

活火山での全磁力観測における DI 補正法の適用

Application of the “DI-correction” method to geomagnetic total intensity observation at active volcanoes

秋元 良太郎・山崎 明・山崎 貴之・浅利 晴紀 (気象庁地磁気観測所)・
高橋 幸祐 (気象庁地震火山部)

R.Akimoto, A.Yamazaki, T.Yamazaki, S.Asari (Kakioka Magnetic Observatory, JMA)
K.Takahashi (Seismology and Volcanology Department, JMA)

Abstract

Since 2015 Seismology and Volcanology Department of Japan Meteorological Agency(JMA) has reinforced its volcano monitoring system, including a successive deployment of magnetic stations for continuous measurement of the geomagnetic total magnetic intensity F . Detection of magnetic signals associated with volcanic activities is, however, seriously affected by noises of the external origins, which are not necessarily eliminated by simply taking a difference of F records at separate stations under significant localities in the magnetic declination and inclination. We attempted to de-noise the F records on five volcanoes with the “DI-correction” method proposed by Tanaka et al. (1978) and Davis et al. (1979). For some periods around magnetic storms recorded at Kakioka Magnetic Observatory, we applied the method to the F data, for which we also used continuous vector data from a reference station. Our results show effective reduction of the external noises for all five volcanoes, indicating that extraction of volcanic signals out of the observed F variations can be eased in practice. To identify long-term volcanomagnetic variations, stability of the vector observation would be required, which may be achieved by performing absolute magnetic observation at the reference station.

1. はじめに

地磁気全磁力観測は火山の地下浅部に存在する熱水活動を把握できる可能性があり、水蒸気噴火など火山活動の監視に貢献することへの期待から強化する観測項目の一つとなっている。平成 26 年 9 月に発生した御嶽山の噴火以降、水蒸気噴火への社会的関心が高まり、気象庁地震火山部では水蒸気噴火の兆候をより早期に把握するため火口付近への観測施設の増強を進めた。平成 27 年度以降、樽前山、吾妻山、安達太良山、御嶽山、九重山、霧島山 (Fig. 1) に全磁力観測装置が整備され、業務的運用に向けての調査が行われている。

火山活動による地磁気の異常変化を検出するためには、日変化や磁気嵐などの地球外部起源磁場変動、海流による磁場変動及び地球の中心核に由来する永年変化等のノイズを除去する必要がある。地球外部起源の変動磁場は、火山地域のような 10km 程度のスケールにおいてほぼ一様とみなせるため、異なる 2 地点間の単純差を求めることで、この種のノイズは一般に数十分の一程度に抑えることができる (橋

本・他 (2003))。しかし、観測点毎に偏角・伏角が異なるため、仮に一様な外部起源変動磁場が加えられたとしても2点間の全磁力値差には変動磁場の影響が残る。これは DI 効果と呼ばれており、火山地域では過去の噴火形成によりもたらされた局所的な磁気異常が存在するため、磁気嵐など大きな外部起源磁場変動に対してこの効果を見逃すことができない。本稿では、田中・他 (1978) や Davis et al. (1979) によって提唱された「DI 補正」と呼ばれる手法を前述の火山に適用し、DI 効果の補正を試みた。以下に調査結果を報告する。



Fig. 1 Location map of the six volcanoes.

2. DI 補正法

ある地点の地磁気三成分を X, Y, Z (水平 2 成分 X, Y と鉛直下方成分 Z) とし、 X_0, Y_0, Z_0 をその点の主磁場、 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ を外部変動磁場とすると、全磁力 F は次のようになる。

$$F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{\frac{1}{2}} = \{(X_0 + \Delta X)^2 + (Y_0 + \Delta Y)^2 + (Z_0 + \Delta Z)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

外部磁場変動の振幅は高々数百 nT で、主磁場の値と比較すると小さい。このため、式(1)をテーラー展開し、外部磁場変動の 2 次以上の項を見逃すと、全磁力 F は係数 K_{X0} 、 K_{Y0} および K_{Z0} を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} F &= F_0 + \frac{X_0}{F_0} \Delta X + \frac{Y_0}{F_0} \Delta Y + \frac{Z_0}{F_0} \Delta Z \\ &= F_0 + \Delta X \cos D_0 \cos I_0 + \Delta Y \sin D_0 \cos I_0 + \Delta Z \sin I_0 \\ &= F_0 + K_{X0} \Delta X + K_{Y0} \Delta Y + K_{Z0} \Delta Z \end{aligned} \quad (2)$$

ここで F_0 とは外部磁場変動を除いた全磁力で、 $F_0 = (X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2)^{\frac{1}{2}}$ である。したがって、異なる 2 地点に一樣な変動磁場 (ΔX 、 ΔY 、 ΔZ) が与えられた場合の全磁力差は、式(3)のように変動磁場 3 成分の 1 次結合として表現できる。

$$\begin{aligned} F_2 - F_1 &= (K_{X2} - K_{X1})\Delta X + (K_{Y2} - K_{Y1})\Delta Y + (K_{Z2} - K_{Z1})\Delta Z + F_{20} - F_{10} \\ &= K_X\Delta X + K_Y\Delta Y + K_Z\Delta Z + S \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)を S の分散が最小となるように、係数 K_X 、 K_Y および K_Z を最小二乗法を用いて決定する。

3 解析に利用したデータ

気象庁で平成 27 年度以降に全磁力観測装置が整備された 6 火山では、参照点及び火口周辺の 6 観測点（安達太良山のみ 4 点）にオーバーハウザー磁力計が設置されており、1 秒間隔で全磁力の連続観測を行っている。また、参照点にはフラックスゲート磁力計も設置されており、絶対観測による観測値の較正は行われていないものの、1 秒間隔で地磁気 3 成分の変化観測を行っている。上記の火山のうち一定期間データが存在するのは安達太良山を除く、樽前山、吾妻山、御嶽山、九重山、霧島山の 5 火山である。

1 つの火山における 6 点の火口周辺の全磁力観測点のうち、DI 効果が大きい地点として参照点との単純差の短周期変動が大きな観測点を 2 点ずつ（御嶽山は 1 点）選択した。DI 効果の例として Fig. 2 に樽前山における全磁力変化を示す。特に TRM_02 や TRM_03 に着目すると、平成 29 年 5 月下旬や 9 月上旬等に、全磁力差が前後と比較して大きく変動している期間がある。このような変動は地磁気観測所（柿岡）で磁気嵐を観測した期間に多く見られる。

本調査では DI 効果が特に大きい事例として、磁力計が整備された 2015 年 12 月以降 2017 年 9 月までの間に柿岡で観測された磁気嵐事例（全 21 事例）に着目した。磁気嵐の継続期間は概ね 1 日から数日程度であることから、その発生日の 3 日前から 6 日後までの 10 日間における観測データ

- ・火口周辺の観測点の全磁力 F_2
- ・参照点の全磁力 F_1
- ・フラックスゲート磁力計のセンサーに固定された座標 3 成分の変動値 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ

の日平均値を入力として、式(3)の係数 K_X 、 K_Y および K_Z を決定した。なお、観測データに含まれている異常値は予め補正を行っている。

4. DI 補正の結果

各観測点において決定された DI 補正係数を Table 1 に示す。また、DI 補正前及び補正後の観測点と参照点の全磁力差を Fig. 3 に示す。全磁力計または 3 成分磁力計のいずれかに障害が発生していた期間はデータが存在しない。補正前後のグラフを比較すると、全ての観測点において磁気嵐に伴う DI 効果が軽減されている。さらに期間全体を通して全磁力の短周期的な変化が補正後のグラフでは大幅に軽減されている。したがって DI 補正を適用することで火山活動に伴う微小な地磁気変化をよりの確に捉えることを可能にすると期待される。

一方、吾妻山の AZM_04 は補正前後で値に大きな変化が見られない。AZM_04 の全磁力差の短周期変化は磁力計近傍の局所的な熱活動に伴う影響であり、DI 効果は小さいと推察される。九重山や樽前山では観測開始直後の補正值に異常が見られる。これはフラックスゲート磁力計の初期ドリフトが原因と考えられる。

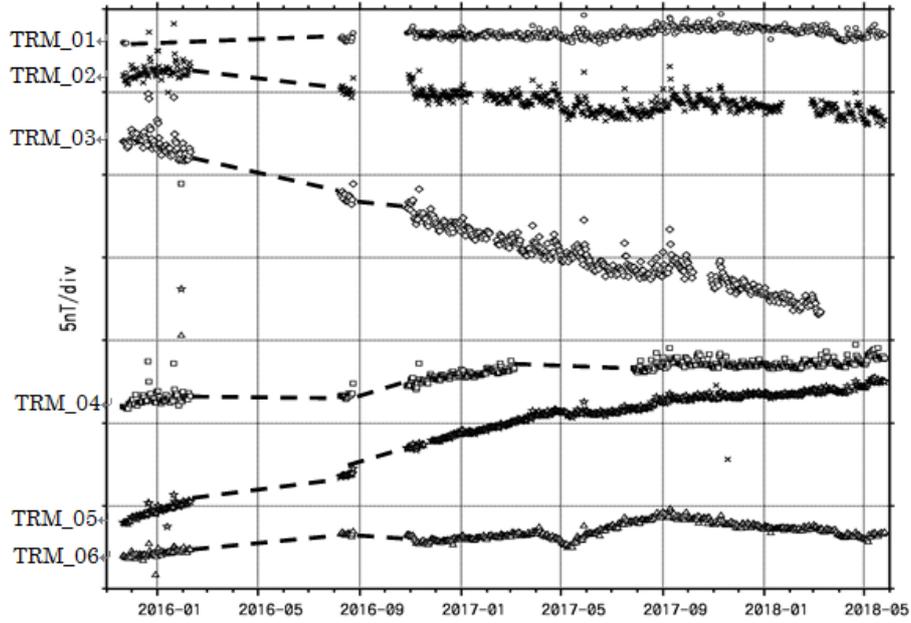


Fig. 2 Local night-time values (00:00 - 02:59) of the geomagnetic total intensity at the continuous observation sites on Tarumae volcano, from November 2015 to May 2018, with respect to the reference station about 8km to the northeast of the lava dome.

Table 1 Values of the coefficients(K_x, K_y, K_z) in Eq.(3) estimated for each observation site.

火山名	観測点名	K_x	K_y	K_z
樽前山	TRM_02	-0.0268	-0.0049	0.0318
	TRM_03	-0.0293	0.0028	0.0347
吾妻山	AZM_02	-0.0208	-0.0222	0.0247
	AZM_04	-0.0049	0.0115	0.0041
御嶽山	ONT_03	-0.0197	-0.0100	0.0129
霧島山	KRS_03	-0.0161	0.0070	0.0380
	KRS_05	-0.0216	0.0000	0.0279
九重山	KJU_02	0.0177	0.0097	-0.0094
	KJU_03	0.0270	-0.0007	-0.0207

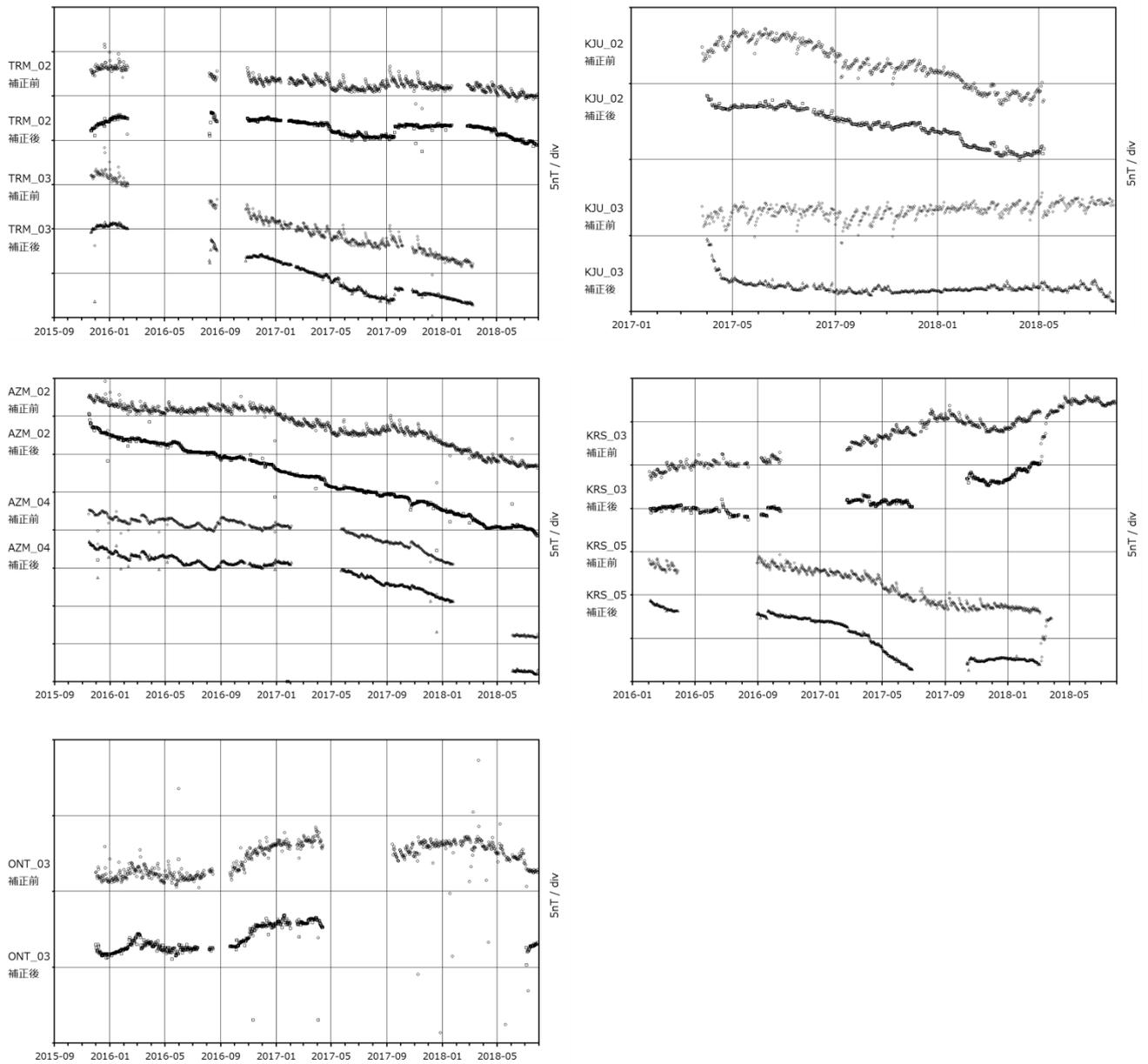


Fig. 3 Daily mean values of the geomagnetic difference before and after DI-correction at the continuous observation sites on Tarumae, Azuma, Ontake, Kuju, Kirishima volcanoes.

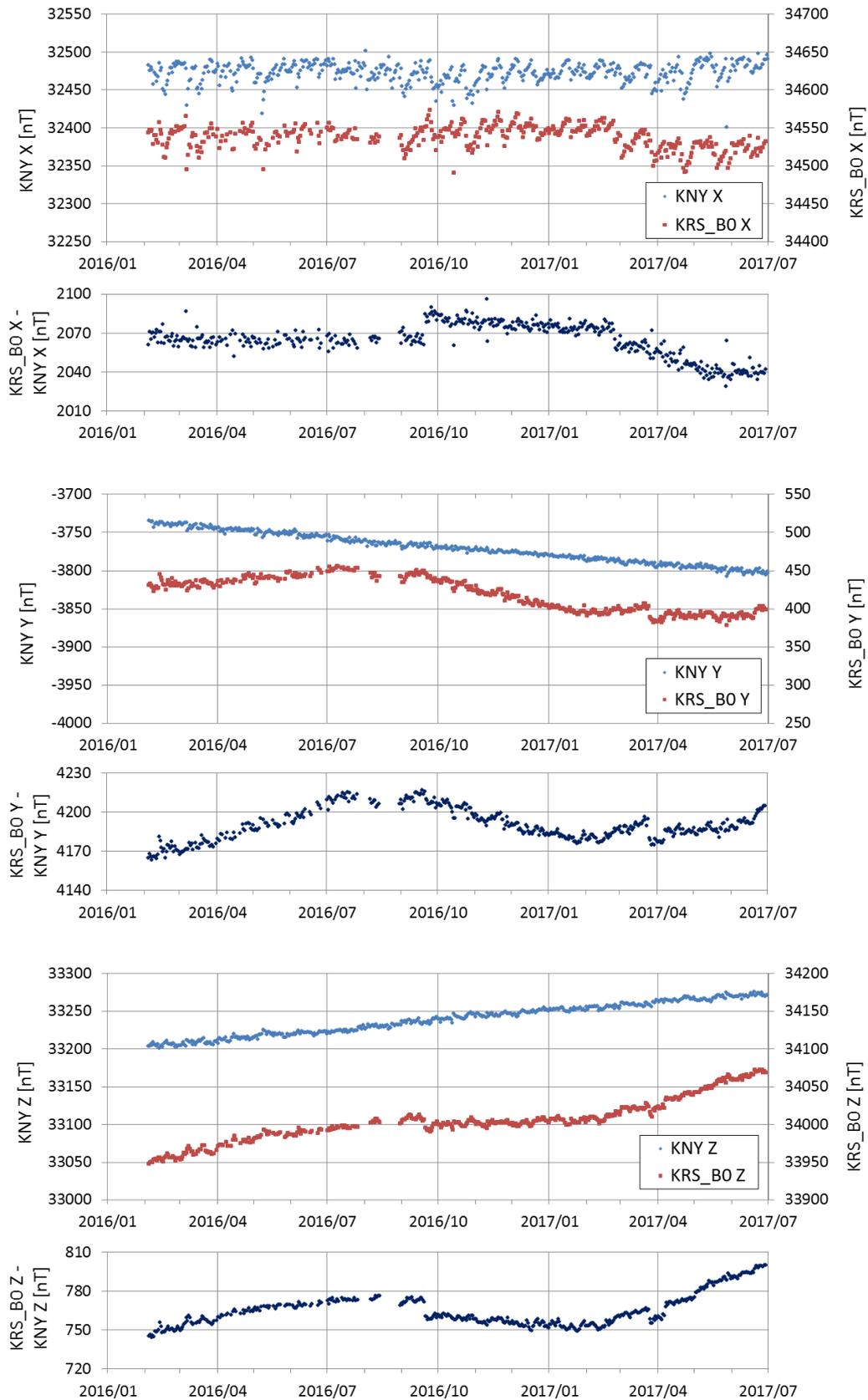


Fig. 4 Daily mean values of the geomagnetic field vector components and their differences at Kanoya(KNY) and Kirishima volcano(KRS_BO).

5. 長期変動の補正について

吾妻山の AZM_02 や霧島山の KRS_03、KRS_05 の補正結果を見ると、補正前後でグラフの長期的なトレンドが変化している。トレンドに影響を与える原因として、(1) 3 成分磁力計の長期安定性、(2) 参照点と観測点の永年変化の違いが考えられる。このうち (2) については、参照点と観測点の距離が 10km 程度と近く、2 点間における地磁気の永年変化の差は十分小さいと考えられるうえ、補正係数が適切であれば長周期の DI 効果に対しても正しく補正されることが期待される。

(1) のフラックスゲート磁力計の安定性の調査にあたり、火山の参照点と地磁気連続観測施設との距離が最も近い霧島山と鹿屋観測施設のデータを検討する。Fig.4 に霧島山の参照点と鹿屋観測施設の X,Y,Z 成分の観測値及びその差分を示す。2 点における各成分の差を見ると、霧島山の参照点では 3 成分ともにステップ状の異常変動が見られる。また温度特性によると考えられる年周変動も見られる。

Fig.3 のグラフから KRS_03 や KRS_05 における単純差と通常の DI 補正後のデータを比較すると、2017 年 2 月から 6 月にかけてトレンドの違いが見られる。鹿屋を基準とした場合の霧島山の 3 成分の変動を見ると、X 成分については 2017 年 3 月以降単調減少、Z 成分については 2017 年 2 月以降単調増加をしており、これら 2 成分を用いた補正の影響で、DI 補正前後のトレンドに差が生じ、それが時間とともに拡大したと考えられる。Table 1 で示すように KRS_03 や KRS_05 の DI 補正の係数のについては Z 成分の絶対値が最大である。磁気嵐など超高層起源の DI 効果による Z 成分の変動は比較的小さいが、数 10nT 以上の長期的な基線値変動がある場合、Z 成分による補正量も大きく寄与することが示された。

そこで長期トレンド成分を取り除き、超高層起源の短期間の DI 効果のみを補正の対象とする手法として、夜間の静穏な時間帯の 3 成分データを月 2 日抽出して長期変動のベースラインを求め、地磁気 3 成分データと各成分のベースラインからの差を用いて DI 補正を行った。静穏な時間帯とは、15 時~18 時(UTC)で鹿屋の K 指数が 1 以下の日を指す。Fig.5 で示すとおり、ベースライン処理を行ったデータを使った DI 補正の長期トレンドはほぼ単純差と一致した。但し、この手法ではベースラインの設定方法に注意が必要である。このことは、2017 年 10 月から 11 月にかけて単純差と比較して見られる異常な変化から示唆される。

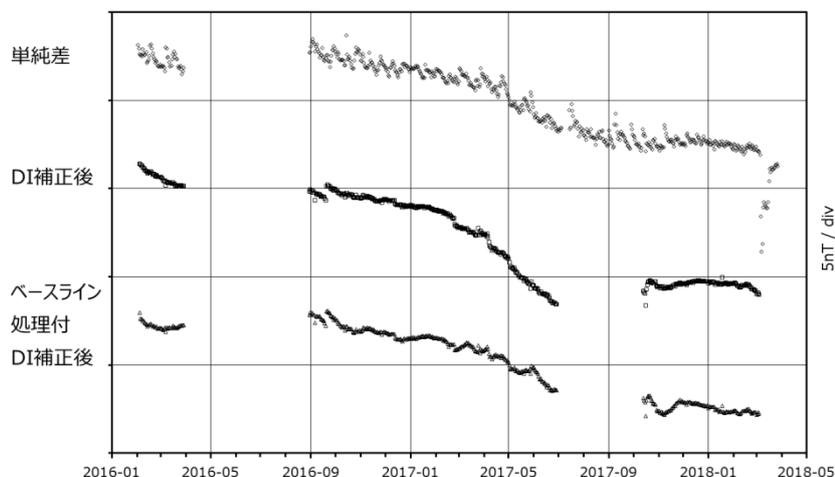


Fig. 5 Daily mean values of the geomagnetic total intensity difference before and after the DI-correction at Kirishima(KRS_05) and which is pretreated with baseline value(bottom).

6. まとめ

地磁気全磁力観測において、参照点に設置した 3 成分磁力計を用いた DI 補正を行うことによって、主に磁気嵐等の短周期現象に対する DI 効果を大幅に軽減することができた。これにより、火山活動に伴う微小な地磁気変化をよりの確に捉えることが可能となった。一方、長周期トレンドに対しては 3 成分磁力計の安定性が課題であり、参照点において定期的に絶対観測を実施する等、地磁気 3 成分の観測精度の向上が必要である。

参考文献

- 橋本武志, 田中良和, Johnston, Malcom J.S., 宇津木充, 笹井洋一, 坂中伸也(2003) : ロングバレーカルデラ地域の地磁気全磁力差に見られる年周変化について : 京都大学防災研究所年報 第 46 号 B-1
- 田中良和, 増田秀晴, 河村謙, 大地洗, 加藤誼司, 馬場広成, 吉野登志男(1978) : 阿蘇火山地域での全磁力測量(1977) : 阿蘇火山集中総合観測(第 1 回 1977)報告. 31-39.
- Davis, P. M., Stacy, F. D., Zablocki, C. J., and Olson, J. V. (1979) : Improved signal discrimination in tectonomagnetism: discovery of a volcanomagnetic effect at Kilauea, Hawaii, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 19, pp. 331-336.