東京大学地震研究所技術研究報告, No. 30, 5-14 頁, 2024 年. Technical Research Report, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, No. 30, pp. 5-14, 2024.

論説

空中磁気探査に用いる地磁気計測用三軸磁力計と その周辺機器の製作 (1)構成と座標計測試験の結果

小河 勉^{*†}・浦野幸子**

Instrumentation for Three-axis Magnetometer and Peripherals for Aeromagnetic Measurements (1) Configuration and Coordinate Measurement Results

Tsutomu OGAWA*[†] and Sachiko URANO**

Abstract

We have begun the development of a three-axis aeromagnetic survey instrument for use on board helicopters and multicopters. It consists of sensors, loggers, and communication devices. In the present paper, we describe its components in detail.

Tests were performed to measure the altitude difference between a barometric sensor to be placed on board a helicopter or multicopter and a sensor to be placed on the ground during the survey to determine the sensor accuracy. The accuracy of the horizontal coordinates was also evaluated using GPS devices attached to barometric sensors. The tests were performed under two conditions: two pairs of barometric and temperature sensors were fixed at almost the same position where a strong GPS signal was received, and the two pairs were separated by a known altitude difference with one pair set at a position where the GPS signal was weak.

The results showed that regardless of the GPS signal strength, the altitude difference estimated using the barometric and temperature sensors exhibited an error of up to about 2.4 m while for the GPS device the error was 6.5 m for a strong signal and about 59 m for a weak signal. In addition, the error in the horizontal coordinates was about 3 m for a strong GPS signal. The results of the present study therefore indicate that the use of barometric and temperature sensors is effective for accurately determining the altitude of a magnetic sensor for aeromagnetic surveys, particularly when three-axis magnetic sensors are used.

Key words : Aeromagnetic survey, Three-axis magnetic sensor, Barometric sensor, Sensor positioning, GPS

はじめに

近年,活火山の火山活動監視を目的とした空中磁気探査 が活発に行われている(例えば Koyama et al., 2013, 2021, 2022).火口周辺の地下岩石は,温度上昇に伴う熱消磁や 温度下降に伴う熱帯磁によって周囲の地磁気が変化するこ とから,地磁気の面的な把握の繰り返しを通じて地下岩石 の帯磁の時間変化を推定することにより,火口周辺の地下 の温度状態の変化が推定可能となる点が,空中磁気探査技 術発展の一因となっている.

その際,磁力計を用いた地表での地磁気計測と比較して ヘリコプターやマルチコプターを用いた空中での地磁気計 測には,地磁気の面的な分布を把握しやすい点や,地表付 近の起伏などの小さな空間スケールの地形変化に伴う地磁 気の小さな空間パターンが空中では減衰するため,検出対 象となるより大きな空間スケールの磁化構造に対応する地

²⁰²⁴年9月30日受付, 2024年12月27日受理.

[†] ogawa@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所観測開発研究センター

^{**} 東京大学地震研究所技術部技術開発室

^{*} Research Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

^{**} Laboratory for Technical Support, Technical Division, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

磁気の空間分布が得られる点,などの利点がある.

他方,現在実施されている空中磁気探査に用いられる磁 力計は,光ポンピング型の全磁力計が主流である.地磁気 はベクトル場なので,空中磁気探査において地磁気をベク トルとして計測できるならば,従来の空中磁気探査と比較 してデータ量が増え,推定される磁化構造の解像度の向上 が期待できる.ただし3成分磁力計を用いた空中磁気探査 の実際においては,各空中計測地点における地磁気の偏角 をデータから同定することは技術的に困難である.例えば ジャイロコンパスを磁力計に並置する場合,追加の電源も 必要となるので,ジャイロコンパス本体も加えた重量の増 加や,位置を3次元的に移動しながらの方位の計測の精 度,必要な精度を出すための所要時間などのいくつもの技 術的困難の克服が課題となる.そうであったとしても,磁 気センサーの姿勢を重力加速度方向とともに記録すれば, 全磁力と伏角,もしくは水平分力と鉛直分力の2成分を データから同定することで,地下帯磁物分布の推定精度の 向上に寄与することが期待できる.

我々は、空中磁気探査に用いうる3成分磁力計の開発を 進めてきた.本稿ではまず、その基本的な構成を示す.こ の構成の特徴の一つとして、探査の際に磁気センサーに並 置する気圧センサーを用いて、地表に設置する参照点の気 圧に対する空中の各計測地点の気圧の差をもとにした高度 差推定が挙げられる.従来のGPSによる高度計測よりも その精度が向上することが期待され、その精度を吟味する ための試験結果を次に示す.



表 1. IMU 搭載センサーの仕様(太字下線付きは今回使用している設定,*は使用しているレンジにおける感度)

センサーIC	LP	S25H	LIS3MDL	LSM6DS	33
測定対象	温度	気圧	磁気	加速度	ジャイロ
出力データ レート (ODR) [Hz]	1/ <u>7</u> /12.5/25	温度と 共通	<u>0.625</u> /1.25 /2.5/5/10 /20/40/80	<u>13</u> /26/52/104 /208/416/833 /1666/3332/6664	<u>13</u> /26/52/104 /208/416/833 /1666
測定レンジ	記載なし,固定		<u>±4</u> /±8 /±12/±16 [gauss]	<u>±2</u> /±4/±8/±16 [G]	125/245 /500/1000 / <u>2000</u> [dps]
感度	0.00208 °C/LSB	0.0002441 hPa/LSB	14.6 nT/LSB*	0.60 mm/s/s/LSB*	70.0 mdps/LSB*

機器の構成とデータ収録

ドローンに搭載する装置全体の構成を図1に示す.装置 は大別してIMU(慣性計測装置), Arduino, sciLogger, Raspberry Piで構成されている.

IMU と Arduino

IMUは、主に姿勢検出の目的で使用されるセンサーをま とめたものである。今回使用する Pololu 社の AltIMU-10 v5 は気圧+温度センサー、3 軸加速度+3 軸磁気センサー、 3 軸ジャイロの3つのセンサー IC が周辺回路とともに1 枚 の基板に搭載されている。それぞれのセンサーの計測周期、 レンジを表1に示す。いずれも、I²C 通信で設定やデータ の取得ができる。

AltIMU-10 v5 には3 軸磁気センサーが搭載されている が、表1に示される通り分解能が大きく、1nT の分解能 が達成できない、3 軸磁気センサーとしてはこの磁気セン サーを用いない。

Raspberry Pi も I²C 通信のマスターとして動作させるこ とができるが、即時性に欠けることと、Raspberry Pi の負 荷を減らす目的で,Arduino MICRO を併用することとした.Arduino はこれらの初期設定をした後は,0.4 秒おきにIMU から計測値を取得し,それ以外の時間は Raspberry Pi からのシリアル通信入力を待機する.そして入力があった際には,その直前の計測値を即時シリアル出力する.Raspberry Pi, Arduino, IMU 間の通信と制御を図2に示す.

sciLogger とフラックスゲートセンサー

地磁気計測用磁気センサーとして,Bartington 社製3軸 フラックスゲートセンサー Mag566 を用いる. ± 5 V の供 給電源により $\pm 100,000$ nT の範囲の磁束密度を計測でき, 感度は公称,45 μ V/nT である.また3軸の直交性誤差は 最大 $\pm 2^{\circ}$ とされるため,較正が別途必要となる.

Mag566 からのアナログ出力を、6 チャンネル 24 ビット AD コンバータを搭載した NT システムデザイン社製データ ロガー, sciLogger で収録する. DC12V 単電源の供給で、 GPS と同期した最高 50 Hz サンプリングが可能であり、本 研究においては 10 Hz サンプリングで使用する.

sciLoggerの分解能は実効約22ビット、ゲインの設定



図 2. Raspberry Pi~Arduino~IMU間の通信と制御のフロー

と合わせて,分解能は約2.4 μV が実現できる. Mag566 と の組み合わせにより,約0.053 nT の分解能が達成できる.

Raspberry Pi

Raspberry Pi には、以下の機能が実装されている.

IMU からのデータ収録 (python プログラム)

0.1 秒おきに Arduino にデータ送信命令をシリアル通信 で送信し,受信したデータに内部時計に応じたタイムスタ ンプを取り付けた上で1分ファイルに保存する.

sciLogger からのデータ収録

sciLogger に収録されたデータを LAN 経由での SSH 接 続によって受信し,Web サーバー経由で閲覧可能な状態 で保存する.sciLogger で収録されたデータは sciLogger 側で保存されるが,そのデータのバックアップや,現場で の収録の確認のために,Raspberry Piでも sciLogger の データを受信して保存する.

NTP サーバー

GPS HATからの信号を処理して内部時計をGPSに同期 させ、Raspberry Piの内部時計を正確な時刻に設定する ため Adafruit Ultimate GPS モジュールを介して GPS アン テナを接続し、Raspberry Pi内に立てた NTP サーバーと 時刻を同期させている.sciLogger も同じ目的で GPS 情報 が必要であるため、アンテナ信号を分岐させる予定であ る.GPS 情報の一部は後の確認のため、IMU からのデー タを収録する python プログラム内で収集、記録するよう にした.

ネットワークとデータの表示

データの回収は基本的には測定後に装置を解体した上で Raspberry Piや sciLogger 上の SD カードを回収すること で行う. しかし観測現場でもデータの確認を行えるよう に、スマートフォン等の利用者端末からの接続要求を受け 付け,Webサービス経由で収録データを表示・転送する. そのために Raspberry Pi上に Web サーバー, DHCP サー バー,アクセスポイント機能を持たせている. Raspberry Pi2Bには無線LAN 機能が内蔵されておらず, Raspberry Pi3Bには無線LAN 機能があるが電波強度が弱いため、利 用者端末との通信には別途USB接続したWi-Fiアダプター を使用している. sciLogger との通信は有線 LAN であり, Raspberry Piの DHCP サーバーにより IP アドレスを割り 振っている. このように Raspberry Pi上にはデータ表示 用のWebサービスと, sciLogger との通信との2つのネッ トワークが存在するが、それぞれ独立しておりフォワー ディングはしていない.

電源

図に記載はないが、Arduino と IMU は Raspberry Pi 経 由で給電する.3軸フラックスゲート磁気センサーと sciLogger は Raspberry Pi 用とは別のバッテリーを用意 する予定である. Raspberry Pi のモデルは後期のものほ ど高性能であるが,消費電力が大きい. 今回は消費電力と 性能の兼ね合いを確認するため,Raspberry Pi2B,及び Raspberry Pi3Bの2種それぞれで試作を行っている.以 下では,前者をrpi2,後者をrpi3と略記する.

高度差の推定方法と結果

試験の概要

装置を2台製作し2通りの試験を行った.1つめは同じ 場所での並行試験(試験1)である.2つめは,高低差の ある場合の並行試験(試験2)である.試験1は2022年 10月12日~19日に2台とも地震研究所2号館の屋上で行っ た.装置は建屋の内側の床に置き,GPSアンテナのみ屋外 の床から2m程度の位置に設置した.試験2は2023年3月 13日~20日に,一方は地震研究所2号館の屋上建屋の床 に、もう一方は2号館1階の床に置いた.いずれもGPSア ンテナは屋外に出し,床から2m程度の位置に設置した. 屋上建屋の床から1階の床まで,錘をつけた糸を垂らして 高さを測ったところ24mであった.

GPS 出力の高度

GPS 出力の高度の統計値を表2に、ヒストグラムを図3 に示す.試験1及び試験2において屋上で取得した高度に 比べ,試験2において上空が開けていない1階で取得した 高度はばらつきが大きい.空中磁気探査で用いる実際は, 開けた場所での使用を想定している.よって高度のばらつ きはこれ以上大きくならないはずである.

GPS 出力の緯度経度及び緯度差,経度差

GPS では高度だけでなく緯度経度の情報も出力されるため、それらの統計値についても緯度については表3、経度

表 2. GPS 出力の高度の統計値

(4) 中心的火 1				
	屋上(rpi2)	屋上(rpi3)		
サンプル数	617666	617817		
平均[m]	44.8	44.7		
標準偏差[m]	4.3	4.6		
最小值[m]	26.0	24.5		
25%(第1四分位)[m]	42.1	41.6		
50%(中央值)[m]	44.8	45.0		
75%(第3四分位)[m]	47.3	47.7		
最大値[m]	61.5	72.8		

(b) 試験 2

	1 階 (rpi2)	屋上(rpi3)
サンプル数	614779	613209
平均[m]	8.9	43.3
標準偏差[m]	30.1	3.9
最小值[m]	-151.4	30.6
25%(第1四分位)[m]	-7.1	40.5
50%(中央值)[m]	9.9	42.8
75%(第3四分位)[m]	27.0	45.8
最大値[m]	138.8	77.6



図 3. GPS 出力の高度のヒストグラム. (a) 試験 1, rpi2 (a-1) 及び rpi3 (a-2). (b) 試験 2, rpi2 (b-1) 及び rpi3 (b-2).

については表4にそれぞれ示す.後述する通り,試験1及 び試験2において屋上での結果を距離に換算すると標準偏 差のずれで約3m,最大値と最小値の差で約22mとなる. 一方,試験2において1階の緯度経度の出力値を距離に換 算すると標準偏差のずれで約16m,最大値と最小値の差で 約192mであった.

GPS 出力から求めた高度差と気圧から推定した高度差の比較

計測期間中の GPS 出力の高度差と IMU センサーの気圧 と温度から推定した高度差の統計値を表5に示す.なお, GPS からの出力は1秒間隔であるのに対し, IMU の気圧 計のデータレートは7Hz であるが,1秒平均をとり GPS の出力間隔に合わせている.

2つの装置の片方を高度の基準とし、もう一方の高度を気 圧と温度から求める式はPortland State Aerospace Society (2004)を参照し、下記を用いた. $z(P, P_0, T_0)$

= - [$\{(P/P_0)^{1/5257} - 1\} \times (T_0 + 273.15)$]/0.0065. (1) ただし, z, T₀, P₀ 及び P はそれぞれ,基準点からの高度 [m],基準点の温度 [°C],基準点の気圧 [hPa] 及び高度 を求める地点の気圧 [hPa] である.

本研究で想定している空中磁気探査の空間領域は,水平 方向で2km四方程度,鉛直方向に数100メートル程度と 制限された領域を想定しており,仮定された鉛直気温減率 を想定して,参照点における気温のみを考慮する簡便な理 論式を用いて,気圧比から高度差を算出することとした.

高度差の時系列のグラフ及びヒストグラムを図4に示す. 高度差を算出する元となった,GPS出力の高度及びIMU センサー出力の気圧の時系列グラフも合わせて示す.気圧 計測の参照用に,東京都千代田区の気象庁東京管区気象台 における気圧10分値を,気象庁のHP「過去の気象デー タ検索」よりダウンロードし,あわせて示す.

試験1ではGPSの電波受信環境が2台ともに良好であ

X 5. 010 田月 7 年及 7 旭田 但

(a) 試験 1

	屋上(rpi2)	屋上(rpi3)	緯度の差	
サンプル数	617666	617817	617634	
平均[度]	35.718713	35.718727	$0.000\ 015$	
標準偏差[度]	0.000020	0.000021	$0.000\ 015$	
最小値[度]	35.718638	35.718655	$-0.000\ 052$	
25%(第1四分位)[度]	35.718698	35.718713	$0.000\ 005$	
50%(中央値)[度]	35.718712	35.718728	$0.000\ 015$	
75%(第3四分位)[度]	35.718727	35.718742	$0.000\ 023$	
最大値[度]	35.718797	35.718823	0.000 110	

(b) 試験 2

	1 階(rpi2)	屋上(rpi3)	緯度の差
サンプル数	614779	613209	613002
平均[度]	35.718440	35.718719	$0.000\ 279$
標準偏差[度]	0.000177	0.000017	0.000 176
最小値[度]	35.717851	35.718645	-0.000 693
25%(第1四分位)[度]	35.718319	35.718707	0.000 194
50%(中央値)[度]	35.718393	35.718718	$0.000\ 325$
75%(第3四分位)[度]	35.718521	35.718732	0.000 401
最大値[度]	35.719433	35.718985	$0.000\ 874$

表 4. GPS 出力の経度の統計値

(a) 試験 1

	屋上(rpi2)	屋上(rpi3)	経度の差
サンプル数	617666	617817	617634
平均[度]	139.759876	139.759882	0.000 006
標準偏差[度]	0.000016	0.000019	0.000 017
最小値[度]	139.759823	139.759825	-0.000 068
25%(第1四分位)[度]	139.759865	139.759868	-0.000 007
50%(中央値)[度]	139.759875	139.759882	$0.000\ 005$
75%(第3四分位)[度]	139.759887	139.759895	0.000 018
最大値[度]	139.759947	139.759955	0.000 078

(b) 試験 2

	1階(rpi2)	屋上(rpi3)	経度の差
サンプル数	614779	613209	613002
平均[度]	139.760195	139.759877	-0.000 319
標準偏差[度]	0.000129	0.000018	0.000 130
最小値[度]	139.759566	139.759685	-0.000 745
25%(第1四分位)[度]	139.760122	139.759862	-0.000 404
50%(中央值)[度]	139.760208	139.759878	-0.000 332
75%(第3四分位)[度]	139.760280	139.759892	-0.000 243
最大値[度]	139.760626	139.759943	0.000 322

るが, 求められる高度差の時系列においては±20mの範 囲, 95%信頼区間は 6.5 m と求められた. 一方, 気圧計を 精度な高度差推定値が得られた. 用いて推定された高度差は±3mの範囲,95%信頼区間は

1.23 m と, GPS を用いた結果と比較しておよそ5 倍も高

一方, 試験2においては1階に設置したGPS受信アンテ

表 5. GPS 出力の高度から計算した高度差と IMU センサーの 気圧と温度から推定した高度差の統計値

	GPS	気圧
サンプル数	617634	617651
平均[m]	-0.1	0.66
標準偏差[m]	3.3	0.63
最小值[m]	-15.5	-1.8
25%(第1四分位)[m]	-2.0	0.17
50%(中央值)[m]	0.0	0.60
75%(第3四分位)[m]	1.9	1.1
最大値[m]	16.6	3.5

(a) 試験 1

(b)	試験	2	

	GPS	気圧
サンプル数	613002	613068
平均[m]	34.4	24
標準偏差[m]	29.9	1.2
最小值[m]	-98	21
25%(第1四分位)[m]	17	23
50%(中央值)[m]	34	24
75%(第3四分位)[m]	50	25
最大値[m]	190	28

ナの受信環境の悪さに起因して、GPSを用いて推定され る高度差の時系列には100mに及ぶ擾乱が見られる。95% 信頼区間は58.6mと試験1で得られた値の10倍程度となっ ている.一方、気圧計を用いて推定される高度差には、長 周期のトレンド成分が見られるものの、擾乱の大きさは 95%信頼区間に換算すると2.4m程度であり、試験1の際 の値と比べて2倍程度に収まった。

議 論

水平位置差・高度差の推定精度のまとめ

表2. 表3及び表4に、試験1. 試験2で得られた水平 位置差・高度差の推定精度をまとめる.水平位置差は、緯 度差・経度差の距離への換算である. 国土地理院が HP で 公表する測量計算サイトの中の「平面直角座標への換算」 に、まず rpi2の緯度・経度データの平均値を入力し、平 面直角座標系の基準点からの北向き・東向きの水平位置の 平均値をメートル単位で算出した.次に,rpi2を基準とし た rpi3 の緯度差・経度差の時系列を作成し、その平均値 を既に得られている rpi2 の緯度・経度の平均値に加えるこ とによってrpi3の緯度・経度の平均値を定義した.rpi3に ついて得られた緯度・経度の平均値を上記計算サイトに入 力し、同様に平面直角座標系の基準点からの北向き・東向 きの水平位置を算出させ, rpi2とrpi3の水平位置差をメー トル単位で求めた. 緯度差・経度差及び高度差のサンプル の分布をガウス分布と仮定し、95% 信頼区間を求めて片 側の値を算出した.緯度差・経度差の95% 信頼区間を,

rpi2の水平位置を基準とした rpi3の水平位置からの北向 き・東向きの水平位置差のメートル単位の 95% 信頼区間 に換算し,表6に記している.

水平位置差は,理想的な環境で行った試験1に比して, rpi2のGPS電波の受信環境が良好ではなかった試験2で は精度が大きく低下する.GPSを用いて推定された高度差 は,試験1の結果に比して試験2の結果は特に95%信頼 区間が約9倍と著しく大きくなって精度が低下する.一方, 気圧計を用いて推定された高度差は,試験1と試験2を比 較しても2倍程度の相違しか無い.

実際に空中磁気探査を実施する環境においては、GPS 電波の受信環境が良好であることが期待される.しかし高 度差の推定においては試験1の理想的な環境であっても、 GPSから求められる高度差よりも気圧計を用いて推定さ れる高度差の方が、精度において2倍から5倍程度、距離 に換算して1mないし2m台で精度良く推定されること が示された.

実際の空中磁気探査においては、空中の探査機と地上の 参照機との間の気圧差の瞬時値から高度差の瞬時値を推定 するため、得られる高度差推定値の誤差はこれらの値より も大きくなると推定される.しかしそのような特性があっ たとしても、GPS ではなく気圧計を用いた高度差推定の 方が、精度が良好であることが十分に期待されることが分 かった.

なお、高度差が無い試験1と高度差が24mある試験2 で高度差推定の標準偏差がそれぞれ0.63m,1.2mと、高 度差の増大に応じて標準偏差が増大する傾向が見られた. 気圧比から高度差を推定する理論式(1)は、誤差伝搬を考 慮すると、気圧比の一定の小さな誤差の推定高度差への伝 播にかかる係数は気圧比のべき乗に比例し、かつべき乗の 指数は-1より大きく1未満である.気圧比の誤差が一定 だったとしても、気圧比が高度差無しに対応する1からず れることにより、高度差の推定誤差は気圧比が1の時より も大きくなりえる.

したがって,気圧計測を用いた高度差推定の際には,空 中磁気探査の基準点を探査領域内の高度の中点付近に選定 することが,高度差推定の誤差を小さくする要因となりえ ることが示唆される.

空中磁気探査における位置推定の誤差

表6に示した水平位置及び高度差推定の95% 信頼区間, それぞれ試験1の3m程度及び試験2の2.4mの値から, 空中磁気探査の磁気測定の位置の推定について,次のよう に考察する.

空中磁気探査の仕様としては,飛行速度は最大で毎秒 2m程度,磁気計測のサンプリングレートは10Hzを想定 している.したがって2m程度の高度差の推定誤差は,磁 気計測で得られた時系列の中では1秒程度,連続する10



図 4. 高度差の時系列グラフ及びヒストグラム. (a) 試験1から得られた, 左, 上から GPS 出力の高度の時系列, 高度差の時系列及 びそのヒストグラム. 右, 上から気圧の時系列, 気圧差から求めた高度差の時系列及びそのヒストグラム. tokyo は東京管区気象台(東 京都千代田区) における気圧 10 分値を表す.

サンプルの範囲に相当する. GPS による水平座標のサン プリングは毎秒の瞬時値とする一方,気圧計による気圧計 測は7Hz サンプリング値の毎秒平均値を用いるものとす る.磁気計測のサンプルも 10Hz サンプリング値の毎秒平 均値を用いて解析を行うものとすれば,磁気計測毎秒値の 得られた地点の水平位置及び参照点からの高度差を,タイ ムスタンプの参照により推定する際に,その時系列上での 食い違いは,水平位置で1.5サンプル程度,高度差で1サ ンプル程度となる.



図 4. (つづき)(b)試験2から得られた,左,上から GPS 出力の高度の時系列,高度差の時系列及びそのヒストグラム.右,上から 気圧の時系列,気圧差から求めた高度差の時系列及びそのヒストグラム. tokyo は東京管区気象台(東京都千代田区)における気圧 10 分値を表す.

想定される空中磁気勾配との対比

以下では中緯度以北の,主磁場に鉛直磁場が卓越する中 部日本以北を想定し,主磁場方向の向きを持つ点磁化の消 磁,帯磁に伴う地磁気変化の定性的考察を記す.

日本の中部以北に探査領域を想定した場合,全磁力の空 中磁気探査においては計測される全磁力値に鉛直成分の寄 与が卓越し,空間パターンは低次となる。一方,地磁気3 成分を計測する空中磁気探査においては,その空間パター ンは鉛直成分よりも水平成分はより高次となり,空間減衰 がより顕著になる。水平成分の空間分布を把握することが できる3軸磁気センサーを用いた空中磁気探査において は、全磁力計を用いた空中磁気探査以上に位置推定の精度

		GPS 北向き距離[m]	GPS 東向き距離 [m]	GPS 高度差 [m]	気圧計 高度差[m]
計廠 1	平均	1.7	0.5	-0.1	0.66
試験 1	95%信頼区間	3.3	3.0	6.5	1.23
試験 2	平均	31.0	-28.8	34.4	24.0
	95%信頼区間	38.3	23.1	58.6	2.4

表 6. 水平位置差・高度差の平均と 95% 信頼区間

が求められる.気圧計を用いた高度差推定はこの点で,表 5に示される通りGPSによる高度差推定よりも高精度と なりえることで空中磁気探査に資することが,本研究で示 された.

また,従来の全磁力計測を用いた空中磁気探査において も,そのデータの解析では解析対象の空間領域を,地表か ら地中一定深度までを高さとする直方体によって水平方向 に分割し,個々の直方体の平均的な磁化の水平分布を推定 する解析手法がしばしば用いられている(例えば Koyama et al., 2013).空中磁気探査における計測高度が,気圧デー タを用いることにより更に高精度とできるならば,深さ方 向の磁化分布の推定精度の向上に寄与でき,解析手法の高 度化に寄与できると期待できる.

以上二点において,気圧計を用いた高度測定が有用であ ることが,今回の試験の結果によって示された.

まとめ

空中磁気探査において全磁力ではなく地磁気3成分を計 測するための、機器の構成を検討し、特に計測地点の対地 高度を高精度に得るための気圧計を用いた地表からの高度 差の推定法を検討した.二つの試験によって得られた結果 により、気圧計を用いて推定される精度が、GPSを用い て推定される精度に比して、高度差が2倍から5倍程度の 高精度、水平位置が、1mから2m程度の高精度で得られ ることが確かめられた.

この精度は、地磁気3成分の空中磁気探査において、鉛 直分力と水平分力の空間分布を得ることにより、帯磁物・ 消磁物の強度や分布を必要な精度で推定することに資する と期待される.

引き続き, ヘリコプターやマルチコプターにこれらのセンサー類とともに搭載可能な磁気センサーと収録装置の開発を進める.

謝 辞:技術研究報告編集委員会と上嶋誠教授,馬場聖 至准教授に,本研究への有益かつ貴重なご指摘とご助言を 頂きました.ここに記して感謝申し上げます.

文 献

- 気象庁,過去の気象データ検索,https://www.data.jma.go.jp/ stats/etrn/index.php (参照: 2024-12-20).
- 国土地理院,平面直角座標への換算,https://vldb.gsi.gojp/sokuchi/ surveycalc/surveycalc/bl2xyf.html (参照: 2024-06-25).
- Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, T. Yanagisawa, A. Watanabe and M. Takeo, 2013, An aeromagnetic survey of Shinmoe-dake volcano, Kirishima, Japan, after the 2011 eruption using an unmanned autonomous helicopter, *Earth, Planets and Space*, vol. 65, p.657–666, https://doi.org/10.5047/eps.2013.03.005.
- Koyama, T., W. Kanda, M. Utsugi, T. Kaneko, T. Ohminato, A. Watanabe, H. Tsuji, T. Nishimoto, A. Kuvshinov and Y. Honda, 2021, Aeromagnetic survey in Kusatsu-Shirane volcano, central Japan, by using an unmanned helicopter, *Earth, Planets and Space*, vol. 73, 139, https://doi.org/10.1186/s40623-021-01466-5.
- Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, A. Yasuda, T. Ogawa, A. Watanabe, S. Sakashita, M. Takeo, T. Yanagisawa, Y. Honda and K. Kajiwara, 2022, An ultra-high-resolution autonomous uncrewed helicopter aeromagnetic survey in Izu-Oshima Island, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 425, 107527, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107527.
- Portland State Aerospace Society, 2004, A quick derivation relating altitude to air pressure, https://archive.psas.pdx.edu/ RocketScience/PressureAltitude_Derived.pdf (参照: 2024-06-25).