

喜撰山ダムにおけるダム磁気効果検出の試み

坂中伸也¹・住友則彦²・大志万直人²

¹ 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

² 京都大学防災研究所地震予知研究センター

An attempt to detect the dam-magnetic effect at Kisen-yama dam in Uji, Kyoto, Japan

Shin'ya Sakanaka¹, Norihiko Sumitomo² and Naoto Oshiman²

¹ Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University, Choyo, Kumamoto, 869-1404, Japan

² Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute,
Kyoto University, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

1. はじめに

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。水位変化による地中の応力変化と磁場変化の関係を調べ、その地域の応力変化と岩石の磁化変化の比例係数—応力磁気係数—を求めることが、この研究の最終目標である。実験室内でも岩石小片を用いて磁気応力係数が求められているが、ダム磁気効果を調べることは、野外での大規模実験と位置付けることができる。磁場データに混入しているノイズの影響もあって、最終目標に到達するには至っていないが、観測の概要・データ解析の現状について報告する。

2. 観測の目的

一般に、応力成分の変化に対する磁化の変化 $\Delta J = (\Delta J_x, \Delta J_y, \Delta J_z)^t$ は、磁気応力係数 (stress sensitivity) β 、応力のないときの岩石の磁化 $J_0 = (J_x, J_y, J_z)^t$ を介して、

$$\begin{bmatrix} \Delta J_x \\ \Delta J_y \\ \Delta J_z \end{bmatrix} = \frac{3}{2}\beta \begin{bmatrix} \tau_{xx} - \sigma_0 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} - \sigma_0 & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} - \sigma_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz}). \quad (2)$$

で表される。この関係は、線形ピエゾ磁気効果 (linear piezomagnetic effect) と呼ばれ (Sasai, 1980)、帯磁率の変化の場合も全く同様な関係が成り立つ。ピエゾ磁気効果 (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 ($1.0 \times 10^{-9} \text{Pa}^{-1} = 1.0 \times 10^{-4} \text{bar}^{-1}$ 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るとは言えない。

磁気応力係数 β を求めるための、実験室レベルより大きなスケールの野外実験として、ダム湖の水位変化、すなわち水の荷重の変化によるピエゾ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この磁場変化のことを“ダム磁気効果 (dam-magnetic effect)”と呼ぶことがある。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、応力変化として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。

ダム磁気効果を調べ、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、関西電力株式会社の敷地内にある喜撰山ダム周辺において、プロトン磁力計による全磁力連続観測を行った。

3 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第1表に、今回の観測例も含めて示す。第1表は、Oshiman et al. (1991) によるものと同様のものである。

大きなダム磁気効果が得られるための条件は、水位変化が大きいことももちろんだが、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。第1表では、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。

水位変化に伴う全磁力変化の大きさは、もちろんダム湖からの距離に大きく依存するが、第1表から、Zhan (1989)の観測結果を除いた平均の係数は概ね -0.04 nT/mの程度であることがわかる。

ダム磁気効果の応力磁気変化モデルとしては、Davis (1974)、Sasai (1986)、Oshiman et al. (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、ブシネスク問題をピエゾ磁気効果に応用したものである。また、境界要素法を用いて、ダム湖の湖底の形状を考慮に入れた二次元のモデル計算の例もある (Sakanaka, 1994)。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、軟らかい凝灰岩の帯磁率について、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で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磁化変化のメカニズムが同じである可能性がある。

ダム磁気効果の観測例 (出典)	係数 (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
this work	~ -0.04

第1表：水位の上昇に対する全磁力変化の割合の観測例

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、関西電力株式会社喜撰山発電所 (住所：京都府宇治市池ノ尾南組8)のダム湖周辺を選んだ。喜撰山発電所は1970年1月に建設、運転が開始され、現在に至っている。第1図に、喜撰山ダムの位置を示す。喜撰山ダムは、淀川水系 (上部=寒谷川、下部=宇治川)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。喜撰山発電所の認可出力は、466,000 kW、発電のための水の有効落差は219.35 m、最大使用水量は、248 m³/s、喜撰山ダムの有効貯水量は533万m³である。喜撰山ダムの堰堤は、中心部に粘土を、その外部に岩を積み上げて造られたロックフィルダムと呼ばれるもので、高さが91 m、長さが255 mある。喜撰山ダムのダム湖 (貯水池)の広さは約31万平方メートルで、標高416.0 mの喜撰山の東麓に位置する。揚水式発電とは、夜間の余った電力を利用して下部貯水池 (建設省天ヶ瀬ダムの鳳凰湖)から上部貯水池 (喜撰山ダム貯水池)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。喜撰山では福井県の原子力発電所からの電力を利用して夜間に貯水池に水を汲み上げている。ここでは、揚水は午前1時から午前6時、発電 (排水・放水)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 (冬場の方が若干大きい)、最大26 mで、通常は20 m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。第2表と第3表に、関西電力で記録されている水位等の記録例を1996年6月と12月についてそれぞれ示す。水位は海拔で示しており、最大満水時の標高は270 mである。1996年4月から12月までの満水時の月ごとの平均水位は、それぞれ、293.30 m、293.34 m、293.20 m、294.48 m、294.65 m、294.50 m、295.30 m、295.70 m、293.34 mとなっている。

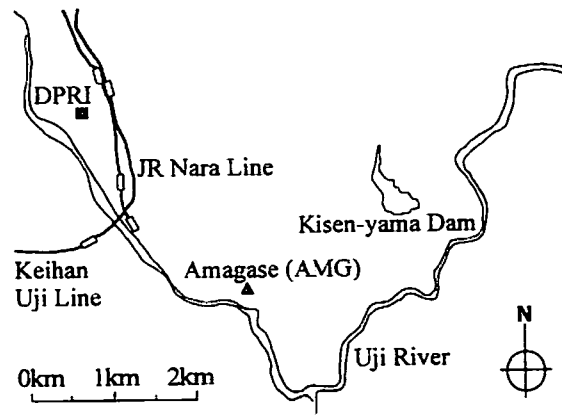
日付	天候	気温 (°C)	水位 (m)	水温 (°C)
6/1	曇	21.9	290.77	21.2
6/2	晴	23.3	288.99	21.8
6/3	"	24.2	295.04	22.3
6/4	曇	22.1	295.05	22.2
6/5	晴	21.9	295.06	22.3
6/6	"	21.9	295.01	22.5
6/7	曇	22.5	294.94	22.2
6/8	"	20.3	288.82	22.0
6/9	雨	17.5	289.01	21.6
6/10	曇	17.9	295.05	21.3
6/11	"	19.5	295.00	21.1
6/12	"	21.7	295.05	21.1
6/13	"	21.4	295.00	20.7
6/14	"	23.3	294.98	21.1
6/15	"	24.4	290.84	21.3
6/16	晴	26.4	295.00	21.7
6/17	"	28.0	294.90	22.6
6/18	雨	21.1	294.92	22.7
6/19	晴	22.8	294.70	22.9
6/20	曇	24.3	293.18	22.7
6/21	雨	21.2	290.41	21.8
6/22	曇	21.7	292.03	21.6
6/23	"	23.6	292.09	21.5
6/24	"	25.0	291.11	21.7
6/25	"	27.2	294.91	21.9
6/26	雨	21.4	294.83	21.6
6/27	曇	24.6	292.34	21.6
6/28	雨	21.7	292.05	22.0
6/29	晴	25.8	291.96	22.2
6/30	曇	23.4	292.83	22.1
平均		22.7	293.20	21.8

第2表：1996年6月の喜撰山
ダムでの水位等(関西電力㈱)

日付	天候	気温 (°C)	水位 (m)
7/1	曇	23.8	295.09
7/2	"	24.0	295.08
7/3	"	26.2	294.95
7/4	"	22.8	294.97
7/5	雨	22.5	294.91
7/6	曇	22.5	294.07
7/7	雨	19.1	294.99
7/8	"	19.5	295.12
7/9	曇	22.0	292.31
7/10	晴	24.5	289.26
7/11	曇	21.6	292.69
7/12	晴	25.5	294.83
7/13	"	28.6	294.07
7/14	"	32.0	295.00
7/15	"	30.0	294.74
7/16	"	29.9	294.92
7/17	"	28.9	294.76
7/18	"	31.6	294.92
7/19	"	31.6	294.85
7/20	雨	23.8	294.10
7/21	晴	26.3	294.99
7/22	曇	26.8	294.81
7/23	"	28.1	294.91
7/24	晴	28.6	294.93
7/25	"	31.0	294.86
7/26	"	30.4	294.88
7/27	"	30.0	294.09
7/28	"	30.8	294.99
7/29	"	30.0	294.84
7/30	"	31.0	294.95
7/31	"	31.1	294.92
平均		26.9	294.48

第3表：1996年7月の喜撰山
ダムでの水位等(関西電力㈱)

この記録を見る限り、季節によって毎日の満水時の水位に若干の差異が見られる。ダム磁気効果の検出という意味においては、この程度の水位の季節変動は気にする必要はない。ちなみに、関西電力株式会社の他の揚水式発電所としては、奥多々良木発電所(兵庫県：1974年6月建設)、奥吉野発電所(奈良県：1978年6月建設)、ならびに大河内発電所(兵庫県：1992年11月建設)がある。



第1図：喜撰山ダムの周辺図（京都府宇治市付近）。京都大学防災研究所（DPRI）、天ヶ瀬地殻変動観測室（AMG）、JR奈良線、京阪宇治線の位置を示す。

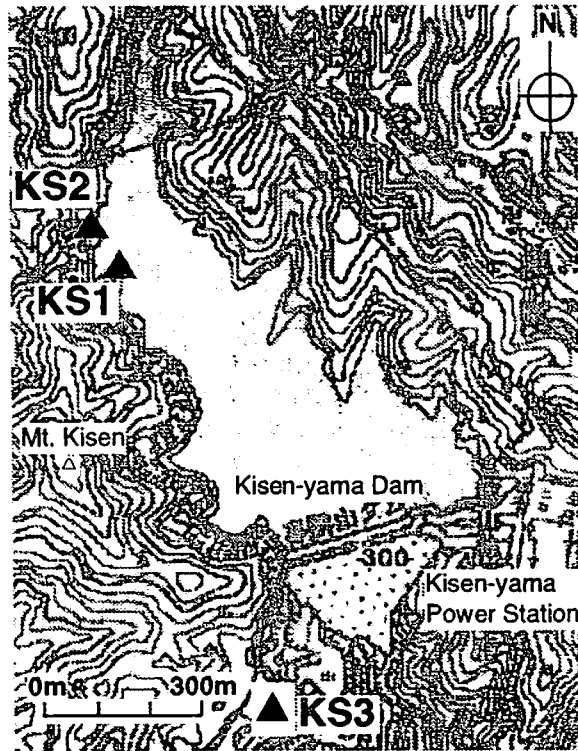
喜撰山では、発電施設が近くにあるため、電磁場ノイズが大きいことも考えられたが、1995年12月に実施したテスト観測から、比較的ノイズの少ないデータが得られることがわかっている。喜撰山ダムから2kmと離れていない場所に、関西電力天ヶ瀬水力発電所の旧取水坑を利用した、京都大学防災研究所地震予知研究センターの天ヶ瀬地殻変動観測室がある。天ヶ瀬地殻変動観測室内には、1992年以来全磁力連続観測を行っている観測点（AMG）があり、喜撰山周辺の観測に対する基準点とすることが期待できる。第1図に示すように、最も大きなノイズ源はJR奈良線（直流電車軌道）、京阪宇治線（直流電車軌道）であると考えられる。電車軌道から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。

喜撰山周辺にプロトン磁力計を3台設置し、全磁力連続観測を行った。観測点KS1、KS2、KS3を第2図のように設置した。モデル計算から、ダム湖の岸から離れると水位変動に伴う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。また、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で、測定精度は0.5nT程度以下（PMP202Sは0.25nT）である。

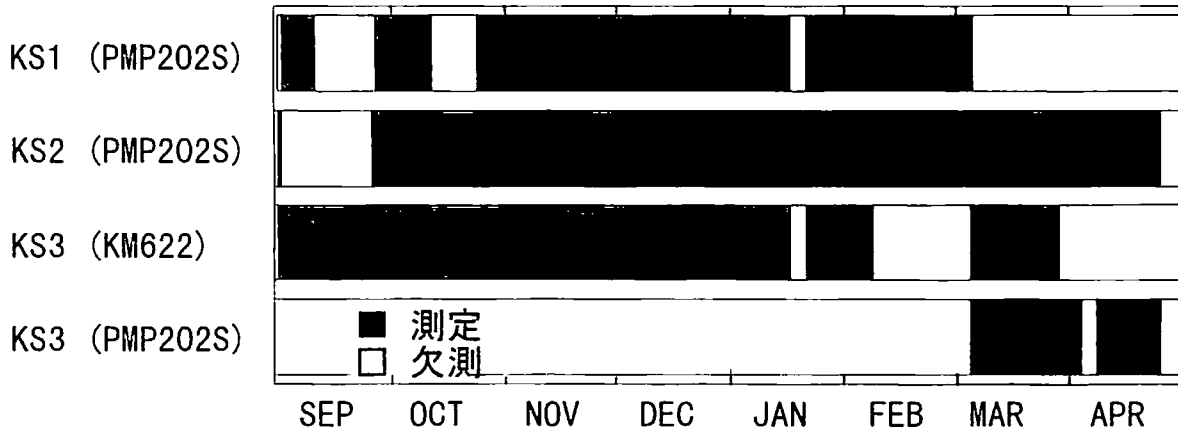
第3図に喜撰山ダム周辺のそれぞれの観測点における1996年9月初めから1997年4月終わりまでのデータ取得状況を棒グラフで示した。AMGについては、全区間にわたって全磁力のデータが存在する。第4表にデータ取得情報についての具体的な日付を示した。

第4図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やや大きく、夜間にミスカウントが多かった。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。

今回の報告では考慮に入れて全磁力データを扱ったわけではないが、参考までに、観測期間中における地球磁場の擾乱情報を第5表に示す。気象庁地磁気観測所が報告している、地磁気静穏日（International Quiet Day）と地磁気擾乱日（International Disturbed Day）の日付を、観測期間中の月毎に示した。



第2図：喜撰山ダム周辺のプロトン磁力計による全磁力連続観測点 (KS1、KS2、KS3)。

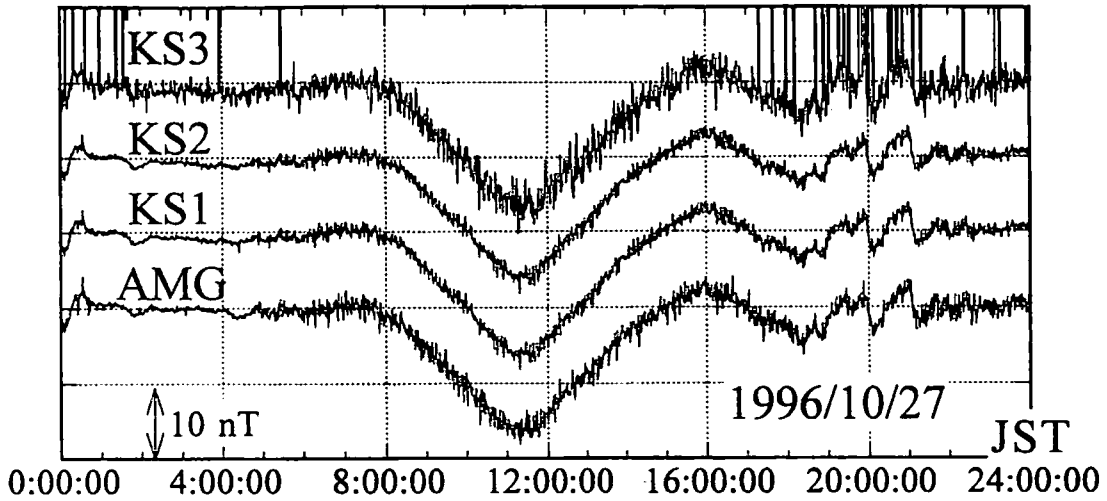


第3図：1996年9月初めから1997年4月終わり(全観測期間を含む)までの喜撰山ダム周辺における全磁力連続データ取得情報。

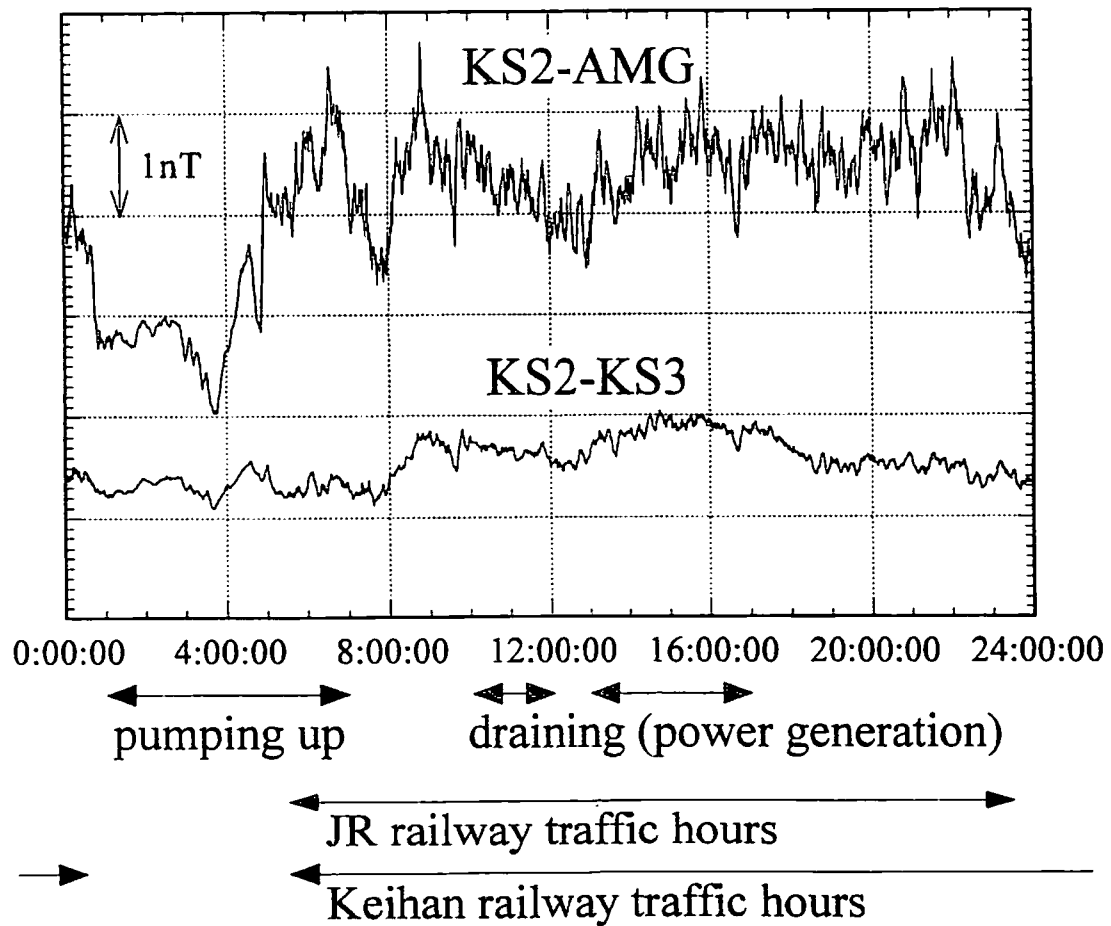
1997年3月5日に、KS1のプロトン磁力計のセンサーををKS3のセンサーからから数mのところに移設して測定を継続。

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。第1表の実際の観測による係数から考えることにする。Zhan (1989)による全磁力変化と水位変化を結びつける係数 -0.280 nT/m は大き過ぎるとすると、水位変化に対する係数は大きくて -0.1 nT/m 程度であろう。このとき、水位変化を 20 m とすると、磁場変化は 2 nT となる。また小さく見積もって係数を -0.01 nT/m としたときは、磁場変化は 0.2 nT 程度となる。磁力計の感度は 0.1 nT であることを考慮に入れ、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、ダム磁気効果は検出可能な範囲であると期待される。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モデル計算によって求めることができるだろう。



第4図：AMG、KS1、KS2 ならびに KS3 における1日の全磁力観測データの例（1996年10月27日）。



第5図：KS2 と AMG、KS2 と KS3 についての全磁力単純差の1日分を、1997年3月28日から4月23日までのうちの21日間について平均したもの。喜撰山ダムの揚水・放水の時間帯、JR奈良線・京阪宇治線の電車の運行時間帯を矢印で示した。

観測点 (測定機器)	データ取得期間
KS1 (PMP202S)	1996/9/2 - 9/10, 9/27 - 10/11, 10/25 - 1997/1/16, 1/21 - 3/5
KS2 (PMP202S)	1996/9/2, 1996/9/27 - 1997/4/24
KS3 (KM622)	1996/9/2 - 1997/1/16, 1/21 - 2/7, 3/5 - 3/28
KS3 (PMP202S)	1997/3/5 - 4/3, 4/8 - 4/24

第4表：喜撰山周辺のプロトン磁力計による全磁力連続測定データの取得期間

	1996年9月	1996年10月	1996年11月	1996年12月
International Quiet Day	1, 2, 3, 6, 30	5, 6, 7, 26, 27	1, 2, 3, 23, 30	1, 5, 6, 19, 20
International Disturbed Day	10, 12, 20, 21, 26	9, 18, 19, 22, 23	13, 14, 15, 17, 18	4, 10, 11, 15, 16
	1997年1月	1997年2月	1997年3月	1997年4月
International Quiet Day	3, 4, 6, 16, 17	4, 7, 13, 19, 20	9, 10, 19, 20, 23	15, 26, 27, 28, 29
International Disturbed Day	10, 11, 26, 27, 28	9, 10, 11, 27, 28	1, 12, 26, 28, 29	11, 17, 18, 21, 22

第5表：観測期間中における地磁気静穏日と擾乱日の日付

第5図に、KS2とAMG、KS2とKS3との地点差(以下、それぞれKS2-AMG、KS2-KS3と表記)を示す。横軸を1日分の時間軸とし、1997年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-AMG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0.05 nT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。

第5図には、揚水・放水の時間帯、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-AMGの変化の振幅は2 nT程度におよんでいる。しかし、残念ながらKS2-AMGは、ダムの揚水・放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、Sasai and Ishikawa (1980) や Sakanaka et al. (1996) も指摘している現象である。喜撰山とAMGの観測点は2 km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ことがわかる。

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。第5図に示した平均のKS2-KS3の変化は、電車の運行時間よりもダムの揚水・放水に対応しているようにも見える。KS3には水位変化による影響がないと仮定して、水位が20 m変化するとき磁場が0.8 nT変化するとすると、水位に対する全磁力変化の係数は、 -0.04 nT/m となり、第1表のこれまでの観測例とだいたいにおいて一致する。しかし、第5図を見る限り、やはりまだ電車の運行時間帯に対応した磁場変化が存在することは否めない。例えば午前4時から午前8時頃にいくつか見られるような、電車軌道起源のノイズと思われる磁場変化のピークの大きさが、KS2-AMGとKS2-KS3で比例した大きさを持っているのならば、うまくノイズを消すことができるかもしれない。しかし、それぞれのノイズのピークの大きさが、比例した大きさを持っていないことが、第5図からわかる。このことは、ノイズによって到来する方向が違ったり、ノイズの周期によって距離減衰の仕方が違う、もしくはノイズ源が電車軌道だけではない可能性があることを意味している。これらについても、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大きい方がよい。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、すなわち中生代の堆積層で覆われており、大きな磁化、磁化率は期待できないところがマイナス材料である。一般的に、堆積岩の磁化の強さは、玄武岩や安山岩などの火山岩の磁化の大きさより、1～2桁、またはそれ以上小さいと考えられている。

5. 今後の展望

今のところ、完全に信頼できるダム磁気効果の検出に成功しているとは言えないが、何らかの時系列解析でうまく処理すれば、展望が開ける可能性は残っている。

また、今日では全磁力の測定の精度は0.1 nTまで向上しているため、他のダム地域の、もう少し厄介なノイズの少ない地域でダム磁気効果を積極的に観測することも考えられる。しかし、特に日本国内では、直流電車軌道からの漏洩電流などにより、地球磁場の観測環境は悪化する一方である。観測値からこれらノイズを除去するための一層の工夫がなされることも重要であろう。

さらに、ダム磁気効果の検出からだけでなく、ある地域で、地殻歪の時間変化と地殻起源の地磁気変化が面的に得られているとすると、モデル計算によって、実効的な磁気応力係数 β を求めることができる可能性がある。この問題についても今後取り組んでいきたい。

謝 辞

天ヶ瀬の全磁力連続観測では、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・森井互・山田勝諸氏に、大変お世話になった。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西正己・岡崎敦・小松幸次・谷口各氏その他の関係者には、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（現・朝日新聞社）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。各位に厚く感謝を表したい。

参考文献

- Abdullabekov, K. N., YE. Berdaliyev, A. N. Pushkov and V. A. Shapiro, Local variations of the geomagnetic field during the filling of a reservoir, *Geomagnetism and Aeronomy (English transl.)*, **19**, 204-206, 1979.
- Brennan, B. J. and L. M. Hastie, Piezomagnetic effect of ground loading by Lake Gordon, Tasmania, *Tectonophysics*, **56**, T9-T16, 1979.
- Davis, P. M., The piezomagnetic computation of magnetic anomalies due to ground loading by a man-made lake, *Pure Appl. Geophys.*, **112**, 811-818, 1974.
- Davis, P. M. and F. D. Stacey, Geomagnetic anomalies caused by a man-made lake, *Nature*, **240**, 348-349, 1972.
- Hamano, Y., R. Boyd, M. Fuller and M. Lanham, Induced susceptibility anisotropy of igneous rocks caused by uniaxial compression, *J. Geomag. Geoelectr.*, **41**, 203-220, 1989.
- Oshiman, N., Y. Sasai, J. Miyakoshi, R. Nishida and I. Shiozaki, Continuous observation of piezomagnetic changes due to ground loading by Lake Nichinan, Tottori, Japan, *Proc. Conductivity Anomaly Workshop*, 137-148, 1991 (in Japanese).
- Sakanaka, S., Numerical evaluation of tectonomagnetic effect of an arbitrarily shaped two dimensional body using surface integral technique, M. S. thesis, Kyoto Univ., Japan, 1994.
- Sakanaka, S., N. Sumitomo and N. Oshiman, Secular changes in the geomagnetic total force in Hokuriku, Kinki and Chugoku districts, Japan, *Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **39-B1**, 273-285, 1996 (in Japanese with English abstract).
- Sasai, Y., Application of the elasticity theory of dislocations to tectonomagnetic modelling, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **55**, 387-447, 1980.
- Sasai, Y. and Y. Ishikawa, Changes in the geomagnetic total force intensity associated with the anomalous crustal activity in the Eastern part of the Izu Peninsula (3)—the East off the Izu Peninsula Earthquake of 1980—, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **55**, 1101-1113, 1980 (in Japanese with English abstract).
- Sasai, Y., A Green's function for tectonomagnetic problems in an elastic half-space, *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 949-969, 1986.
- Zhan, Z., Investigations of tectonomagnetic phenomena in China, *Phys. Earth Planet. Int.*, **57**, 11-22, 1989.