

東京 / 柿岡における地磁気観測の歴史と現状

源 泰拓 (観測課)

2010年3月8日受付, 2010年3月11日改訂, 2010年3月16日受理

要 旨

日本の地磁気観測は1883年から東京の中央気象台で行なわれていた。東京の都市化の進展に伴い、路面電車などによる人工ノイズが増加したことから、1913年に地磁気観測所を東京の北東約75kmに位置する柿岡に移転した。柿岡での観測結果は中央気象台に送付されていたが、1923年に関東大震災が起これ、中央気象台に保管されていた記録紙、野帳などがすべて焼失した。1923年以前の地磁気記録として残っているのは、それまでに印刷物として刊行されていた1897年から1915年のもので、1916年から1923年までのデータは、残念ながら欠落している。

1950年、変化観測測器が、地磁気観測所で開発された温度補償を実現したものに更新され、著しく変化観測の精度が向上した。絶対観測測器については、1956年、ユニバーサルマグネトメータ方式A-56型標準磁気儀、サインガルバノメータ方式H-56型標準磁気儀を開発した。そして1965年ベクトルプロトン磁力計MO-Pを採用することにより、絶対観測の品質は飛躍的に改善され、当時の世界の観測所のなかでも第一級のものになったといえる。

1976年、Kakioka automatic standard magnetometer (KASMMER) が導入された。このKASMMERにより毎分値の提供が可能となった。さらに秒単位のデータについては、まず1985年から3秒ごとの観測値が、1987年から毎秒値が公開されている。

現在、地磁気観測所では、絶対観測を角度測定器DI-72とプロトン磁力計で、変化観測を高感度3軸フラックスゲート磁力計と4台のオーバーハウザー磁力計で行っている。主測器は高感度3軸フラックスゲート磁力計で、3成分の毎秒値と0.1秒値を測定している。高感度3軸フラックスゲート磁力計には傾斜と温度の監視装置が設置されているが、年間の温度変化は3℃以内に保たれて、傾斜変動も安定している。

一方、地磁気観測所周辺は宅地と農地であり、車輛や建造物等の磁性体、あるいは各種工事による人工擾乱は観測に影響を及ぼしうる。このような人工擾乱の増加に対応するため2007年に「人工擾乱計測システム」が整備された。これは観測所構内に配置した複数の地磁気計測器の測定値から、人工擾乱源の位置と磁気モーメントを求めるものである。

過去のデータの検証によると、1947年までの柿岡のデータについて、絶対観測データの処理に不適切なプロセスがあったことから、これまでに公表されたものは品質に改善の余地があることが判明している。1948年にIATME Oslo meetingにてなされた報告では、1947年以前の絶対観測精度はそれ以降よりも著しく劣るとされたが、観測データを検討し、適切な再処理を施すと、その精度は1948年以降とほぼ同等であることがわかった。このため1920～1940年代の絶対観測結果を再点検し、地磁気データの再計算を進めている。

1976年に光ポンピング磁力計が導入されるまでの期間については、地磁気変化観測の結果は毎時値のみが公開されているが、過去データをより利用しやすい形態で提供するため、地磁気観測所では、地磁気ブローマイド記録からデジタル毎分値を作成するための手法を開発している。

なお、本稿は“History of Geophysics and Space Science”に投稿した“THE HISTORY AND THE PRESENT SHAPE OF THE TOKYO/KAKIOKA MAGNETIC OBSERVATORY”の和文を、許可を得て地磁気観測所テクニカルレポートに寄せたものである。

1. はじめに

筆者は2009年8月、ハンガリー・Sopronで開催された国際地球電磁気学・超高層大気物理協会 (International Association of Geomagnetism and Aeronomy: IAGA) 科学総会の Commission on History セッションにおいて、THE HISTORY AND THE PRESENT SHAPE OF THE TOKYO/KAKIOKA MAGNETIC OBSERVATORY と題する発表を行った。その後、セッションでの発表をまとめて、“History of Geophysics and Space Science”として出版したいとの依頼を受け、本稿を執筆した。一方、この発表の内容は地磁気観測に携わる者に、利用可能なデータを示し、また多くの示唆を与えると考え、テクニカルレポートに和文を寄せるものである。

2. 観測と公開データの沿革

日本における近代的な地磁気観測は1883年の国際極年を契機に東京で開始された。継続的な観測の記録として、1897年以降の毎時値が残されている。地磁気観測に用いられた観測測器の変遷と公開されているデータの利用可能な期間を図1にまとめた。

地磁気観測所 (1983) によれば、地磁気観測は1883年から1913年まで東京の中央气象台で行なわれていた。この間の絶対観測測器は田中館式と称される Declinometer (D), Deflection Instrument (H) と Dip circle of Casell (I) である。変比観測には Mascart's magnetograph が用いられていた。

その後、東京の都市化の進展に伴い、路面電車などによる人工ノイズが増加したことから、1913年に地磁気観測所を東京の北東約75kmに位置する柿岡に移転した。移転を機に、絶対観測測器は Wild-Edelmann declinometer に、変比観測測器は Eschenhagen's variometer に更新された。柿岡での観測開始当初は、絶対観測は月に1回東京からスタッフが出張して観測を行い、変化観測は柿岡駐在の職員により記録紙交換等の保守を行っていたとされる。柿岡での観測結果は中央气象台に送付されていたが、1923年に関東大震災が起こり、中央气象台に保管されていた記録紙、野帳などがすべて焼失した。1923年以前の地磁気の記録として残っているのは、それまでに印刷物として刊行されていた1897年から1915年のもので、1916年から1923年までのデータは、残念ながら欠落している。また、大震災により柿岡も少なからず被害を受け、応急修理が終わったのは1924年1月だったことから、観測は2月11日に再開されている。一方、関東大震災を契機に柿岡の施設と観測体制の充実がなされた。地磁気観測に

関係する全職員を柿岡に常駐させて現地で迅速にデータ処理をさせ、絶対観測も毎週1回の実施として精度の向上が図られた。その後、第二次世界大戦中も柿岡での地磁気観測は継続され、毎時値データが残されている。なお、以下「地磁気観測所」とは、特に断らない限り気象庁地磁気観測所 (柿岡) を示す。

1950年、変比観測測器が Eschenhagen's Schmidt's Variometer から KM type variometer (D,H), KZ type variometer (Z) に更新された。これらの測器は地磁気観測所で開発され、とくに整磁合金による温度補償を実現した (久保木, 1976) ことにより、著しく精度を向上させたものである。絶対観測測器については、1956年にユニバーサルマグネトメータ方式 A-56型標準磁気儀、サインガルバノメータ方式 H-56型標準磁気儀を開発した。そして1965年にベクトルプロトン磁力計 MO-P を採用することにより、絶対観測の品質は飛躍的に改善し、当時の世界の観測所のなかでも第一級のものになったといえる。

1976年には、Kakioka automatic standard magnetometer (KASMMER) が導入された (柳原他, 1973)。主な構成要素は光ポンピング磁力計、プロトン磁力計、角度測定器、計算処理装置で、角度測定器を除いて自動的に動作させることができた。4台の光ポンピング磁力計を使って全磁力、水平成分、鉛直成分、偏角の各成分を0.1nTの絶対精度をもつデジタル値として測定した。角度測定器 DI-72 はサーチコイルを用いた一種の磁気経緯儀で、地球磁場の偏角と伏角を角度1秒の精度で測定した。光ポンピング磁力計よりも安定したプロトン磁力計による全磁力測定と合わせて、地球磁場全成分の絶対値を与えた。この KASMMER により毎分値の提供が可能となった。さらに1983年から毎秒値が公開されている。

1993年には、光ポンピング磁力計にかえてオーバーハウザー磁力計と高感度フラックスゲート磁力計による地磁気観測が開始されて現在に至っている (Tsunomura *et al.*, 1994)。

3. 地磁気観測所の現状

現在、地磁気観測所では、絶対観測を角度測定器 DI-72 とプロトン磁力計で、変化観測は高感度3軸フラックスゲート磁力計と4台のオーバーハウザー磁力計で行っている。主測器は高感度3軸フラックスゲート磁力計で、3成分の毎秒値と0.1秒値を測定している。この磁力計の性能緒元は表1のとおりである。4台のオーバーハウザー磁力計では、全磁

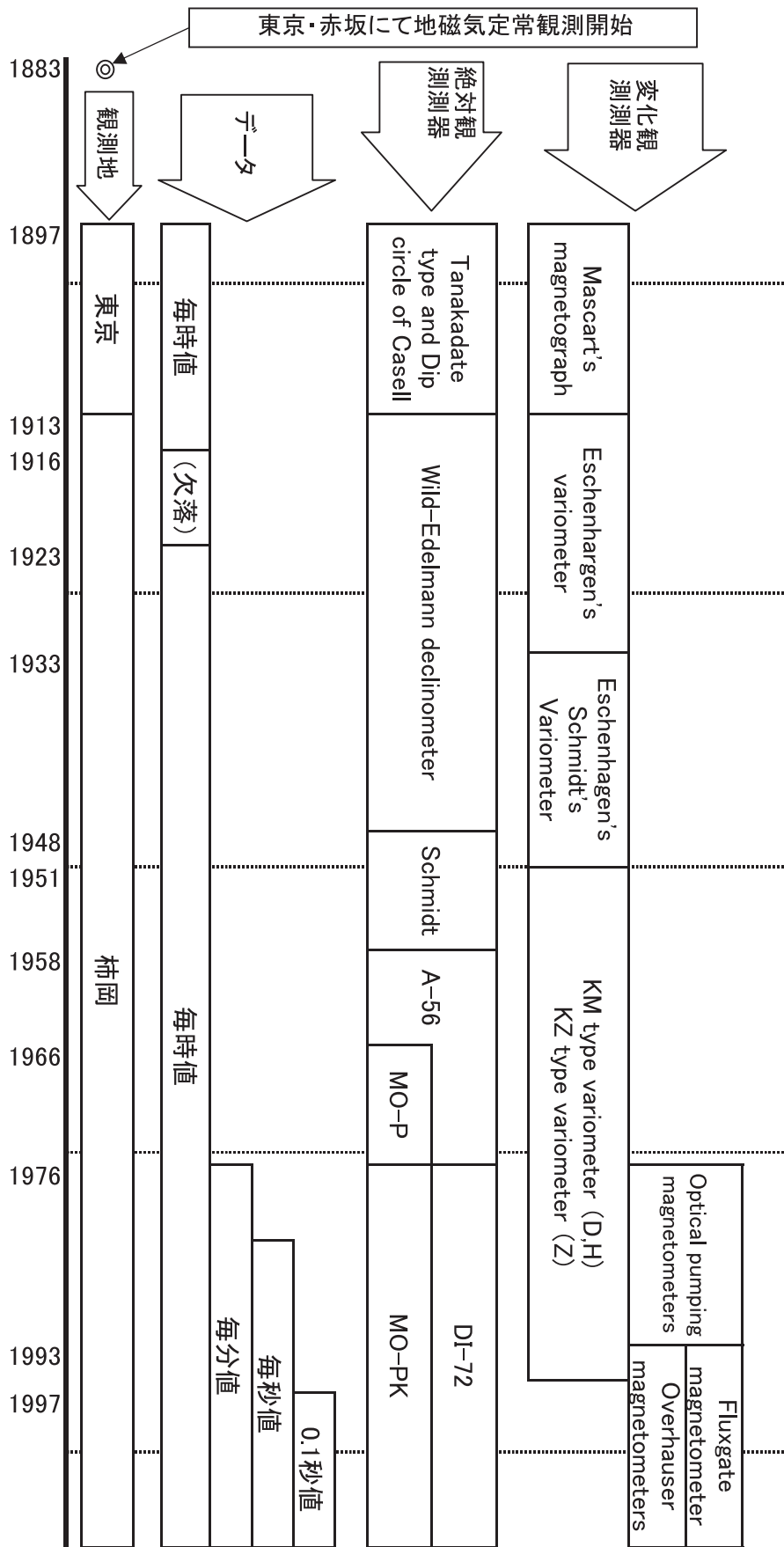


図1 地磁気観測所における観測測器と利用可能なデータの推移

表1 地磁気観測所高感度3軸フラックスゲート磁力計の諸元

温度係数	<0.5nT/degree
安定性	<±0.1nT/day
観測レンジ	-600nT to +600nT
軸方位の誤差	<6'
出カノイズレベル	<0.05nT
デジタル出力分解能	0.01nT

力のほか、打ち消し磁場を作るファンロー・ブラウンバック・コイルと組み合わせて、水平成分、鉛直成分、偏角の各成分の毎秒値を測定している。

高感度3軸フラックスゲート磁力計には傾斜と温度の監視装置が設置されている。センサーは地下5mの地下変化計室に設置されており、年間の温度変化は3℃以内に保たれて、傾斜変動も大量の降雨があった場合などをのぞき安定している(図2)。

このように、磁力計の性能、変化計室の環境ともに良好といえるが、近年では人工的な磁場擾乱が大きな問題となっている。直流電車による地磁気人工擾乱からは法的に保護されているものの、地磁気観測所周辺は宅地と農地であり、車輛や建造物等の磁性体、あるいは各種工事による人工擾乱は観測に影響を及ぼしうる。このような人工擾乱の増加に対応するため2007年に「人工擾乱計測システム」が整備された。これは観測所構内に配置した複数の地磁気計測器の測定値から、人工擾乱源の位置と磁気モーメントを求め、人工擾乱の補正に活用するものである(Okawa et al., 2007)。

4. 過去データの検証

現在利用可能なデータの期間については図1にまとめた。前述のとおり1923年以前のブロマイド、野帳などの記録は関東大震災で焼失したが、印刷物として刊行されていた1897年から1915年の毎時値はデジタル値で利用可能である。このうち東京で観測された1897年から1912年のデータについては、校訂作業を行なったデジタル値も公開されている(外谷他 2004)。

柳原(2002)は柿岡の歴代の観測測器による観測精度に関する詳細な検討を行い、Wild-Edelmann declinometerを絶対観測に使用していた1947年までの柿岡のデータについて、観測についてはおおむね良好であったが、データの処理に不適切なプロセスがあったことから、これまでに公表されていたこの時期の地磁気データは品質に改善の余地があるとの評価を下している。1948年に、絶対観測測器がWild-Edelmann declinometerからSchmidtに更新さ

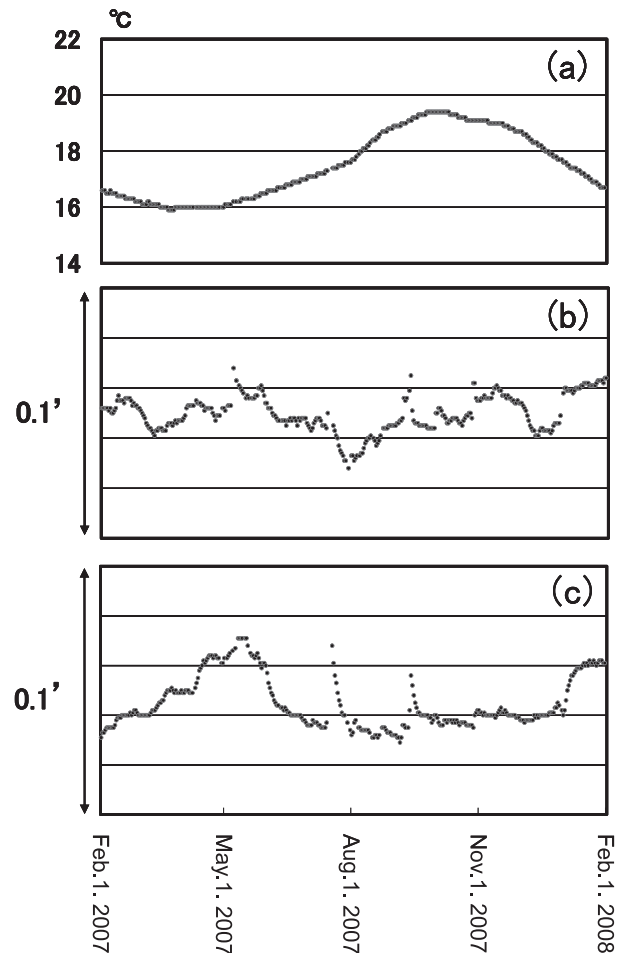


図2 地磁気観測所での高感度3軸フラックスゲート磁力計の傾斜と温度の推移(2007年2月1日から2008年1月31日)

(a)は温度、(b)は傾斜(南北)、(c)は傾斜(東西)を示す。7月と9月の傾斜変動は強い降雨による。

れ観測精度は約2nTになったが、International Association of Terrestrial Magnetism and ElectricityのOslo meetingでは、それまで用いられていたWild-Edelmann declinometerによる観測精度が約8nTと報告されている(Wadati 1950)。これは更新後のSchmidtに比べて4倍劣ることになるが、観測データを検討し、適切な再処理を施したところ、その精度はSchmidtとほぼ同等となることがわかった(図3)。

これまでの調査でデータ処理法の改善により品質向上が期待できることが分かったので、1920~1940年代の絶対観測結果を再点検し、変化観測はブロマイド記録を確認しながら月毎に処理を進めている。上記の手法により修正した、1933年8月の毎時値を修正前のデータ、ホノルル、ニューメックの観測値とあわせて図4に示す。修正後のデータは1ヶ月間の推移が平滑化されており、データ品質が改善されたと判断される。

5. 過去データのデジタル化

観測開始から1976年に光ポンピング磁力計が導入されるまで、地磁気変化観測の結果は毎時値のみが公開されている。しかし、保存されている当時のアナログ記録（プロマイド）には、毎分値を読み取る

ことが可能な高品質のものが存在する。これらの過去データをより利用しやすい形態で提供するため、地磁気観測所では、地磁気プロマイド記録からデジタル毎分値を作成する手法の開発を行っている。

具体的には、プロマイドをスキャナにより高解像度のデジタル画像として読み取り、このデジタル画像を計算機で処理して時系列データに変換する。ついで時系列データを感度計算、ギャップ補正、基線値の加算等の補正を行うプログラムで処理して、デジタル毎分値を作成する。これまでにデジタル画像化時のゆがみ補正、デジタル画像を時系列データとして取り込むプログラムの開発がなされている。

並行観測によって光ポンピング磁力計によるデジタル値とプロマイドによるアナログ記録がともに存在する期間について、既存のデジタル毎分値とプロマイドから得られたデジタル毎分値を比較した結果を図5に示す。各成分とも振幅0.5nT程度の日内変動を示しつつ、期間全体にわたって安定している。記録印画紙が切り替わる00h前後での連続性も良く、D成分では差の日周変化も明確に捉えている。また、差の10分間の標準偏差は各成分とも平均して0.05~0.1nT (0.005~0.01')程度であり、短時間でのばらつきは非常に小さいことから自動読取の精度は高いと言える。本手法によって観測誤差内の精度で毎分値化を行うことは可能であると考えられる。

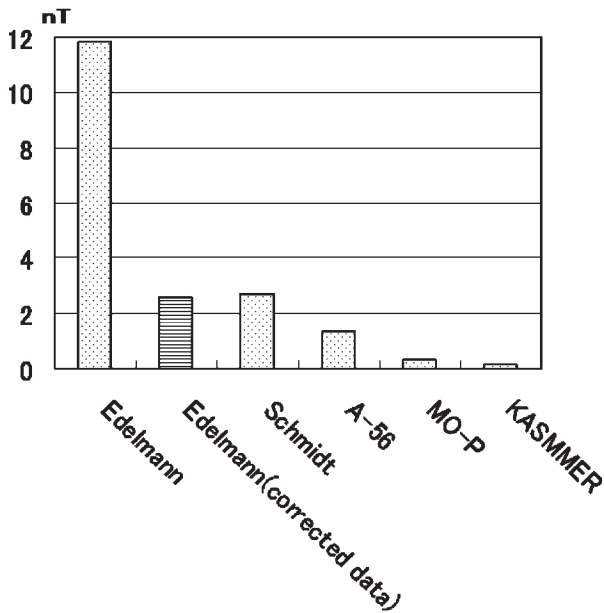


図3 地磁気観測所における絶対観測測器と精度。ここで、精度は基線値の標準偏差（縦軸）で示す。IATME・Oslo会議で報告されたEdelmannの精度は8 nTであったが、再処理を行うと約2.6nTとなる。

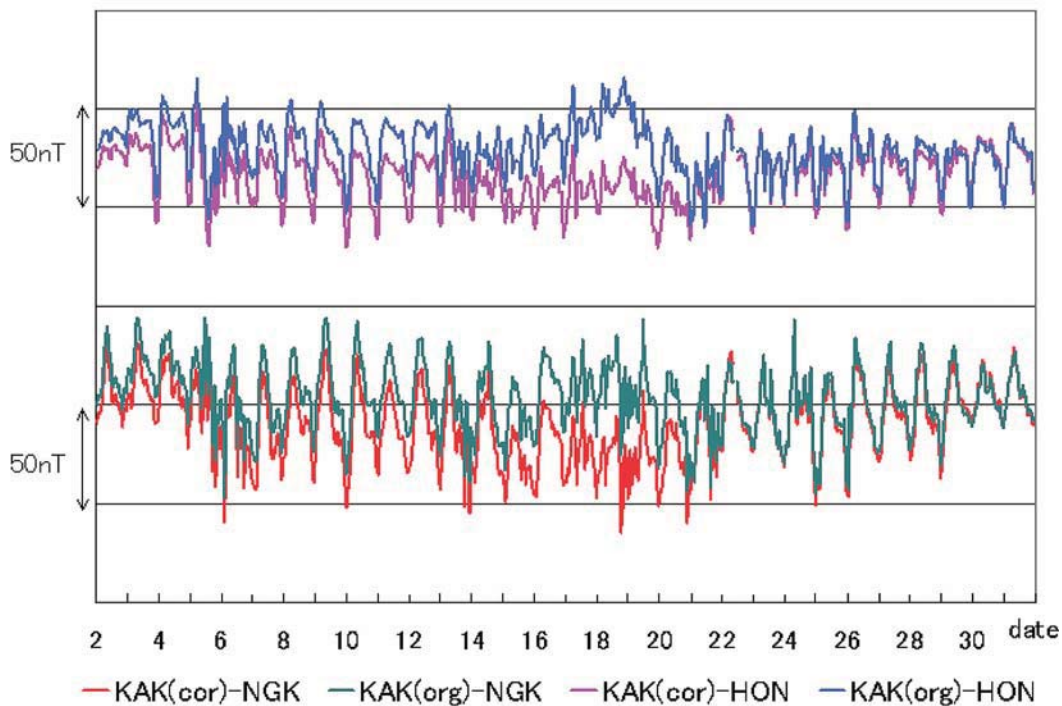


図4 地磁気 H 成分毎時値、柿岡：KAK とホノルル：HON、ニーメック：NGK との差（1933年8月2日～31日）
 柿岡修正値：KAK (cor) では、修正前：KAK (org) よりも毎時値の推移が平滑化されている。

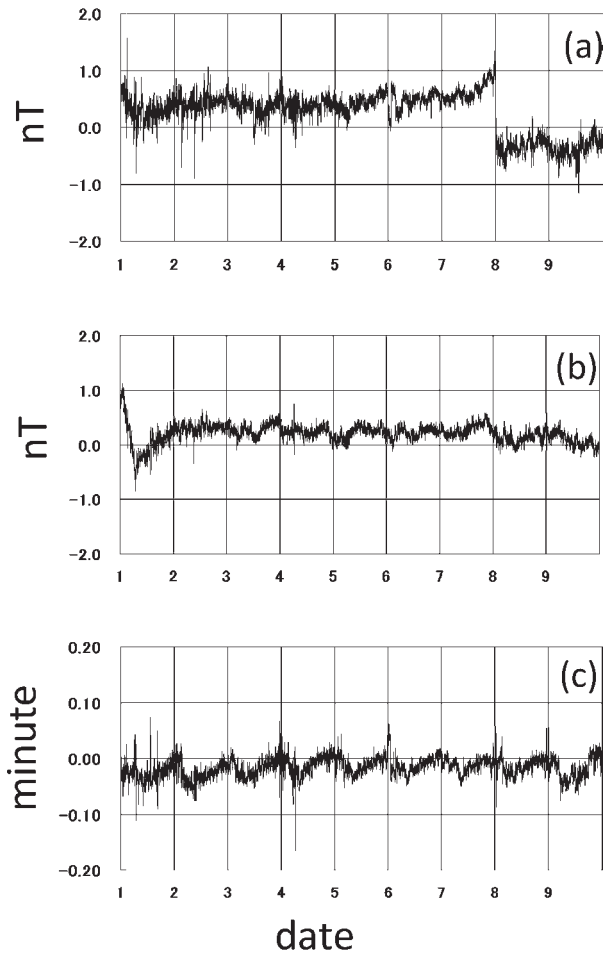


図5 光ポンピング磁力計によるデジタル値と、プロマイドから得た毎分値との差（1984年8月1日～9日）
 (a) はH成分, (b) はZ成分, (c) はD成分を示す.
 H成分の8日0時のギャップは、日基線値の変更による見かけ上のものである.

謝辞

過去のデータと観測測器の変遷については地磁気観測所外谷健氏の調査によるところが大きい。過去データのデジタル化については、地磁気観測所増子徳道氏の調査経過を使用させていただいた。そして、元地磁気観測所長の柳原一夫氏には、観測測器精度の推移について、退職されているにもかかわらず親身の助言を直接いただいた。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 地磁気観測所編, 地磁気観測所百年史, 地磁気観測所, 茨城, 1-4, 1983.
- 久保木忠夫, 地磁気変化計の整磁合金による温度補償と磁石, 地磁気観測所要報, 別冊第6号, 1-30, 1976.
- Okawa, T., T. Tokumoto, S. Nakajima, T. Owada, T. Toya, F. Muromatsu, and N. Kumasaka, Development of artificial geomagnetic disturbances monitoring system, Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Vol. C-99(398), 183-188, 2007 (XII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing).
- 外谷 健, 小出 孝, 吉田明夫, 明治時代の東京地磁気観測データの校訂, 地磁気観測所テクニカルレポート, 2(2), 1-49, 2004.
- Tsunomura, S., A. Yamazaki, T. Tokumoto, and Y. Yamada, The New System of Kakioka Automatic Standard Magnetometer, Mem. Kakioka Mag. Obs., 25, 1-2, 3-32, 1994.
- Yanagihara, K., M. Kawamura, Y. Sano, and T. Kuboki, New standard magnetic observation system of Kakioka (KASMMER), Mem. Kakioka Mag. Obs., Supplementary, 4, 217-281, 1972.
- 柳原一夫, 柿岡の標準磁気儀三代と観測精度, 地磁気観測所技術報告, 41, 51-70, 2002.
- Wadati, K., Report from director of the Central Meteorological Observatory of Japan, IATMA Bulletin, No. 13, 183-184, 1950 (Transactions of Oslo Meeting).

The Kakioka Magnetic Observatory - Past and Present

by

Yasuhiro MINAMOTO¹

¹Kakioka Magnetic Observatory

Received 8 March 2010; received in revised form 11 March 2010; accepted 16 March 2010

Abstract

Geomagnetic observations were conducted by the Central Meteorological Observatory (CMO) in Tokyo from 1883 to 1913. With the progress of urbanization in the metropolitan city of Japan, artificial noise, such as that generated by street cars, increased and consequently CMO relocated the geomagnetic observatory to Kakioka in Ibaraki prefecture, about 75 km northeast of Tokyo. Although the observation data measured at the Kakioka Magnetic Observatory (KMO) were sent to CMO, all the written records and field notes stored at CMO were destroyed in a fire after the 1923 Kanto Earthquake. The geomagnetic records taken before 1923 that still survive today are publications of the records from 1897 to 1915, but the data from 1916 to 1923 was unfortunately lost.

In 1950, KMO developed a new observation instrument that incorporated a temperature compensation function and achieved a remarkable improvement in observation accuracy, and which replaced the conventional variation observation instrument. For absolute observation instruments, KMO developed in 1956 the A-56 universal magnetometer and the H-56 sine galvanometer. In 1965, KMO installed the MO-P vector proton magnetometer to drastically enhance the quality of its absolute observation, probably making it world class at the time.

In 1976, the Kakioka automatic standard magnetometer (KASMMER) was installed (Yanagihara et al., 1973). KASMMER allowed KMO to provide observation data values with a one-minute resolution. With regard to data with a resolution measured in seconds, KMO started providing observation data with a three-second resolution in 1985 and with a one-second resolution in 1987.

Today, KMO conducts absolute observations with DI-72, an angle measuring instrument, and a proton magnetometer, and variation observations with a high-sensitivity triaxial fluxgate magnetometer and four Overhauser magnetometers. The main measuring instrument is a high-sensitivity triaxial fluxgate magnetometer, which measures the values of three components every second and observation values at 10 Hz. Although the fluxgate magnetometer is equipped with a monitoring device that checks inclination and temperature, the annual temperature variation is kept within 3 °C, and the inclination variation is also kept stable.

KMO is surrounded by residential and farm land, and its observations can be affected by artificial disturbances such as those caused by vehicles, buildings, other magnetic bodies or construction work. To cope with the increasing level of artificial disturbances such as these, an artificial disturbance measurement system was established in 2008. This system calculates the magnetic moments of sources of artificial disturbances from the measurement values of the geomagnetic measuring instruments installed inside the KMO campus.

According to a re-examination of past data, it was revealed that since the data obtained at Kakioka until 1947 was not processed appropriately, the published data lacked adequate quality. The reports delivered at the IATME Oslo Meeting held in 1948 concluded that the observation accuracy before 1947 was very much poorer than that thereafter, but when the observation data in question were reviewed and re-processed appropriately, its accuracy turned out to be almost equal to that after 1948. Now the work of re-examining and re-processing of absolute observation results from the 1920s to the 1940s is under way.

Until the optical pumping magnetometer was introduced in 1976, only the hourly values among the observation data of geomagnetic variation were disclosed. But in order to provide the past data in a more accessible and usable form, KMO developed a technique to convert the geomagnetic data recorded on bromide paper into digital values with a one-minute resolution.