

磁気図2000.0年値の作成 Magnetic Charts for the Epoch 2000.0

測地部 白井宏樹・錦 輝明・佐藤秀幸・宇津木充

Geodetic Department Hiroki SHIRAI, Teruaki NISHIKI, Hideyuki SATOH and Mitsuru UTSUGI

鹿野山測地観測所 仲井博之・森田美好

Kanozan Geodetic Observatory Hiroyuki NAKAI, Miyoshi MORITA

水沢測地観測所 門脇俊弘・湯通堂亨

Mizusawa Geodetic Observatory Toshihiro KADOWAKI, Toru YUTSUDO

要 旨

国土地理院では、日本全国の地磁気の地理的分布と永年変化を把握するために、1948年から現在に至るまで、50年以上にわたり地磁気測量を実施している。前回の磁気図1990.0年値の作成から10年が経過し、今回新たに、これまでの地磁気測量から得られた観測結果を用いて、2000年1月1日0時（世界時）における日本全国の磁場分布を地磁気成分毎（偏角・伏角・全磁力・水平分力・鉛直分力）に表現した磁気図2000.0年値（国土地理院技術資料B・1 No.35）を作成した。本稿では、磁気図作成の過程について報告する。

1. はじめに

地球は、磁石としての性質をもち、地球のつくる磁場を地球磁場という。地球磁場は、主磁場と変化磁場に分けられる。主磁場は、地球内部に起因するものである。変化磁場は、地球外部の太陽活動などに起因するもので、日変化や磁気嵐等による不規則な変化をする。また、地球磁場は一定なものではなく、時間とともに常時変化をしており、変動の周期は、数秒の短いものから、数百年という長いものまでである。比較的周期が長いものを地磁気の永年変化と呼び地球内部に起因するものとされている（広石，1992）。

地球磁場は、方向と大きさを持つベクトル量である。単位は、方向が度（°）または分（'）大きさがナノテスラ（nT）で表示する。ある地点の地球磁場を表現するためには、図-1のような方法で表す。

水平面で磁場の方向と南北方向のなす角を偏角（D）、水平面と磁場の方向となす角を伏角（I）、地球磁場の大きさを全磁力（F）、水平面上の磁場の大きさを水平分力（H）、そして鉛直面上の磁場の大きさを鉛直分力（Z）と呼ぶ。

今回の磁気図では、これら5成分を各地域ごとに算出し、図化したものである。

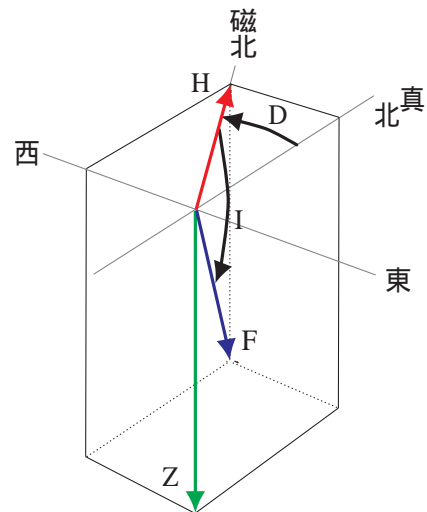


図-1 地球磁場の成分
(D: 偏角, I: 伏角, F: 全磁力,
H: 水平分力, Z: 鉛直分力)

2. 観 測

詳細な磁気図を作成するためには、できるだけ多くの観測点において、多くの良質な観測データが必要である。そのため限られた予算の中ではあるが、計画的に連続または一定間隔で繰り返し観測を実施してきた。

国土地理院における地磁気測量には、一等磁気測量、二等磁気測量、地球電磁気連続観測装置における地磁気連続観測、測地観測所における地磁気連続観測の4種類がある。

一等磁気測量は、1948年から一等磁気点において本格的に開始され、磁気図作成に必要な地磁気各成分の永年変化を把握することを主目的としている。そのため全国に約100点の一等磁気点を設置し、定期的に改測を実施してきた。現在の一等磁気測量は、磁気儀による絶対観測とフラックスゲート三軸磁力計による変化観測及びプロトン磁力計を使用した観測を実施している。最終的に

地磁気5成分（偏角・伏角・全磁力・水平分力・鉛直分力）の観測日の日平均値を求めている（写真 - 1）。

地磁気は時間変化をするばかりでなく空間的にも変化しており、局所的に顕著な磁気異常を示す地域も少なくない。二等磁気測量は、そのような地磁気の地理的分布の詳細を捉えることを主目的として、1952年から1970年にかけて、全国約850点の二等磁気点で実施された。なお二等磁気点は、近年改測作業を実施していないために、磁気図の作成においては、近似的に地域的な地磁気異常分布についての情報に変化がないものとして扱っている。

地球電磁気連続観測装置は、地磁気の連続データを得ることを目的として、1996年に全国11箇所で設置した。観測装置では、プロトン磁力計による全磁力観測、フラックスゲート磁力計による水平分力、偏角、鉛直分力の

変化量を毎分観測している（写真 - 2）。

観測データは、つくばから電話回線により常時収録できるシステムになっている。また、フラックスゲート磁力計では、基準となる値（基線値）からの変化量が得られるため、絶対値を求めるために、現地で磁気儀等を用いて周期的に基線値を決定するための絶対観測を実施している（田辺，1997）。

また、1956年千葉県君津市に鹿野山測地観測所、1969年岩手県水沢市に水沢測地観測所、1980年岩手県江刺市に江刺観測場が設置され、これらの観測所においても地磁気の連続観測を実施している。

以上が国土地理院における地磁気観測である。これらの観測データを使用して磁気図2000.0年値を作成した（表 - 1）。

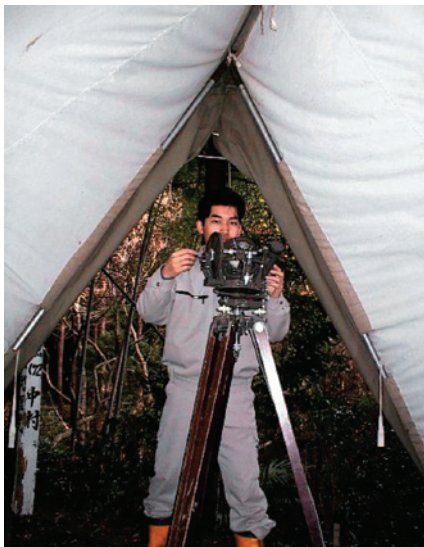


写真 - 1 一等磁気点での磁気儀による絶対観測



写真 - 2 地球電磁気連続観測装置の全景（岐阜県益田郡萩原町）

表 - 1 磁気図作成に用いたデータ

種 類	点数	使用データ	
「変化量計算に用いかつ2000.0年値を算出する測点」			
一等磁気点	26	1980～2001年	（観測日平均値）
観測所（国土地理院）	2	1980～2000年	（年平均値）
観測所（気象庁地磁気観測所）	3	1980～2000年	（年平均値）
「計算式により2000.0年値を算出する測点」			
一等磁気点	75	1990.0年値	
二等磁気点	775	1990.0年値	
「2000.0年値を算出する測点」			
地球電磁気連続観測装置	11	1999～2000年	

3. 磁気図の作成

この項では、磁気図作成の手順に従い整理の手法を述べる(図-2)。

3.1 C1補正

一等磁気測量により得られた観測値は、日変化や磁気嵐などの擾乱が含まれている。また、観測日は、任意の日時であり全国の磁気点で同時観測することができないので、各々の観測値から共通の永年変化を取り除き、ある特定の日時に同時観測されたように観測値を統一(補正)する必要がある。

そこで、100年以上にわたり地磁気の連続観測をしている気象庁地磁気観測所(茨城県八郷町柿岡)(以下、「柿岡」という)を基準観測所とし、磁気点と柿岡の磁場変化量が一定と仮定して、同一時刻の値にする作業を行う。これをC1補正または年度化成と呼んでいる。

一等磁気点の観測結果は、今回の作業では基準年を1990.0年とし年度化成をした。結果は、地球磁気観測報告(国土地理院技術報告)においても公表している。

3.2 基準観測所の基準年値変化量の算出

今回作成した「磁気図2000.0年値」は2000.0年を基準としている。2000.0年とは、2000年1月1日0時(世界時)であり、2000.0年値とは、1999年1月1日~2000年12月31日の観測値の平均値をいう。よって、基準観測所(柿岡)の基準年値(2000.0年値)は、1999年1月から2000年12月までの各月平均値24個を平均したものである。また、柿岡の10年間の経年変化量は、従来成果である1990.0年値と新成果である2000.0年値の差であり、これを基準年値変化量(ΔC1)という(表-2)。

3.3 一等磁気点・観測所の10年間の変化量計算

次に、1980年から2001年までの期間において定期的に観測がなされた一等磁気点について、観測データの時間変化から2000.0年化成値を算出する。

もし、観測点の地磁気の変化が基準観測所と全く同じであれば、その点での異なる日の観測値を1990.0年に化成すると、それらは全て一致するはずである。

しかし、実際には地磁気変化は地域によって異なるため、観測日が異なれば化成値も異なる。そこで地磁気成分ごとに、異なる日の観測値の1990.0年化成値を観測日

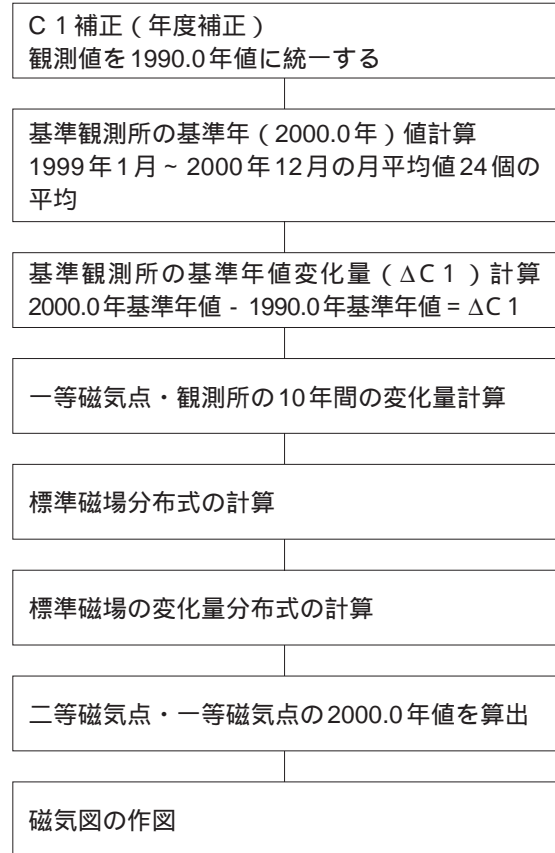


図-2 磁気図作成のフローチャート

$$\begin{aligned}
 F(X_1)_{1990.0} &= AX_1^2 + BX_1 + C \\
 F(X_2)_{1990.0} &= AX_2^2 + BX_2 + C \\
 F(X_3)_{1990.0} &= AX_3^2 + BX_3 + C \\
 &\dots \dots \dots \\
 F(X_m)_{1990.0} &= AX_m^2 + BX_m + C
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} F(X_1)_{1990.0} \\ F(X_2)_{1990.0} \\ F(X_3)_{1990.0} \\ \dots \\ F(X_m)_{1990.0} \end{aligned}} \right\} \text{式-1}$$

$F(X_m)_{1990.0}$: 1990.0年化成値
 X_m : 観測年月日
 A, B, C : 係数

の二次式で近似し(式-1)、最小二乗法により回帰曲線を求める。この式に1990.0年を代入して1990.0年値とする。また、この式に2000.0年を代入し3.2項で求めた

表-2 基準観測所(柿岡)の基準年値と変化量
C1 = 2000.0年基準値 - 1990.0年基準値

Kakioka	D ()	I ()	H (nT)	Z (nT)	F (nT)
2000.0年基準値	423.4	2981.0	30016	35371	46390
1990.0年基準値	409.5	2953.0	30137	34934	46137
ΔC1	13.9	28.0	-121	437	253

基準年値変化量 C1を加えて、2000.0年値を算出する。

以下に具体例を示す。表 - 3は、一等磁気点(4)川之江の1980年から2001年までに9回実施した一等磁気測量である。各成分の観測日平均値をC1補正により1990.0年化成値に年度化成をした。観測日と化成値(偏角)を図上にプロットすると図 - 3のようになる。しかし、柿岡と磁気点の経年変化量が異なるため、このようにプロットにばらつきが生じる。1990年化成値は、図 - 3で求めた二次式にX=0(1990年)を代入して398.09となる。またX=10(2000年)を代入すると395.19となり、これに柿岡の10年間の変化量(ΔC1=13.9)を加算した値409.09(6°49')が2000.0年値となる。このようにして、各点・各成分について2000.0年値を算出した。

近年、一等磁気点での改測回数が低下し、係数を決定するのに十分な磁気点が減少した。1990.0年値の際は103点使用したが、今回は26点に大幅減少した。そのため、地磁気連続観測を実施している国土地理院水沢測地

観測所、鹿野山測地観測所、気象庁地磁気観測所(柿岡、女満別出張所、鹿屋出張所)の観測値もあわせて使用した。観測所では、連続観測していることから1980年から2000年までの期間の各年平均値を1990.0年値に化成して使用している。

3.4 標準磁場分布式の計算

ここで、日本周辺域の磁場分布を大局的に、緯度・経度の二次式で表されるものとして、3.3項で計算した磁気点観測成果(2000.0年値)と、その点の緯度・経度を用いて次の観測方程式をたて(式 - 2)、最小二乗法により標準磁場分布式を求めた(表 - 4)。

ここで、Mは日本のほぼ中心の37°N・138°Eの位置における地磁気各成分の2000.0年値を表す。・は緯度・経度を度単位で表示している。なお、この式は「磁気図2000.0年値」に記載されている。

表 - 3 一等磁気点(4)川之江観測結果

観測年月日	D	c1	化成値	I	c1	化成値	H	c1	化成値	Z	c1	化成値	F	c1	化成値
1981/11/07	385.8	11.7	397.5	2834.5	13.9	2848.4	31628	-16	31612	34205	257	34462	46586	189	46775
1983/11/02	389.1	9.5	398.6	2835.9	12.1	2848.0	31650	-33	31617	34256	205	34461	46639	137	46776
1985/12/07	392.2	6.3	398.5	2839.1	9.2	2848.3	31656	-39	31617	34327	141	34468	46695	81	46776
1987/10/22	394.8	3.6	398.4	2842.1	5.9	2848.0	31657	-33	31624	34388	81	34469	46741	40	46781
1989/12/03	398.2	-0.2	398.0	2849.5	-0.9	2848.6	31606	14	31620	34482	-2	34480	46775	8	46783
1991/12/04	401.2	-2.7	398.5	2854.0	-4.9	2849.1	31609	9	31618	34576	-91	34485	46847	-63	46784
1993/12/09	402.7	-5.9	396.8	2860.9	-11.6	2849.3	31586	35	31621	34690	-199	34491	46916	-128	46788
1995/12/02	405.2	-9.0	396.2	2867.9	-18.6	2849.3	31558	68	31626	34802	-306	34496	46980	-188	46792
2001/01/29	409.0	-14.0	395.0	2878.7	-28.8	2849.9	31483	130	31613	34938	-444	34494	47030	-253	46777

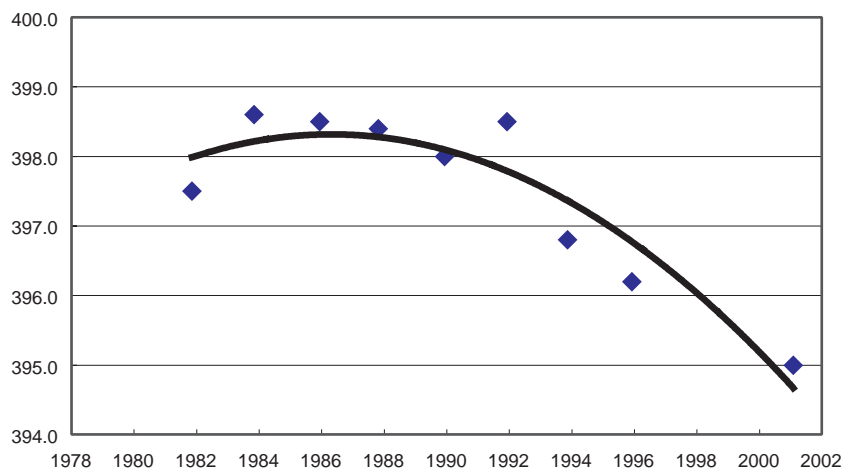


図 - 3 一等磁気点(4)川之江(偏角)の1990年化成値のグラフ
 横軸：観測年 $y = -0.0167X^2 - 0.1234X + 398.09$
 縦軸：偏角() $X : (観測年月日 - 1990年1月1日)年$

$$\begin{aligned}
 D_1 &= M + A\Delta\phi_1 + B\Delta\lambda_1 + C\Delta\phi_1^2 + D\Delta\phi_1\Delta\lambda_1 + E\Delta\lambda_1^2 \\
 D_2 &= M + A\Delta\phi_2 + B\Delta\lambda_2 + C\Delta\phi_2^2 + D\Delta\phi_2\Delta\lambda_2 + E\Delta\lambda_2^2 \\
 D_3 &= M + A\Delta\phi_3 + B\Delta\lambda_3 + C\Delta\phi_3^2 + D\Delta\phi_3\Delta\lambda_3 + E\Delta\lambda_3^2 \\
 &\dots \quad \dots \quad \dots \\
 D_n &= M + A\Delta\phi_n + B\Delta\lambda_n + C\Delta\phi_n^2 + D\Delta\phi_n\Delta\lambda_n + E\Delta\lambda_n^2 \\
 \Delta\phi &= \phi - 37^\circ \quad \Delta\lambda = \lambda - 138^\circ
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \dots \\ D_n \end{aligned}} \right\} \text{式 - 2}$$

3.5 標準磁場の変化量分布式の計算

地磁気各成分の1990年から2000年までの10年間の変化量の分布についても、緯度・経度の二次式で表されるものと仮定し、3.3項で求められた10年間の変化量から最小二乗法により、地磁気各成分の変化量を定式化した(式-3)。この式により、任意の点における地磁気各成分の変化量が計算できる(表-5)。

$$\begin{aligned}
 \Delta D_1 &= M + A\Delta\phi_1 + B\Delta\lambda_1 + C\Delta\phi_1^2 + D\Delta\phi_1\Delta\lambda_1 + E\Delta\lambda_1^2 \\
 \Delta D_2 &= M + A\Delta\phi_2 + B\Delta\lambda_2 + C\Delta\phi_2^2 + D\Delta\phi_2\Delta\lambda_2 + E\Delta\lambda_2^2 \\
 \Delta D_3 &= M + A\Delta\phi_3 + B\Delta\lambda_3 + C\Delta\phi_3^2 + D\Delta\phi_3\Delta\lambda_3 + E\Delta\lambda_3^2 \\
 &\dots \quad \dots \quad \dots \\
 \Delta D_n &= M + A\Delta\phi_n + B\Delta\lambda_n + C\Delta\phi_n^2 + D\Delta\phi_n\Delta\lambda_n + E\Delta\lambda_n^2 \\
 \Delta\phi &= \phi - 37^\circ \quad \Delta\lambda = \lambda - 138^\circ
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \Delta D_1 \\ \Delta D_2 \\ \Delta D_3 \\ \dots \\ \Delta D_n \end{aligned}} \right\} \text{式 - 3}$$

3.6 二等磁気点の2000.0年値の算出

詳細な磁気図を作成するためには、3.3項で2000.0年値を求めた一等磁気点だけでは、配点密度が不十分である。しかし、二等磁気測量は、過去30年間実施されていない。そこで、3.5項で決定した変化量係数に、二等磁気点の緯度・経度を与えて、その点の10年間の変化量を求め、1990.0年磁気図を作成した時に決定した1990.0年値に加算することにより、二等磁気点の2000.0年値を決定した。

また、一等磁気点で改測回数が少なく10年間の変化量計算に用いなかった観測点についても、二等磁気点と同様な手法で2000.0年値を決定した。

3.7 地球電磁気連続観測装置

全国11箇所の地球電磁気観測装置における連続観測は、1996年度に開始されたため最近のデータしかない。そのため、地球電磁気観測装置の2000.0年値は、基準観測所の基準年値の算出と同様に1999年1月～2000年12月の月平均値24個を平均することにより決定した。

3.8 磁気図の作図

磁気図は、こうして求められた一等磁気点、二等磁気

表 - 4 標準磁場分布式の係数

$$\begin{aligned}
 D_n &= M + A\Delta\phi_n + B\Delta\lambda_n + C\Delta\phi_n^2 + D\Delta\phi_n\Delta\lambda_n + E\Delta\lambda_n^2 \\
 \Delta\phi &= \phi - 37^\circ \quad \Delta\lambda = \lambda - 138^\circ \quad (\phi \cdot \lambda \text{ unit of degree})
 \end{aligned}$$

	M	A	B	C	D	E
D	7 37.142	21.622	-7.672	0.442	-0.320	-0.675
I	51 03.804	73.745	-9.472	-0.771	-0.459	0.359
H	nT 29859.182	nT -425.215	nT -87.838	nT -5.725	nT 7.773	nT -3.051
Z	36978.848	1083.733	-313.745	-8.609	-4.011	-0.110
F	47505.388	567.453	-294.499	-0.255	-2.975	1.291

表 - 5 標準磁場の変化量分布式の係数

$$\begin{aligned}
 \Delta D_n &= M + A\Delta\phi_n + B\Delta\lambda_n + C\Delta\phi_n^2 + D\Delta\phi_n\Delta\lambda_n + E\Delta\lambda_n^2 \\
 \Delta\phi &= \phi - 37^\circ \quad \Delta\lambda = \lambda - 138^\circ \quad (\phi \cdot \lambda \text{ unit of degree})
 \end{aligned}$$

	M	A	B	C	D	E
ΔD	0 13.042	-0.200	0.581	-0.024	0.136	-0.067
ΔI	0 27.636	-0.377	-0.039	0.016	-0.056	0.039
ΔH	nT -134.115	nT -8.658	nT 4.355	nT -0.423	nT 0.981	nT -0.568
ΔZ	440.833	-3.766	0.011	-0.672	0.547	0.007
ΔF	258.101	-0.036	1.777	-0.938	1.064	-0.348

点，基準磁気点，観測所の2000.0年値を用いて，地磁気成分ごとに等値線を描き作成した。この時に，磁気点の周囲で孤立した目玉状の等値線が表れることがあった。そのような場所については，隣接する磁気点の値と照らし合わせて，明らかに不整合と思われる磁気点については，削除してから作図をした。

また，前回の磁気図まではスクライブ法により作成していたが，磁気図2000.0年値は，Genetic Mapping Tool (GMT) を使用し，初めてパソコン上で等値線を作成し画像化を行った。このことにより，作業が非常に効率化されたと同時に，データがデジタル化されているため，今後他の研究での利用が容易になると期待されている。

例として，図 - 4 に「磁気図（偏角）2000.0年値」図 - 5 に「磁気図（全磁力）2000.0年値」を示す。等値線は，偏角・伏角が10 毎に，全磁力・水平分力・鉛直分力が100nT 毎の間隔で描いている。

4. 磁気偏角一覧図の作成

磁気図2000.0年値（偏角）の作図結果をもとに，1：50000地形図毎の磁針方位値を記述したものが，2000.0年磁気偏角一覧図（国土地理院技術資料B・1 - No.34）である。磁針方位値は，磁気図2000.0年値（偏角）を1：50000地形図毎に区切り，その図郭中心の数値を読んだものである。1図葉内に等値線が密にある場合には，さらに細かく分割して，その範囲の中心の値を読んで数値を決定した。

ただし，地磁気測量が行われていない南西諸島・北方領土等については，3.4項で決定した二次式で磁針方位値の算出を行った。

また，日本周辺域の磁針方位については，海上保安庁海洋情報部が，石垣島・硫黄島・南鳥島等において実施した地磁気測量の観測結果を考慮してモデル式の作成を行っている。国土地理院では，これらの地域で地磁気測量を行っていないため，今回磁針方位値を10 単位で表示したときに，両者の差が30 以上の場合には，海上保安庁海洋情報部のモデル式を採用することにした。また，小笠原諸島の父島で気象庁地磁気観測所が観測し

ているが，海上保安庁のモデル式の方が一致していることがわかった（表 - 6）。そのため国土地理院が刊行する地形図の磁針方位値は，この数値を使用するものとする。

表 - 6 父島における偏角値の比較

父 島	偏角	差()
測定値(2000/01/01)	214.8	
国土地理院モデル式	255.6	-40.8
海上保安庁モデル式	205.8	9.0

5. まとめ

1990年値磁気図の作成までは，一等磁気点における繰り返し観測が数多く行われていたが，1996年から地球電磁気連続観測装置の設置より，一等磁気点繰り返し観測の量が減少した。そのため，従来方法により10年間の変化量の推定が可能な一等磁気点がかかり減少してしまった。そのために，今回は，観測所のデータと新設した地球電磁気連続観測装置のデータもあわせて，2000.0年値を算出した。また地磁気測量は，観測点の周辺に人為的な磁気擾乱源がない場所が望ましい。しかし近年，様々な開発事業等により，安定して永年変化を検出できる観測点が少なくなっている現状にある。この傾向は，今後も続くものと予想されることから，環境の良い磁気点を厳選して，それらの磁気点について集中して繰り返し観測を行うことが必要である。また，今後も他の観測機関と連携をとりデータの有効活用を計るとともに，新しい解析手法を用いて，日本の磁場モデルの作成を検討したい。

謝 辞

磁気図の作成には，多くの観測データが必要であり，これまで地磁気測量に従事されてきたすべての方々に感謝いたします。特に今回は，気象庁地磁気観測所，海上保安庁海洋情報部より貴重なデータ提供をいただき使用しました。ここに記して関係者に深く感謝いたします。

参考文献

- 国土地理院(2002)：2000.0年値磁気偏角一覧図，国土地理院技術資料B1-No.34，2002。
 国土地理院(2002)：磁気図2000.0年値，国土地理院技術資料B1-No.35，2002。
 田辺 正(1997)：全国に設置した地球電磁気連続観測装置，国土地理院時報No.87，4-12。
 広石一男(1992)：地磁気測量の概説，国土地理院技術資料B5-No.17，48-58. 1992

磁気図(偏角) 2000.0年値

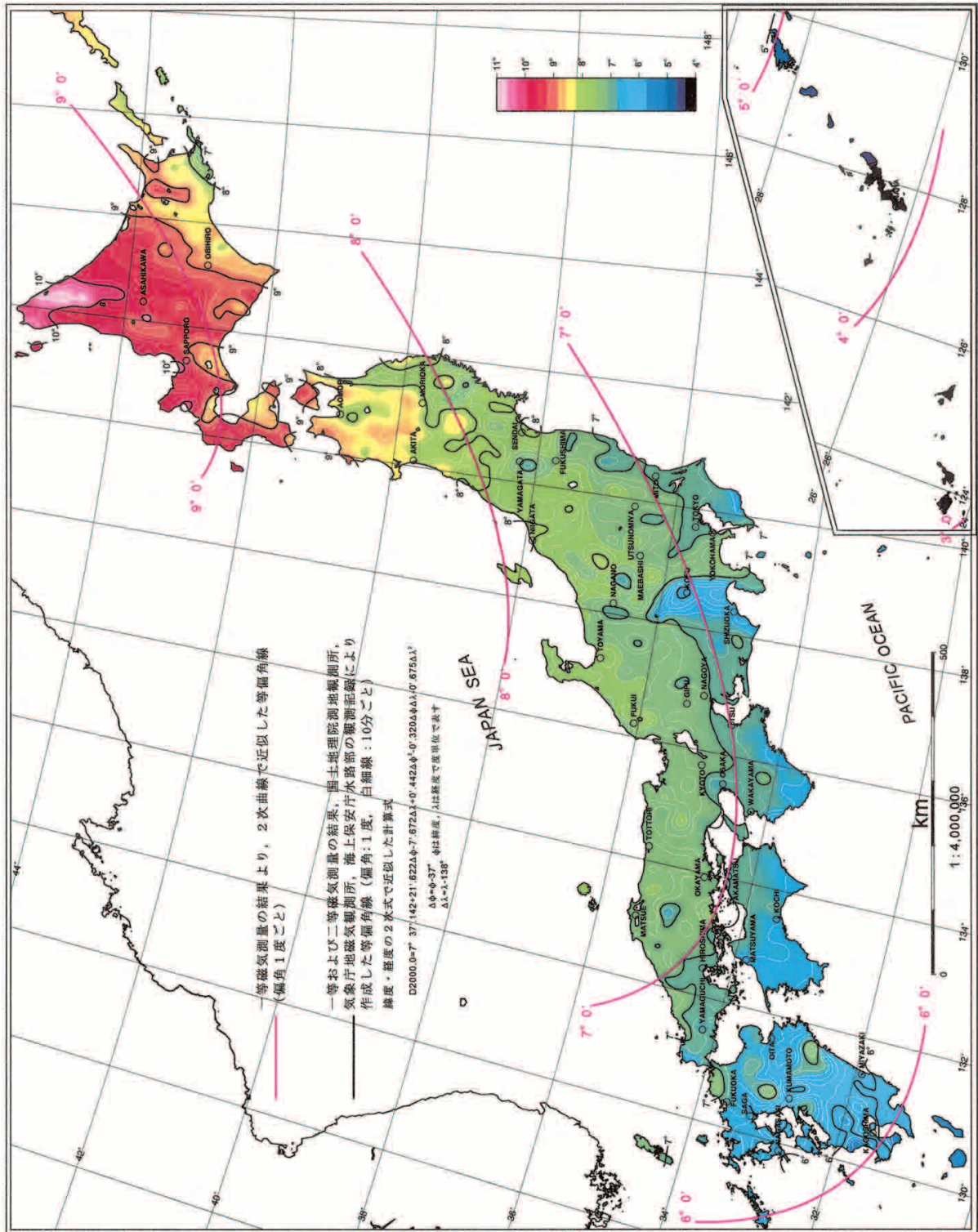


図 - 4 磁気図(偏角) 2000.0年値(縮尺約50%)

