

## 中古ルビジウム発振器の性能評価試験

小河 勉<sup>\*†</sup>・浦野幸子<sup>\*\*</sup>

### An Evaluation of Secondhand Rubidium Atomic Frequency Standards

Tsutomu OGAWA<sup>\*†</sup> and Sachiko URANO<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

The output frequency of a secondhand rubidium atomic frequency standard (FE-5680A) was inexpensively obtained and examined. After connecting a terminal for the frequency output, a sinusoidal AC signal with a peak-to-peak voltage of 2V could be detected. The output frequency was approximately 8.4 MHz and its precision was 0.0001 Hz. Its long-term stability and temperature dependency were estimated to be better than  $10^{-11}$ /day and  $10^{-11}$ /K, respectively, which are smaller than the values listed in the datasheet. Although the warm-up time was about 20% longer than the listed value, the peak power consumption was about 33% smaller.

The high level of precision and stability would allow the device to be used to, for example, the frequency counter circuit of a proton precession magnetometer for measuring the geomagnetic total intensity.

*Key words* : Rubidium Atomic Frequency Standard, Frequency, Long-term Stability, Temperature Sensitivity, Warm-up Time, Consumption Power

#### はじめに

地磁気全磁力の計測に用いられるプロトン磁力計では、磁気モーメントをもつ水素原子（プロトン）を励磁によって整列させると、励磁の打ち切りとともにプロトンが磁場の中で磁場の方向を回転軸とした、全磁力に比例する周波数での Larmor 歳差運動を開始する(力武, 1972)。その際、プロトンのもつ磁気モーメントが Larmor 歳差運動によって、プロトンの容器を覆うコイルに周期的な起電力を生じさせる。この起電力を濾波回路・増幅回路への入力信号とし、その出力信号を周波数計測回路に入力して周波数を計測すると、この周波数計測によって得られた周波数値から全磁力値が換算できる。起電力の周波数と全磁力との間の比例係数は量子レベルの物理定数によって与えられるた

め、常温程度での温度や圧力の変化の影響を受けない安定な計測が可能である。

近年市販されているプロトン磁力計は公称、数万 nT の地磁気全磁力を 0.01 nT の分解能すなわち 7 桁の精度で計測・記録する。この精度は磁力計の周波数計測回路に用いられる発振器の精度に強く依存する。フィールドにおけるプロトン磁力計を用いた年単位の期間にわたる地磁気全磁力観測においては、磁力計に用いられる発振器の絶対的な精度だけではなく、その長期安定性や温度係数も考慮に入れる必要がある。それは観測点における気温変化が見かけ上の全磁力変化をもたらす要因になってしまうためである。実際の全磁力観測でも、気象データの参照の結果プロトン磁力計が計測した全磁力値に、急激な降雨と気温低下に伴った数 nT 程度の有意な変化が見受けられる(上嶋誠, 私信)。

市販のプロトン磁力計の中には、全磁力値とともに基板上の温度を記録する機種も存在する。計測全磁力値と基板温度との間の温度係数が得られれば、基板温度を参照した全磁力値の補正が可能となる。しかし、その温度係数の較正を行うためには、その際の磁力計センサーの位置及び計測時刻における真の全磁力値を把握する必要がある。当該

2013 年 12 月 4 日受付, 2014 年 2 月 3 日受理.

<sup>†</sup>ogawa@eri.u-tokyo.ac.jp

\* 東京大学地震研究所観測開発基盤センター,

\*\* 東京大学地震研究所技術開発室 (開発系)

\* Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

\*\* Laboratory for Technical Service and Development (Development Group), Technical Division, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

計測位置・時刻における真の全磁力値は、その近傍の磁化分布・温度分布と温度変化に依存した成分を含んでいる (Utada et al., 2000). そのため、較正作業を適切な場所及び条件で行わなければ、推定される温度係数には計測位置・時刻に由来する成分が混入しうる. 同様に、長期にわたる試験観測で長期安定性の較正を行う場合は、当該計測位置・時刻における地磁気永年変化の把握が必要である. プロトン磁力計の完成品に内蔵された発振器の長期安定性や温度係数などの正確な仕様を把握するには、発振器単体での較正作業を行うほうが賢明である. また発振器自体、温度変化の影響を受けにくい機種を用いることが望ましい.

プロトン磁力計の構成にあたっては、石英結晶の圧電効果を用いた水晶発振器に温度補償や恒温槽を施した製品の使用が、温度変化に伴う発振器の周波数変化の小さい安定な計測に資することとなる. また Larmor 歳差運動と同様に、温度や圧力の変化の影響を受けにくい量子レベルの現象である、原子の輝線スペクトルの安定した周波数を用いて構成されたルビジウム発振器のプロトン磁力計への使用も、温度変化に伴う見かけ上の全磁力変化の排除に有効である.

プロトン磁力計以外の地球物理計測一般においても、絶対重力計のような高精度かつ安定な時間・周波数計測を必要とする測器の開発と試作に当たっては、発振器の較正や試験は重要である.

我々はプロトン磁力計の試作を目指して、周波数計測回路に組み込むための発振器として中古のルビジウム発振器

を廉価に入手し、データシート上の仕様と実機の性能とを比較した. 本稿では、特にこのルビジウム発振器の出力周波数とその安定性、消費電力などの評価試験の結果を記す.

### 発振器のデータシート上の仕様と改良作業

我々は、Frequency Electronics 社製ルビジウム発振器 FE-5680A (図 1 参照) を中古品で 1 台当たり約 13,000 円にて計 3 台入手した. 筐体に記されたユニット番号 (以下、U/N) は若い順に 23651, 35332, 37658 であり、製造番号はそれぞれ 34730W, 0151-49500, 0223-53391 となっている. 以下では各種の点検・試験作業を、U/N23651 及び U/N35332 の 2 つの個体について行った結果を記す.

同発振器の仕様上のパラメータをデータシートから抜粋して表 1 に示す. FE-5680A は温度係数が 1°C 当たり 9 桁以上、また長期安定性は年当たり 10 桁以上、1 日当たり 8



図 1. FE-5680A の外観 (Frequency Electronics 社ホームページより).

表 1. FE-5680A 及び代表的な恒温槽付水晶発振器の仕様 (抜粋)

| 種別                             | ルビジウム<br>発振器   | 恒温槽付<br>水晶発振器            |  |
|--------------------------------|--|--------------------------|--|
| メーカー<br>機種                     | Frequency<br>Electronics Ltd.,<br>FE-5680A           | 京セラ<br>OCVCXO-173A       | 日本電波工業<br>NH37M28LC                                  |
| Frequency                      | 10MHz<br>(factory settable<br>1Hz to 20MHz)          | 10MHz                    | 10MHz  |
| Long Term<br>Stability         | $2 \times 10^{-9}$ /year<br>$2 \times 10^{-11}$ /day | $2 \times 10^{-8}$ /year | $5 \times 10^{-8}$ /year<br>$5 \times 10^{-10}$ /day |
| Warm-up<br>Time                | <5min. to lock                                       |                          | <10min   |
| Output<br>Voltage              | 0.5V RMS<br>into 50 ohm<br>sinewave                  |                          |  |
| Frequency<br>vs Temp           | $3 \times 10^{-10}$<br>(-5°C to +50°C)               | $1 \times 10^{-9}$       | $< 5 \times 10^{-9}$                                 |
| Power<br>Consumption<br>(25°C) | 11W<br>(steady state)<br>32W<br>(peak)               | 12W                      | <1.3W<br>(steady state)<br><3.5W<br>(peak)           |
| Voltage<br>Required            | 15 to 18V<br>@700mA                                  | 11.4 to 12.6V            | 5.0V ± 5%  |

桁以上、それぞれ保証された安定な発振器とされている。これらの数値は恒温槽付水晶発振器の代表的な機種のものと比較して、1桁以上優れていることを示している。

一方、消費電力は定常状態で11 Wとされ、野外観測で用いられるプロトン磁力計にとっては大きな値である。恒温槽を用いない水晶発振器が用いられている場合、プロトン磁力計の消費電力は、励磁の際の電流による消費電力に支配される。DC 12 V または 24 V の電源で線抵抗約 10  $\Omega$  のコイルに数秒間電流を流して励磁するので、全磁力を毎分計測する際のプロトン磁力計の励磁に要する平均的な消費電力は、励磁時間を2秒として0.5 W から2 W 程度である。プロトン磁力計の励磁以外の電力消費を考慮してもFE-5680Aの消費電力はプロトン磁力計のそれ以上である。したがって、このルビジウム発振器を用いて試作するプロトン磁力計は、野外での太陽電池を用いた観測点における低消費電力の仕様には不向きとなる。AC 100 V 商用電源の供給を受けられる観測点における使用に適したものとなる。

入手したFE-5680Aの3台の実機はすべて、データシートの記載に反して、信号出力のための端子が取り付けられていなかった。FE-5680Aに対する電源供給などのためのDサブ9ピン端子は、給電用以外のピンからも、電源を供給してもデータシートに記載された電圧0.5 V RMS程度、周波数1 Hz から20 MHzの信号を検出することができなかった。

発振器の筐体を開け、筐体内に配置された各種のピン・レセプタクル等の電圧をオシロスコープで計測したところ、確認作業を施した2台の個体ともに、基板上的RF同軸レセプタクル(SMT)から、ピーク間電圧約2 V、周波数約8 MHzの正弦波交流電圧の出力が確認できた。データシート上の数値と比較すると、この電圧出力は周波数ではFE-5680Aの工場出荷時に調整可能な1 Hz から20 MHzの範囲にあり、仕様を満たしていることになる。また振幅は、入力インピーダンスが50  $\Omega$  よりも十分大きいオシロスコープを用いた計測であることを考慮すれば、FE-5680Aの出力インピーダンスが20  $\Omega$  程度であるならば異常な値ではない。この信号以外に正弦波交流電圧出力は確認できなかったため、これをFE-5680Aから得られる信号とみなすこととした。この信号を筐体外に取り出せるよう、図2のように筐体にBNCレセプタクルを取り付け、基板上的RF同軸レセプタクル(SMT)との間に配線を施す改良を行った。FE-5680A本来の仕様と比較して信号を取り出す端子の位置は異なるが、これは改良作業の簡便さを優先した結果である。

### 発振器の稼働と出力周波数の計測

FE-5680Aの動作確認及び出力周波数の計測を、地震研



図2. 改良によりBNCレセプタクルを取り付けたFE-5680A(U/N35332, 左)及び取り付けしていないFE-5680A(U/N37658, 右)。

究所2号館地下1階B21室で実施した。U/N23651及びU/N35332に電源を供給して稼働し、信号を筐体外に取り出した。同室は空調調節器が稼働する地下室で、室温は室内のアルコール温度計を目視で繰り返し確認する限り、24°Cから26°Cだった。FE-5680Aへの電源は、最大3 Aの電流供給が可能な安定化電源からDC 15 Vを供給した。

まず2つの個体の消費電流の推移を確認したところ、いずれの個体も開始直後の約5分間は約1.5 Aの最大の電流を消費した後、徐々に減少した。開始10分後には0.8 Aに達し、さらに0.7 Aまで低下したところで定常状態となった。開始直後及び定常状態の消費電力はそれぞれ、最大値となる22.5 W及び10.5 Wである。データシート上のそれぞれの値32 W及び11 Wと比較すると、前者は実機の値がデータシート上の値の約2/3と過少であり、後者は実機の値とデータシート上の値とが符合した。なお、個体への給電を開始すると筐体が発熱するが、給電を止めた後、筐体が高温を保持した状態で給電を再開すると、再開直後は約1.5 Aの最大消費電流を要する時間が短縮された。

次に出力信号の周波数の推移を計測した。FE-5680Aの出力周波数は、Hewlett Packard社製ユニバーサルカウンターHP53132Aを用いて計測した。HP53132Aへの外部タイムベース入力として、GPSを用いたHewlett Packard社製時間・周波数参照受信機HP58503Bからの10 MHz交流電圧出力を入力した。周波数計測のためのゲート時間は10秒とした。10秒ごとの計測値がHP53132AのDサブ9ピン端子からシリアル通信で送信されるので、これをPCで受信し、受信時刻とともに記録した(図3参照)。

FE-5680Aの2つの個体の出力周波数の計測期間は、U/N35332については2013年6月10日から14日にかけて、またU/N23651については同14日から20日にかけてである。その計測結果を図4に示す。以下、U/N35332及びU/N23651をそれぞれU1及びU2と略記する。数日間という計測期間の範囲では、出力周波数はいずれも約8.4 MHzで、

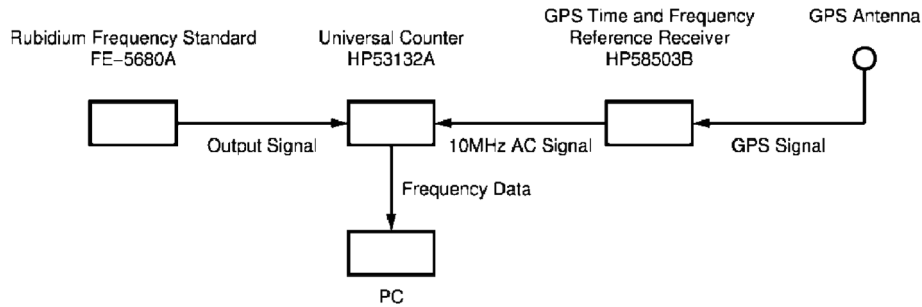


図 3. (上) 周波数計測のブロック図. (下) FE-5680A 出力信号の周波数計測の光景. 机上, HP53132A (右), 安定化電源 (中奥), FE-5680A (U/N23651, 中手前) 及び計測周波数記録用 PC (左).

$\pm 0.001$  Hz の範囲で安定であることがわかった. ただし U1 については 4 日間で出力周波数が一定値に収束したのに対し, U2 については 6 日間を経ても出力周波数が増加する傾向が停止しなかった. HP53132A のマニュアルによれば, ゲート時間を 10 秒として周波数計測を行う際, HP53132A への入力信号の周波数が  $10^7$  Hz 程度の場合の周波数計測誤差は  $10^{-4}$  Hz 程度とされている. したがって, U2 に顕著な計測周波数の平均値からのばらつきは発振器の出力周波数のばらつきを示すものと考えられる. U1 の計測周波数の, 1 日程度の時定数をもつ緩慢的変化や, 数時間に及ぶ時定数を持った変化とその回復とは, 発振器に起因するものと考えられる. 一方, より短周期で振幅が  $10^{-4}$  Hz 程度の周波数のばらつきには, HP53132A の計測精度に起因するものが顕著に含まれると考えられる.

2 つの個体それぞれの出力周波数の, 計測終了直前の 3 日間のデータにもとづいて, 平均周波数, 時間変化率, 日周変化振幅を最小自乗法で推定して得られた値を表 2 に示す.

当該時間のデータと表 2 にもとづく回帰式を図 5 に示す. 推定された RMS はいずれの個体についても HP53132A の計測精度と符合する  $10^{-4}$  Hz 程度で, 有効数字の桁数は 10 桁に達した. 長期安定性は U2 の時間変化率が大きいものの U1 のそれと比較して 2 倍程度しか変わらず, いずれもデータシートに記載された仕様を満たす結果となった. 日周変化振幅は推定を試みたものの, RMS よりも小さい結果となった. 今回の計測では室温の並行計測は実施しなかったため, 温度係数の推定は不可能である. しかし, 推定された日周変化振幅がすべて室温日周変化によるものと仮定し, かつアルコール温度計の目視で確認された  $\pm 1^\circ\text{C}$  程度の温度変化が, 空気調節器が稼動した室内の室温日周変化として存在していたと仮定すれば, 温度係数は  $(10^{-12} \sim 10^{-11})/\text{K}$  となり, データシートに記載された仕様を満たすことになる. 推定された日周変化振幅が室温日周変化以外に起因する成分を含んでいる場合, または実際の室温日周変化がさらに大きかった場合には, 推定される温度係数

はより小さくなる。

給電開始直後は2つの個体ともに、出力周波数は、定常状態における値に近い周波数とそれより250Hz程度低い周波数との間で信号の周波数が振動した後に定常状態に移行した(図6参照)。U1については図5に示した給電と計測を開始した時刻、すなわち17時15分に対してその10分前、17時05分まで電源を供給した後いったん給電を止め、その10分後に給電を再開して計測を開始した。一方、U2については最初の給電開始と同時に計測も開始した。

いったん給電を停止した後に再開したU1の方が、定常状態に移行するまでの時間が短かった結果は、消費電流の推移を確認した際の最大消費電流の継続時間を確認した結果と調和する。U2の結果から、Warm-up timeとしてデータシートに記載された給電開始後5分未満という時間を吟味すれば、給電開始後5分においては周波数の振動が終了して値が収束する途中にあり、定常状態の出力周波数に比して0.1Hz程度、 $10^{-8}$ 程度の有意な差が依然残っている。

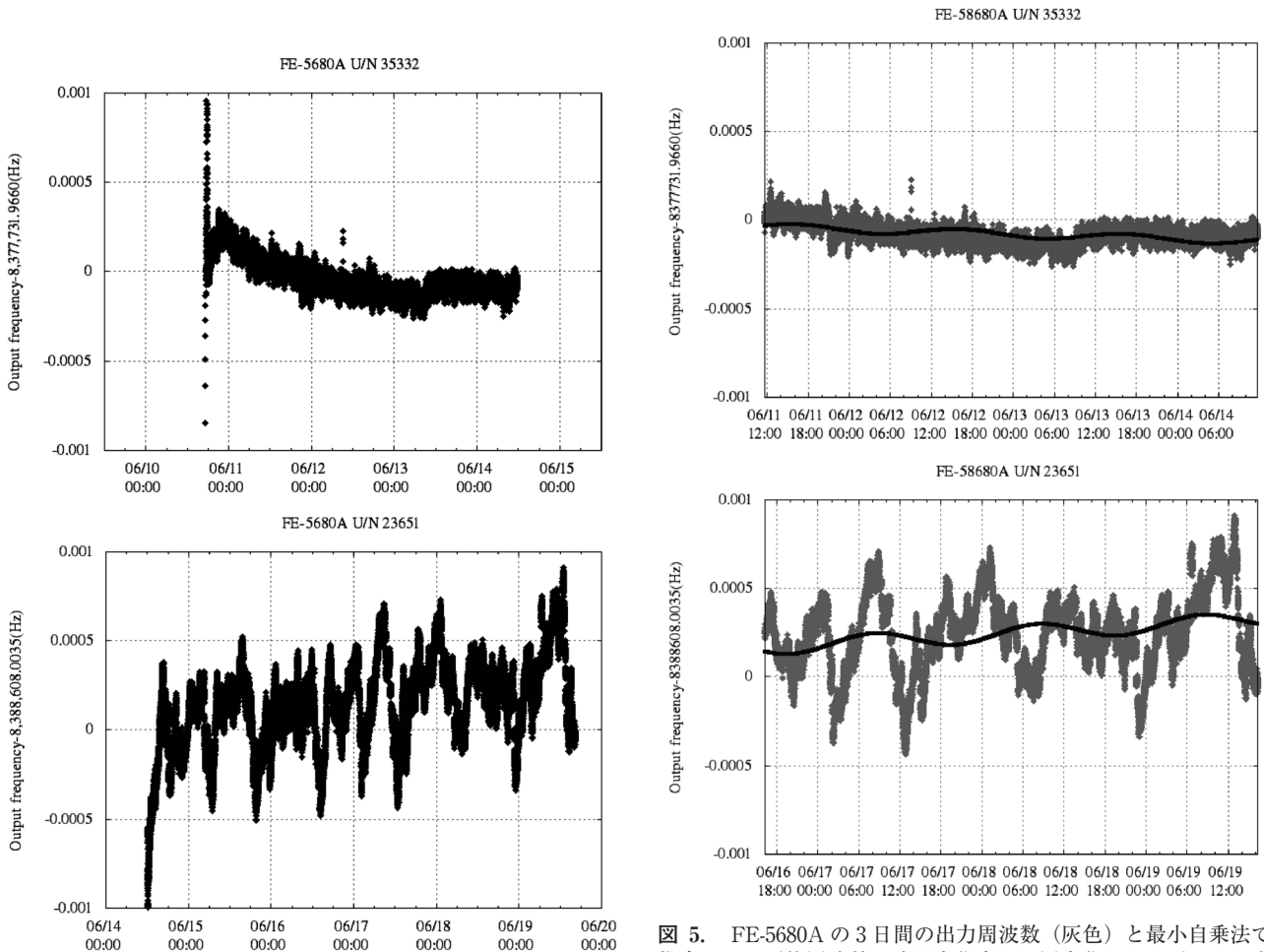


図 4. FE-5680A 出力周波数の推移. U1 (上) 及び U2 (下).

図 5. FE-5680A の3日間の出力周波数(灰色)と最小自乗法で推定された平均周波数, 時間変化率, 日周変化から予測された出力周波数(黒). U1 (上) 及び U2 (下).

表 2. FE-5680A の実機から得られたパラメータ

|           | U1  | U2  |
|-----------|---|---|
| RMS(Hz)   | $5.0 \times 10^{-5}$                                      | $2.1 \times 10^{-4}$                                      |
| 平均周波数(Hz) | 8377731.9660  | 8388608.0037  |
| 時間変化率     | $2.7 \times 10^{-5}$ Hz/day<br>$3.2 \times 10^{-12}$ /day | $5.2 \times 10^{-5}$ Hz/day<br>$6.2 \times 10^{-12}$ /day |
| 日周変化振幅    | $2.0 \times 10^{-5}$ Hz<br>$2.4 \times 10^{-12}$          | $4.5 \times 10^{-5}$ Hz<br>$5.4 \times 10^{-12}$          |

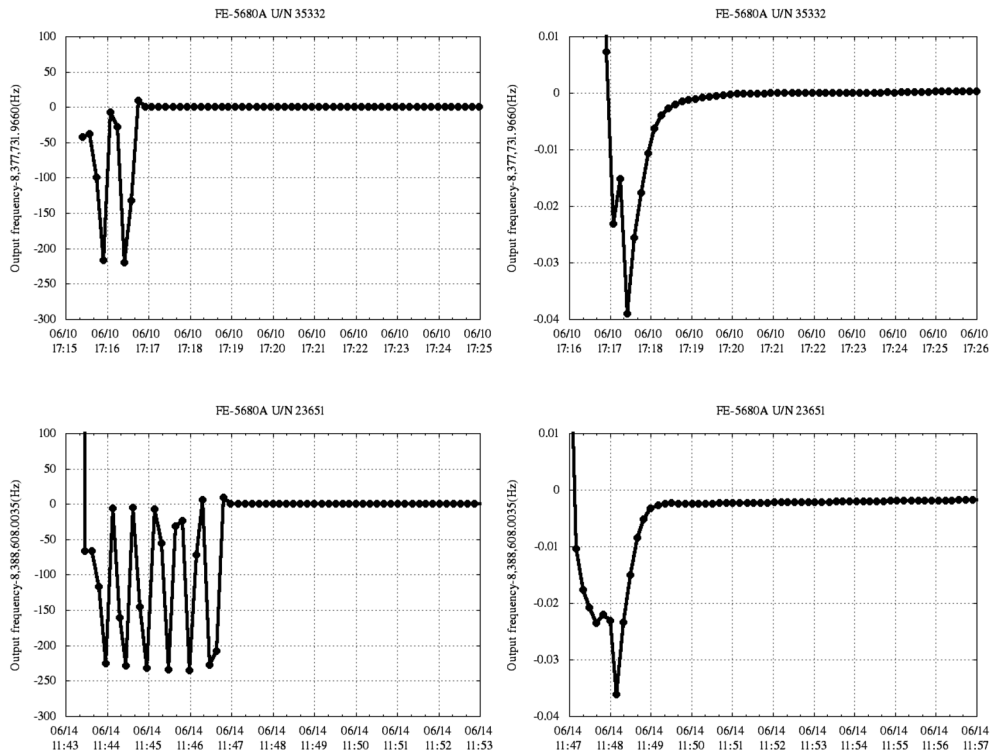


図 6. FE-5680A の給電開始直後の出力周波数の推移. U1 (上) 及び U2 (下) の, 給電開始直後からの 10 分間 (左) 及び周波数が 0.001 Hz 程度の範囲で収束する前後の 10 分間 (右).

出力周波数の安定に要する時間は最大で 6 分とみなす方が実機に即していることがわかった。

## ま と め

ルビジウム発振器 FE-5680A の中古品を廉価で入手し, その実機的主要仕様を, データシートを参照しながら確認した. 筐体の外形に, 実機ではレセプタクルがないために信号を取り出せないという, データシートとの著しい齟齬があり, 工作によって信号を取り出せるよう改良した. DC 15 V 電源の供給により得られた出力信号は, 開放状態でピーク間電圧 2 V の正弦波交流電圧で, 出力周波数は約 10 桁の精度を持つことが分かった. そのうえ, 時間変化率, 温度係数はデータシートに記載された数値の範囲にあり, かつ小さな値で, たいへん安定な発振器であることが分かった. 消費電力は稼動直後の最大消費電力がデータシートに記載された値よりも小さく, 定常状態ではデータシートの記載と同程度だった. Warm-up time の最大値はデータシートの記載よりも 2 割 (1 分間) 大きく見積もる方が

実機に即していることが分かった。

以上の結果から, これらの FE-5680A が中古かつ廉価であってもデータシートに記載された仕様をおおむね満たしていること, したがってプロトン磁力計に組み込むには十分な仕様を満たすことが判明した。

謝辞: 地震研究所の新谷昌人准教授には, FE-5680A の出力周波数の計測の際にその環境を提供していただきました. 有益な査読意見を新谷昌人准教授と鈴木雄治郎助教からいただきました. また技術研究報告編集委員会には, 有益なご指摘を頂きました. ここに記して感謝申し上げます。

## 文 献

- 力武常次, 1972, 「地球電磁気学」, 岩波書店, 472 頁.  
 Utada H., M. Neki and T. Kagiya, 2000, A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals, *Earth, Planets and Space*, **52**, 91-103.