

道東地域の地磁気絶対測量

橋本武志・茂木 透 (北大理)・西村三治・有田 真 (地磁気観測所女満別)

Absolute magnetic measurements in the eastern Hokkaido

Takeshi Hashimoto, Tohru Mogi (Fac. Sci. Hokkaido Univ.)

Mitsuharu Nishimura, Shin Arita (Memambetsu Magnetic Observatory, JMA)

Abstract

Since 1972, Hokkaido University has observed the magnetic total field at several fixed stations in the eastern part of Hokkaido. It has been revealed from the previous observation that the rate of secular changes shows a systematic spatial pattern. Nishida et al. (2004) attributed it to the piezomagnetism due to compressional stress field associated with the subduction of Pacific plate. Magnetic total field, however, contains the so-called orientation effect due to the difference in declination and inclination at each station. Indeed, south coast of eastern Hokkaido shows a marked and extensive magnetic anomaly, which may cause deviated magnetic orientations from station to station. We, thus, planned three-component absolute magnetic measurements at existing total field stations. Our aim is to reveal the magnetic orientation at each station and the secular magnetic field in three-components for the purpose of quantitative evaluation of tectonomagnetic signals which might be recorded in our continuous total field data (in the past and future). The present paper summarizes the absolute magnetic measurements which we conducted at three stations in November 2009. We also review the previous magnetic studies in this area for reference.

1. はじめに

北海道東部は、プレート運動に関連して地殻に歪みが生じる地域である。海溝沿いには、太平洋プレートの沈み込みに伴って、M7~8クラスの地震が発生することが知られており、内陸の弟子屈周辺でも、M5クラスの地震が過去に繰り返し発生している。こうした背景から、同地域では、地震や地殻変動に伴う重力や地磁気の異常とその変化を検出するための観測が展開されてきた。北海道大学および地磁気観測所によるこの地域での地磁気観測は、1970年代初頭に始まり、1994年までは不定期の繰り返し測量により行われてきた。1994年以降、地震予知計画の一環として、北海道大学がプロトン磁力計による全磁力連続観測点の整備を始めた。移設や欠測期間を経ながらも全磁力の観測は続けられ、2009年現在では磁気点は8箇所に拡充されている(第1図)。

大島・他(1994)は、1994年までのデータから、女満別を参照点とした各磁気点の全磁力単純差に直線的な変化傾向があることを見出した。Nishida et al. (2004)は、これを太平洋プレートの沈み込みに伴う地殻の圧縮に起因する tectonomagnetism であると考え、変化率の空間分布を、不均質磁化構造を考慮に入れた応力磁気効果で説明した。

これまでのところ、過去40年弱の間にこの地域で発生したM7級以上の地震について、応力開放によるコサイスマックな変化は、残念ながらいずれの磁気点でも検出されていない(一部は検出可能であったとされるが欠測; Nishida et al., 2007)。Nishida et al. (2004)の仮説が正しいとすると、近い将来発生が想定される根室沖地震が次のターゲットとなる。コサイスマックなものについては、少なくとも1 nT

のステップ状変化があれば、現在の全磁力連続観測により検出可能であろう。一方、前兆現象を捉えるという観点からは、地点毎に異なる傾きを示す永年変化について、その挙動を吟味することが手がかかりとなるだろう。ただし、これまでの観測結果によれば、地殻活動起源とされる永年変化は、最大で 3 nT/yr 程度である。そこからの偏差としての異常変化を見極めようとする、少なくとも全磁力の orientation 効果をきちんと評価しておく必要がある。このためには、磁気点ごとの偏伏角と三成分の永年変動場を明らかにすることが不可欠である。

以上のことから我々は、現在道東地域の 8 箇所で行働中の全磁力連続観測点において、三成分絶対測量を行うことを計画した。本稿では、2009 年 11 月に実施した、厚岸 (AKS)・標茶 (SHI)・仁多 (NIT) の 3 箇所における観測の概要を示す。なお、本稿の末尾には、過去にこの地域で行われてきた磁場観測をレビューするとともに、最新のデータを加えて示す。

2. 絶対測量の目的および目標とする精度

かつては、地震に伴う磁場変化を三成分絶対測量そのものによって検出しようとする試み（長谷川・他, 1983）もあったが、その目的を達するには、偏伏角測定に、概ね 0.1° の精度が要求される上、それなりの頻度で測定を行う必要がある。こうした観測は不可能ではないが、長期間継続していく上でのハードルも高い。そこで、北海道大学では、以下のようにしてこの問題に取り組もうとしている。まず、地震に関連する磁場変化の直接的検出は全磁力連続観測網が担う。加えて、2 年に 1 回程度の頻度で三成分絶対測量を行う。絶対測量は、全磁力差データに混入する orientation 効果を補正することを主目的とし、各磁気点の偏角伏角と、三成分の永年変化を数 10 nT の精度で明らかにする。多くの場合、全磁力差の orientation 効果は、外部擾乱に対して数 10 分の 1 の振幅となるので、1 nT を超える異常変化があれば、この方法で検出可能と思われる。以下、測定方法と初回の結果についてまとめる。

3. 測定方法

今回の絶対測量は、2009 年 11 月 10 日から 12 日にかけて行った。偏角・伏角の測定には、非磁性セオドライトに一軸のフラックスゲート磁力計を搭載した FT 型磁気儀 MAG-01H(6 秒読み、地磁気観測所所有)を使用した。また、全磁力の測定には、北海道大学所有のオーバーハウザー磁力計 GSM-19 を使用した。FT 型磁気儀は、絶対観測点に非磁性の三脚を固定し、その上に設置した。FT 型磁気儀の中心位置の高さは、設置した杭上から 1m である。オーバーハウザー磁力計は、絶対観測点から 20m 程度離れた場所に F 点を設け、そこに検出器を支柱に取り付け非磁性三脚で垂直に固定した。検出器の高さは杭上から 2.4m である。絶対観測点と F 点の全磁力地点差は、絶対観測の前後で絶対観測点と F 点の全磁力値をそれぞれオーバーハウザー磁力計で測定し求めた。FT 型磁気儀は望遠鏡に取り付けられている FM センサを用いて磁場と直交している FM センサ軸の向きを望遠鏡光軸の向きとして目盛盤から読み取り、磁場の向きを求めるものである。偏角と伏角の値は、測定方法の組み合わせにより平均的に同一点上の観測値として求められ、今回の観測では、10 回(6 回)の測定値から 4 個(2 個)の観測値を得た。

今回測定を行ったのは、厚岸 (AKS)、標茶 (SHI)、仁多 (NIT) の 3 箇所である。測定は昼間に行い、偏角絶対方位測定のための指標点として、見通しの良い方向に三脚でマークを立てた。絶対測定点と、指標点としたマークについて、その位置座標を GPS により測定することで真方位を得た。偏角は、位置座標と測角を合わせて計算することにより得られる。使用した GPS は、THALES Navigation 社の携帯型

受信機 Mobile Mapper である。この受信機は、測定時間を 30 分間以上確保した上で、後処理として国土地理院電子基準点との差分をとることにより、水平位置の誤差が 0.3 m 程度まで抑えられる。

なお、この GPS 端末による真方位測定の精度を検証する目的で、天測による真方位が既知である地磁気観測所女満別出張所構内で後日実験を行った。受信状態の良好な状態では天測真方位との差は 0.5' 程度、測位精度は 0.03 m 程度、受信状態を比較的悪くした状態では天測真方位との差は 5' 程度、測位精度は 0.3 m 程度と見積もられた。本稿では、この実験結果を参考にして、磁気点と指標点の双方に 0.3 m の測位誤差（受信状態が悪い場合）を仮定して、各々が逆方向にずれたときの値を推定真方位の誤差として算出した（第 2 表の偏角値欄の誤差に対応）。

4. 測定結果

今回の偏角・伏角および全磁力測定値を第 1 表にまとめる。偏角については、南から北に向かうに従って西偏が強くなる。厚岸の伏角が極めて大きいのは、南岸域の高磁気異常に対応したものである。女満別との偏角・伏角差が 1° 前後に達する地点もあり、全磁力の単純差に含まれる orientation 効果は無視できないものと思われる。

今回の偏角測定は、GPS を利用した真方位測定を仲介しているため、かなりの誤差を含むことは否めない。前節に述べた如く 0.3 m の測位誤差を仮定すると、偏角値には 10~20' の誤差が見込まれる。ただし、各磁気点に対して 2 つの指標点を用いているので、実際の偏角推定誤差を評価する手がかりとすることができる。厚岸と標茶では、それぞれの指標点から求めた偏角の差は 3~4 分、仁多では約 20 分の食い違いがある。厚岸と標茶では、GPS に起因する誤差範囲の数分の 1 であり、比較的良好な測定ができた可能性が高い。一方、仁多では GPS に起因する推定誤差とほぼ同程度の食い違いとなっており、偏角測定の信頼度は低い。仁多の測定で食い違いが大きい理由としては、GPS の受信時間が短かったことと、磁気点が林の中であったため受信状態が悪かったことが考えられる。なお、伏角測定は GPS 測量には依存せず、いずれの地点でも十分な精度が得られている。

5. 道東地域における先行研究のまとめ

道東地域における繰り返し地磁気測量は 1971 年に始まっている。気象庁地磁気観測所が、地震予知研究を目的として、緑・上春別・厚床の 3 地点で三成分絶対測量を実施したのがその最初である。北海道大学でも、地震予知計画の一環として、屈斜路・厚岸・標茶の 3 箇所で 1972 年から全磁力の繰り返し測量が行われている（国土地理院の一等磁気測量は 1950 年に遡るが、空間密度が低いため、ここでは除外している）。折しも、1973 年 6 月 17 日に根室半島沖地震（M7.4）が発生したことから、地震に伴う地磁気変化の有無が検討された。大川・他（1974）はこの地震の直後までの、山下・横山（1975）は 1974 年までの測量結果をまとめ、この地震に関連する全磁力変化は検出されなかったことを報告している。一方、地磁気観測所女満別出張所（1974）の報告によれば、この地震に関連して、偏角成分に 0.8 分の変化があったとされている。

その後も、両機関による繰り返し磁気測量は、不定期ながら続けられてきた。大島・他（1994）は、1994 年の測定値を加えて過去の観測結果を総括するとともに、1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震との関連についても議論し、1972~1994 年にかけて道東地域で発生した主要な地震に伴う明瞭な地磁気変化は検出されなかったと結論づけた。その一方で彼らは、磁気点毎の経年変化が直線トレンドに乗る

ことを明らかにし、かつ、その勾配に地域性が認められることから、地殻の tectonomagnetic 効果の可能性を指摘した。

地震に関連した地磁気変化の検出を目的とした観測とは別に、道東地域の磁気異常についての研究も進められてきた。特に、根釧原野の南岸域に存在する著しい高磁気異常は、高重力異常とあわせて古くから注目されていた。清野（1958）は、地理調査所（現在の国土地理院）の Bouguer 異常図と磁気異常図（鉛直分力）に自身の補足観測を加えて、南岸域の重磁力解析を行い、重力異常と磁気異常は同一の岩帯によるものと推定した。森・横山（1967）は、根室海峡において海上磁気測量を行い、地上観測とあわせて東岸域の全磁力異常分布を明らかにしている。1970年代には、地質調査所が全国で空中磁気測量による全磁力マッピングを精力的に進め、道東地方についても、知床半島および東海岸地域を除いて、分解能の高い全磁力磁気異常図が作成された（中塚・大熊, 2005）。その後、Sugisaki et al. (2001) および Nishida and Watanabe (2002) は、空中磁気測量の空白地域を補完すべく、地上の全磁力サーベイを精力的に行った。ここに至って、道東地域の全磁力異常はほぼその全貌が明らかになり、Nishida et al. (2004) による三次元不均質磁化構造のモデルが提示された。

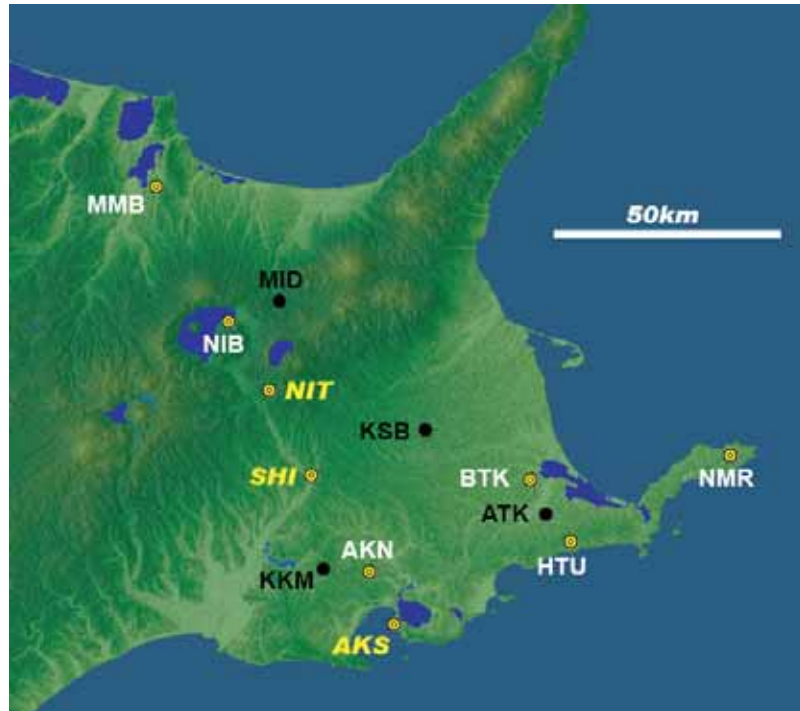
Nishida et al. (2004) はさらに、この不均質磁化構造に対して、地殻変動観測で得られている歪み速度を適用して、ピエゾ磁気効果の計算を行った。計算により得られた磁場変化率は、実際の全磁力観測の経年的トレンドの空間分布をよく説明した。すなわち、大島・他（1994）が指摘した tectonomagnetism 仮説が、数値計算によりサポートされたことになる。ただし、Nishida et al. (2004) の計算では、応力磁化係数を一般的に用いられている値より 1 桁大きく (10^{-2} MPa^{-1}) 仮定する必要がある。

ところで、コサイスマックな磁場変化については、山下・横山（1975）が、 10^{-4} bar^{-1} の応力磁化係数では 1973 年根室半島沖地震に伴うピエゾ磁気効果は 10^{-2} nT オーダーという見積もりを出し、検出限界以下であると結論づけている。一方、Nishida et al. (2004) の主張は、不均質な磁化構造がある場合には、磁場変化が構造境界付近に集中する効果が重要であるというもので、地点によっては均質媒質の場合よりも大きな磁場変化が期待されるとした。加えて、彼らの推測通り、天然の応力磁化係数が室内実験から期待される値よりも 1 桁大きいとすると、コサイスマックな磁場変化は検出可能であるということになる。現在のところ、この問題の決着は、来るべき根室沖地震に持ち越された形になっている。

北海道大学では、1990年代中頃から、プロトン磁力計による全磁力連続観測網を道東地域に整備してきた。最近の観測結果を、Nishida et al. (2004) にまとめられた 1990年代後半のデータとともに、スケールを合わせて示す。90年代に行われた連続観測は、1999年秋にいったん休止しており、2004年以降に再開・増設された。そのいくつかはセンサーの移設や交換により、絶対値としての連続性が確認されていないものもある。こうした事情があるものの、永年変化のトレンドを過去と現在で比較すると、多くの磁気点で変化率は一定ではないことがわかる。例えば、NIB では 1990年代後半の減少傾向は最近では微増に転じており、KKM では 1990年代にほぼゼロであった永年変化のトレンドが、近接した AKS では最近明瞭な増加を示している。また、東部南岸の HTU では、 2.6 nT/yr に達する顕著な増加傾向が観測されている。これらの観測事実は、Nishida et al. (2004) が提起したモデル（第 2 図）に修正を迫るものであるが、既に述べたように、orientation 効果の補正を行って吟味しなければならない。今後、順次絶対測量を実施して議論を深めたい。なお、今回の測量では、GPS による真方位測定の限界から、偏角測定の精度が十分に上げられなかった。今後の測定では、真方位測定の精度を向上させるため、ジャイロコンパスの利用を検討している。

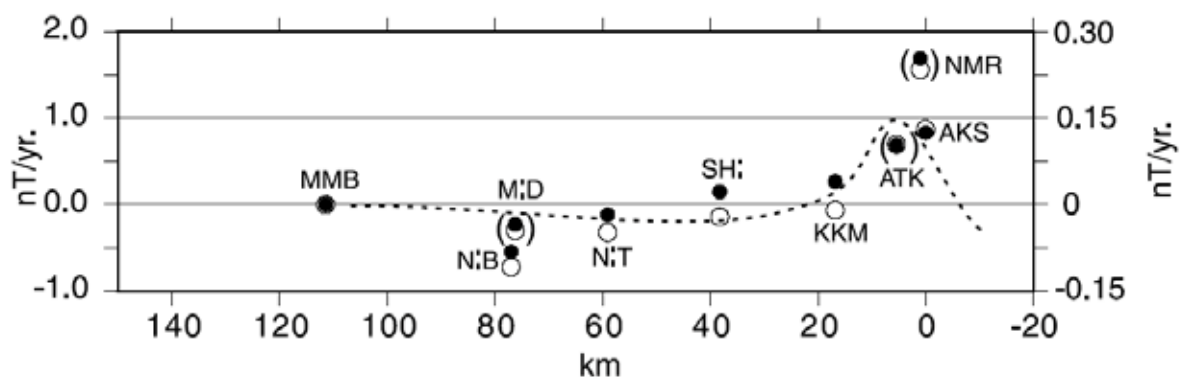
参考文献

- 地磁気観測所技術報告, 34, 特別号観測指針, 85-122, 1994.
- 長谷川一美・室松富二夫・菅原政志・橋本雅彦・小池捷春・水野喜昭, 北海道東部における地震予知観測及び厚床付近の CA 永年変化観測, 地磁気観測所技術報告, 22, 3, 49-63, 1983.
- 気象庁地磁気観測所女満別出張所, 1973 年 6 月の根室沖地震に伴う地磁気変化について, 1973 年 6 月 17 日根室半島沖地震調査報告, 72-75, 1974.
- 森 俊雄・横山 泉, 北海道東部の地磁気異常(序報), 北海道大学地球物理学研究報告, 17, 15-21, 1967.
- Nishida, Y., Y. Sugisaki, K. Takahashi, M. Utsugi, and H. Oshima, Tectonomagnetic study in the eastern part of Hokkaido, NE Japan: Discrepancy between observed and calculated results, Earth Planets Space, 56, 1049-1058, 2004.
- Nishida, Y., M. Utsugi, and T. Mogi, Tectonomagnetic study in the eastern part of Hokkaido, NE Japan (II): Magnetic fields related with the 2003 Tokachi-oki earthquake and the 2004 Kushiro-oki earthquake, Earth Planets Space, 59, 1181-1186, 2007.
- Nishida, Y., and T. Watanabe, Geomagnetic Survey in the Eastern Part of Hokkaido, NE Japan (2): Supplemental Data Report, Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics), 11, 895-900, 2002.
- 大川史郎・山下 済・横山 泉, 北海道東部地方における根室半島沖地震後の重力および地磁気の再測, 1973 年 6 月 17 日根室半島沖地震調査報告, 67-71, 1974.
- 大島弘光・前川徳光・宇津木充・西田泰典, 1993 年釧路沖地震後の北海道東部における重力および全磁力の再測定, 北海道大学地球物理学研究報告, 57, 23-33, 1994.
- 清野政明, 北海道東部(根釧原野)における重力及び地磁気異常, 北海道大学地球物理学研究報告, 6, 9-16, 1958.
- Sugisaki, Y., K. Takahashi and Y. Nishida, Geomagnetic Survey in the Eastern Part of Hokkaido, NE Japan: A Data Report, Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics), 11, 811-820, 2001.
- 山下 済・横山 泉, 北海道東部における地磁気全磁力の経年変化の観測(第1報), 北海道大学地球物理学研究報告, 33, 31-39, 1975.
- 中塚 正・大熊茂雄, 日本空中磁気異常データベース. 数値地質図, P-6, 地質調査総合センター, 2005.



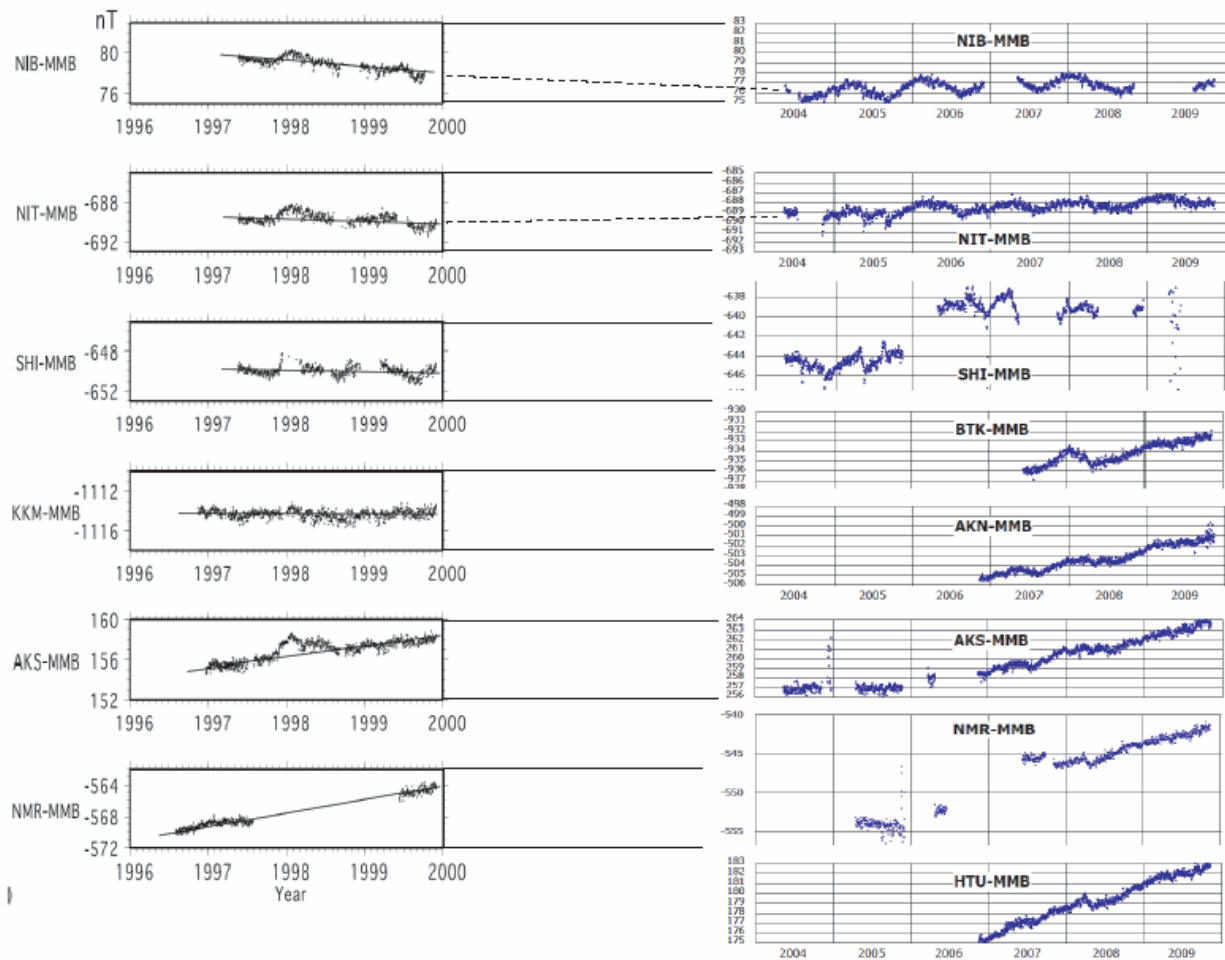
第 1 図：道東地域の磁気点分布．MID, KSB, ATK は気象庁地磁気観測所の磁気点で，現在は観測が行われていない．MMB は気象庁地磁気観測所女満別出張所．KKM は北海道大学の磁気点で現在は観測を行っていない．それ以外は 2010 年現在稼働中の北海道大学の全磁力連続観測点．本稿では，NIT, SHI, AKS の絶対測量を報告した．

Fig.1: Magnetic stations in the eastern Hokkaido. MID, KSB, and ATK indicate the repeat sites of Japan Meteorological Agency (presently inactive). MMB denotes Memambetsu Magnetic Observatory of JMA. Hokkaido University runs other stations as continuously recording total field sites except for KKM which was shifted to AKN. Absolute measurements at NIT, SHI, and AKS are reported in this paper.



第 2 図：各磁気点の永年変化トレンド (Nishida et al., 2004)．横軸は海岸線からの距離 (km)．左軸は 1990 年代の観測から算出された永年変化トレンド (白丸および黒丸に対応)，右軸は不均質磁化構造に対してプレート沈み込みに伴う歪速度を与えた場合の応力磁気効果による変化場のトレンド (点線に対応)．左右の軸でスケールが異なることに注意．

Fig.2: Yearly rate of secular variations at each station (after Nishida et al., 2004). Horizontal axis shows distance from the south coast. Vertical axes indicate the yearly rate. Left axis corresponds to the observed rate in 1990s (open and closed circles), while right axis does to the calculated rate of piezomagnetic field due to compressional stress over inhomogeneously magnetized crust (dashed line). Note that vertical scale differs between left and right axes.



第3図：女満別を参照点とした全磁力変化（単純差日平均値）。2000年以前のプロットはNishida et al. (2004) から引用。2000年から2003年は観測を休止していたためデータがない。また、NITおよびNIB以外の磁気点では2004年以前と以後で絶対値の連続性が確認できていない。

Fig.3: Total field changes referred to MMB (daily averages of simple difference). Plots before 2000 are after Nishida et al. (2004). Note that data is not available in 2000-2003 because of closure of the stations. Absolute continuity between 1990s and 2000s is not maintained due to sensor shift except for NIB and NIT.

第 1 表：本研究で行った絶対測量の結果（測定日：2009 年 11 月 10～12 日）

Table 1: Results of the absolute measurements in this study

偏角（declination）： * は指標の違いによる差ではなく，磁気儀による磁北測定セット内でのばらつきを表す

磁気点 station	指標 mark	偏角（西偏） decli (w+)	標準偏差 SD*	最大-最小 Max-Min*	基線長 baseline	観測値数 num	地理院 偏角図 2000.0 値	女満別毎時値 MMB hourly
厚岸 (AKK)	1	7° 57.951 ± 11.7	0.137	0.299	176.75 m	4	7° 50	8° 45.4
	2	8° 00.203 ± 17.5			118.13 m	4		
標茶 (SHI)	1	8° 48.575 ± 10.6	0.128	0.277	195.40 m	4	9° 00	8° 45.2
	2	8° 44.835 ± 13.5			152.97 m	4		
仁多 (NIT)	1	9° 30.828 ± 23.3	0.073	0.103	88.56 m	2	9° 10	8° 42.6
	2	9° 11.277 ± 15.6			132.59 m	2		

伏角（inclination）

磁気点 station	伏角 inclination	標準偏差 SD	最大 最小 Max-Min	観測値数 number	地理院伏角図 2000.0 値	女満別毎時値 MMB hourly
厚岸 (AKK)	57° 34.018	0.097	0.138	2	58° 20	58° 9.5
標茶 (SHI)	57° 06.063	0.012	0.025	4	57° 00 ~ 10	58° 9.5
仁多 (NIT)	56° 58.746	0.023	0.050	4	57° 20	58° 9.5

全磁力（total intensity）

磁気点 station	全磁力 total intensity	標準偏差 SD	観測値数 number	地理院全磁力図 2000.0 値	女満別毎時値 MMB hourly
厚岸 (AKK)	49,816.5 nT	0.54 nT	6	50,300 nT	49,629 nT
標茶 (SHI)	49,002.6 nT	0.17 nT	10	48,800 nT	49,637 nT
仁多 (NIT)	48,861.6 nT	0.03 nT	10	49,200 nT	49,630 nT