

道東地域の地磁気永年変化と三成分絶対測量

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

西村 三治*・有田 真**・清水 淳平***・井 智史****

気象庁地磁気観測所女満別出張所

源 泰拓・長町 信吾

気象庁地磁気観測所

(2012年1月6日受理)

Geomagnetic secular changes in eastern Hokkaido

Takeshi HASHIMOTO, Tohru MOGI

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

Mitsuharu NISHIMURA*, Shin ARITA**, Jumpei SHIMIZU***, Tomofumi I****

Memambetsu Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

Yasuhiro MINAMOTO and Shingo NAGAMACHI

Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

(Received January 6, 2012)

Localized geomagnetic secular changes have been reported in the eastern Hokkaido, previously by repeat surveys, and more recently, by continuous recording. Some previous studies discuss the piezo-magnetic field due to stress accumulation by plate subduction. To elucidate the nature of such “anomalous” secular changes in the total field, we started geomagnetic three-component absolute measurements. Firstly, we estimated the so-called orientation effect which may be contained in the simple differential total field, by using the results of the absolute measurements. At some stations this effect has been found to be non-negligible.

While correcting the orientation effect, we assessed an effect of global-scale secular changes by using the IGRF-11 model. This effect contributes much to regional-scale secular changes in the eastern Hokkaido. As a result, considerable part of the observed differential total field can be explained by this component. Then, residuals which deviated from the global secular field are obtained, which showed relatively good agreement with the predicted piezo-magnetic field.

* 現所属：気象庁札幌管区气象台，Sapporo District Meteorological Observatory, JMA

** 現所属：気象庁地磁気観測所，Kakioka Magnetic Observatory, JMA

*** 現所属：気象庁精密地震観測室，Matsushiro Seismological Observatory, JMA

**** 現所属：気象庁網走地方气象台，Abashiri Local Meteorological Observatory, JMA

However, it is still uncertain that the residual field is significant or not, as well as its origin.

Our analysis has also revealed an “anomalous” decreasing trend in the total field in the late 90s at NIB station which is located at the eastern side of Kussharo caldera. We speculate that this anomalous magnetic change may have some relation to the elevated signature of volcanic unrest at Atosanupuri where seismic swarm was followed by significant ground deformation in the mid 90s.

I. はじめに

北海道東部は、太平洋プレートの沈み込み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、M7～8級の地震が数10年間隔で発生することが知られており、内陸の弟子屈周辺でもM5級の地震が過去に繰り返し発生している。一方、根釧原野の南岸域には著しい高磁気異常・高重力異常があることが古くから知られていた（例えば、清野，1958；森・横山，1967）。現在では、この磁気異常は、Fig. 1に示したように、釧路から根室の沖合に中心をもち海溝軸方向にやや伸張した高磁気異常の一部であることがわかっている。類似の磁気異常が択捉島沖やウルップ島沖にも点々と見られることから、この高磁気異常は、太平洋プレートの沈み込みと関連したものであることが示唆される。

このような背景から、道東地域では、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1970年代から展開されてきた。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。国土地理院の一等磁気測量を除けば、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を行ってきた。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年から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、地殻活動起源の磁場である可能性を指摘した。

さらに、Nishida et al. (2004) は、詳細な磁気異常図から推定した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、応力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永年変化率の空間分布をよく説明した。すなわち、大島・

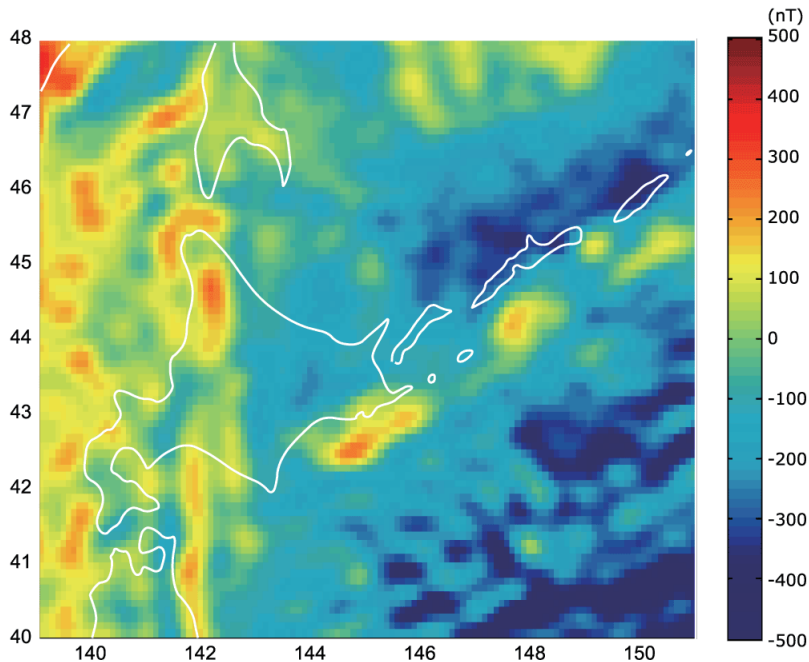


Fig. 1. Magnetic anomaly map around Hokkaido. Based on the EMM 2010 (Enhanced Magnetic Model) produced by the National Geophysical Data Center, NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/index.html>). Long wavelength component has been removed.

他 (1994) の仮説が、数値計算により支持されたことになる。ただし、Nishida et al. (2004) の計算では、変化率の空間分布パターンはよく説明できるものの、応力磁化係数として室内実験等から得られている一般的な値 (10^{-3} MPa^{-1}) を仮定した場合、実際に観測された変化率の 10 分の 1 程度の振幅しか得られない。なお、時間スケールの長い天然環境下での応力磁化係数は、短い時間スケールでの加圧実験に基づく室内実験からの推定値と比べて大きい可能性も考えられるが、これは現在も未解決のままになっている問題である。

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行った。移設や欠測期間を経ながらも全磁力の観測は続けられ、2011 年現在では 8 箇所毎 5 分の連続観測が行われている (Fig. 2 および Table 1)。

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なレベルに達する可能性が高い。現在、この問題の決着は、来たるべき根室沖地震に持ち越された形になっている。

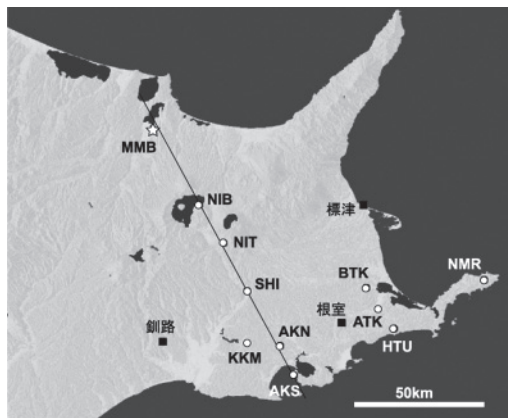


Fig. 2. Magnetic stations in the eastern Hokkaido. Open circles indicate the magnetic stations of Hokkaido University. KKM and ATK have been stopped in the late 1990s and shifted to AKN and HTU in 2006. MMB denotes Memambetsu Magnetic Observatory of JMA. Rectangles show the 1st order magnetic repeat points of Geographical Survey Institute. The line connecting AKS and MMB will be used in Fig. 5 as horizontal axis.

Table 1. Location of magnetic stations in operation (WGS84 system)

Station	Lat (dms)	Lon (dms)	Alt (m)
NIB	N43 38 07	E144 23 12	191
NIT	N43 29 50	E144 30 15	171
SHI	N43 19 29	E144 36 53	29
AKN	N43 07 36	E144 46 23	49
AKS	N43 01 09	E144 50 17	87
BTK	N43 20 13	E145 10 50	18
HTU	N43 11 18	E145 18 44	65
NMR	N43 22 01	E145 44 16	21

一方、地震に前駆する応力蓄積を地磁気変化で捉えたとすれば、観測点毎に異なる傾きを示す永年変化について、その挙動をグローバルな永年変化と区別して評価する必要がある。このうち、地殻活動に起因しないグローバルな永年変化成分を見極めるには、地磁気のグローバルな永年変化モデルからの推定に加えて、各磁気点の地磁気偏角・伏角の違いに起因する見かけの全磁力永年変化（オリエンテーション効果またはDI効果と呼ばれる）についても定量的に検討しておく必要がある。

以上のことから、我々は、道東地域において地磁気三成分絶対測量を行うことを計画した。2009年から順次測量を開始し、2011年までに既存のすべての磁気点で測量を実施した。本稿では、各磁気点における三成分絶対測量の結果について報告するとともに、これまでに観測されている道東地域の全磁力永年変化の特徴について述べる。三成分絶対測量の結果を用いてオリエンテーション効果の補正を行った上で、永年変化の地域性に関して、その原因についても考察する。

II. 三成分絶対測量 — 目標とする精度と観測方法 —

本研究の主目的は、道東地域の地磁気全磁力差永年変動が地震の準備過程における応力磁気効果であるとする Nishida et al. (2004) の仮説を検証することにある。そのための手順は次の通りである。

- (1) 8箇所の全磁力連続観測点における地磁気偏角・伏角を測定する。これにより、全磁力連続データに含まれるオリエンテーション効果（DI効果）による見かけの永年変化を評価・補正する。

(2) 各磁気点における三成分の永年変動場を継続的（2年に1回程度）に測定する。これにより、想定される応力磁気効果モデルを三成分で検証することを目指す。また、上記のオリエンテーション効果を、地点毎の三成分変化場を用いて評価する。

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で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、偏角・伏角測定に概ね0.1分の精度が要求される上、測定頻度も高くしなければならない。このような観測は不可能ではないが、野外観測における技術的な困難さに加えて、長期間観測を継続していく上でのハードルも高くなってしまう。また、本来は各観測点に三成分磁力計で連続観測を行い、絶対測量で定期的に基線値を決定することが望ましいが、それは現実問題として困難である。そこで、我々は、繰り返しによる三成分測量の精度として数10 nT（偏角・伏角にして概ね数分角）を目標とした。現在、我々は全磁力の連続観測を行っているので、コサイスマックな変化については、時間分解能の点で有利な全磁力に頼ることとする。その上で、三成分絶対測量の結果を利用して、地震に前駆する時間スケールの長い磁場変化を評価・補正しようとする。地磁気の永年変化（参照点との差分ではなく生の永年変化）は時期と成分によって異なるが、大きい場合で20 nT/yr程度である。多くの場合、オリエンテーション効果は、永年変化そのものの10分の1以下と予測されるので、地点毎の偏角・伏角が数分角の精度で測定できれば、大きな誤差要因とはならないと考えられる。ただし、三成分永年変化場については、2年毎に数10 nTの精度で測定し、10年間程度の傾向を見ることで、ようやく地点毎の相違が検出できるかどうかという程度であろう。

次に、観測手法について述べる。まず、偏角・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（2009年の測量では地磁気観測所所有の6秒読み、2010年は京都大学所有の1秒読み、2011年は地磁気観測所所有の1秒読み機材）を使用した。FT型磁気儀は、セオドライトに取り付けられているフラックスゲート・センサが感知する地磁気と直交する方向に、望遠鏡の光軸が向けられたときの角度を目盛盤から読み取る装置である。

各地点では、プロトン磁力計による全磁力連続観測が行われている。干渉を避けるため、プロトン磁力計のセンサから数10 mないし100 m程度離れた位置に磁気点を定めて杭打ちする。そこに非磁性の三脚を設置し、杭の上面から100.5 cmの位置（A点と呼ぶ）にFT磁気儀の中心がくるよう調整し、偏角・伏角を測定する。三成分を求めるためには、同じA点で全磁力も測定しなければならないが、これは偏角・伏角測定とは同時にできないため、その前または後に測定することとした。これとは別に、絶対観測点から数10 m程度離れた地点（F点と呼ぶ）に磁力計を設置しておき、A点での測定と平行して全磁力を毎15秒で自動計測しておく。このようにして、偏角・伏角測定を行っていた時刻のA点での全磁力値を間接的に推定する。A点およびF点の全磁力測定には、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。なお、2011年の根室（NMR）および仁多（NIT）観測点では、F点を設けず、運用中のプロトン磁力計

による毎1分値で代用した。

地磁気偏角を知るためには、真方位を知る必要がある。真方位測定のために、2009年の測量ではGPS測量、2010年と2011年の測量ではジャイロステーションによる方法を採用した。前者は、見通しのよい方向に指標点を設け、その指標点とA点の位置をGPS測量で求めるものである。詳細は橋本・他(2010)に記述してあるので本稿では省略するが、測角精度に難がある(10~20分)ことが判明したため、2010年以降は後者の方法を採用した。ジャイロステーションは、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ップGP1XおよびトータルステーションSETXからなる装置(精度公称値:標準偏差20秒)を借用した。ジャイロを利用することで、天測を行うことなく真北測定の精度を確保することができるため、測定場所や測定時間帯に関する自由度が高くなる。2011年の測量では、仁多(NIT)において、天測(北極星)とジャイロ測定の両方を実施することができた。両者の差は40秒から1分角であった(ジャイロによる真北の方が東寄り)。

III. 測定結果

上記の方針と観測方法により、2009年から順次三成分絶対測量を開始した。これまでのところ、2009年11月に厚岸(AKS)・標茶(SHI)・仁多(NIT)の3地点、2010年10月に厚岸北(AKN)・初田牛(HTU)・別海(BTK)・仁伏(NIB)の4地点、2011年10月に厚岸(AKS)・根室(NMR)・仁多(NIT)の3地点において絶対測量を行うことができた。なお、仁多(NIT)では、土地の改変によって2009年に設置した絶対測量杭が亡失していたため、2011年の測量では、近傍の(推定で10m以内)地点に杭を再設置して測量を行った。

測量結果をまとめてTable 2a~cに示す。偏角については、南岸地域では西偏 8° 前後であるが、内陸に向かうに従って西偏が強くなり、弟子屈の仁多では 9° を超えて極大となる。さらに、仁伏(NIB)、女満別(MMB)と北へ向かうにつれて西偏は弱まる。この特徴は、国土地理院の偏角異常図でも確認することができる。また、厚岸(AKS)や初田牛(HTU)では、緯度が低いにもかかわらず伏角が大きい。これは、南岸域の高磁気異常を反映したものと考えられる。NOAAによるEnhanced Magnetic Modelから作成した磁気異常図(Fig. 1)を参照すると、この高磁気異常は、釧路・根室の沖合にその中心があることがわかる。厚岸から根室半島沿岸域はこの磁気異常の北縁にあたり、局所性が特に強いことが予想される。陸域の二等磁気測量に基づいて作成されている国土地理院の磁気異常図の空間分解能では、こうした局所的な磁気異常は十分に表現されていない可能性がある。Table 2には、比較のため、国土地理院のホームページで公開されている磁気異常2010.0年値からの内挿計算による偏角・伏角・全磁力値も示しているが、実測値との食い違いはこうした局所的な磁気異常が主な原因ではないかと推測される。女満別との伏角差は1度前後に達する磁気点もあり、このような地点では、全磁力の単純差に含まれるオリエンテーション効果を見逃すべきではない。

IV. オリエンテーション効果の評価

女満別を参照点とした全磁力単純差に含まれるオリエンテーション効果を評価するために、以下の処理を行った。まず、調べようとする磁気点の偏角・伏角と全磁力から、現在のその地点における地磁気三成分を求める。次に、女満別を含む道東地域の永年変動場が一樣であると仮定して、女満別における三成分の変化場を、対象となる磁気点の三成分に対して過去に遡って合成する。この操作により、過去の任意の時点について、磁気点の全磁力値を推定することができる。その上で、女満別の全磁力との単純差をとれば、オリエンテーション効果による見かけの全磁力永年変化が得られる。

例として、道東の磁気点の中で、もっとも古くから測量が行われている厚岸 (AKS) についてその効果を確認してみる。1972年から2011年までの全磁力変化 (女満別との単純差日平均、ただし、1994年以前は繰り返し測量による測定) を Fig. 3a に示す。AKS では、2009年に三成分絶対測量を行っている。女満別の1950年から2010年までの年平均値ベースの永年変化 (Fig. 3c) を用いて、AKS についてオリエンテーション効果を推定した (Fig. 3b)。1980年から2000年に注目すると、この期間に約15nTの全磁力増加 (年変化率で+0.75nT/yr) が観測されているが、同じ期間に、約-8nTのオリエンテーション効果による見かけの減少 (年変化率で-0.4nT/yr) があったことが推定される。従って、オリエンテーション効果を除去した真の全磁力永年変化は、+23nT (+1.15nT/yr) であったと考えられる。このように、AKS で実際に観測された全磁力変化は、オリエンテーション効果から期待される変化傾向とは逆センスであったが、その効果は無視してよい大きさではないことが明らかになった。

他の磁気点についても同様の処理によりオリエンテーション効果を評価することができる。連続観測点が整備され始めた1996年以降の変化を Fig. 4 に示す。単純差日平均を濃い青色で、オリエンテーション効果を補正した変化を薄い青色で示した。Fig. 4 から明らかなように、AKS と同様、オリエンテーション効果を補正すると、変化率はむしろ大きくなるセンスにあり、永年変化がオリエンテーション効果で説明できないことは明らかである。逆に言えば、このことは、観測された永年変動場の大部分は各地点に固有のものであり、道東地域の永年変化場が空間的に一樣ではないことを意味している。また、このこと自体は、応力磁気効果仮説を支持する結果ともいえる。ただし、Fig. 5 に示したように、最近の変化率は、Nishida et al. (2004) が報告した1990年代の変化率とはかなり異なってきている。特に、NIB や NIT など内陸部の磁気点では、1990年代には減少傾向にあったのに対して、最近は増加に転じている。このように、永年変化の空間パターンは、Nishida et al. (2004) で提案された応力磁気効果モデルには、もはや整合しなくなってしまったように見える。しかし、南岸域に近づくほど変化率が大きいという傾向は維持されていることを考えると、長波長の永年変化をもたらす原因が他にもあるのではないかと疑われる。そこで、次節ではグローバルな永年変化場が混入している可能性について検討する。

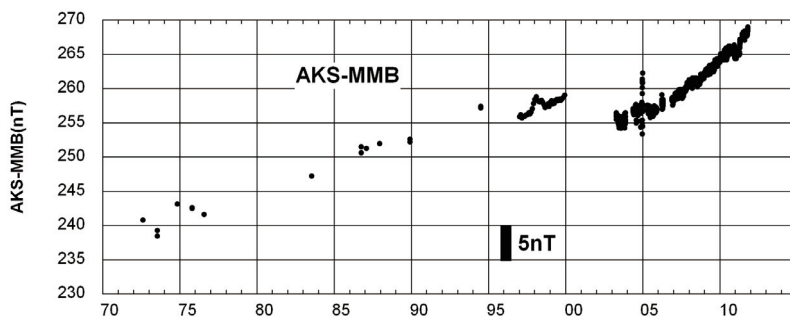


Fig. 3a. Differential total field change since 1972 through 2011 at AKS as referred to MMB.

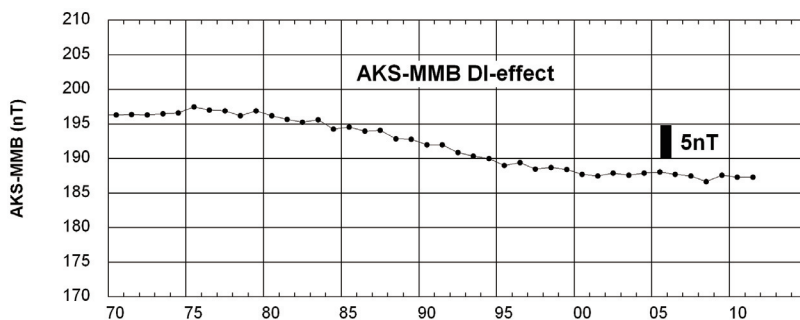


Fig. 3b. An estimated total field change at AKS due to the orientation effect.

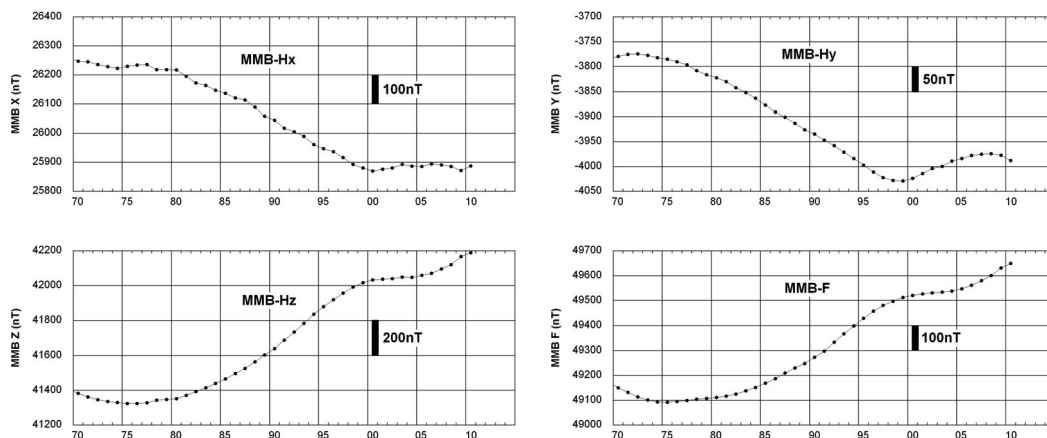


Fig. 3c. Annual-based secular changes at Memambetsu magnetic observatory, JMA since 1970 through 2010. Northward component (upper left), eastward component (upper right), downward component (lower left), and total field (lower right).

Table 2a. Summary of the absolute measurements (declination). Error ranges in declination are estimated from the ones in GPS location of marks, or in the difference between gyro and celestial measurements. Standard deviations and “Max-Min” are calculated from the data set of magnetic north measurements with a theodolite.

Station Name	Measurement Date (UT)	Mark Number	Declination (Westward)	Standard Deviation	Max - Min	No. of Measurement	Declination by GSI (2010.0)	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	7° 44'	8° 45.4'	GPS		
	2009/11/10 03h	2	8° 00.2' ± 17.5'			4		8° 49.0'			
	2011/10/19 02h	1, 2	8° 00.9' ± 1'	0.22'	0.53'	4		Gyro	8° 51.3'		
	2011/10/19 03h	1, 2	8° 04.0' ± 1'	0.13'	0.30'	4					
SHI (標茶)	2009/11/12 05h	1	8° 48.6' ± 10.6'	0.07'	0.28'	4	8° 54'	8° 45.2'	GPS		
	2009/11/12 05h	2	8° 44.8' ± 13.5'			4					
	2009/11/12 01h	1	9° 30.8' ± 23.3'	0.13'	0.10'	2		8° 42.6'	GPS		
	2009/11/12 01h	2	9° 11.3' ± 15.6'			2					
NIT (仁多)	2011/10/21 00h	1	9° 12.6' ± 1'	0.37'	0.83'	4	9° 11'		8° 43.4'	Celestial	
	2011/10/21 01h	2	9° 15.4' ± 1'			4			8° 46.8'		
	AKN (厚岸北)	2010/10/19 02h	1	8° 48.1' ± 1'	0.20'	0.69'		4	8° 05'	8° 47.8'	Gyro
		2010/10/20 01h	1	8° 46.6' ± 1'				3			
HTU (初田牛)	2010/10/20 05h	1	8° 23.7' ± 1'	0.06'	0.20'	3	7° 14'	8° 48.2'	Gyro		
	2010/10/21 03h	1	8° 41.3' ± 1'			3				8° 55'	
NMR (根室)	2011/10/20 00h	1	8° 25.2' ± 1'	0.15'	0.20'	4	7° 21'	8° 44.3	Gyro		
	2011/10/20 01h	2	8° 24.9' ± 1'			4				8° 46.8	

Table 2b. Summary of the absolute measurements (inclination)

Station Name	Measurement Date (UT)	Inclination	Standard Deviation	Max - Min	No. of Measurement	Inclination by GSI (2010.0)	Inclination at MMB
AKS (厚岸)	2009/11/10 03h	57° 34.0'	0.10'	0.14'	2	58° 21'	58° 9.6'
	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° 14.2'
SHI (標茶)	2009/11/12 05h	57° 06.1'	0.01'	0.03'	4	57° 12'	58° 9.5'
	2009/11/12 01h	56° 58.7'	0.02'	0.05'	4	57° 22'	58° 9.5'
NIT (仁多)	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'
AKN (厚岸北)	2010/10/19 02h	57° 57.8'	0.03'	0.02'	2	57° 59'	58° 12.3'
	BTK (別海)	2010/10/20 01h	0.02'	0.06'	3	57° 43'	58° 13.2'
HTU (初田牛)	2010/10/20 05h	58° 16.4'	0.06'	0.07'	3	58° 13'	58° 11.7'
	NIB (仁伏)	2010/10/21 03h	0.04'	0.08'	3	57° 35'	58° 11.6'
NMR (根室)	2011/10/20 00h	57° 37.6'	0.02'	0.04'	4	58° 16'	58° 15.3'
	2011/10/20 01h	57° 38.2'	0.05'	0.12'	4		58° 15.6'

Table 2c. Summary of the absolute measurements (total field)

Station Name	Measurement Date (UT)	Total Field	Standard Deviation	No. of Measurement	Total Field by GSI (2010.0)	Total Field at MMB
AKS (厚岸)	2009/11/10 03h	49,816.5 nT	0.54 nT	6	50,821 nT	49,629 nT
	2011/10/19 02h	49,885.6 nT	0.40 nT	10		49,670 nT
	2011/10/19 03h	49,895.8 nT	1.49 nT	10		49,677 nT
SHI (標茶)	2009/11/12 05h	49,002.6 nT	0.17 nT	10	48,966 nT	49,637 nT
	2009/11/12 01h	48,861.6 nT	0.03 nT	10	49,350 nT	49,630 nT
NIT (仁多)	2011/10/21 00h	48,941.0 nT	3.03 nT	10		49,664 nT
	2011/10/21 01h	48,938.4 nT	1.61 nT	10		49,659 nT
AKN (厚岸北)	2010/10/19 02h	49,098.7 nT	1.76 nT	6	50,456 nT	49,646 nT
	BTK (別海)	48,559.7 nT	0.22 nT	8	49,295 nT	49,638 nT
HTU (初田牛)	2010/10/20 05h	49,753.0 nT	0.31 nT	8	49,354 nT	49,658 nT
	NIB (仁伏)	49,689.6 nT	0.67 nT	8	49,429 nT	49,659 nT
NMR (根室)	2011/10/20 00h	49,029.7 nT	1.41 nT	10	48,585 nT	49,674 nT
	2011/10/20 01h	49,017.0 nT	0.87 nT	10		49,666 nT

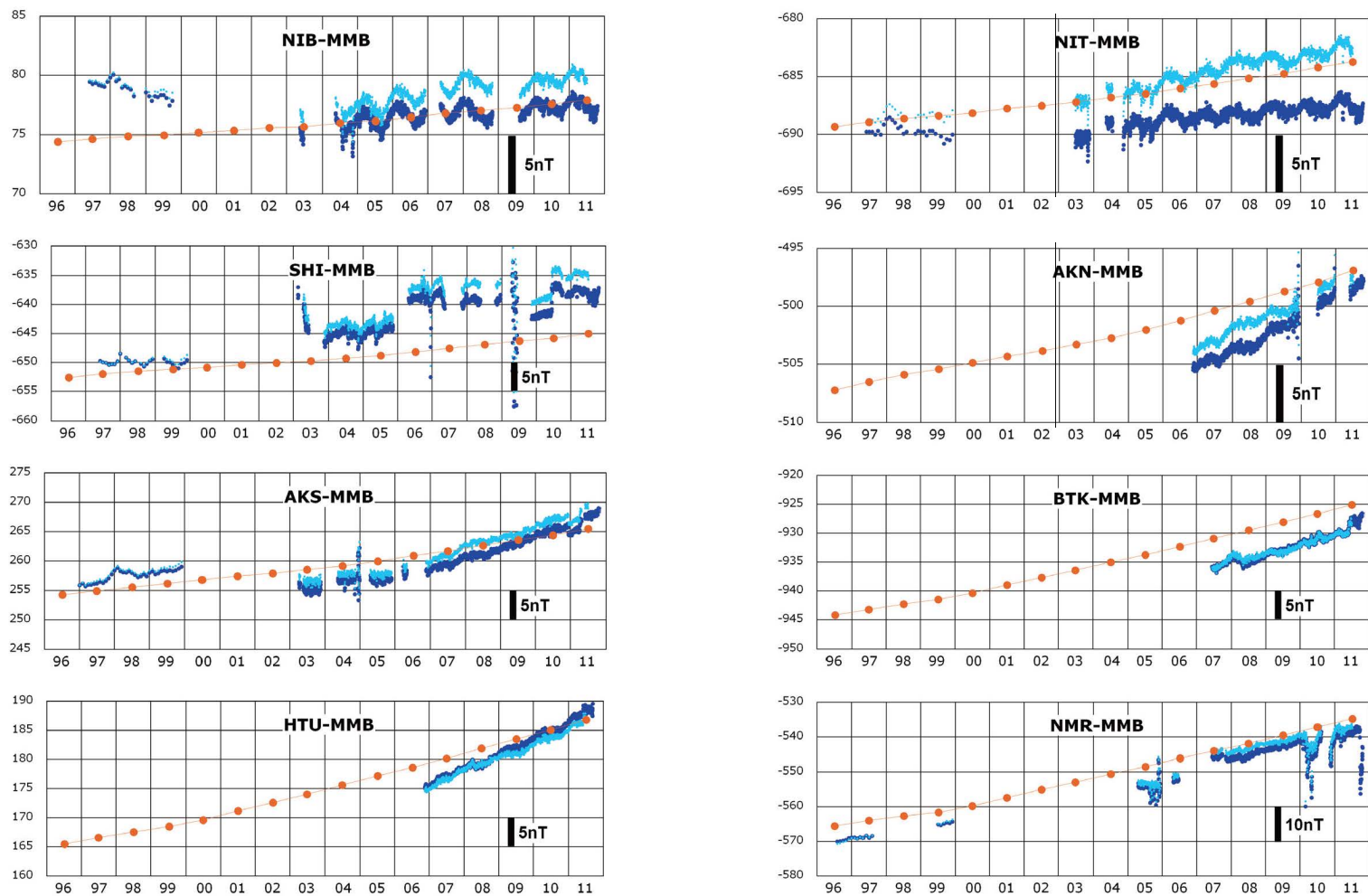


Fig. 4. Total field changes (1996-2011) referenced to MMB. Dark blue traces indicate the daily-base simple difference, while the light blue do the ones with the orientation effect corrected. Red dots with lines show the predicted changes based on the IGRF-11 model.

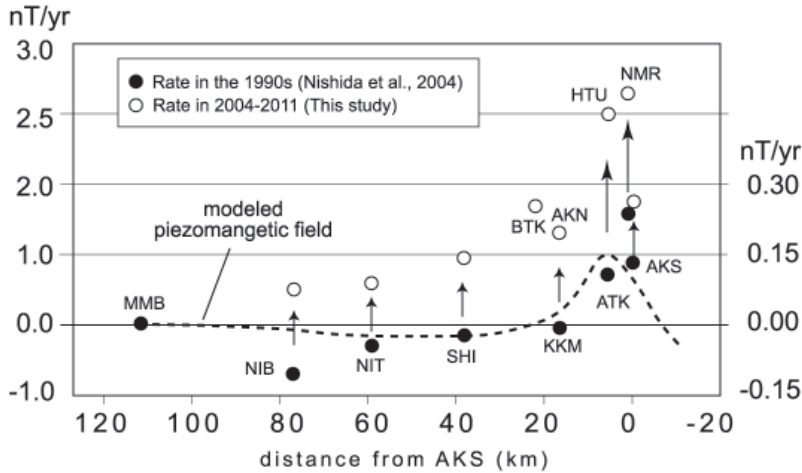


Fig. 5. Summary of the rate of secular changes against the horizontal distance from AKS to MMB along the line shown in Fig. 2 (modified from Nishida et al., 2004). Solid circles show the changes in the 1990s which is reported in Nishida et al. (2004) without orientation correction, while the open circles indicate the changes after 2004 with orientation effect corrected. Amplitudes are referred to the left-side ordinate. For convenience of comparison, the values at NMR, BTK, ATK, HTU are also projected onto the measurement line. HTU and AKN have been shifted from ATK and KKM, respectively. Modeled piezomagnetic field is shown by a dashed curve (right-side ordinate), which is calculated by Nishida et al. (2004). Assumed stress sensitivity is $2 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ for the calculation.

V. グローバルモデルによる検討

地磁気の永年変化は、もともとコア起源の主磁場の変動がその大半を占めると考えられている。主磁場は長波長成分から成るので、国際標準磁場モデル (IGRF) のようなグローバルモデルで表現されている。2010年に公開された IGRF-11 モデル (IAGA working group V-MOD, 2010) は、第13次までのガウス係数で球面調和関数展開されたもので、永年変化については第8次までの係数が与えられている。このようなグローバルモデルで表現される空間波長は1000 km以上であり、道東地域スケールの磁気異常は含まれない。ただし、このように波長の長い成分であっても、時間変化についてみた場合、数10 km以上離れた地点間には永年変化の差が現れる可能性がある。本稿では、道東地域にこうした成分が混入しているかどうかを確認する。

ここでは、IGRF-11モデルを用いて、各磁気点および女満別における全磁力値を年毎に計算し、女満別を参照点とした単純差の永年変化を求め、Fig. 4に重ねて示した（ただし、縦軸は適宜シフトさせている）。IGRFモデルから期待される各磁気点の永年変化は、いずれも女満別と比較して増加傾向を示すことがわかった。さらに、この増加傾向は、内陸部よりも南岸域の方が顕著である。従って、道東地域で観測されてきた永年変化には、このようなグローバルな変動の一部が重畳していると考えた方がよさそうである。もし、地殻活動起源の応力磁気効果が含まれているならば、このグローバルな変動からの偏差を検討しなければならないことになる。Fig. 4か

ら、この偏差分の年変化率を求めて地点毎にまとめると、Fig. 6 のようになる。Fig. 5 と比較して、応力磁気効果モデルによる計算値に、より近い結果となっている。根室（NMR）は、8つの観測点の中でもっとも大きな永年変化を示す磁気点であるが、その殆どはグローバル起源のものであり、偏差分としてはわずかな変化である。内陸部では相対的に偏差変化率が小さいものの、依然として正の変化である（ただし、オリエンテーション効果の補正をしなければ、NIB ではほぼ偏差変化なし、NIT ではわずかに負の偏差変化率となる）。この結果の有意性については判断が難しいが、現時点では応力磁気効果による永年変化であることを否定するものではない。

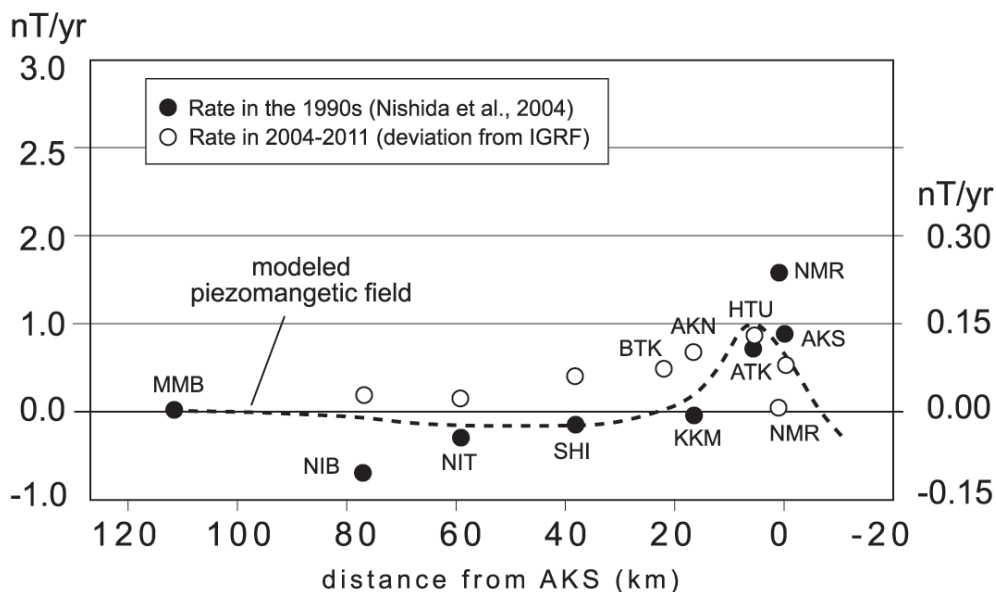


Fig. 6. Summary of the rate of secular changes deviated from the IGRF11 model. Ordinates are the same as Fig. 5. Solid circles show the changes in the 1990s without orientation correction, while the open circles indicate the deviated changes after 2004 with orientation effect corrected.

VI. 仁伏の永年変化に関する考察

屈斜路湖東岸に位置する仁伏（NIB）では、1997年から1999年にかけて明瞭な減少傾向が観測されていた（Fig. 4）。2000年から2003年までは観測が中断していたため、その間の変化については不明であるが、2003年以降は増加傾向に転じている。最近の変化はIGRFモデルからの推定に近く、永年変化としてはむしろ正常な傾向といえる。逆に、1990年代後半は、何らかの原因で局所的に磁場が減少していたと考えるべきであろう。この90年代後半の「異常」変化の原因として、1994-1995年頃をピークとして起こったアトサヌプリ火山の活動の高まりが関係している可能性がある。NIBは、アトサヌプリ溶岩ドーム群の北縁にあたるため、火山活動に起因す

る磁場変化が混入していたとしても不思議ではない。アトサヌプリでは、1993-95年にかけて最大25cmにおよぶ地盤の隆起が起こったことが干渉SAR解析で明らかにされている（国土地理院，2006）。また、1994-95年にかけてアトサヌプリ周辺では群発地震が発生しており、火山活動に関連したものと推測されている（本谷・一柳，1996）。欠測を含むため開始・終息の時期は不明であるが、NIBの全磁力に「異常」減少が観測されたのは1997-99年であり、上記の火山性地盤変動の収縮期にあたる。NIBは推定膨張源から水平距離で北に約4kmに位置しており、地下の冷却帯磁を捉えていた可能性がある。ただし、アトサヌプリの周辺には他に磁気点がないため、これ以上の議論は難しい。本稿では、火山活動との関連の可能性を指摘するにとどめる。

VII. ま と め

道東地域の既設磁気点において、2009年から地磁気三成分絶対測量を開始した。2011年までに、既設の8箇所の磁気点すべてにおいて絶対測量を実施した。絶対測量の結果を用いて、各磁気点の全磁力単純差に生じるオリエンテーション効果を見積もり、観測された永年変化にどの程度見かけの変動が混入しているかを議論した。その結果、地点によっては、参照点である女満別の伏角・偏角との間に大きな隔たりがあり、オリエンテーション効果は無視すべきでないことが明らかになった。ただし、推定されたオリエンテーション効果は、実際に観測されてきた永年変化の傾向とは逆センスであり、この効果を補正すると、実際の永年変化場は、補正前に比べて若干大きいものと考えられた。変化率について見ると、1990年代に推定されていた永年変化よりも、2000年代後半の方が明らかに大きくなっており、そのままではNishida et al. (2004)で提案された応力磁気効果モデルとは整合しない。そこで、グローバル地磁気モデル(IGRF-11)を用いて広域の永年変化場を推定し、道東地域にどの程度影響があるかを考察した。その結果、グローバルな変動場は道東地域スケールにも影響を及ぼしており、実際に観測されている永年変化の傾向とも一致することが明らかとなった。想定される地殻活動起源の永年変化を抽出するために、この広域変動場からの偏差に着目して、地点毎の変化率を求めたところ、応力磁気効果モデルに比較的近い分布が得られた。ただし、この結果の有意性については議論の余地があり、観測された永年変化が、広域変動場と誤差範囲で一致していると考えた方が正しい可能性も残されている。その場合には、応力磁気効果仮説は否定されることになるが、現時点でこれを証明するのは難しく、今後の観測結果を待つ必要がある。

謝辞 2010年の測定にあたり、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磁気儀をお借りしました。借用に際し、同施設の宇津木充氏にご協力を頂きました。東京大学地震研究所からは、上嶋 誠氏を通じて、真方位測定のためのジャイロスコープをお借りしました。ご対応いただいた皆様に深謝いたします。なお、磁気点分布図の作成にあたり、国土地理院発行の50mメッシュ数値地図を使用しました。Table 2に引用した国土地理院の偏角・伏角・全磁力

2010.0 年値の計算には、ホームページ上で公開されている内挿計算サイト (http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_04/index.html) を利用させていただきました。記して感謝申し上げます。

文 献

- 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, 1983. 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.
- 橋本武志・茂木 透・西村三治・有田 真, 2010. 道東地域の地磁気絶対測量, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 56-63.
- International Association of Geomagnetism and Aeronomy Working Group V-MOD, 2010. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation, *Geophys. J. Int.*, **183**, 1216-1230.
- 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.
- 国土地理院, 2006. 地震予知連絡会会報, **75**, 59-61.
- 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.
- 本谷義信・一柳昌義, 1996. 北海道大学地球物理学研究報告, **59**, 211-220.
- Nishida, Y., Y. Sugisaki, K. Takahashi, M. Utsugi, and H. Oshima, 2004. Tectonomagnetic 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.
- 山下 済・横山 泉, 1975. 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.