

北陸・近畿・中国における全磁力永年変化(2)

坂中伸也・住友則彦・大志万直人

京都大学防災研究所地震予知研究センター

要 旨

北陸・近畿・中国地方の11観測点において、プロトン磁力計による全磁力連続観測を続けている。1994年終り頃から1997年にかけてのデータから、いくつかの観測点における地磁気永年変化の異常を指摘した。この中には、1995年の兵庫県南部地震に関連する可能性のある異常変化もあるが、因果関係はよくわからない。他方、地殻内の応力変化と全磁力変化の関係を明らかにする目的で、京都府宇治市の喜撰山ダムでダム磁気効果の検出を試みた。

キーワード: プロトン磁力計, 地磁気永年変化, ピエゾ磁気効果, 兵庫県南部地震, ダム磁気効果

1. はじめに

岩石に力をかけると磁化が変わる性質があり、ピエゾ磁気効果(応力磁気効果)と言われる。地殻内の応力が変化した場合も、ピエゾ磁気効果で岩石の磁化が変化し、結果として磁場が変化することが期待される。このほか地殻起源の磁場変化の原因として熱による消磁・磁化獲得、流動電位等が考えられており、ピエゾ磁気効果をも含めてこれらの現象を研究する分野はテクトノマグネティズム(tectonomagnetism)と呼ばれている。このような磁場変化を検出する目的で、京都大学防災研究所地震予知研究センター(RCEP, DPRI, Kyoto Univ.)では、プロトン磁力計による全磁力の連続観測を1998年4月現在、北陸・近畿・中国地方にまたがる11箇所で行っている(Fig.1)。観測点の略号(地名)は、TOT(鳥取)、NAM(西天生)、HRJ(宝立)、SBE(鯖江)、AMG(天ヶ瀬)、MYM(峰山)、MUY(撫養)、FNK(舟木)、TKG(宝塚)、TNJ(丹生)、SGW(菅沢、1996年7月停止)であ

る。TOTでは約30年前から、NAMやHRJでは15年くらい前から、SBE・AMGは6年前、MYMは4年前、六甲・淡路島・徳島等に位置するMUY・FNK・TKG・TNJは1995年1月17日の兵庫県南部地震直後から、プロトン磁力計による連続観測がなされている。

地殻起源の磁場変化の検出を目的とした全磁力観測の結果についての前回報告(坂中ら、1996)の中で、北陸のSBEでの永年変化率が他地点に比べて2倍くらい大きいと指摘したが、ここではその後の変化の推移を、また1995年1月に起こったM7.2(JMA)の兵庫県南部地震に関連した磁場変化があったかどうかなどについて報告する。さらに、揚水式ダムを利用したダム磁気効果実験についても合わせて述べる。

2. 全磁力永年変化について

地震予知を目的とした全磁力の連続観測は大学・政府関連諸機関によって全国の約30箇所で行われ

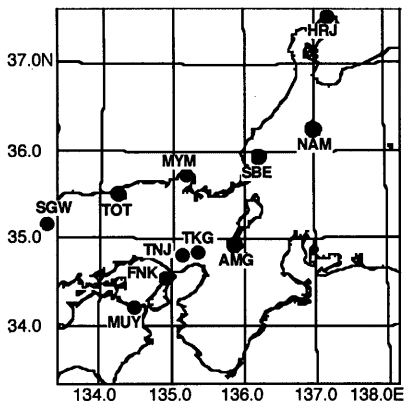


Fig.1 Locations of continuous observation sites of the geomagnetic total force measured by RCEP.

ている。観測結果は地震予知連絡会に定期的に掲載されている。Fig.2は全国の観測点分布である。一例として、Fig.3に、1977年から1997年までの全国の各観測点の柿岡（KAK，気象庁地磁気観測所）に相対的な単純差による永年変化を示した。北海道や九州の観測点では不規則な変動が大きく現れている。これはDST（赤道環電流による磁場擾乱で、磁嵐時には発達する）の影響による。このような地球外部起源の擾乱磁場を除去する工夫が色々なされているが、未だ完全ではない。

これまでの地震予知連絡会への報告は、ノイズの分離が不十分のため、見かけの変化か地殻活動や地震に関係する変化の区別が付き難く不評であった。2年前から地震予知連絡会への報告を中断し、データ解析が詳しくやり直されている。これら永年変化観測データの大幅な見直しの結果の一部は角村ら（1998）によって報告されている。この結果によると、西南日本の永年変化の傾向が全国的な永年変化の傾向からいくらか違っているとの指摘がなされている（Fig.4）。このような永年変化の異常傾向を確かめる目的をも考慮に入れて、RCEPによる近畿地方を中心とした全磁力連続データを解析した。

前回報告（坂中ら，1996）では、TOT・AMG・SBE・NAM・HRJにおける全磁力永年変化のKAKに対する同時刻の単純差を、1992年から1995年の終わりまで示したが、今回新たなデータを加えて1997年9月までのものをFig.5に示す。地点差の算出には、前回報告と同様、地震予知計画・地磁気研

究グループがとりまとめに用いているのと同じデータセットを用いた。すなわち、夜間の0時40分から3時までの10分毎の全磁力値15個の平均値を求め、これを1日の代表値とし、これらの月平均値を求め図に示した。エラーバーは、月平均値に対する日平均値のばらつきを示しており、エラーバーの長さは平均誤差で表した。また、AMGとSBEについては1998年4月までの最新のデータについて、AMGとSBEの単純差AMG-SBEをFig.6に示した。

Fig.5に示した北陸・近畿・中国地方のKAKに対する永年変化が1996年頃までは増加傾向にあることは、角村ら（1998）が示した近畿・中国の永年変化の傾向（Fig.4）と一致する。1992年からのこの永年変化率は平均+1nT/年程度である。前回報告では、SBE-KAKについての永年変化率が、1992年から1995年7月までの平均が+2.5nT/年と周辺地域より2倍以上大きいことを指摘したが、1996年には増加からいったん減少に転じ、その後は1997年まで微増または横ばいである。SBEにおいては、1995年7月から11月までと、1996年7月から1997年5月までの2度にわたって測定器の故障等のため欠測となってしまったが、プロトン磁力計のセンサーの位置は全く変わっておらず、周辺的环境も見た目には変化がないことから、観測値自体は信用できる。

また、HRJについては、1993年2月7日に起こったM6.6（JMA）の能登半島沖地震に関連して指摘された（後藤ら，1994；坂中ら，1996）、地震の前後に見られた大きな全磁力変化はその後鎮静化したようである。ただ、年周変化に対応するような、振幅の比較的小さな変化が以後繰り返されている。また、Fig.5には、前回報告では紹介していなかったSGWの永年変化についても示した。SGWについては、欠測が多いものの、永年変化率は大きいようであるが、山陰地方特有の変化かも知れない。この他に、TOTでは1996年7月頃から永年変化が増加から減少傾向に変化していることも特徴の一つとして挙げることができる。他の観測点でも増加が止まったか、むしろ減少に転じた傾向が見られるので、広域的な変化かも知れない。

Fig.5で示した1995年から1997年の期間の各観測点での平均永年変化率（nT/年）を地図上にプロットしたものがFig.7である。淡路島や神戸周辺の観測点についての永年変化率についても示した。増加域、減少域がありやや複雑である。

以上のように永年変化について検討した結果、地域的な異常変化があるように見えるが、地震活動な

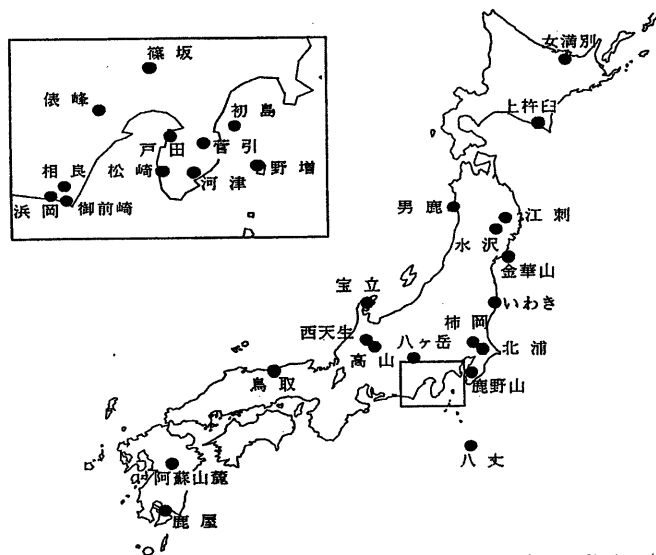


Fig.2 Magnetic observation stations by Geomagnetic Group on Earthquake Prediction (after Geomagnetic Group on Earthquake Prediction and Kakioka Magnetic Observatory, 1996).

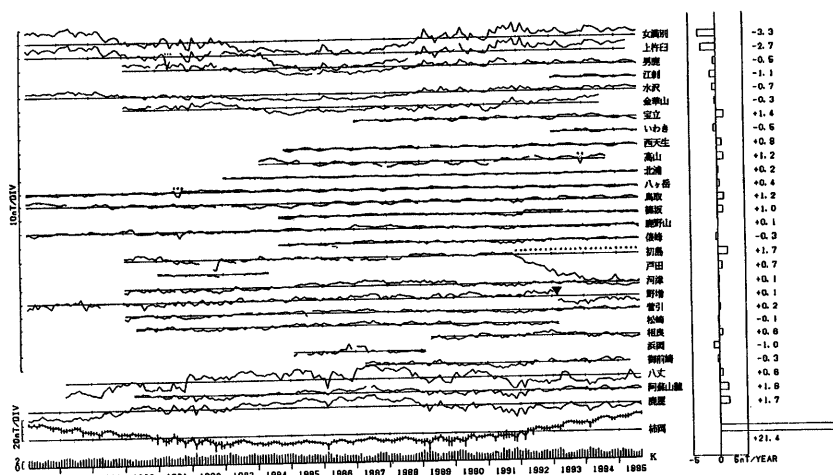


Fig.3 Month-to-month changes in differences of night-time total forces at each station from those at Kakioka (KAK) excluding the secular variation (left) and the annual rates of the differences (right) with the numerical values (right-most), for a period from January, 1977 to September, 1995. Dotted lines indicate periods when data are subjected to noises due to artificial disturbances or instrumental troubles. The annual rates are calculated without these data. In the bottom of the left panel, month-to-month changes in night-time total forces and the night-time K indices at Kakioka are shown. Error bars indicate $\pm$ standard deviations (after Geomagnetic Group on Earthquake Prediction and Kakioka Magnetic Observatory, 1996).

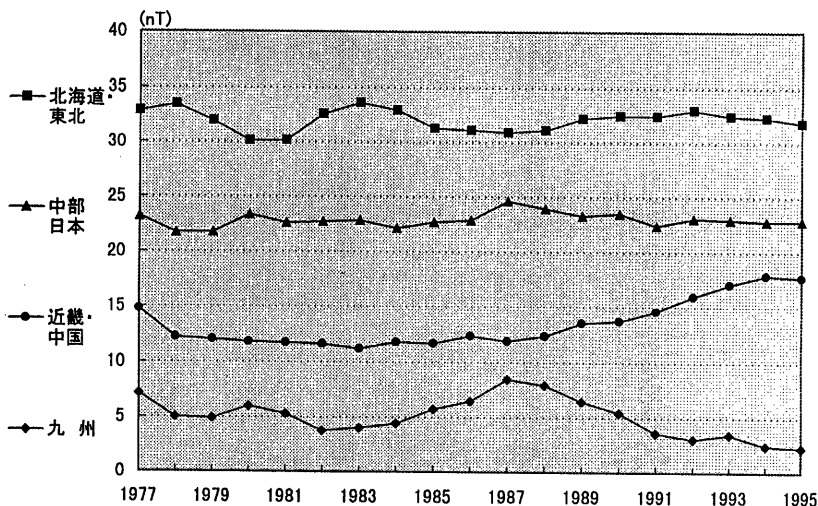


Fig.4 Regional secular variations of the geomagnetic total force referring to Kakioka (KAK) are shown in the northeastern Japan, central Japan, Kinki & Chugoku, and the southwestern Japan districts. It can be seen that anomalous trends started around 1987 in Kinki and Chugoku area and Kyushu area (southwest of Japan) (after Tsunomura, 1998).

どとの関連は不明である。なかでも、西南日本の永年変化の傾向が全国的な傾向から外れていることが明らかにされたが、原因は分からない。一説にはシベリア磁気異常が関係するのではないかとの見方がある。

3. 兵庫県南部地震に伴う磁場変化

次に1995年1月17日に起こった兵庫県南部地震に関連する可能性のある磁場変化について述べる。Fig.5の斜線部分に示したように、地震の3、4か月前からのAMGに現れている変化について注目する。年周変化も一部含まれているが他の年の変化とはかなり違う。この異常変化の下に凸の部分は地震直後に終息している。この全磁力変化に対応する地殻変動が存在するかどうかを確認するために、天ヶ瀬 (Amagase, AMG) での歪変化 (古澤, 1996) をFig.8に示す。これには、天ヶ瀬だけでなく、山崎 (Yamasaki)・阿武山 (Abuyama)・逢坂山 (Osakayama) 等の近畿地方周辺の他の観測点の歪変化も示してあるが、兵庫県南部地震の約半年前から共通に変化しているように見える。これによれば、AMGの全磁力変化の異常よりも、歪変化が

先行しているように見える。

兵庫県南部地震に関連したAMGの異常変化が近畿中北部に共通な変化によるかどうかを調べるため、同じ近畿地方にあるMYMの、KAKに相対的な全磁力変化をFig.9に示す。残念ながらMYMでは地震前のデータはなく、地震後も磁力計交換等によるギャップが見られるので、確実なことは言えないが、特別な磁場変化は見られないようである。

Fig.5には、地震後に展開され、その後も連続観測が続けられている六甲・淡路島周辺の観測点 (TKG, TNJ, FNK, MUY) についての柿岡との夜間値の単純差も示してある。この地域の全磁力観測にはソトビル社のプロトン磁力計KM622 (田中式) を用いた。ただしTKGのみは国際電子工業株式会社のプロトン磁力計PMP202Sを用いた。地点差を計算するためのデータセットはやはり0時40分から3時までの10分毎の全磁力値を用い、計算方法も前章で述べた算出方法と同じである。淡路島・六甲周辺の観測点での全磁力のKAKに相対的な永年変化には、特別な傾向はなく、地震後の余効変動等に伴うような変化は全磁力からは見受けられない。

磁場変化と地震との直接的な関連を見ようとする試みは今までにもなされ、異常変化が観測されたと

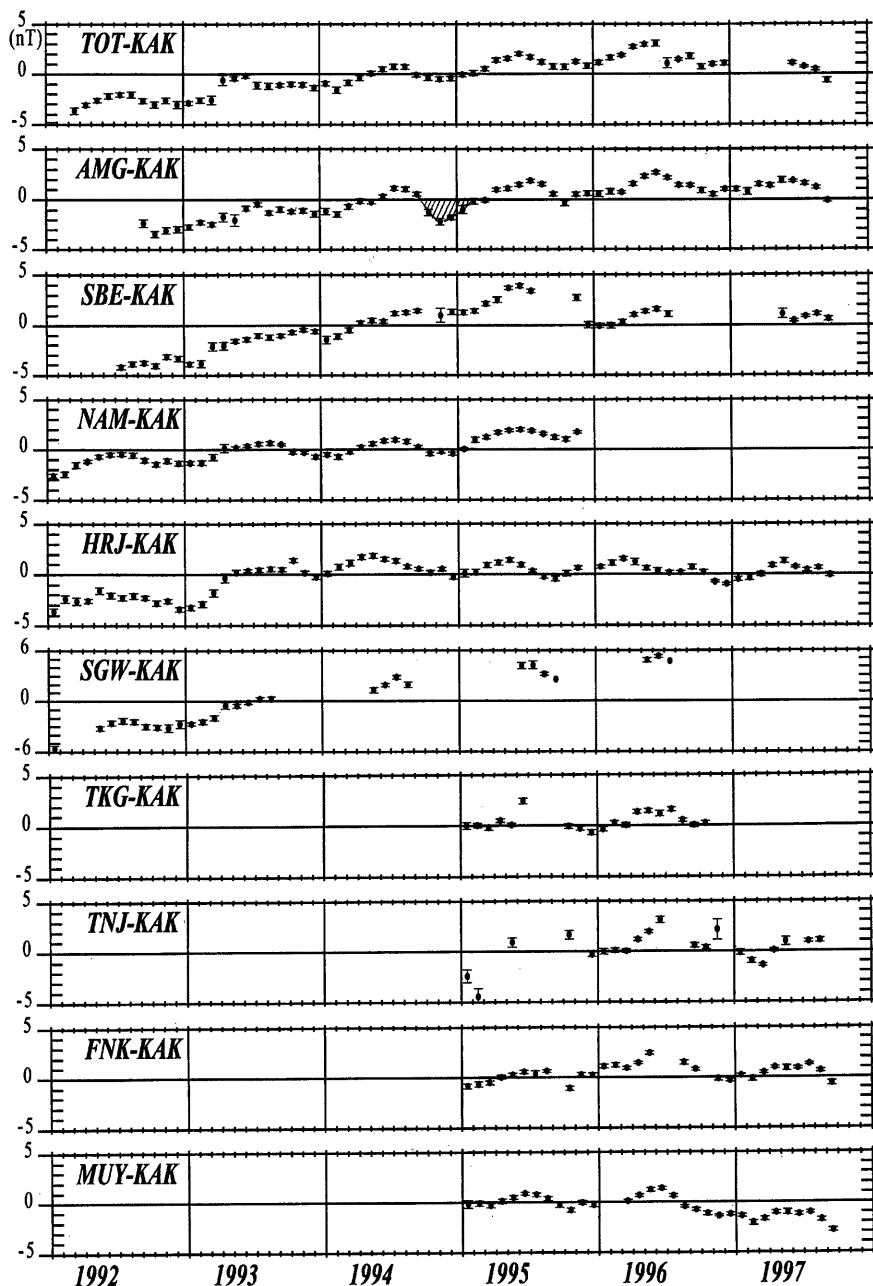


Fig.5 Secular variations of the geomagnetic total force at RCEP stations referring to KAK from the beginning of 1992 to September, 1997. Monthly mean values are plotted.

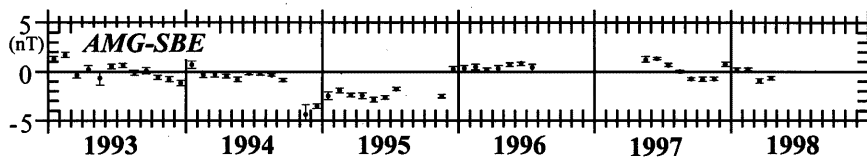


Fig.6 Secular variations of the geomagnetic total force difference between AMG and SBE from the beginning of 1993 to April, 1998.

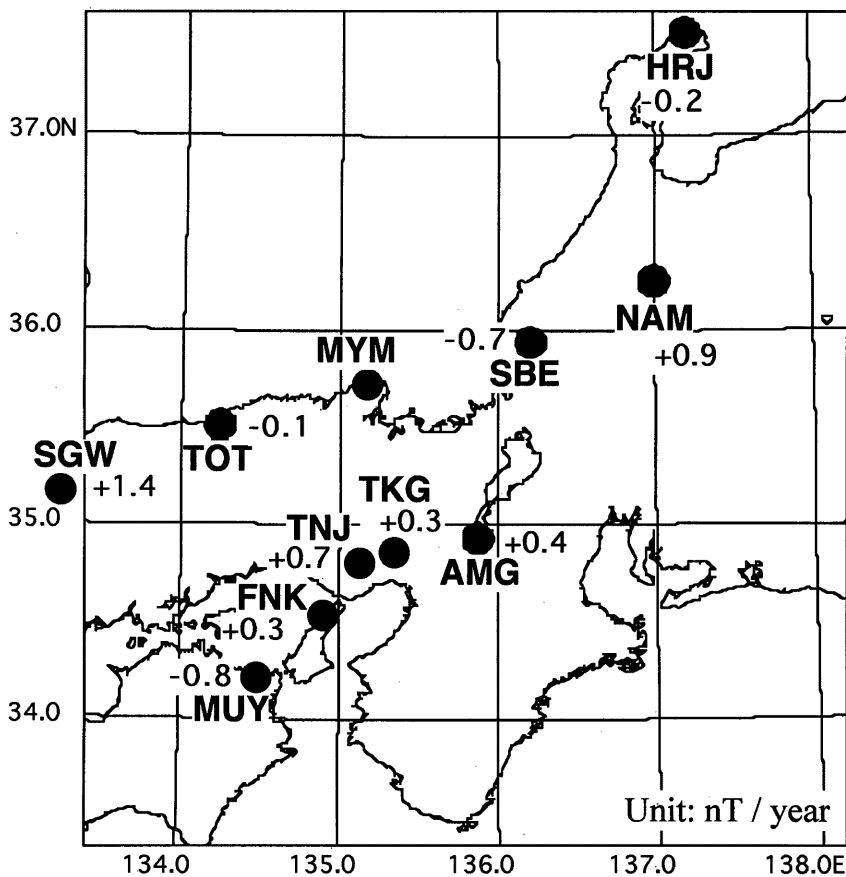


Fig.7 Annual rates of the secular variations referring to KAK at RCEP observation sites are indicated in numerals. The rates are calculated based on the data from 1995 to 1997.

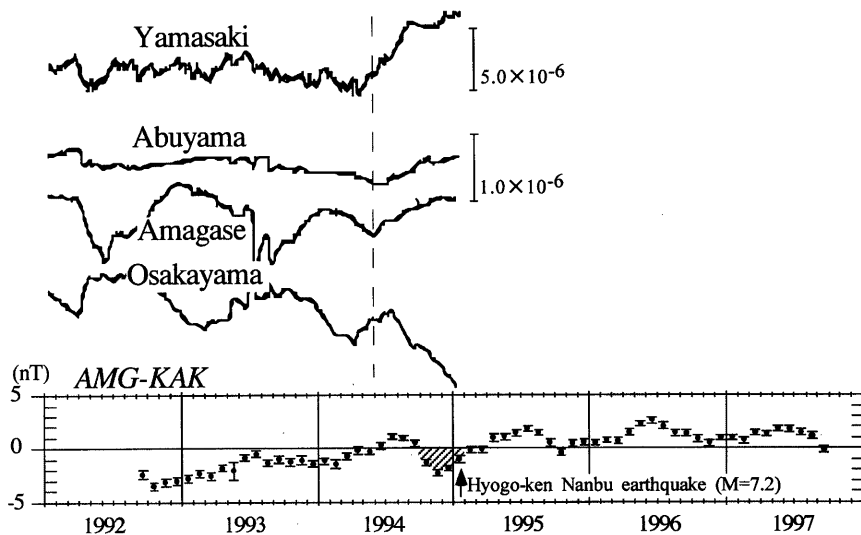


Fig.8 Temporal variations of the earth strain at Yamasaki, Abuyama, Amagase, and Osakayama stations preceding to the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake (M7.2). The secular variations of the geomagnetic total force at Amagase (AMG) referring to KAK are also shown in the same time axis (modified after Furuzawa, 1996).

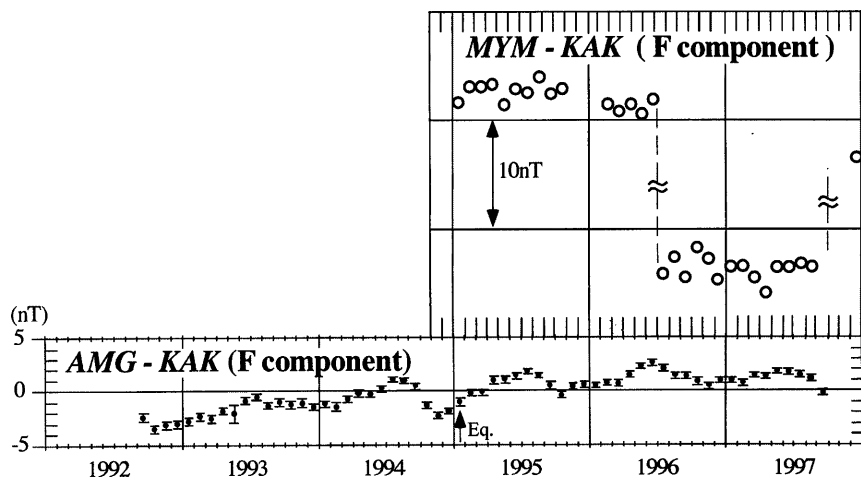


Fig.9 Secular variations of the geomagnetic total force at MYM and AMG referring to KAK after the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake are shown.

伴うような変化は全磁力からは見受けられない。

磁場変化と地震との直接的な関連を見ようとする試みは今までもなされ、異常変化が観測されたとの報告は少なくないが、明確な対応が見つかる変化を検出した例は少ない。今回の報告もこの域を出ていないことは残念であるが、AMG の場合機器等の不調による変化でないことはほぼ間違いない。全磁力の永年変化には地殻活動に伴う変化が現れると期待されるが、観測点周辺の漏洩電流ノイズや、建造物の影響といったような、人工的な原因による磁場変化の可能性もまだまだ残されている。また、人工的な原因のみならず、地殻内起源か、外部擾乱の影響かはっきりしないことも多い。一つの解決策としては、断層などの周辺に観測点をもっと密に配して、永年変化の詳細を調べることであり。また観測された異常変化が実際の地殻内の応力変化から起こりうる磁場変化であるかどうかを調べるために、GPS などの地殻の歪の観測値を基にして、広範囲の地殻応力を考慮に入れた応力地磁気変化モデルの構築も将来は考えて行かねばならないだろう。

4. ダム周辺での全磁力連続観測

4.1 ダム磁気効果の観測の目的

ピエゾ磁気効果によって、どれほどの大きさの応力変化に対して、どれほどの磁場変化が期待できるかは、必ずしもはっきりしていない。前章までに述べたように、観測された磁場変化には、人工的なノイズや外部磁場擾乱の影響も否定できない場合があるので、磁場変化が真に応力起源であるかどうか判断することは一般的に難しい。このため、前もってモデルをつくり応力変化と磁場変化の定量的な因果関係を把握しておくことは大切である。

一般に、応力変化 $\Delta\sigma$ に対する磁化の変化 ΔJ は、磁気応力係数を β 、応力のないときの岩石の磁化を J_0 、とすると、

$$\Delta J = C\beta\Delta\sigma J_0 \quad (1)$$

で表される。ここでは C は幾何的な量をも含む比例係数である。実際は磁化の方向、応力の成分を考慮に入れなければならないが、基本的な比例関係として式(1)が成り立つ。帯磁率の変化の場合も全く同様な関係が成り立つ。応力磁気効果のモデル計算では、実験室内で岩石小片を使った測定で求められた磁気応力係数 β ($1.0 \times 10^{-9} \text{Pa}^{-1}$ 程度) をしばしば用いるが、実際の広域な地殻の応力変化に対応するような巨視的な意味での実効的な磁気応力係数の値はよくわかっていない。

磁気応力係数 β を求めるための、実験室レベル以上の大きさの野外実験として、ダム湖の水位変化、すなわち水の荷重の変化による応力磁気効果を観測することが考えられている。ダム湖の水位変化に伴う磁場変化のことをダム磁気効果と呼ぶことがある。このダム磁気効果の検出、即ち水位が変化するダム地域におけるピエゾ磁気効果の検出の試みの最大の利点は、応力変化は水の荷重変化のみを考えればよいから、応力変化分布の推定が比較的容易なことである。

ダム磁気効果を検出し、水位変化(応力変化)に対してどのくらいの磁場変化があるのかを検出する目的で、京都府宇治市にある関西電力株式会社の敷地内にある喜撰山ダムを選び、プロトン磁力計による全磁力連続観測を行った。

4.2 ダム磁気効果のこれまでの観測例

喜撰山ダムでの観測について述べる前に、ダム磁気効果のこれまでの観測例を簡単に紹介しておく。ダム磁気効果の観測研究は、オーストラリア南東部、Snowy MountainにあるTalbingo damでの湛水前後の磁場変化についてのDavis and Stacey (1972)の報告に始まる。これまでのダム磁気効果の観測例から得られた、水位変化に対する全磁力の変化率をTable 1に示す。

大きなダム磁気効果が得られるための条件は、式(1)からもわかるように、磁気応力係数 β 、または岩石の磁化が大きいことである。Table 1では、Zhan (1989)による変化率が異常に大きい、これはダム周辺の岩石の磁化が大きいことに起因する可能性がある。Zhan (1989)が観測に用いた中国の北京北部のMiyun reservoir周辺には鉄鉱山があり(Zhan, personal communication)、鉄鉱石によって周囲の磁化がかなり強いと考えられる。

ダム磁気効果の応力磁気変化モデルとしては、Davis (1974)、Sasai (1986)、大志万ら(1991)等があるが、これらは基本的には地表に、ある荷重を考えたビジネス問題をピエゾ磁気効果に応用したものである。しかし、ダム周辺の磁化の大きさを適当に仮定し、これらのモデルに実験室内の岩石実験から求められた磁気応力係数 β を用いると、観測値を説明するほど大きな磁場変化を得ることができない。このことから、実験室で得られるような小さなスケールでの磁気応力係数よりも、実際の地球物理学的な現象としてのピエゾ磁気効果に関与するような大きなスケールでの磁気応力係数の方が桁数で1ないし2大きい可能性が指摘されている。

Hamano et al. (1989)は固結してしっかりした岩

石だけでなく、柔らかい凝灰岩について、磁気応力係数を求める実験を行っている。その結果、凝灰岩の磁気応力係数は、固結した岩石片のものよりオーダー的に大きいことが明らかになった。ダム周辺など、大きなスケールの問題を考えたとき、一塊の岩石を考えるよりも、岩石片の集まりと考えた方が合理的で、凝灰岩のような完全に固結していない場合とメカニズムが同じである可能性がある。

4.3 喜撰山ダム周辺での全磁力観測

磁力計設置場所として、喜撰山ダム湖周辺を選んだ。Fig.10 に、喜撰山ダムの位置を示す。喜撰山ダムは、京都府宇治市内にある宇治川水系の揚水式の発電用ダムで、地下発電所と変電施設が併設されている。揚水式発電とは、夜間の余った電力を利用してダムに水を汲み上げ、昼間の電力需要の多いときに水を落として発電するものである。喜撰山ダムでは、揚水は午前1時から午前6時、発電は午前10時から午前12時、午後1時から午後6時までとなっている。水位の1日の最大変位は季節によって若干違うが、最大26mである。通常は20m程度である。水位変化はダム磁気効果を検出するためにはやや小さいが、ここでは毎日繰り返される水位変動の効果を重ね合わせ、統計的な処理をすれば磁場変化を検出できる可能性がある。

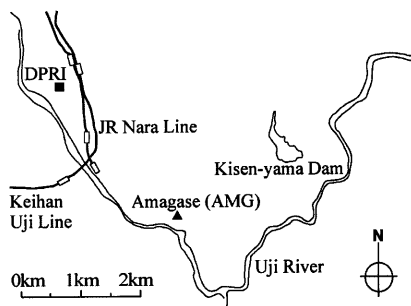


Fig.10 A regional map including Kisen-yama dam, AMG station, electric railways (JR Nara line and Keihan Uji line), and DPRI.

発電施設が近くにあるため、電磁場ノイズが高いことも考えられたが、1995年12月に実施したテスト観測から、比較的ノイズの少ないデータが得られることがわかっている。喜撰山ダムから2kmと離れていない場所に、京都大学防災研究所が関西電力

水力発電所の旧取水坑を利用して、地殻変動を観測している施設がある。同じ場所で1992年以来全磁力連続観測を行っているAMG（天ヶ瀬）観測点があり、喜撰山周辺の観測に対する基準点とすることが期待できる。Fig.10に示すように、最も大きなノイズ源はJR奈良線（直流電車軌道）、京阪宇治線（直流電車軌道）である。電車軌道からAMGまでの距離は2km程度、喜撰山ダムまでは4km程度である。従って電車によるノイズはAMGよりも喜撰山周辺の観測点の方が振幅が若干小さい。

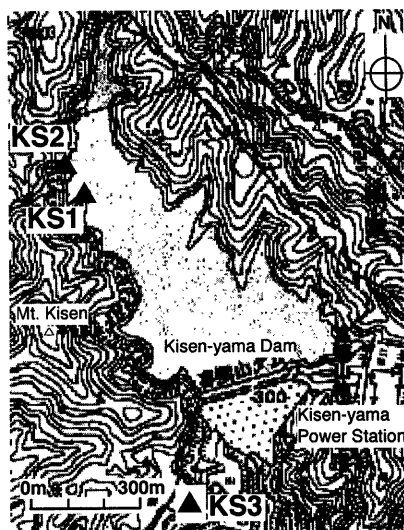


Fig.11 Observation sites for continuous measurements of the geomagnetic total force by proton precession magnetometers around Kisen-yama dam.

喜撰山周辺にはプロトン磁力計を3台設置し、全磁力連続観測を行った。観測点KS1、KS2、KS3をFig.11のように設置した。モデル計算から、ダム湖の岸から離れると磁場変化が急激に小さくなることがわかっているので、できるだけダム湖の中心に向かって突き出た地形の部分に磁力計を設置することが望ましい。しかし、現場へのアクセスの困難などもあって、観測点はダム湖の西岸に限られた。KS1とKS2はものの100mと離れていないが、観測器の精度の検定の意味もある。KS3は、良好なデータが得られれば水位変化に関係のない基準点として使うことができる。観測は1分計測で1996

Table 1 Rates of magnetic changes agaist changes of water level at dam sites (modified after Oshiman et al., 1991).

Sorces for dam-magnetic effect	Coefficients (nT/m)
Davis and Stacey (1972)	-0.040
Abdullabekov et al. (1979)	-0.085
Brennan and Hastie (1979)	-0.019
Zhan (1989)	-0.280
Oshiman et al. (1991)	-0.014, -0.013, -0.065

年9月2日より、途中若干の欠測はあるが1997年4月24日まで行なった。観測機材はAMG, KS1, KS2では国際電子工業株式会社のプロトン磁力計PMP202S, 観測点KS3ではソフトビル社のプロトン磁力計KM622(田中式)を用いた。いずれも測定感度は0.1nT, 測定精度は0.5nT程度である。1997年3月5日から、KS1のプロトン磁力計をKS3の位置に移設して、観測を継続した。

Fig.12に比較的地球外部起源の磁場擾乱が少なく、KS3のデータが安定している日(1996年10月27日)の全磁力の観測例を示す。KS3の磁力計では、観測期間を通して、ノイズの振幅も他の磁力計と比べて大きく、特に夜間にミスカウントが多かった。

4.4 全磁力地点差

初めに期待されるおおよその磁場変化の大きさを見積もる。Table 1の実際の観測による係数から考える。Zhan (1989)による全磁力変化と水位変化を結びつける係数 -0.280nT/m は大き過ぎるとして、この係数は大きくて -0.1nT/m 程度であろう。このとき、水位変化を20mとすると、磁場変化は2nTとなる。また小さく見積もって係数を -0.01nT/m としたときは、磁場変化は0.2nT程度となる。磁力計の精度は0.1nTであるので、データを何日も重ね合わせることによってランダムノイズが消えるとすると、検出可能な範囲であろう。もちろんこの係数は観測する位置によって変わり得るが、水位変化から磁場変化をある程度予測するには便利である。最終的に知りたい磁気応力係数 β は、ダム湖の大きさ、形状を考慮に入れて求めることができる。

Fig.13に、KS2とAMG, KS2とKS3との地点差を示す。横軸を1日分の時間軸とし、3月28日から4月23日までのうちの21日間について重ね合わせた平均値を示した。この期間中はすでにKS1で使っていた磁力計をKS3に移設しており、KS3

において良好なデータがとれていた。KS2とAMGの地点差については、他の観測期間中の平均値も同様の傾向を示している。なお、喜撰山ダム湖畔の、お互いに100mと離れていないKS1とKS2の1997年2月の地点差の毎分の月平均値のばらつきは、1日を通してその標準偏差が0.05nTと安定している。このことから、磁力計自体の信頼性は確認できている。

Fig.13には、揚水・排水の時間帯、JR・京阪の電車の運行時間帯を共に矢印で示した。1日のうちで、KS2とAMGの地点差の変化の振幅は2nT程度におよんでいる。しかし、残念ながらKS2とAMGの地点差は、ダムの揚水・排水の時間よりも電車の運行の時間に対応しているように見える。電車の運行時間帯と、夜間の運行休止時間帯では全磁力地点差にオフセットが生じることは、笹井ら(1980)や坂中ら(1996)も指摘している現象である。喜撰山とAMGの観測点は2km程度しか離れていないが、電車軌道からのノイズの混入の仕方が違う。

観測点同士がもっと近ければ、電車軌道からのノイズが共通と見なされ、差をとることによって相殺されることも考えられるため、KS2とKS3の地点差をとった。Fig.13に示した平均のKS2とKS3の地点差の変化は、電車の運行時間よりもダムの揚水・排水に対応しているようにも見える。今回は予備的な結果を示すだけであるが、今後検討してゆきたい。

単純に地点差をとる通常の方法ではダム湖の水位変化による磁場変化を検出することは必ずしもうまく行くとは限らないことがわかったが、もともと喜撰山ダムでのダム磁気効果は小さすぎたかも知れない。先にも触れたように、応力磁気効果を効果的に検出するためには、地殻の岩石がもともと持っている磁化や磁化率が高い方がよい。しかし、喜撰山ダム付近の地質は丹波帯から美濃帯に含まれ、中生代の堆積層で覆われており、高い磁化、磁化率は期

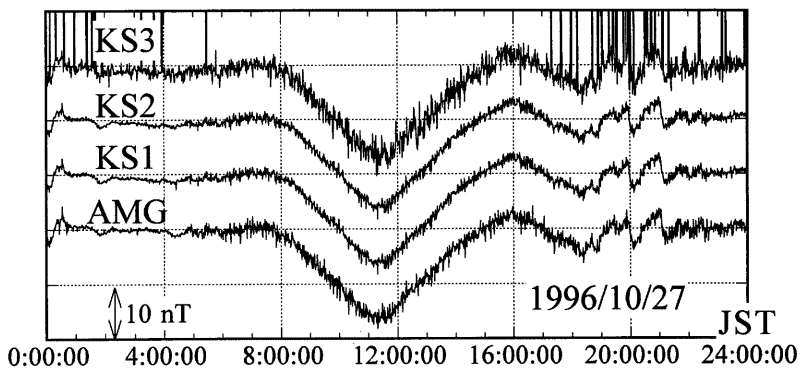


Fig.12 An example of observed data of the total intensity at AMG, KS1, KS2 and KS3 on October 27, 1996.

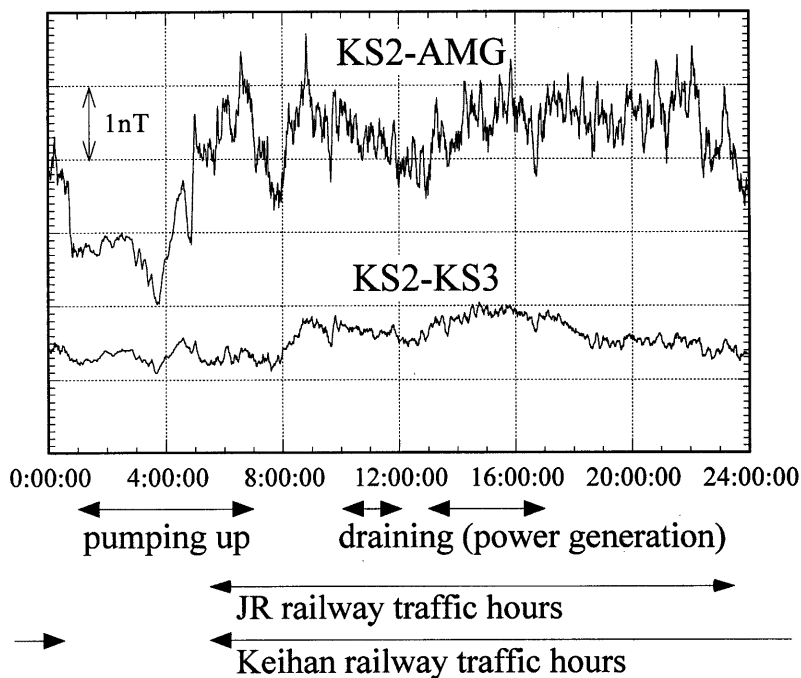


Fig.13 Temporal changes of the geomagnetic total force difference of KS2-AMG and KS2-KS3 through a day. Hours for pumping up and draining water at Kisen-yama dam, and for JR and Keihan railroad traffic working are also shown by arrows.

待できないところがマイナス材料である。

5. 終わりに

今日では全磁力の測定の精度は0.1nTまで向上している。しかし、観測環境は悪化する一方である。すなわち直流電車軌道からの漏洩電流のノイズが増大する傾向にある。これは電車のパワーアップ、路線の拡大などによる。観測値からこれらノイズの除去の一層の工夫がなされねばならない。

地殻の応力変化に伴う磁場変化の検出は地震予知のみならず、地殻の磁気物性の研究においても興味ある問題である。近年、GPSの全国的な観測網が整備され、地殻の詳細な変動が明らかにされつつある。これらの変化と磁場の変化との対応を更に詳細に調べて行きたい。

謝 辞

天ヶ瀬の観測では、京都大学防災研究所付属地震予知研究センターの古澤保・大谷文夫・森井亙・山田勝諸氏に、鯖江の観測では平野憲雄氏に、鳥取の観測では矢部征氏、西天生・宝立の観測では和田安男氏に大変お世話になった。厚く謝意を表したい。また、喜撰山ダム周辺での観測については、京都大学防災研究所の鈴木祥之氏、ならびに関西電力株式会社の関係者には、ダム湖周辺への特別な立ち入り・観測について格別の便宜をはかって頂いた。地震予知研究センターの後藤忠徳（現、愛知教育大学）・市来雅啓・笠谷貴史・首藤英児の学生諸氏には観測機材の設置・撤収作業を手伝って頂いた。各位に感謝を表したい。

参考文献

- 大志万直人・笹井洋一・宮腰潤一郎・西田良平・塩崎一郎 (Oshiman, N., Sasai, Y., Miyakoshi, J., Nishida, R. and Shiozaki, I.) (1991): ダム磁気効果の観測結果とモデルとの比較—鳥取県日南湖（菅沢ダム）—, CONDUCTIVITY ANOMALY 研究会論文集 (Proc. Conductivity Anomaly Workshop), pp. 137-148.
- 後藤忠徳・坂中伸也・堀友紀・和田安男・住友則彦・大志万直人: 能登半島沖地震に関連した全磁力変化, 京都大学防災研究所年報, 第37号 B-1, 1994, pp. 281-291.
- 坂中伸也・住友則彦・大志万直人 (1996): 北陸・近畿・中国における全磁力永年変化について, 京都大学防災研究所年報, 第39号 B-1, pp. 273-285.
- 角村ら (Tsunomura et al.) (1998): CONDUCTIVITY ANOMALY 研究会論文集 (掲載予定) (Proc. Conductivity Anomaly Workshop, in press).
- 古澤保 (1996): 地殻変動連続観測による兵庫県南部地震, 阪神・淡路大震災—防災研究への取り組み—, 京都大学防災研究所, pp. 34-42.
- 笹井洋一・石川良宣 (1980): 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化 (第三報), 東京大学地震研究所彙報, 第55号, pp. 1101-1113.
- 地震予知計画・地磁気研究グループ, 気象庁地磁気観測所 (Geomagnetic Research Group on Earthquake Prediction, and Kakioka Magnetic Observatory) (1996): 地磁気永年変化精密観測 (1977年1月—1995年9月), 地震予知連絡会会報 (Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction), 第55巻, pp. 669-674.
- Abdullabekov, K. N., Berdaliyev, Y.E., Pushkov, A. N. and Shapiro, V. A. (1979): Local variations of the geomagnetic field during the filling of a reservoir, Geomagnetism and Aeronomy (English transl.), Vol. 19, pp. 204-206.
- Brennan, B. J. and Hastie, L. M. (1979): Piezomagnetic effect of ground loading by Lake Gordon, Tasmania, Tectonophysics, Vol. 56, pp. T9-T16.
- Davis, P. M. (1974): The piezomagnetic computation of magnetic anomalies due to ground loading by a man-made lake, Pure Appl. Geophys., Vol. 112, pp. 811-818.
- Davis, P. M. and Stacey, F. D. (1972): Geomagnetic anomalies caused by a man-made lake, Nature, Vol. 240, pp. 348-349.
- Hamano, Y., Boyd, R., Fuller, M. and Lanham, M. (1989): Induced susceptibility anisotropy of igneous rocks caused by uniaxial compression, J. Geomag. Geoelectr. Vol. 41, pp. 203-220.
- Sasai, Y. (1986): A Green's function for tectonomagnetic problems in an elastic half-space, J. Geomag. Geoelectr., Vol. 38, pp. 949-969.
- Zhan, Z. (1989): Investigations of tectonomagnetic phenomena in China, Phys. Earth Planet. Int., Vol. 57, pp. 11-22.

Secular Changes in the Geomagnetic Total Force in Hokuriku, Kinki and Chugoku Districts (2)

Shin'ya SAKANAKA, Norihiko SUMITOMO and Naoto OSHIMAN

Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute,
Kyoto University, Japan

Synopsis

We have carried out continuous observations of the geomagnetic total force by proton precession magnetometers at 11 sites in Hokuriku, Kinki and Chugoku districts, Japan mostly since 1992. We discuss several features of the secular variation anomalies in the geomagnetic total force basing on the data observed from the end of 1994 to 1997. One of the anomalies is possibly related to the occurrence of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, although the cause is unknown. In addition, in order to make clear the relationship between stress changes in the crust and the piezomagnetic changes, we attempt to observe and detect the dam-magnetic effect around Kisen-yama dam in Uji city, Kyoto prefecture, Japan. A brief result is reported.

Keyword: proton precession magnetometer; geomagnetic secular variation; piezomagnetic effect;
Hyogo-ken Nanbu earthquake; dam-magnetic effect