



Title	道東地域の地磁気永年変化と三成分絶対測量（続報）
Author(s)	三嶋， 渉； 橋本， 武志； 茂木， 透 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告， 78， 69-82
Issue Date	2015-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.78.69
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58251
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_78_p69-.pdf



道東地域の地磁気永年変化と三成分絶対測量（続報）

三嶋 渉

北海道大学大学院理学院

橋本 武志・茂木 透

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

森山多加志・仰木 淳平・森永 健司

気象庁地磁気観測所

(2015 年 2 月 3 日受理)

Geomagnetic secular changes in eastern Hokkaido (Part 2)

Wataru MISHIMA

Graduate School of Science, Hokkaido University

Takeshi HASHIMOTO, Tohru MOGI

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

Takashi MORIYAMA, Junpei OHGI, Kenji MORINAGA

Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

(Received February 3, 2015)

Regional to subregional-scale anomaly in the rate of geomagnetic secular changes have been observed in eastern Hokkaido. The origin of such anomalous changes has long been discussed. Based on the total field records, some previous studies suspected the piezomagnetic effect is due to stress loading accompanying subducting plate motion as the major cause. We started three-component absolute measurements at eight continuous magnetic stations in 2009, aiming at revealing the mechanisms of the anomaly. This study reports the results of the absolute measurements up to 2014, as well as the continuous total field records.

Although we have performed the absolute measurements only twice or three times at each station, it is readily recognized that the rate of secular change with respect to Memambetsu in horizontal and vertical components differs from site to site. Steeper trends near the southern coast are the characteristics similar to the case in the total field. Declination looks more complicated, presumably showing clockwise rotation in the northern area, while anti-clockwise in the south. Considering the compressional stress region of eastern Hokkaido and existence of highly-magnetized rocks in the coastal area, the piezomagnetic effect is still a candidate for these spatiotemporal variations.

Based on the available dataset, we conclude that the anomaly in the total field is not brought by the so-called orientation effect, and that there must be such real changes of tens to hundred km scale, whatever the cause is. It should be the next step in the future works to verify the piezomagnetic hypothesis by comparing the three-component rate of change through a numerical simulation.

I. は じ め に

北海道の太平洋沿岸では、太平洋プレートの沈み込みに伴った大地震が、数十年間隔で繰り返して発生している。また、北海道東部地域（以後、道東地域）では、地震間に西北西－東南東方向の短縮歪みも観測されている（石川・他，1999）。加えて、道東地域には、太平洋沿岸部の根釧原野や根室半島に磁気異常の分布が知られている（例えば、清野，1958，森・横山，1967）。こうした背景から、道東地域では地震に伴ったコサイスミックな地磁気変化や地震間の応力蓄積過程で、地磁気や重力変化が生じているのではないかと考えられている。

1973年6月17日、根室半島沖地震（M7.4）が発生した。この地震では、コサイスミックな地磁気変化の有無が検討された。検討結果には、地震による全磁力変化が検出されなかったと結論づけた報告（大川・他，1974）と、偏角成分に0.8'の変化が検出されたと報告したもの（地磁気観測所女満別出張所，1974）が提示された。その後、1993年1月15日、釧路沖地震（M7.5）が発生した。大島・他（1994）は、過去の観測結果に1994年の測定値を加えて、全磁力変化と1993年釧路沖地震との関連を検討した。彼らは、釧路沖地震と関連した全磁力変化はなかったと結論づけたが、その一方で、全磁力の永年変化の傾きは観測点ごとに異なっていることを指摘した。Nishida et al. (2004) は、この地域性のある永年変化率の原因を、プレート運動の応力積荷によるピエゾ磁気求めた。その上で、道東地域での稠密な全磁力測定（Sugisaki et al., 2001; Nishida and Watanabe, 2002）により推定した地殻の不均質構造を用いて、ピエゾ磁気効果で期待される全磁力変化率の空間分布を計算した。計算結果は、観測された全磁力変化率の空間分布を概ね説明するものとなった。ただし、観測結果を説明するためにこの計算で仮定された応力磁化係数は、室内実験から知られている値と比べて一桁大きいものであった。

これまでの検討で得られた成果を踏まえて、地域性のある永年変化を地磁気三成分で定量的に評価を行い、道東地域の磁気異常や地震に関連した地磁気変化のメカニズムを解明するため、北海道大学では2009年より地磁気三成分絶対測量を始めた。橋本・他（2012）は、2011年までの絶対測量結果を用いて、参照点の気象庁地磁気観測所女満別観測施設（MMB）と各観測点の間で、伏角と偏角が異なることにより、両者の全磁力単純差に見かけ上の変化が表れるオリエンテーション効果について評価した。検討の結果、オリエンテーション効果を補正しても、観測点ごとに異なる永年変化のトレンドにはサブリージョナル・スケールの異常が残ることが明らかとなった。しかし、オリエンテーション効果の補正だけでは、ピエゾ磁気効果仮説での空間分布とは整合しなかった。そこで、橋本・他（2012）は、オリエンテーション効果の補正に加えて、グローバル

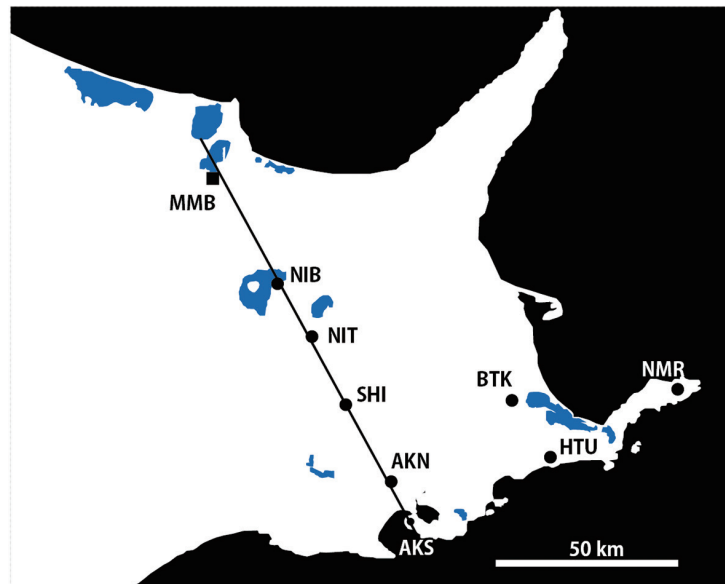


Fig. 1. Magnetic stations in the eastern Hokkaido. Solid circles indicate the magnetic stations of Hokkaido University. MMB shows Memambetsu Magnetic Observatory of JMA. The line connecting AKS and MMB will be used in Fig. 4.

地磁気モデル (IGRF-11) から推定した地球深部起源の影響を取り除いた残差を求めた。その結果, Nishida et al. (2004) で提唱されたピエゾ磁気効果モデルと比較的近い空間分布を得た。このことは, 道東地域の永年変化の原因を検証する際に, グローバル・スケールの永年変化の混入も考慮すべきであることを意味する。

以上のように, 道東地域の磁気異常や地震に関わる地磁気変化に対して, いくつかの観測事実が明らかにされ, その解釈が提案されてきた。しかし, それらのメカニズムについて最終的な結論は出ていない。

2009 年より開始された道東地域での地磁気三成分測量は 2014 年まで継続的に実施され, 既設の全磁力連続観測点 8 点 (Fig. 1) で 2 回あるいは 3 回の測量データが蓄積された。本稿では, 各磁気点での 2014 年までの観測結果をまとめ, 三成分および全磁力の永年変化の特徴について考察する。

II. 観 測 方 法

偏角と伏角の測定には, 非磁性セオドライト (Carl Zeiss 社 THEO-010B) に一軸のフラックスゲート・センサ (Bartington 社 MAG-01H) を搭載した FT 型磁気儀 (2012 年と 2014 年の測量は地磁気観測所所有の 1" 読み, 2013 年は京都大学所有の 1" 読み機材) を使用した。

各観測点では, プロトン磁力計による全磁力連続観測が行われている。このセンサとの干渉を

避けるため、偏角と伏角を測定する絶対観測点はセンサから数 10 m ないし 100 m 程度離れた位置にプラスチック杭で設置されている。測量時には、この絶対観測点に非磁性の三脚を設置し、杭の上面から 79.5 cm の位置に脚頭面がくるようにする。これは、後述するオーバーハウザー磁力計（以後、OHM）のセンサと FT 型磁気儀の中心の高さを一致させるためである。偏角と伏角は、磁気儀を脚頭に固定して測定する。三成分を求めるためには、偏角・伏角と同一の位置で全磁力を測定する必要があるが、両測定は同時には行うことができない。そのため、全磁力測定は、偏角・伏角測定の前後に OHM を用いて測定した。この全磁力測定とは別に、絶対観測点から数 10 m 程度離れた仮参照点に OHM を設置して、絶対観測点での測定と平行して全磁力を毎 5 秒で自動計測した。この仮参照点での計測により、偏角と伏角測定を実施した時刻の絶対観測点での全磁力値を間接的に推定する。絶対観測点および仮参照点の全磁力測定には、北海道大学所有の OHM GSM-19（GEM-Systems 社製、分解能 0.01 nT）を使用した。なお、2013 年の仁多（NIT）観測点では、仮参照点を設けず、既設のプロトン磁力計による毎 1 分値で代用した。2012 年までの絶対測定の実行回数は、各観測点で 6 回から 10 回（2 セットから 4 セット）で実施してきた。しかし、目標とする観測精度である 1' を得るためには、それほど多くの測定回数を要しないことから、省力化のため、2013 年以降は各観測点での絶対測定の実行回数を 4 回（1 セット）に減らして実施した。

偏角を計測するためには、真方位を測定する必要があるが、その測定はジャイロトータルステーションで行った。ジャイロトータルステーションは、東京大学地震研究所所有のソキア・トプコン製ジャイロスコープ GP1X（精度公称値：標準偏差 20"）およびトータルステーション SETX となる装置を用いた。2009 年の測量では、携帯型 GPS を利用して真方位を測定したが十分な精度に達しないことが分かったため、2010 年以降は基本的にジャイロトータルステーションを用いている。ただし、2014 年の厚岸北（AKN）、初田牛（HTU）での測量では、安定した地上構造物を方位標とすることによりジャイロスコープによる真方位測定を省略し、2012 年の真方位を偏角測定の見準として採用した。なお、初田牛（HTU）では、2014 年の測量時に FT 型磁気儀による天測を実施した。しかし、過去に用いた方位標について真方位を確認したところ、ジャイロで 2012 年に測定した同じ方位標の真方位との間に、約 1' の差が確認された。橋本・他（2012）によると、2011 年に仁多（NIT）で行われた天測とジャイロ測定の見準による真方位測定で 40" から 1' の差があったと報告されている。2014 年の初田牛（HTU）の測量で生じた 1' 程度の差はこの報告結果に近い値である。したがって、天測との約 1' の差は、本研究で用いたジャイロに固有の見差であると考えられるが、この見差が時間的にどの程度安定しているのかは現時点で不明である。

Ⅲ. 測 定 結 果

2012 年から 2014 年までの観測は、2012 年 10 月に初田牛（HTU）、厚岸北（AKN）、別海（BTK）、

仁伏（NIB）の4点，2013年10月に厚岸（AKS），根室（NMR），標茶（SHI），仁多（NIT）の4点，2014年10月に初田牛（HTU），厚岸北（AKN），別海（BTK），仁伏（NIB）の4点で実施した。

観測を開始した2009年以降のすべての測量を合わせると，厚岸（AKS），初田牛（HTU），厚岸北（AKN），別海（BTK），仁伏（NIB）の6点で計3回ずつ，根室（NMR）と標茶（SHI）の2点では計2回ずつの絶対測量を実施したことになる。なお，仁多（NIT）では，下草刈りや樹木伐採等の土地改変により，たびたび磁気点が亡失するため，2013年の測量時に，プロトン磁力計のセンサ柱近傍に絶対磁気点を移設して保全することとした。

Table 1a. Summary of the absolute measurements (declination) The error ranges in the fourth column are based on the positioning errors of GPS for 2009 and the typical determination error of true north by the gyro-station used in this study for other years. Standard deviations and “Max - Min” are derived from theodolite operation.

Station Name	Measurement Date (UT)	Mark Number	Declination (Westward)	Standard Deviation	Max - Min	No. of Measurement	Declination at MMB	Method of True Bearing
AKS (厚岸)	2009/11/10 03h	1	7° 58.0' ± 11.7'	0.14'	0.30'	4	8° 45.4'	GPS
	2009/11/10 03h	2	8° 00.2' ± 17.5'			4		
	2011/10/19 02h	1,2	8° 00.9' ± 1'	0.22'	0.53'	4	8° 49.0'	Gyro
	2011/10/19 03h	1,2	8° 04.0' ± 1'	0.13'	0.30'	4	8° 51.3'	
	2013/10/31 06h	1,2	8° 06.9' ± 1'	—	—	1	8° 52.5'	Gyro
	2013/10/31 06h	1,2	8° 06.4' ± 1'	—	—	1	8° 52.0'	
SHI (標茶)	2009/11/12 05h	1	8° 48.6' ± 10.6'	0.07'	0.28'	4	8° 45.2'	GPS
	2009/11/12 05h	2	8° 44.8' ± 13.5'			4		
	2013/10/30 00h	1,2	8° 47.3' ± 1'	—	—	1	8° 46.7'	Gyro
	2013/10/30 01h	1,2	8° 49.8' ± 1'	—	—	1	8° 49.2'	
NIT (仁多)	2009/11/12 01h	1	9° 30.8' ± 23.3'	0.13'	0.13'	2	8° 42.6'	GPS
	2009/11/12 01h	2	9° 11.3' ± 15.6'			2		
	2011/10/21 00h	1	9° 12.6' ± 1'	0.37'	0.83'	4	8° 43.4'	Gyro
	2011/10/21 01h	2	9° 15.4' ± 1'	0.32'	0.83'	4	8° 46.8'	
	2013/10/29 01h	1,2	9° 14.5' ± 1'	—	—	1	8° 49.6'	Gyro
	2013/10/29 02h	1,2	9° 16.1' ± 1'	—	—	1	8° 51.5'	
AKN (厚岸北)	2010/10/19 02h	1	8° 48.1' ± 1'	0.20'	0.69'	4	8° 47.8'	Gyro
	2012/10/24 03h	1	8° 52.2' ± 1'	0.19'	0.45'	4	8° 51.0'	Gyro
	2012/10/24 03h	2	8° 52.2' ± 1'	0.19'	0.45'	4	8° 51.0'	
	2014/10/15 02h	1	8° 58.7' ± 1'	—	—	1	8° 57.2'	—
	2014/10/15 03h	2	8° 59.0' ± 1'	—	—	1	8° 56.7'	
BTK (別海)	2010/10/20 01h	1	8° 46.6' ± 1'	0.20'	0.73'	3	8° 46.4'	Gyro
	2012/10/25 05h	1	8° 51.9' ± 1'	0.18'	0.41'	4	8° 50.8'	Gyro
	2014/10/16 01h	1	8° 50.1' ± 1'	—	—	1	8° 52.8'	Gyro
HTU (初田牛)	2010/10/20 05h	1	8° 23.7' ± 1'	0.06'	0.20'	3	8° 48.2'	Gyro
	2012/10/24 23h	1	8° 22.6' ± 1'	0.10'	0.23'	4	8° 46.6'	Gyro
	2012/10/25 00h	1	8° 22.9' ± 1'	0.26'	0.62'	4	8° 46.7'	
	2014/10/15 06h	1	8° 31.0' ± 1'	—	—	1	8° 54.9'	Celestial
NIB (仁伏)	2010/10/21 03h	1	8° 41.3' ± 1'	0.03'	0.18'	3	8° 47.4'	Gyro
	2012/10/26 01h	1	8° 40.9' ± 1'	0.14'	0.32'	4	8° 47.0'	Gyro
	2012/10/26 02h	1	8° 43.9' ± 1'	0.08'	0.11'	2	8° 46.9'	
	2014/10/16 07h	1	8° 40.9' ± 1'	—	—	1	8° 54.3'	Gyro
NMR (根室)	2011/10/20 00h	1	8° 25.2' ± 1'	0.15'	0.20'	4	8° 44.3'	Gyro
	2011/10/20 01h	2	8° 24.9' ± 1'	0.18'	0.29'	4	8° 46.8'	
	2013/10/30 23h	1,2	8° 33.1' ± 1'	—	—	1	8° 52.4'	Gyro
	2013/10/31 00h	1,2	8° 33.2' ± 1'	—	—	1	8° 52.4'	

Table 1b. Summary of the absolute measurements (inclination).

Station Name	Measurement Date (UT)	Inclination	Standard Deviation	Max - Min	No.of Measurement	Inclination at MMB
AKS (厚岸)	2009/11/10 03h	57° 34.0'	0.10'	0.14'	2	58° 19.7'
	2011/10/19 02h	57° 38.9'	0.22'	0.48'	4	58° 14.9'
	2011/10/19 03h	57° 37.1'	1.33'	2.60'	4	58° 14.9'
	2013/10/31 06h	57° 43.7'	—	—	1	58° 19.7'
	2013/10/31 06h	57° 43.6'	—	—	1	58° 19.7'
SHI (標茶)	2009/11/12 05h	57° 06.1'	0.01'	0.03'	4	58° 9.5'
	2013/10/30 00h	57° 16.3'	—	—	1	58° 19.7'
	2013/10/30 01h	57° 16.1'	—	—	1	58° 19.5'
NIT (仁多)	2009/11/12 01h	56° 58.7'	0.02'	0.05'	4	58° 9.5'
	2011/10/21 00h	57° 01.7'	0.08'	0.19'	4	58° 16.0'
	2011/10/21 01h	57° 01.1'	0.08'	0.19'	4	58° 15.6'
	2013/10/29 01h	57° 03.8'	—	—	1	58° 19.0'
	2013/10/29 03h	57° 03.4'	—	—	1	58° 18.4'
AKN (厚岸北)	2010/10/19 02h	57° 57.8'	0.03'	0.02'	2	58° 12.3'
	2012/10/24 03h	58° 03.2'	0.05'	0.12'	4	58° 17.7'
	2014/10/15 02h	58° 09.1'	—	—	1	58° 23.8'
BTK (別海)	2010/10/20 01h	57° 39.8'	0.02'	0.06'	3	58° 13.2'
	2012/10/25 05h	57° 43.4'	0.04'	0.09'	4	58° 16.8'
	2014/10/16 01h	57° 49.1'	—	—	1	58° 22.7'
HTU (初田牛)	2010/10/20 05h	58° 16.4'	0.06'	0.07'	3	58° 11.7'
	2012/10/24 23h	58° 21.5'	0.05'	0.11'	4	58° 17.6'
	2012/10/25 00h	58° 21.9'	0.11'	0.24'	4	58° 18.1'
	2014/10/15 06h	58° 25.6'	—	—	1	58° 21.5'
NIB (仁伏)	2010/10/21 03h	57° 23.3'	0.04'	0.08'	3	58° 11.6'
	2012/10/26 01h	57° 29.3'	0.04'	0.08'	4	58° 18.2'
	2012/10/26 02h	57° 29.2'	0.01'	0.01'	2	58° 18.2'
	2014/10/16 07h	57° 32.2'	—	—	1	58° 20.8'
NMR (根室)	2011/10/20 00h	57° 37.6'	0.02'	0.04'	3	58° 15.3'
	2011/10/20 01h	57° 38.2'	0.05'	0.12'	4	58° 15.6'
	2013/10/30 23h	57° 43.1'	—	—	1	58° 20.7'
	2013/10/31 00h	57° 43.3'	—	—	1	58° 20.9'

2009 年以降のすべての測量結果を Table 1a ~ 1c に示す。厚岸 (AKS) や初田牛 (HTU) など南岸部では偏角が西偏 8° 程度を示し、内陸部へ向かうにつれて西偏が強くなり、仁多 (NIT) でピークをとり、その北側に位置する仁伏 (NIB)、女満別 (MMB) に向かって西偏が弱くなってゆく。また、厚岸 (AKS)、初田牛 (HTU)、厚岸北 (AKN) などは相対的に低緯度であるにも関わらず、伏角が大きいことが分かる。これら偏角と伏角の空間的な特徴は、2011 年までに報告された結果と同じである。

また、連続観測点 (以後、連続点) における 96 年以降の全磁力変化 (女満別との単純差) を Fig. 2 に示す。なお、Fig. 2 の連続記録に重ねてプロットした折れ線グラフは絶対測量における全磁力測定の結果を示している。Fig. 2 を見ると、過去に指摘されてきたように女満別 (MMB) から南に向かうにつれて永年変化の傾きが大きくなっていることが明瞭である。また、絶対測量の結果は、概ね連続観測のトレンドを反映するものとなっている。

Table 1c. Summary of the absolute measurements (total field) Values with Asterisks (*) were originally reported in Hashimoto et al. (2012) incorrectly.

Station Name	Measurement Date (UT)	Total Field	Standard Deviation	No.of Measurement	Total Field at MMB	K-index at MMB
AKS (厚岸)	2009/11/10 03h	49,816.2 nT	0.54 nT	6	49,629 nT	0
	2011/10/19 02h	49,855.1 nT (*)	0.40 nT	10	49,670 nT	11
	2011/10/19 03h	49,865.3 nT (*)	1.49 nT	10	49,677 nT	11
	2013/10/31 06h	49,960.2 nT	0.49 nT	4	49,770 nT	11
	2013/10/31 06h	49,958.4 nT	0.74 nT	4	49,767 nT	11
SHI (標茶)	2009/11/12 05h	48,916.6 nT (*)	0.17 nT	10	49,673 nT	1
	2013/10/30 00h	49,024.8 nT	1.40 nT	4	49,747 nT	22
	2013/10/30 01h	49,023.8 nT	0.22 nT	4	49,745 nT	22
NIT (仁多)	2009/11/12 01h	48,861.6 nT	0.03 nT	10	49,630 nT	1
	2011/10/21 00h	48,910.5 nT (*)	3.03 nT	10	49,664 nT	5
	2011/10/21 01h	48,908.0 nT (*)	1.61 nT	10	49,659 nT	5
	2013/10/29 01h	49,048.1 nT	2.42 nT	4	49,748 nT	16
	2013/10/29 02h	49,059.8 nT	4.90 nT	4	49,763 nT	16
AKN (厚岸北)	2010/10/19 02h	49,098.7 nT	1.76 nT	6	49,646 nT	13
	2012/10/24 03h	49,168.9 nT	1.59 nT	10	49,717 nT	5
	2014/10/15 02h	49,230.7 nT	2.30 nT	4	49,777 nT	15
BTK (別海)	2010/10/20 01h	48,559.7 nT	0.22 nT	8	49,638 nT	8
	2012/10/25 05h	48,661.6 nT	0.17 nT	10	49,738 nT	3
	2014/10/16 01h	48,695.0 nT	0.92 nT	4	49,766 nT	14
HTU (初田牛)	2010/10/20 05h	49,753.0 nT	0.31 nT	8	49,658 nT	8
	2012/10/24 23h	49,820.2 nT	0.96 nT	10	49,723 nT	5
	2012/10/25 00h	49,812.6 nT	0.55 nT	10	49,714 nT	3
	2014/10/15 06h	49,905.0 nT	0.60 nT	4	49,800 nT	15
NIB (仁伏)	2010/10/21 03h	49,689.6 nT	0.67 nT	8	49,659 nT	6
	2012/10/26 01h	49,748.1 nT	0.31 nT	10	49,715 nT	5
	2012/10/26 02h	49,751.6 nT	0.78 nT	6	49,719 nT	5
	2014/10/16 07h	49,839.0 nT	0.06 nT	4	49,806 nT	14
NMR (根室)	2011/10/20 00h	48,999.2 nT (*)	1.41 nT	10	49,674 nT	7
	2011/10/20 01h	48,986.4 nT (*)	0.87 nT	10	49,666 nT	7
	2013/10/30 23h	49,086.0 nT	0.35 nT	4	49,758 nT	22
	2013/10/31 00h	49,081.0 nT	1.40 nT	4	49,752 nT	11

Ⅳ．地磁気三成分の永年変化の特徴

2009 年から 2014 年の絶対測量の結果から三成分永年変化の特徴を明らかにする。絶対測量での直接的な測定量は、偏角 (D)、伏角 (I)、全磁力 (F) であるが、本稿では、偏角 (D)、水平分力 (H)、鉛直分力 (Z) の組み合わせで地磁気三成分を表示する。H と Z は、磁気儀による D と I それぞれの測定時刻における絶対点の F を仮参照点の F から推定した値を用いて計算した。サブリージョナル・スケールの永年変動を見やすくするために、Nishida et al. (2004) や橋本・他 (2012) が全磁力について行ったのと同様に、各成分について女満別 (MMB) を参照点とした同時刻の単純差 (ΔD , ΔH , ΔZ) を求めた。このように女満別 (MMB) を参照点とすることは、女満別 (MMB) における永年変化からのずれとして各観測点の変動を見ることになる。これは、女

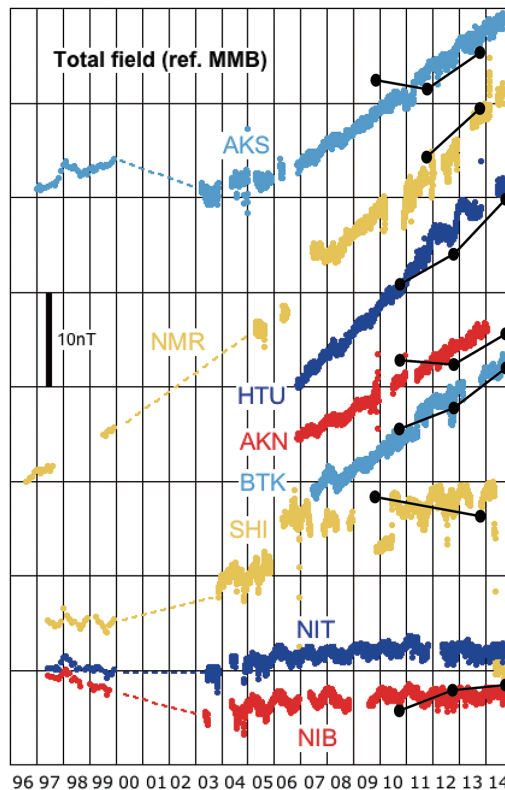


Fig. 2. Total field changes referenced to MMB since 1996 through 2014 at the magnetic continuous stations of Hokkaido University. Solid circles with lines show absolute repeat measurements (2009–2014) which are drawn from the same data as Fig. 3. Trace are aligned in the order from south (top) to north (bottom) along the line shown in Fig. 1.

満別（MMB）の永年変化がこの地域を代表する安定的なものであると暗に仮定していることになるが、実際にはそうでない可能性もあることには注意しておく必要がある。

このようにして求めた、三成分（ ΔD , ΔH , ΔZ ）及び全磁力（ ΔF ）の時系列プロットを Fig. 3 に示す。時系列での変化量に着目するため、縦軸を適当にずらしてプロットした。なお、仁多（NIT）は観測点の移設を2度行っており、時間変化を議論することができないため Fig. 3 には掲載していない。

誤差は、次のように考慮した。D の測定では、真方位の決定精度（ジャイロの公称標準偏差： $\pm 20''$ ，実際の推定総合誤差： $\pm 1'$ ）が磁気方位のそれ（数 $''$ ）よりも誤差要因として格段に大きい。そのため、 ΔD のエラーバーは、GPS を用いた手法（2009 年のみ実施）及びジャイロトータルステーションでの真方位測定での精度で表示した。I の測定誤差は、気象庁地磁気観測所がまとめた、FT 型磁気儀による偏角・伏角の観測精度の報告（小池，2002）と野外での FT 型磁気儀による観測状況の報告（橋本・他，1995）を参考とした。小池（2002）は、地磁気観測所が採用している FT 型磁気儀の測定手順における D と I の観測値精度が概ね $1''$ と報告した。橋本・他

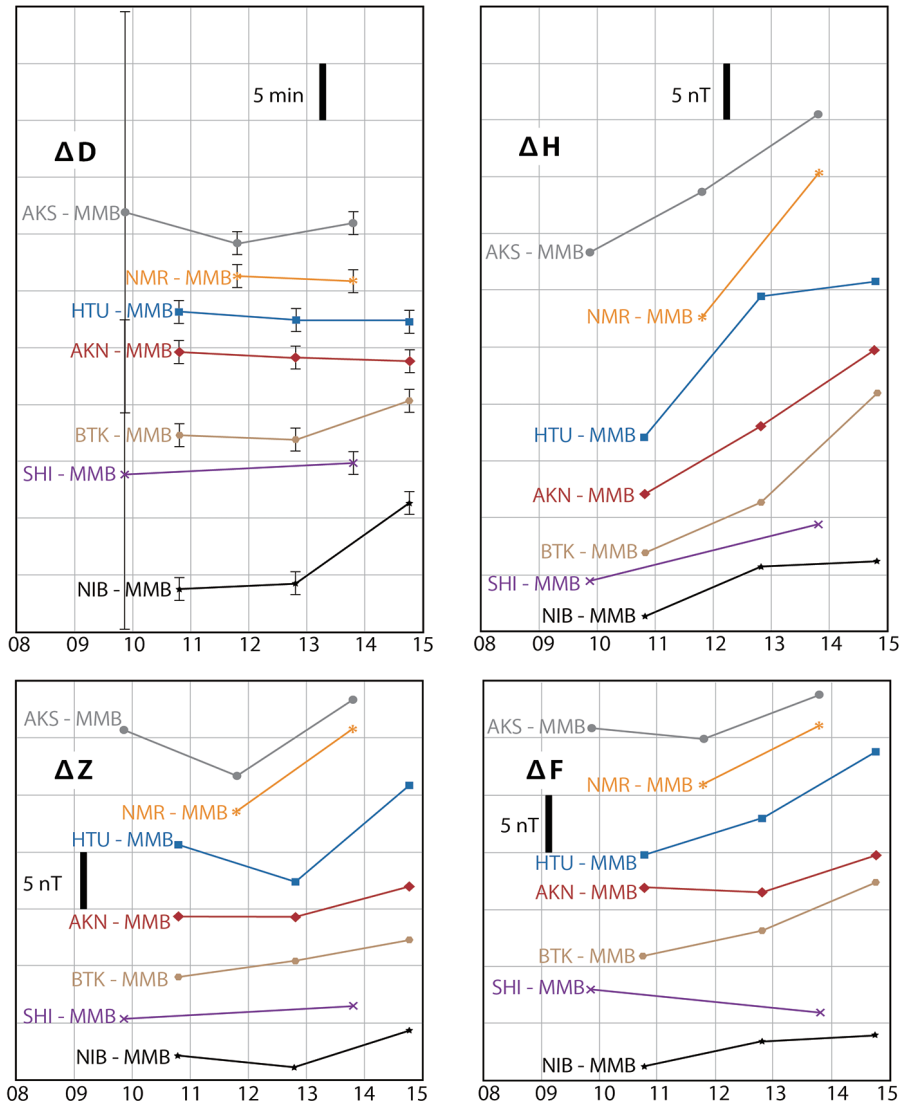


Fig. 3. Summary of the absolute measurements (2009-2014) referred to MMB. Panels in the upper-left, upper-right, lower-left, and lower-right show declination (eastward positive), horizontal component (northward positive), vertical component (downward positive), and total field, respectively. Error bars in the ΔD plot are adopted from Table 1a. Note that the orientation effect is not taken into account in the ΔF plot. Traces in each panel are aligned in the order from south (top) to north (bottom) along the line shown in Fig. 1.

(1995) は、野外での FT 型磁気儀の観測と室内の基準器の観測状況を比較し、野外観測での I の観測精度は概ね室内で実施する場合と同等であるとまとめた。本研究では、1 観測における DI 測量の反復回数が橋本・他 (1995) でのそれよりも少ない場合がほとんどである。しかしながら、磁気儀の 4 姿勢の平均値 (1 セット) の持つ誤差が概ね 1" 程度との報告 (小池, 2002) を踏まえると、I の測定誤差は本研究で目安とする精度 ($1' \approx 10 \text{ nT}$) に対して十分に小さい。このため、I

と F を用いて計算される H と Z の誤差も十分小さいと考え、 ΔH と ΔZ には、エラーバーを付さないこととした。

次に、三成分と全磁力の永年変化の特徴を述べる。まず、 ΔD は、別海 (BTK) よりも背弧側では偏角の西偏が時間の経過とともに弱くなる傾向、海溝側では西偏が強くなる傾向を示している。南岸域では観測点ごとの変化率に顕著な差は認められないが、内陸部では仁伏 (NIB) での変化率が突出して大きい。ただし、 ΔD に関しては、測定上の問題により 2009 年の測定結果 (AKS 及び SHI) に大きな誤差が見込まれるため、上記の特徴は断定的ではない。

次に、 ΔH と ΔZ についてまとめる。 ΔH はすべての観測点で増加している。その変化率はおよそ海溝側の観測点ほど大きく、内陸部の標茶 (SHI) と仁伏 (SHI) ではやや小さい。南岸域の観測点の中では、根室 (NMR) での変化率が大きい。 ΔH は、観測点ごとにわずかに異なる永年変動を示している。一方、 ΔZ の観測点ごとの変化のトレンドは、概ね ΔH に近いが、その変化率は ΔH よりも小さい。

最後に ΔF について述べる。 ΔF は、標茶 (SHI) を除いて、すべての点で増加の傾向を示している。やはり、背弧側の観測点に対して海溝側の観測点では、変化率が大きい。これは、 ΔH と ΔZ が全磁力の増加に寄与し、その変化率が南岸ほど大きいという傾向に照らし合わせて考えると矛盾しない。標茶 (SHI) は、全磁力では減少の変化を示しているが、 ΔH と ΔZ では増加の変化を示しており、 ΔF の減少を説明できない。この観測点は、2 回の測量データしかないため、ここまでの結果だけでは明確な傾向をつかむことは難しく、今後の観測データの蓄積を待つこととしたい。

以上をまとめると、三成分の変化率の特徴は、以下の 3 点に集約できる。第一に、三成分の変化率は観測点ごとに異なっており、やはりサブリージョナル・スケールの分布が存在している。すなわち、先行研究において指摘されてきた全磁力の永年変化に見られる地域性は、オリエンテーション効果による見かけの変動ではないことが確実である。第二に、南岸域ほど変化率が大きく、三成分では ΔH の変化率が他の成分と比較して大きい。第三に、 ΔD は、南岸域と内陸部で変化が逆のトレンドを示している可能性が高い。

ところで、鉛直分力 (Z) の変動成分は、主として電磁誘導による二次磁場と考えられるが、海陸分布や地殻の不均質が強く影響するため、 Z の日変化は観測点ごとに大きく異なる可能性がある。このため、女満別 (MMB) の Z 成分との単純差をとっても日変化が適切に除去されるとは限らず、かえって誤差を増大させるおそれもある。そこで、鉛直成分については、Fig. 3 の方法とは別に、以下に述べる方法でも ΔZ を求めてみた。

まず、地磁気観測所が提供している女満別 (MMB) における Z 成分の毎時値を用いて、単純平均で毎月値を算出する。次に、それを直線近似することで、2009 年から 2014 年までの永年変化と見なす。この近似的な永年変化直線では、日変化などの短周期成分は平滑化されている。この近似直線からのずれとして ΔZ を求めると、日変化補正を施さずに女満別 (MMB) の長周期永年変化成分だけが除去された ΔZ を得ることができる。このようにして求めた ΔZ を Fig. 4 に示す。

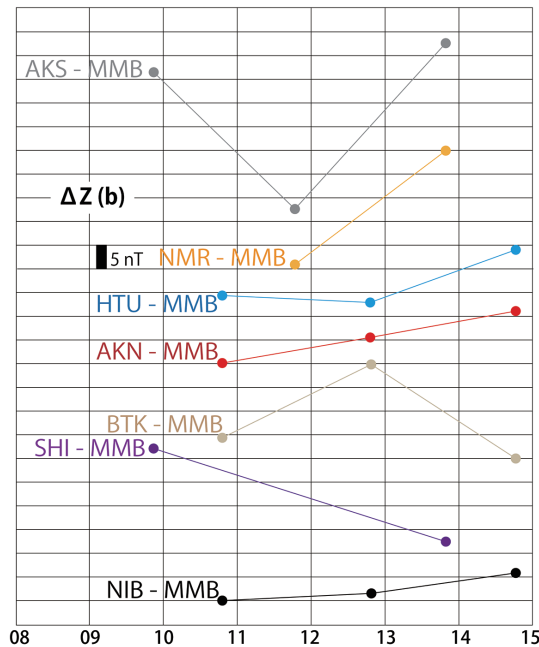


Fig. 4. Changes in the vertical component referred to MMB. A long-term trend (2009–2014) based on the monthly average values is used as the reference data of MMB.

2種類の補正方法による ΔZ を比較すると、初田牛（HTU）、厚岸北（AKN）、仁伏（NIB）では、後者において直線性がよくなる一方で、厚岸（AKS）、別海（BTK）では、逆に直線性が悪くなっている。本来は短期間であっても三成分の連続観測を行って、観測点ごとにZの特性を確認した上で、いずれの処理を適用するかを選択すべきであるが、それは今後の課題として、本稿では、前者の方法で求めた ΔZ を用いて以後の議論を行う。

V. 三成分の永年変化率の空間分布

現在のところ、絶対測量は1観測点あたり2回または3回しか行っていないため、現有のデータから各成分の永年変化率を正確に推定することにはやや無理がある。しかし、全磁力連続観測の時系列グラフ（Fig. 2）によれば、絶対測量を開始した2009年以降の永年変化は概ね直線的である。このことから、同時期のDHZ各成分の永年変化もまた、直線的である可能性が高いと考えられる。そこで、本稿では予想的な考察のため、Fig. 3に示した各成分の時系列プロットを直線近似して、その勾配から永年変化率（ $\Delta \dot{D}$, $\Delta \dot{H}$, $\Delta \dot{Z}$, $\Delta \dot{F}$ ）を求め、その空間分布に系統的な特徴が認められるかどうかを調べてみることにする。Fig. 1に示したように、厚岸（AKS）、厚岸北（AKN）、標茶（SHI）、仁多（NIT）、仁伏（NIB）、女満別（MMB）は、概ねプレート沈み込み方向に沿ってほぼ直線上に配置されている。Fig. 5は、この直線に沿った厚岸（AKS）からの距離

を横軸にとり、上記の方法で推定した各観測点の永年変化率を縦軸にしてプロットしたものである。根室 (NMR)、初田牛 (HTU)、別海 (BTK) については、厚岸 (AKS) と女満別 (MMB) を結ぶ直線から外れているため、この直線に投影したときの位置で示している。全磁力の永年変化率をプロットした Fig. 5 右下のパネルには、Nishida et al. (2004) によるピエゾ磁気効果の数値計算から求められた永年変化率分布を点線で示した。

まず、 $\Delta \dot{F}$ の空間分布は、直線上に配置された観測点の中では南岸域の観測点と内陸部の仁伏 (NIB) において正の変化率を示すが、内陸部の標茶 (SHI) では負の変化率になっている。また、南岸域の観測点のうち根室 (NMR)、初田牛 (HTU)、別海 (BTK) での変化率の絶対値はやや大きく、厚岸 (AKS) と厚岸北 (AKN) では同程度である。 $\Delta \dot{F}$ の空間分布は Nishida et al. (2004) で報告されたピエゾ磁気効果モデルによる計算結果と相似的である。ただし、ここで示した $\Delta \dot{F}$ には、オリエンテーション効果やグローバル・スケールの補正が施されていないため、実際の値は若干小さくなると思われる。

$\Delta \dot{H}$ と $\Delta \dot{Z}$ の空間分布は、おおよそ $\Delta \dot{F}$ に類似した傾向がある。また、 $\Delta \dot{H}$ の変化率は $\Delta \dot{Z}$ の 2 ～ 3 倍である。道東地域の広域応力場は、太平洋プレートの沈み込みに伴って概ね西北西－東南東方向の短縮歪み (石川・他, 1999) である。また、南岸域では、高磁気異常に対応する磁化の強い岩体の存在が示唆されている (Sugisaki et al., 2001) ため、南岸域での変化率が内陸部でのそれに

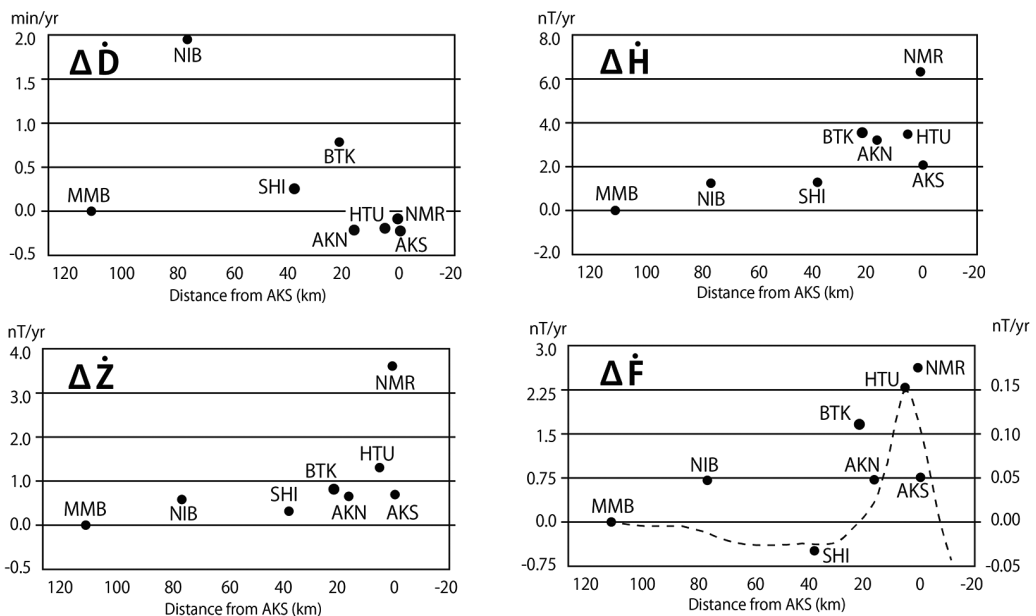


Fig. 5. Rate of secular changes against the horizontal distance from AKS to MMB along the line shown Fig. 1. For convenience of comparison, the values at NMR, BTK, and HTU are also plotted as the projection onto the same line. Solid circles indicate the rate of change derived from absolute measurements (2009–2014). Note that the orientation effect is not taken account in the total field plot. The modeled piezomagnetic field by Nishida et al. (2004) is also shown as a dashed curve in the $\Delta \dot{F}$ panel (right-side ordinate).

比べて相対的に大きくても不自然ではない。このように、道東地域の圧縮場と高磁気異常の分布を考えると、定性的には、 $\Delta \dot{H}$ や $\Delta \dot{Z}$ の特徴もピエゾ磁気効果で説明できそうであるが、現時点では推測の域を出ない。今後、不均質な磁化構造を考慮した上で、各成分のピエゾ磁気効果を数値計算により求め、観測結果と比較する必要がある。

$\Delta \dot{D}$ の空間分布を見ると、仁伏（NIB）の変化率が他の点と比較して突出していることが分かる。仁伏（NIB）観測点は、アトサヌプリ溶岩ドーム群の北縁に設置されている。そのため、火山活動による地磁気変化が混入していることも考えられるが、現時点において詳細は不明である。

VI. ま と め

道東地域における 2014 年までの三成分絶対測量と全磁力連続観測の結果を報告した。また、2009 年以降の三成分および全磁力の永年変化の特徴を述べ、永年変化率の空間分布を予想的に議論した。三成分での永年変化は観測点ごとに異なるトレンドで推移していることが明らかとなった。そのため、これまで観測されてきた地域性のある全磁力の永年変化は、オリエンテーション効果による見かけの変動ではないことが確実である。また、永年変化率の絶対値は南岸域ほど大きく、三成分では水平分力のそれが他の成分と比較して大きい。加えて、偏角の変化率は、南岸域と内陸部で逆のトレンドである可能性が示唆されたが、これは 2009 年の誤差を考慮すると現時点では断定できない。現時点では、まだ観測回数が少ない。議論の精度を上げていくためには、今後も根気強く絶対測量を継続する必要がある。今後、Nishida et al. (2004) が全磁力について行ったのと同様に、ピエゾ磁気効果モデルの数値計算を三成分について行うことが、モデルの検証に有効であろう。

謝辞 第一著者の三嶋は、2013 年より本測量に関わってきました。2009 年から 2011 年の測量では、気象庁地磁気観測所および同女満別出張所（当時）の有田 真氏、井 智史氏、清水淳平氏、長町信吾氏、西村三治氏、源 泰拓氏のご協力をいただきました。2013 年の測定では、京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設から FT 型磁気儀をお借りしました。真方位測定のために使用したジャイロトータルステーションは、東京大学地震研究所から借用しました。記して、深謝いたします。

文 献

- 橋本雅彦・伊藤暢宏・石田憲久・高田麻美・福井史雄, 1995. 野外での FT 型角度測定器による観測状況について, 地磁気観測所技術報告, **34**, 18-20.
- 橋本武志・茂木 透・西村三治・有田 真・清水淳平・井 智史・源 泰拓・長町信吾, 2012. 道東地域の地磁気永年変化と三成分絶対測量, 北海道大学地球物理学研究報告, **75**, 117-132.
- 石川典彦・橋本 学, 1999. 測地測量により求めた日本の地震間の平均的な地殻水平ひずみ速度 (II), 地震 **2**, **52**, 299-315.

- 気象庁地磁気観測所女満別出張所, 1974. 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.
- 小池捷春, 2002. FT 型磁気儀による偏角・伏角の観測精度, 地磁気観測所技術報告, **41**, 1-13.
- 森 俊雄・横山 泉, 1967. 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.
- Nishida, Y. and T. Watanabe, 2002. Geomagnetic Survey in the Eastern Part of Hokkaido, NE Japan (2): Supplemental Data Report, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. 7, **11**, 895-900
- Nishida, Y., Y. Sugisaki, K. Takahashi, M. Utsugi, and H. Oshima, 2004. Tectonomagenetic study in the eastern part of Hokkaido, NE Japan: Discrepancy between observed and calculated results, *Earth Planets Space*, **56**, 1049-1058.
- 大川史郎・山下 済・横山 泉, 1974. 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.
- 大島弘光・前川徳光・宇津木充・西田泰典, 1994. 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.
- 清野政明, 1958. 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.
- Sugisaki, Y., K. Takahashi, and Y. Nishida, 2001. Geomagnetic Survey in the Eastern Part of Hokkaido, NE Japan: A Data Report, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. 7, **11**, 811-820.