

# 柿岡, 女満別, 鹿屋における地磁気日変化の変動

山田 雄二

(1995年1月13日受付, 1995年2月17日改訂)

## 概 要

柿岡, 女満別, 鹿屋における地磁気日変化の1日毎の変動のパターン分類を主成分分析法を用いて行った. その結果日変化のパターンは3つの主成分でその変動のほとんどを説明できることがわかった. 第1主成分は昼間側電離層のSq渦電流の強さの変動を表しており, 季節変動が明瞭で11年周期変動も見られる. この主成分は1日周期潮汐風によるダイナモ電流の変動を表していると考えられる. 第2主成分は昼間の午前側, 午後側2つの電流渦から成っており, 半日周期潮汐風によるダイナモ電流の変動を表していると思われる. 第3主成分のパターンや季節変動の様子は上の2つの主成分とは著しく異なっており, その成因はよくわからないが, 極域起源の電離層電流によるものではないかと推定される. この方法は電流渦の中心位置に着目するこれまでの手法に比べてより正確にパターン変動を記述することができる.

## 1. はじめに

地上で観測される地磁気静穏日日変化は, 主に電離層中のダイナモ電流によって生じていると考えられている. 地上磁場変化から推定される電離層電流は, 北半球で反時計回り, 南半球で時計回りに流れる, 昼間側の一対の電流渦から成り立っている. しかしその強さや形状は必ずしも時間的に一定ではない. 特に季節変動や太陽活動度の変化による年年変動は古くから調べられている (Campbell (1989) の参考文献を参照). またこのような長周期の変化に加えて, 数日のうちに日変化の形が一変する様なこともしばしばある.

ところで日変化電流系の変動は, 南北半球の一対の渦電流構造自体は変わらず, 多くの場合その変形や強度の変化という形で現れる. 従って電流渦の中心位置の時間変動を調べることによってパターンを数量的に表現できることから, これまで日変化電流系の変動に関する議論は渦中心の移動を通じてなされてきた (例えば Hasegawa (1960)). この方法によってパターンの変化の様子について多くの知識が得られた. しかしこの手法は2つの点で改良する必要がある.

- (1) これまでに明らかとなった電流渦中心の移動の様子は必ずしも単純ではない. これは電流渦の移動が複数の要因によって引き起こされていることを示唆している. 従ってさらに踏み込んだ議論をするためには単に渦中心に着目するにとどまらず, 日変化全体についてその変動がどのような空間的広がりを持っているか, そしてそれがどのような時間スケールで変動しているかを, 総合的かつ定量的に解析することが必要である.

(2) 上で述べたように地磁気日変化が時間と共に変動しても基本的な2つ目玉構造は変わらない。従って日変化の変動を平均状態とその偏差とに分離する考え方が有効である。平均パターンからの偏差を取り出してそれを解析の対象とすれば、変化の様子をより鮮明にすることができ、その物理的意味をさらに明確にできるだろう。

この報告ではその目的のために、地磁気日変化のパターンと強度の変動を定量的に記述する方法として主成分分析法を用いた解析方法を紹介する。そして解析の結果、日変化電流系の変動がいくつかのモードから成り立っていることを示す。

## 2. 解析方法

使用したデータは1958年から1992年までの35年間の、柿岡 (KAK)、女満別 (MMB)、鹿屋 (KNY) の水平分力 ( $H$ )、偏角 ( $D$ ) の毎時値である。第1表には各観測点の位置を示した。解析にあたっては、地方時 (15h-15h UT) で一日中、 $K_p$  インデックスが2+を越えない日の毎時値を対象とし、3地点のうち1地点でも欠測がある日は除外した。その結果、解析に用いた日数は2927日となった。

第1表 各観測点の地理・地磁気座標。

Table 1 The location of each observatory in geographic and geomagnetic coordinates.

Observatory	Geographic		Geomagnetic	
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
Memambetsu (MMB)	43° 54' 30" N	144° 11' 35" E	34.7°	210.5°
Kakioka (KAK)	36° 13' 45" N	140° 11' 23" E	26.7°	208.0°
Kanoya (KNY)	31° 25' 14" N	130° 52' 56" E	21.2°	200.1°

前処理としてまず各々の  $H, D$  成分毎時値から地理上の北向き ( $X$ )、東向き ( $Y$ ) 成分を計算した。また永年変化などの長周期の変動を取り除くため、1日 (地方時0時~24時) 毎に日変化のベース値を求めて、それからの偏差を使用した。ここでは各成分について、1日の始めの3時間 (0時~3時) と最後の3時間 (21時から24時) の6個の毎時値から求めた、その日1日の地磁気変化の1次トレンドを長周期成分とみなしてベース値に用いた。従って使用するデータの夜間の値 (0時~3時, 21時~24時) の平均はいずれの日も0である。これは地磁気日日変化が主として電離層電流に起因するならば良い近似と考えられる。

こうして得られた3地点一組の毎時値は144個 (3地点×2成分×24時間) の値からなり、これがその日の地磁気変化を表している。すなわち144個の値1セット、

$$b_n = (b_n^{MMB}, b_n^{KAK}, b_n^{KNY}) \quad (1)$$

によって (3地点での) 第  $n$  日の24時間の日変化を表現していることになる。ただしここで  $b_n^{MMB}, \dots$  は各々の地点での1日の毎時値の並びで、

$$\mathbf{b}_n^{MMB} = (x_n^{MMB}(0), \dots, x_n^{MMB}(23), \dots, y_n^{MMB}(0), \dots, y_n^{MMB}(23))$$

$$\vdots$$

である。

(1) は144次元位相空間での1個の点を示しているから、解析の対象は2927個の点(サンプル)の集団であり、2個の点の距離はその2日における日変化のパターンの違いを反映している。従って1日毎の日変化のパターンの変化を調べることは、その位相空間内での点の分布の状態を調べることに帰着する。そしてここではその方法として主成分分析を用いた。

具体的にはまず  $\{\mathbf{b}_n, n=1, 2, \dots, 2927\}$  に対して平均偏差をとる。すなわち

$$\mathbf{B}_n = \mathbf{b}_n - \bar{\mathbf{b}} \quad (2)$$

ただし、

$$\bar{\mathbf{b}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{2927} \mathbf{b}_n \quad (3)$$

である。次にこの2927個の144次元ベクトル  $\mathbf{B}_n$  について共分散行列(144行×144列)を計算し、その固有値・固有ベクトルを求める。得られた固有ベクトルは2927サンプルに共通な変動パターンを表し、対応する固有値がその主成分の分散、すなわちそのパターンの変動の強さを示す。今の場合には計算上は144個の固有ベクトルが求まるが、ノイズや誤差のため小さな固有値に対応する固有ベクトルはあまり意味がなく、もっぱら固有値の大きい(変動の大きい)上位の固有ベクトルについて議論することになる。また求められた固有値の大きいものから順に第1主成分、第2主成分、……と呼ぶ。

こうして求められた固有ベクトル  $\{\mathbf{w}_i, i=1, 2, \dots, 144\}$  は互いに直交しており、 $n$  番目の日のデータ  $\mathbf{b}_n$  は

$$\mathbf{b}_n = \bar{\mathbf{b}} + \sum_{i=1}^{144} a_{in} \mathbf{w}_i \quad (4)$$

のように固有ベクトルの一次結合で表すことができ、あらかじめ固有ベクトルのノルムを1に規格化しておけば、(4)の係数は

$$a_{in} = \mathbf{B}_n \mathbf{w}_i' \quad (5)$$

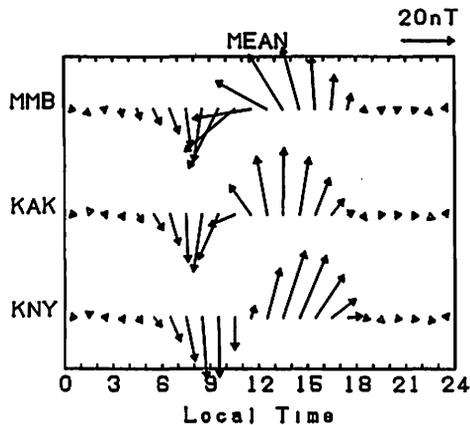
のように内積によって求めることができる(ここで'は転置行列を表す)。この係数  $a_{in}$  から第*i*主成分のパターンの時間( $n$ )的な推移を知ることができる。

### 3. 解析結果

主成分分析の結果を示す前に、まず第1図に全サンプルの平均を表示した。ここではX, Y成分からなる磁場の水平成分ベクトルを、頭上の等価電流系を模して90°時計回りに回転したもので表示している。まず磁場の変化が昼間の時間帯に限定されており、夜間は変化が非常に小さいことがわかる。前節で述べた様に、真夜中をはさむ6時間の平均値を1日のベースとしているから、夜間の変化が昼間に比べ小さくなるのは当然であるが、ほぼ日の出と共に磁場変化が始まり日没と同時に変化が小さくなるということは、日変化の

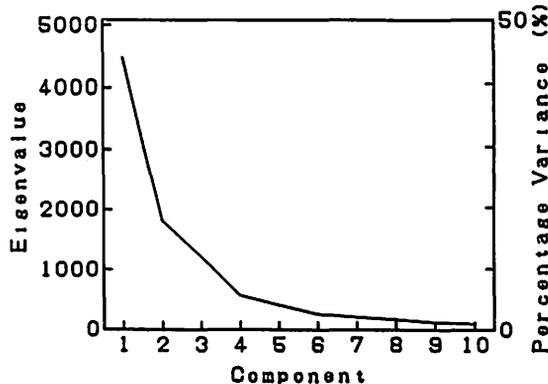
平均パターンの原因はそのほとんどが電離層電流であることを裏付けている。昼間の等価電流のパターンは左回りの渦状電流であり、これは1日周期潮汐風によるダイナモ電流が日変化の主体であることを表している。

各日の日変化のこの平均パターンからの偏差について主成分分析を行い、その結果得られた上位主成分(第1~10主成分)の固有値を第2図に示した。第1主成分の寄与率は44%に達している。また第3主成分までの累積寄与率は74%であり、日変化変動の分散のかなりの部分を上位3成分だけで説明できることがわかる。従って以下では上位3つの主成分(モード)について説明する。



第1図 3観測点における地磁気水平成分の1958年~1992年の平均日変化。各ベクトルは90°回転して頭上の等価電流として表現している。

Fig. 1 Mean daily variations of the horizontal magnetic vector at three observatories, 1958-1992. Each vector is rotated by 90 degrees to express the overhead equivalent current.



第2図 始めの10項までの主成分固有値。右端の縦軸の目盛りで寄与率を表している。

Fig. 2 Eigenvalues of the leading ten principal components. The ordinate on the right side of the figure indicates the corresponding percentage variance.

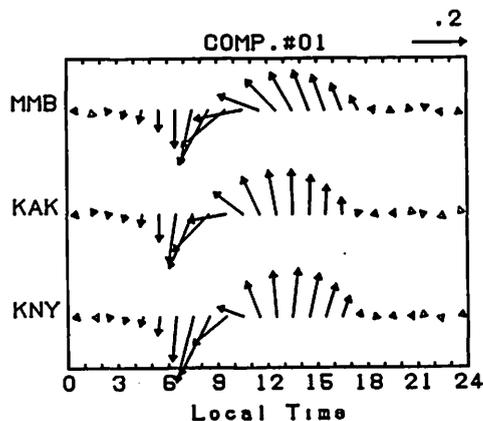
## 3-1 第1主成分

第3図は第1主成分の固有ベクトルである。固有ベクトルは144次元のベクトルでノルムは1に規格化されている。第1図と同様に等価電流ベクトルとして表示している。これを見ると第1図と同様に夜間の磁場変化は昼間に比べてフラットでかつ小さい。このような明瞭な地方時依存性は磁気圏界面電流や磁気圏尾部電流では説明は困難であり、この磁場変化は電離層電流が起源であると思われる。

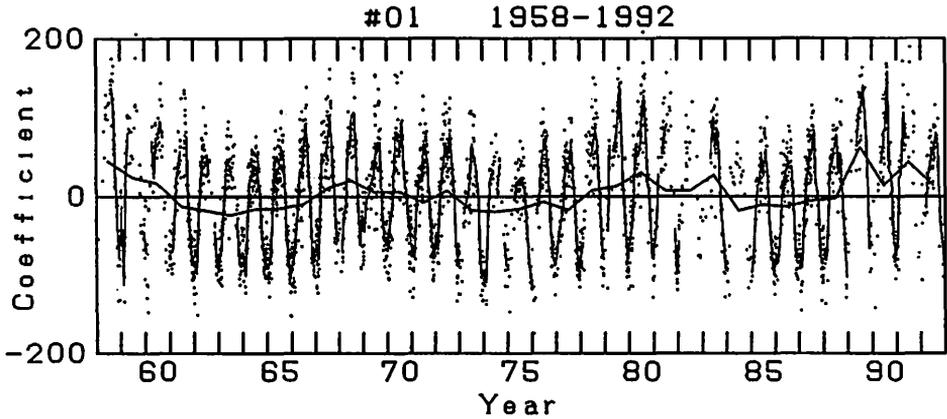
この図をみると、第1主成分のパターンは大まかに言って第1図の平均パターンと類似している。すなわち昼間側の1つ目玉の渦電流パターンである。従って平均パターンにこの磁場変動が重なったとしても電流のパターンはほとんど変わらない。言い替えるとこのモードは基本的にいわゆるSq電流系の強弱の変化を表している。第1主成分の係数がプラス方向に大きいときは磁場変化は平均パターン（第1図）に第3図のベクトル（を係数倍したもの）が加わるから平均のSq電流が強まっていることを表す。逆にマイナス方向に大きいときは第3図のベクトルを全て逆向きにして平均パターンに加わるからSq渦電流は弱くなっている状態を示すことになる。第3図の1つ目玉構造から推定して、このモードは1日潮汐風による電離層ダイナモ電流の変動を反映していると思われる。

実際に第1主成分の振幅が時間と共にどのような値をとっているかを示すために、第4図に第1主成分の係数 ( $a_{1n}$ ) の1日毎の値を点で表している。また同時に、年毎の平均値と月毎の平均値をそれぞれ太線と細線で示した。この図でまずわかることは、年周変化が非常に明瞭で規則的であることである。個々の点は月平均値（細線）からずれてはいるがその量は年周変化の振幅に比べればおしなべて小さい。もう一つの特徴は年平均値（太線）が太陽活動の11年周期変動に対応して変動していることである。第5図は1958年から1992年までの国際太陽黒点数の年平均値の推移であるが、第4図の年平均値の変動と非常に良く対応していることがわかる。

年周変化の様子を詳しく見るために、月毎に係数の平均をとって表示したものが第6図である。実線は解析した全ての年についての平均値、破線と点線はそれぞれ太陽活動が活発な年と不活発な年だけについての平均値のプロファイルである。季節変化は夏大きく冬

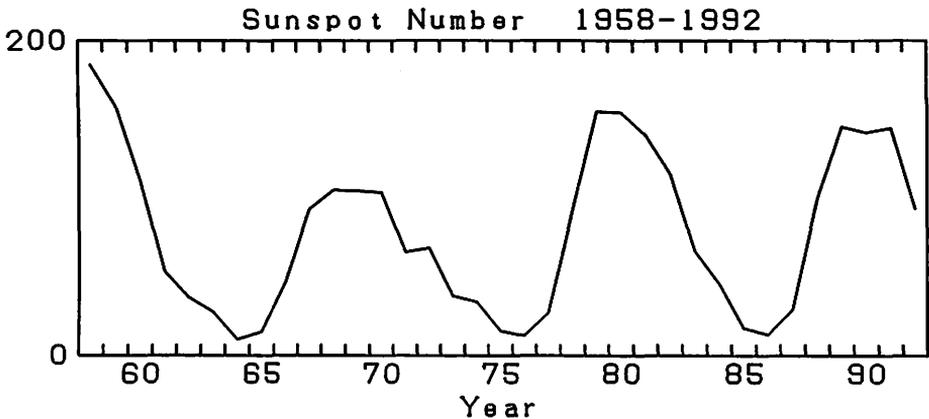


第3図 頭上の等価電流ベクトルで表示した、第1主成分固有ベクトル。  
Fig. 3 Eigenvector of the first principal component expressed by equivalent overhead current vectors.



第4図 点は第1主成分の各々の日の係数。月平均値、年平均値がそれぞれ太線、細線で示されている。月平均値はその月に3日以上データのデータが使用できる場合にのみ示した。

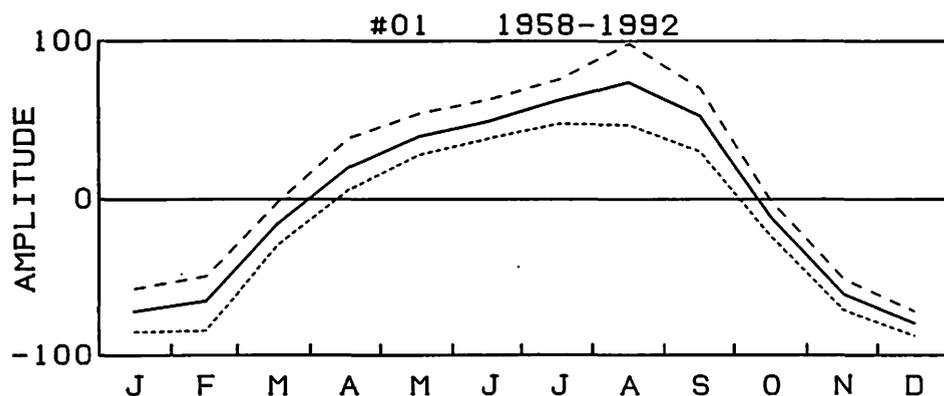
Fig. 4 Coefficient of the first principal component on each day (dot). Monthly means and yearly means are indicated by thin and thick solid line, respectively. The monthly mean value was calculated only when data of more than three days are available in the month.



第5図 国際太陽黒点数の年平均値 (1958年~1992年)。

Fig. 5 Yearly mean values of the International Sunspot Number, 1958-1992.

小さい、すなわち  $S_q$  渦電流は夏強まり冬弱まるということが明瞭である。冬半球より夏半球の方が  $S_q$  電流系が強いことはこれまでに既に指摘されている (Matsushita and Maeda, 1965)。また年周変化は12月に極小になるのに対して、極大は8月であり夏至とはずれている。同様のずれは Campbell and Matsushita (1982) も導いており、彼らの解析では太陽活動極小期には7月から8月始めに  $S_q$  電流がピークとなる。 $S_q$  電流系の強弱が単に電離層電気伝導度の変動で決まるのであれば、北半球で太陽天頂角が最小となる6月から7月にかけてピークとなるはずである。従ってこの結果は  $S_q$  電流系の強度変動には電気伝導度だけでなく潮汐風の変動も関与していることを示唆している。Vincent et al. (1988) による熱圏下部の風速データの解析によれば、1日周期潮汐風の振幅は夏の終わ



第6図 月毎に求めた、第1主成分の係数の平均値。実線は全期間の平均を表す。また破線と実線はそれぞれ、太陽活動が活発な年（1958～61年、1967～72年、1978～83年、1989～92年）と静穏な年（1962～66年、1973～77年、1984～88年）の値から求めた平均を表している。

Fig. 6 Coefficient of the first principal component averaged over each month. Solid line shows the means of all the years. Dashed line and dotted line show the means of the solar active years (1958-61, 1967-72, 1978-83, 1989-92) and solar quiet years (1962-66, 1973-77, 1984-88), respectively.

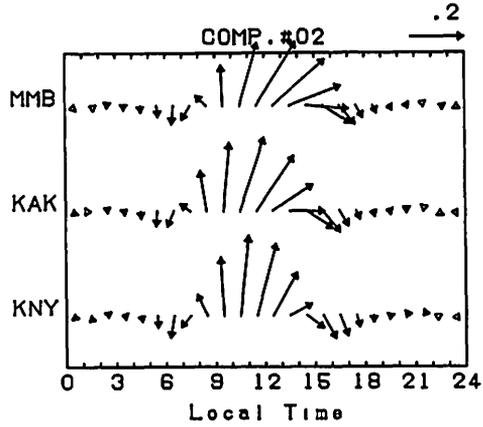
りに最大になるという結果が得られており、この考えを裏付けている。ただし Campbell and Matsushita (1982) の解析では太陽活動極大期には  $Sq$  のピークは夏よりもむしろ春、秋に現れるという、半年周期変動が顕著であることを導いている。これは我々の解析においては次節で述べる第2主成分の影響ではないかと思われる。

### 3-2 第2主成分

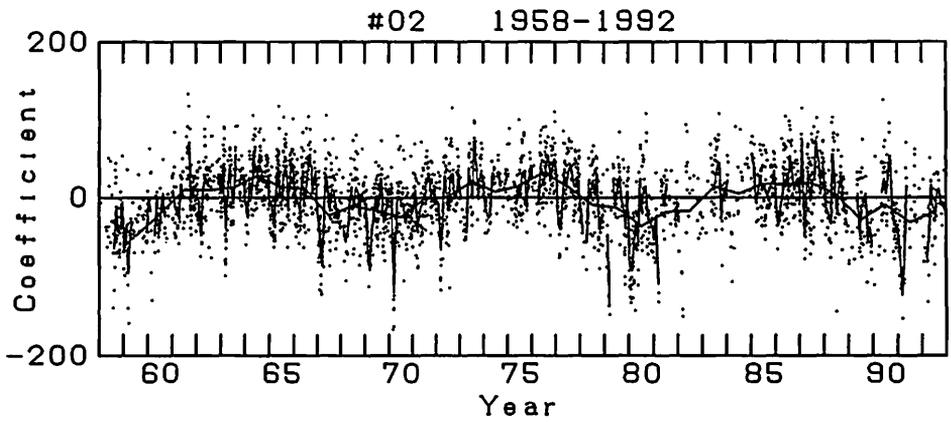
第7図は第2主成分の固有ベクトルである。このパターンは第1主成分の場合とは違って、平均磁場（第1図）とは著しく異なり、午前側と午後側に中心をもつ一対の渦電流から成り立っているように見える。2つの渦電流の向きは互いに逆向きで、渦中心の位置は  $KNY$  よりもさらに南側にあると推定される。また午後側の渦は午前側の渦に比べ強く、その位置も午前側へ張り出している。

第2主成分の係数の時間変化を示したのが第8図である。第1主成分の場合（第4図）と比べて季節変化の形が不明瞭である（細線）一方、太陽活動の11年周期変動に対応した変化（太線）が明瞭であり、太陽活動が活発な年は係数は小さくなり、静穏な年は大きくなる。月毎の平均値（第9図）でさらに詳しく見ると、季節変化は第1主成分の場合のようなきれいな1年周期ではなく、半年周期成分も大きな比重をしめており、結果として3月と10月が極小となっている。また夏期は他の季節に比べて太陽活動による変動が小さい。

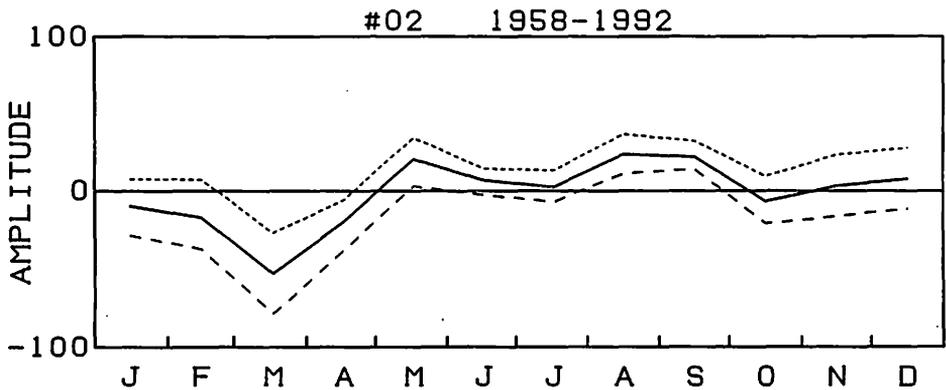
第7図の等価電流系の形状から考えて、このモードは半日潮汐風による電離層ダイナモ電流の変動を表現していると思われる。半日周期潮汐風の主要なモードと思われる(2,2)と(2,4)モードによって電離層中に励起される電流については、Tarpley (1970), Richmond et al. (1976), Takeda and Maeda (1981) が数値計算を行っている。いずれの結果においても(2,2)モードの風系によって生じる電離層電流は昼間側に渦構造として現れ、午前側が反時計回り、午後側が時計回りの2つ目玉型になっている。それに対して、(2,4)モードによる電流系はやはり電流渦ができるものの Tarpley (1970) の結果以外は2つ目



第7図 第2主成分について第3図と同様に表したもの。  
Fig. 7 Same as Fig. 3 but for the second principal component.



第8図 第2主成分について第4図と同様に表したもの。  
Fig. 8 Same as Fig. 4 but for the second principal component.



第9図 第2主成分について第6図と同様に表したもの。  
Fig. 9 Same as Fig. 6 but for the second principal component.

玉構造は不明瞭である。また数値計算によると(2,4)モードの電流渦中心緯度はいずれの計算でも $30\sim 40^\circ$ という結果が得られているのに対して、(2,2)モードによる電流渦の中心は約 $24^\circ$  (Tarpley, 1970), あるいは $10\sim 20^\circ$  (Takeda and Maeda, 1981)とものと低緯度に位置する点でも(2,2)モードの方が第2主成分のパターンと一致する。従って第2主成分は(2,2)モード潮汐風によるダイナモ電流の消長を表していると想像できる。ただしこれらの南北半球に対称な潮汐風モードに加えて、反対称モードもダイナモ電流に大きく寄与しているという説もあり (Stening, 1989), 風の南北半球同時観測の結果でも反対称モードが無視できない振幅を持つことが明らかとなっている (Vincent et al., 1988). 従って第2主成分が本当に(2,2)モードの風系の変動をあらわしているのかどうか結論をだすには、南北両半球のデータを使った解析を待たなくてはならない。

ここで注意すべき点は、たとえ上記の推測どおりに、第2主成分が(2,2)モードに対応しているとしても、それは半日周期潮汐風の他のモードの地磁気日変化への寄与が小さいことを必ずしも意味しないことである。我々がここで調べているのは日日変化への寄与が大きい成分であって、日変化への寄与が大きいかどうかはこれだけではわからない。実際、Richmond et al. (1976)の数値計算では、生じるダイナモ電流は(2,2)モードより(2,4)モードの方が大きいという結果になっている。

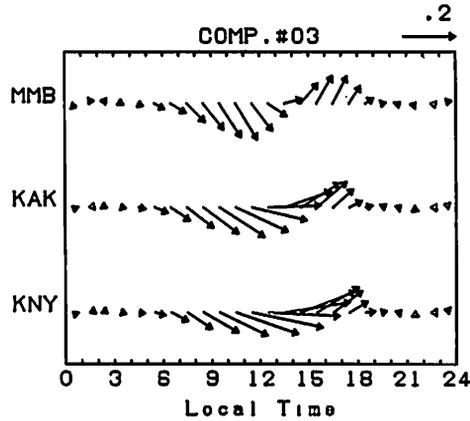
ところで、もし第2主成分が半日周期潮汐風によるダイナモ電流を反映しているとする と第8図や第9図で得た季節変化や11年周期変化は説明できるだろうか。中間圏界面から熱圏下部における半日周期潮汐風の観測によれば、風の位相や鉛直波長の変化は1年を通じてのなめらかな変化ではなく、夏と冬の2つの違った状態からなる。そしてその状態は春と秋の短期間のうちにギャップ的に遷移することがわかっている (Vincent et al., 1988; Tsuda et al., 1988). また振幅については周期的な季節変動は不明瞭だが9~10月に大きくなることがわかっている (Tsuda et al., 1988). この様な風の季節変化によって第9図の解析結果が説明できるか確かめるには、半日周期潮汐風の振幅や位相の変化が地磁気へ与える効果を見積もる必要がある。

太陽活動への依存性については、第2主成分が(2,2)モードを反映していると仮定すると第8図の結果から、(2,2)モードによるダイナモ電流は太陽活動が活発な時期には弱まることになる。Takeda and Yamada (1987)は太陽活動の変化による電離層電気伝導度の変動がダイナモ電流系に与える影響を数値計算によって求めた。それによれば(2,2)モードによる電流は太陽活動と共に増大する。彼らの計算では潮汐風の強さは太陽活動の変動では変わらないとしているから、ここでの解析結果を説明するには潮汐風の何らかの変動を考える必要がある。レーダーによる中間圏上部~熱圏下部の潮汐風の観測によれば、半日周期潮汐風の振幅が太陽活動度の11年周期変動に伴って変動しており、しかも活動度と逆相関であるという報告がある (Sprenger and Schminder, 1969; Greisiger et al., 1987; Namboothiri et al., 1993). このことは定性的にはつじつまが合うが、結論を導くにはさらに精密な比較・検討が必要である。

### 3-3 第3主成分

第10図は第3主成分の固有ベクトルである。これを見ると第1主成分と同様、夜間の磁場変化は昼間に比べてほとんど0であり、この磁場変化も電離層電流が起源であると思われる。

このパターンを見てみると、KNYでは基本的に南北方向よりも東西方向の電流が卓越



第10図 第3主成分について第3図と同様に表したもの。  
Fig. 10 Same as Fig. 3 but for the third principal component.

したパターンを示しているが、KAK、MMBと北へ行くにつれて南北成分が大きくなり渦状の電流に近づいていく。このことから推定して、このパターンは日本付近よりもやや高緯度側に中心のある渦電流の変動を示していると思われる。

第11図は第3主成分の係数の時系列プロット、第12図は月平均値のプロットである。これからわかるように、

- (a) 季節変化は4月と9月にそれぞれ極大、極小をもつ年周変化が主体である。
- (b) 太陽活動による変化は春～秋に顕著である。
- (c) 冬季は太陽活動度によらず常にほとんど係数は0である。

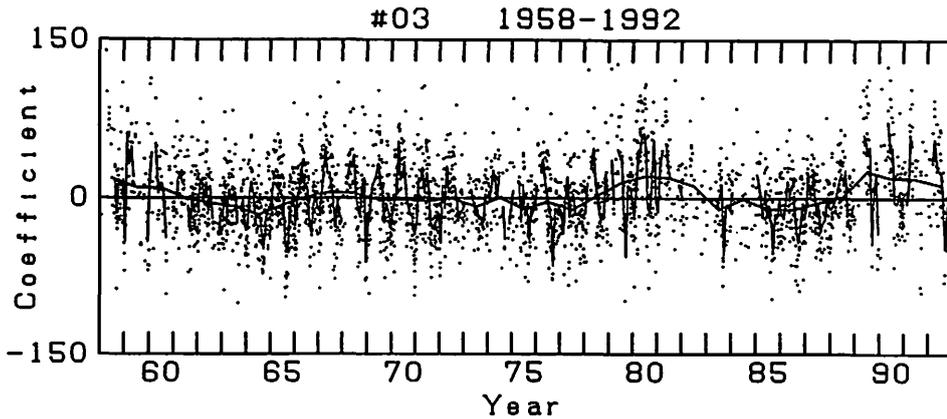
という、第1、2主成分の場合とは全く異なった特徴がある。(b)、(c)は電流系の電離層電気伝導度への依存を表していると考えられ、この電流系が電離層電流であるという考えを裏付けている。ただいずれにしても、この電流系の原因を調べるには高緯度のデータも含めた解析を行わなければならない。

#### 4. 議 論

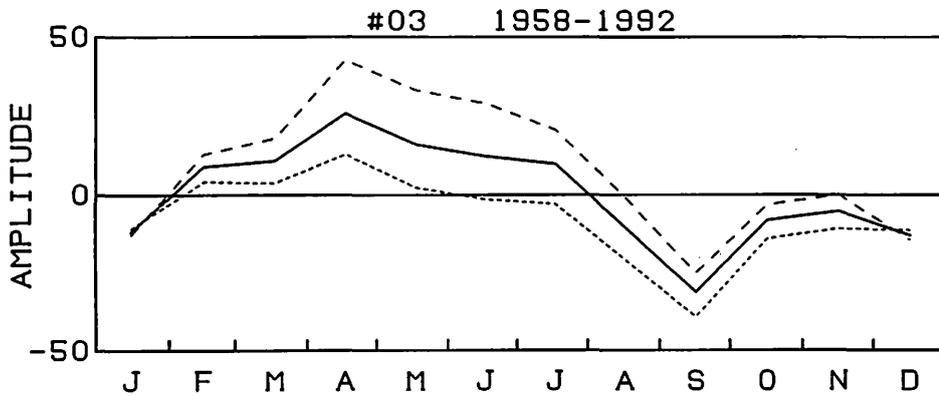
ここでは生の磁場データから変動パターンを互いに直交する主成分に分解して議論した。この方法は「パターン」という定性的な特徴を定量的に議論するのに威力を発揮する。ところで主成分分析法は多変量解析の一つの方法に過ぎず、この方法で得られた分類結果が物理的に意味があるかどうかは別問題である。しかし前節での議論の結果から、第1～3主成分についてはそれぞれの固有ベクトルの形状や、係数の時間変化（季節変化、11年周期変化）の様相は互いにかなり異なっており、これらの3つのパターンはそれぞれ異なる物理的メカニズムによるものであると思われる。

ところで地磁気日変化電流系のパターン変動は、これまで電流渦の中心の位置の変化を指標として調べられてきた（例えば Hasegawa (1960) 参照）。ここに示した主成分分析の結果は電流渦の移動という観点からはどう解釈されるだろうか。そのことを調べるために、求めた各主成分の変動が等価電流渦中心の移動にどのように反映するかを見積もってみた。

第13図は第1～3主成分それぞれについて、代表的な場合として係数が $\pm\sigma$ （ $\sigma$ は標準



第11図 第3主成分について第4図と同様に表したもの。  
 Fig. 11 Same as Fig. 4 but for the third principal component.



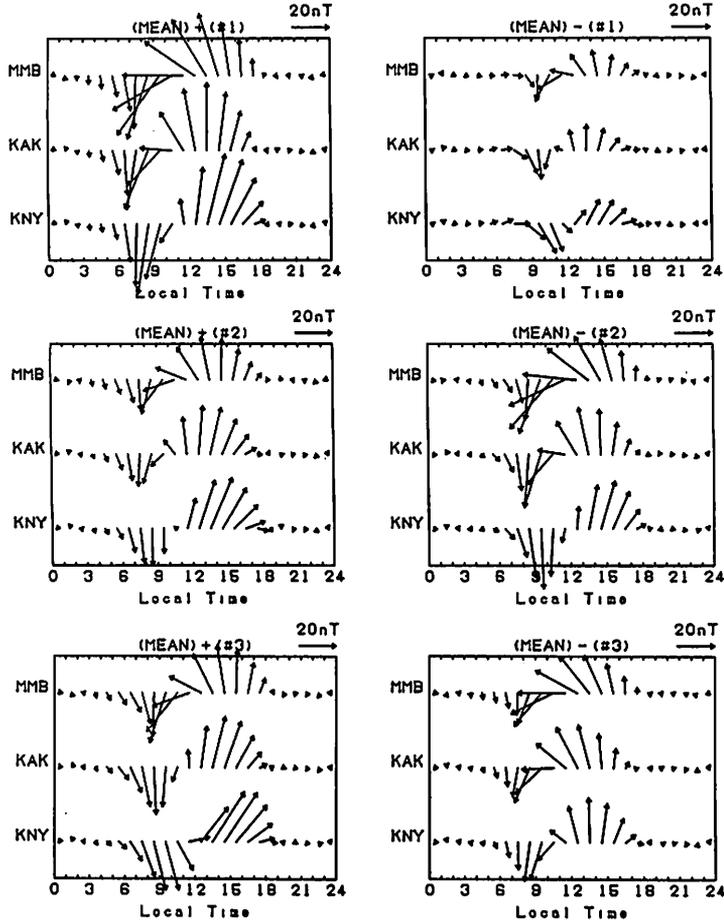
第12図 第3主成分について第6図と同様に表したもの。  
 Fig. 12 Same as Fig. 6 but for the third principal component.

偏差)の時にどのような磁場変化となるか計算した結果である。すなわち  $\lambda_i$  を第  $i$  主成分の固有値としたとき (固有値はその主成分の分散を表すから),

$$\bar{b} \pm \sigma_i w_i \quad (\sigma_i = \sqrt{\lambda_i})$$

を第1~3主成分について図示したものである。(式(4)を参照。)

まず第1主成分の係数が正で大きい場合(第13図上段, 左)と負で大きい場合(上段, 右)とを比べてみると前者は後者に比べて電流渦の強度が2倍以上強い。このことは第1主成分が主に  $S_q$  電流渦の強弱の変化を示す(3-1節)から当然であるが, 加えて電流の南北成分が午前側の南向きから午後側の北向きにかわる時刻は前者の方が後者よりどの地点も1時間ほど早く, 電流渦の中心が午前側へ偏っていることを示している。また電流渦の中心の緯度は前者ではKNYより南にあると思われるのに対して後者は明らかにKNY



第13図 主成分の係数が大きな値をとるときに日変化の形状がどの様になるか具体的に計算してみたもの。上段, 中段, 下段の図がそれぞれ第1~3主成分の場合である。各図は平均のパターン(第1図)に係数が $+\sigma$ (左図),  $-\sigma$ (右図)の時の主成分のパターンを重ね合わせて表現している。

Fig. 13 Demonstration of daily equivalent current pattern in the case that the first, second, and third principal component have a large coefficient (top, middle, and bottom panels, respectively). Each pattern is derived from the mean daily pattern (Fig. 1) superposed by each component vectors with the coefficient  $+\sigma$  (left panels) and  $-\sigma$  (right panels).

より北にある。この様に第1主成分は電流渦の強度の変化だけでなく、実は渦中心の位置の変動も表している。第2主成分の場合(第13図中段)は、係数が正で大きい場合と負で大きい場合とで磁場変化の大きさはあまり変わらない。しかし渦の位置に着目すれば前者の方が後者より午前側に位置している。第3主成分の場合(第13図下段)も電流強度にはあまり違いが見られないが、係数が正で大きい時の方が明らかに渦中心の緯度が高い。

日変化電流系の渦中心の地方時は、夏の方が冬より早い(Matsushita and Maeda, 1965)。地方時の変化は第1, 2主成分に関係しているが、前節のこれらの主成分の係数の季節変化(夏の方が冬より大きい)と一致している。従って渦中心の東西方向の位置の季節変化は1日周期, 半日周期潮汐風の電流系両方の季節変化が関与していると考えられる。

それに対して中心緯度の変化についてはそう単純ではない。Shiraki (1973) によれば、冬は太陽活動が静穏な年の方が活発な年に比べて中心緯度は高いのに対して、夏は活動が活発な年の方が逆に緯度が高い。第13図によれば中心緯度の緯度変化に関与するのは第1, 3主成分である。第6図と第12図とからわかるように、冬季は第3主成分はほとんど太陽活動に依存しないから、緯度の変動は第1主成分だけできまり、太陽活動が静穏であるほど渦の緯度は高い(第1主成分の係数が小さい)。第1主成分のこの傾向は夏季も変わらないが、夏季は第3主成分の太陽活動依存が非常に顕著であり、しかもその緯度変化は第1主成分と逆である。第3主成分の係数は太陽活動が静穏であるほど係数は小さい(すなわち緯度は低い)。従って夏季は両者のバランスで緯度変化の太陽活動依存性が決定される。このことは太陽活動の変動による渦中心の緯度変化が夏季よりも冬季の方が顕著である(Shiraki, 1973) ことと符合している。従って渦中心の南北方向の季節による移動についても、第1と第3主成分という、おそらく互いに異なったメカニズムによる地磁気変動の合成によって発生していることが明らかとなった。

このように  $S_q$  電流の中心位置は必ずしも単一の原因だけで変動している訳ではない。従って単に電流の中心の位置によってパターン分類しただけでは必ずしもその物理的な背景を理解することは難しい。その意味でここで提示した新たな解析方法はより有用であると言えよう。

## 参考文献

- Campbell, W. H., An introduction to quiet daily geomagnetic fields, *PAGEOPH*, **131**, 315-331, 1989.
- Campbell, W. H., and S. Matsushita,  $S_q$  currents: a comparison of quiet and active year behavior, *J. Geophys. Res.*, **87**, 5305-5308, 1982.
- Greisiger, K. M., R. Schminder, and D. Kurschner, Long-period variations of wind parameters in the mesopause region and the solar cycle dependence, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **49**, 281-285, 1987.
- Hasegawa, M., On the position of the focus of the geomagnetic  $S_q$  current system, *J. Geophys. Res.*, **65**, 1437-1447, 1960.
- Matsushita, S., and H. Maeda, On the geomagnetic solar quiet daily variation field during the IGY, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2535-2558, 1965.
- Namboothiri, S. P., A. H. Manson, and C. E. Meek, Variations of mean winds and tides in the upper middle atmosphere over a solar cycle, Saskatoon, Canada, 52°N, 107°W, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **55**, 1325-1334, 1993.
- Richmond, A. D., S. Matsushita, and J. D. Tarpley, On the production mechanism of electric currents and fields in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **81**, 547-555, 1976.
- Shiraki, M., Variations of focus latitude and intensity of overhead current system of  $S_q$  with the solar activity, *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, **15**, 107-126, 1973.
- Sprenger, K., and R. Schminder, Solar cycle dependence of winds in the lower ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **31**, 217-221, 1969.
- Stening, R. J., A calculation of ionospheric currents due to semidiurnal antisymmetric tides, *J. Geophys. Res.*, **94**, 1525-1531, 1989.
- Takeda, M., and H. Maeda, Three-dimensional structure of ionospheric currents, 2. currents caused by semidiurnal tidal winds, *J. Geophys. Res.*, **86**, 5861-5867, 1981.
- Takeda, M., and Y. Yamada, Simulation of ionospheric electric fields and geomagnetic field variation by the ionospheric dynamo for different solar activity, *Ann. Geophys.*, **5A**, 429-434, 1987.

- Tarpley, J. D., The ionospheric wind dynamo-II, solar tides, *Planet. Space Sci.*, **18**, 1091-1103, 1970.
- Tsuda, T., S. Kato, A. H. Manson, and C. E. Meek, Characteristics of semidiurnal tides observed by the Kyoto meteor radar and Saskatoon medium-frequency radar, *J. Geophys. Res.*, **93**, 7027-7036, 1988.
- Vincent, R. A., T. Tsuda, and S. Kato, A comparative study of mesospheric solar tides observed at Adelaide and Kyoto, *J. Geophys. Res.*, **93**, 699-708, 1988.

## Time Change of the Geomagnetic Daily Variation at Kakioka, Memambetsu, and Kanoya

by

Yuji YAMADA

### Abstract

The day-to-day change of the geomagnetic daily variation at Kakioka, Memambetsu, and Kanoya is decomposed into several patterns by using the method of the principal component analysis. As a result, the first component represents the fluctuation of the intensity of the *Sq*-current vortex in the ionosphere, whose amplitude varies in both the annual and 11-year cycle. The cause of this variation is attributed to the fluctuation of dynamo current due to the diurnal tidal wind. The eigenvector of the second component consists of a pair of current vortices on both sides of the noon, which is interpreted as the dynamo-current fluctuation associated with the semi-diurnal tide. The third component, whose current pattern and time variation are quite different from those of the leading two components, is probably caused by the ionospheric currents originated in the polar region. The method introduced here can be used for more precise description of the pattern fluctuations of equivalent currents than the analysis on the basis of movements of the *Sq* foci.