, 回収装置側は指向性アンテナを使用して行いたい. 送信装置側に無指向性 LAN アンテナを使用する場合は, 距離依存性と回収時間に主眼を置いて試験を行い, 指向性アンテナを使用する場合は, 距離依存性や回収時間のほかに無線 LAN アンテナ面に対する方向依存性についても試験を行いたい.

今後, より詳細な動作シーケンスの検討を行い, 小型無人飛行機を使った試験で一部のファイルを回収できなかった原因の特定を行いたい. また, 小型無人飛行機の自律飛行により複数の地点のデータ回収を 1 フライトで可能にしたい.

#### 謝 辞

本システムの開発は平成 21 年度国立極地研究所研究プロジェクト (開発研究 E16) によって行われた. また, 試験の一部は南極地域観測第Ⅷ期 6 か年計画萌芽研究観測 AH4 「無線通信による野外 GPS データの遠隔回収実験およびフィールド長期間 GPS 観測試験」の一部として第 53 次日本南極地域観測隊において実施された.

本システムの開発および動作試験において、浅子正浩氏（測位衛星技術株式会社）、東野伸一郎氏（九州大学）、小原徳昭氏（ロボティスタ）、桑原幹夫氏にご協力いただいた。

#### 文 献

- Aoki, S., Ozawa, T., Doi, K. and Shibuya, K. (2000): GPS observation of the sea level variation in Lützow-Holm Bay, Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2285–2288, doi: 10.1029/1999GL011304.
- 青山雄一・深町 康・土井浩一郎・青木 茂・渋谷和雄 (2011): 南極昭和基地における験潮儀と GPS プレイで観測された潮位変化の比較. 日本測地学会第 116 回講演会要旨集, 49–50.
- Doi, K., Seo, N., Aoki, S. and Shibuya, K. (2002): Sea surface height determination by GPS in sea ice region of Lützow-Holm Bay, Antarctica, *Polar Geosci.*, **15**, 104–111.
- 土井浩一郎・今栄直也・岩田尚能・瀬尾徳常 (2004): 第 41 次南極地域観測隊において実施された南極氷床における GPS 観測. 南極資料, **48**, 7–18.
- 船木 實・Ant-Plane Group (2006): 南極観測用小型無人航空機 Ant-Plane の開発. 南極資料, **50**, 212–230.
- Funaki, M., Hirasawa, N. and the Ant-Plane group (2008): Outline of a small unmanned aerial vehicle (Ant-Plane) designed for Antarctic research. *Polar Sci.*, **2**, 129–142.
- 測位衛星技術株式会社 (2009): GPS データ回収システム操作マニュアル, p20.