

ダム地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）——

日本大学文理学部応用地学科	大志万直人
東京大学地震研究所	笹井洋一
鳥取大学教養部 地学教室	宮腰潤一郎
鳥取大学教養部 地学教室	西田良平
鳥取大学教養部 地学教室	塩崎一郎

Continuous Observation of Piezomagnetic Changes due to Ground Loading by Lake Nichinan, Tottori, Japan

N. Oshiman	Dept. of Earth Sciences Nohon Univ.
Y. Sasai	Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.
J. Miyakoshi	Inst. of Earth Sciences, Tottori Univ.
R. Nishida	Inst. of Earth Sciences, Tottori Univ.
I. Shiozaki	Inst. of Earth Sciences, Tottori Univ.

1. はじめに

長期にわたって、高精度観測を安定に維持できるプロトン磁力計の普及に伴い、世界中で広く観測が行なわれるようになり、前兆的な地磁気変化、他の地殻変動の観測項目との相関の良い地磁気変化、また、Coseismicな変化等が検出されている。こういった、地磁気変化は、岩石磁化の応力変化により引き起こされるわけであるから、地磁気を観測するという事は、とりもなおさず、地殻応力変化を、地表においてモニターしていることになる。

Sasai(1983)は、理論的に、プロトン磁力計の”歪計”としての感度を見積っている。それによると、 β (応力磁化係数) = $1.0 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{dyne}$ 、 J (岩石の磁化) = $1.0 \times 10^{-3} \text{emu/cc}$ 、 $\lambda = \mu = 3.5 \times 10^{11} \text{cgs}$ の場合に全磁力値で 1 nT の変化は、 1.8×10^{-5} の歪みの変化に対応する。ところでRikitake(1987)は、過去観測された地磁気における前兆現象を調べ、全磁力変化は、歪の変化で、およそ $10^{-7} - 10^{-6}$ に対応していることを示している。またJohnston(1986)はサンアンドレアス断層で観測された、重力、歪み、上下変動等と非常に良い相関を示す地磁気変化から、地磁気変化 1 nT は歪変化 1.02×10^{-6} に相当することを示している。つまり実際のプロトン磁力計は、理論的予想よりもかなり感度の良い”歪計”なのである。このように、実際に観測された地磁気変化は、理論値よりも大きいことがしばしばある。

こういったことの原因としてまず考えられるのが、その応力場内の磁気構造である。これは、漠然とではあるが、よくいわれる”つぼ”と言うことであろう。古く

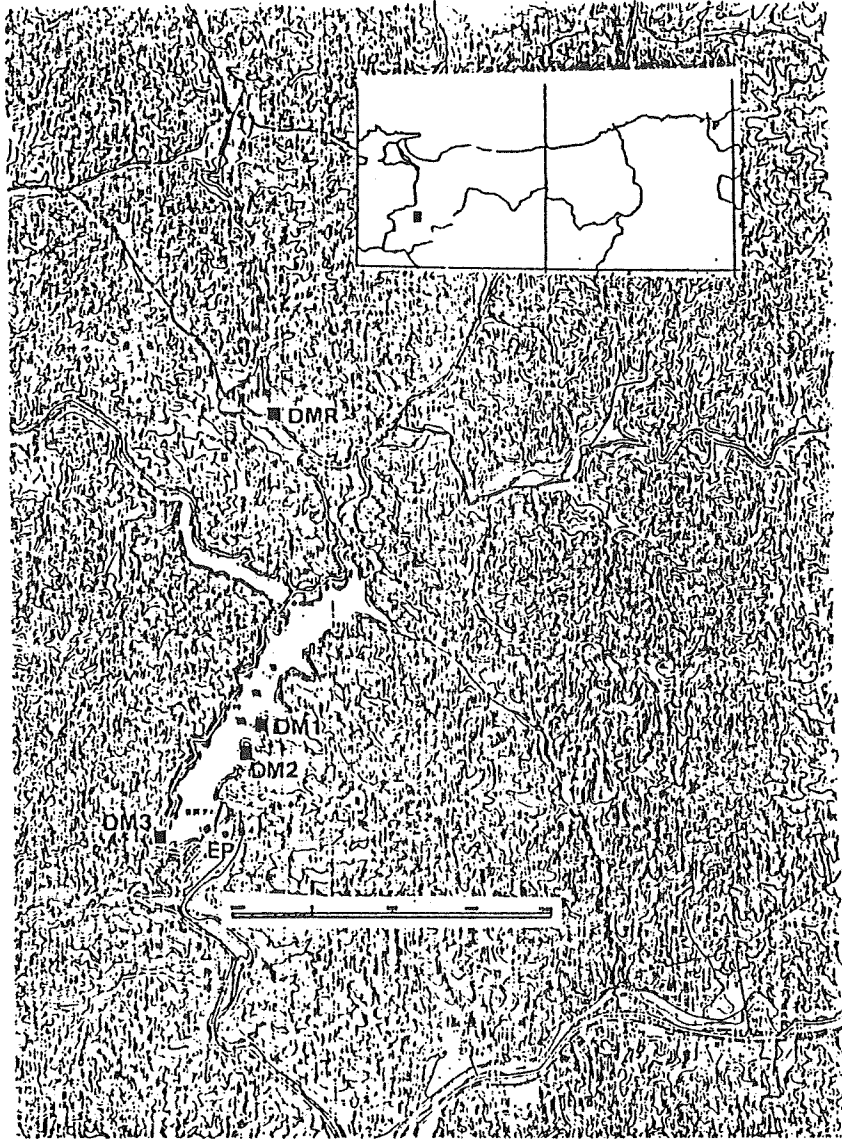
は、Stacey(1964)、また最近ではZlotonicki and Cornet(1986)、Oshiman(1990)、Oshiman et al.(1991)らの研究によれば、磁化の非均質な構造が存在する場合には、均質な磁化構造の場合に比べて、期待される変化が大きくなることが示されている。また逆に、非均質構造の存在のため、ある測点においては、その変化が小さくなってしまう場合も考えられる。したがって、測点配置を決定する場合に、非均質な磁化構造を考慮に入れば、地磁気を観測することで、効率よく地殻応力変化をモニターできる可能性がある。

実際のプロトン磁力計が、理論的予想よりもかなり感度の良い”歪計”であるもう一つの理由としては、岩石の β （応力磁化係数）がこれまで、測定されてきた頑丈な岩石試料のものよりも大きいのではないかということがある。Hamano et al.(1989)によれば、凝灰岩などの多孔質でもろい岩石では、 β が一桁以上大きくなるようである。平均的な、地表付近の岩石は、「測定されてきた頑丈な岩石試料」よりは、「凝灰岩などの多孔質でもろい岩石」に近い可能性がある。

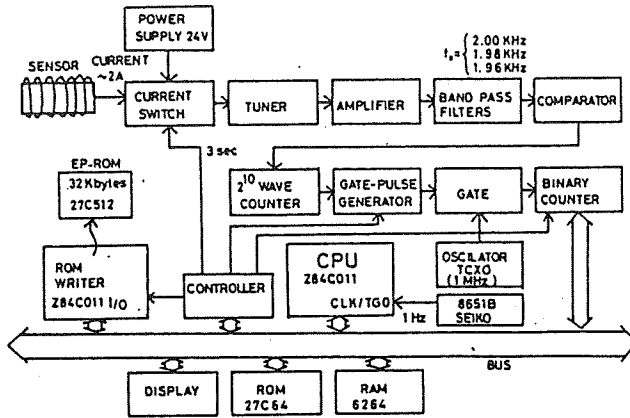
一方、Davis and Stacey(1972)、Abdullabekov et al.(1979)、Brennan and Hastie(1979)、Zhan(1989)らは、ダム水位変化に伴う地磁気変化を検出する研究を行なった。ダムの水位変化による地殻応力変化は、地震などの場合に比べ、その応力変化の分布は、単純で、モデル化した場合の問題点が少ない。そして、Davis(1974)は、得られた変化とモデルとの比較により、地表で得られた岩石の磁化の強さよりも、かなり大きな磁化の値を持つ岩石が地下に存在しなければ、観測地を説明できないことを指摘している。しかし、外国で行なわれた（行なわれている）ダム地磁気効果の観測例は、全て繰り返し測量により得られたものである。そこで、宮腰他（1990）に、序報として報告したように、我々は、プロトン磁力計を用いた、連続観測による、ダム地磁気効果の研究を1989年8月から開始した。ここでは、1990年末までに得られた結果の報告と、そのモデルによる検討を行なうことにする。

2. 観測システム

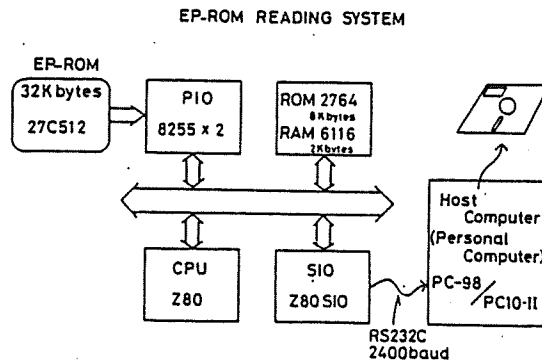
図1に菅沢ダムの位置とダムの周辺に設置した4点の全磁力連続観測点DM1、DM2、DM3それとDMRの配置を示す。観測点DMRは、地磁気日変化等の、外部磁場変動を除去するための基準観測点である。そのため、DMRはダムより約1km離れた位置に設置されている。Davis(1974)のモデル計算の結果によれば、ダムの水位の変化による最も大きい全磁力変化の期待できる領域は、湖の内側の範囲に限られることがすでに示されている。そこで、あらかじめこのことを考慮し、ダム周辺に設置したDM1～DM3の3点の観測点は、できるだけ湖の中に突き出した位置を選んで、設置されている。以上の4点の測点には、図2(a)のブロックダイアグラムに示されるようなプロトン磁力計を設置した。プロトン磁力計の計測分解能は、0.1nTであり、その精度は、ほぼ±0.25nT以上である。全磁力の計測は、毎分ごとに自動的に行なわれ、計測されたデータは、EP-ROMに焼き付けられて保存される。この方式で、約45日間の毎分値をEP-ROMの交換無しに記録することができる。



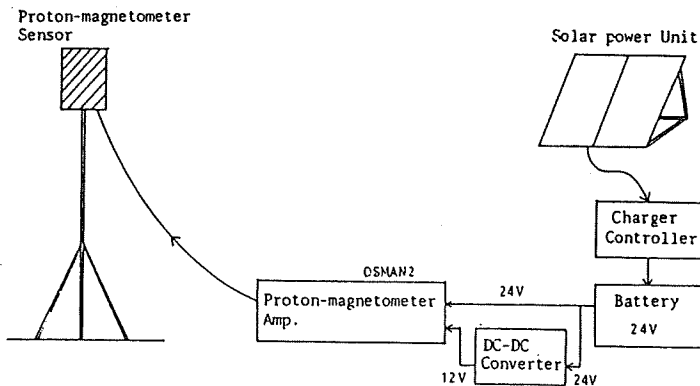
第1図 菅沢ダムと観測点配置



第2図 (a) プロトン磁力計のブロックダイアグラム



第2図 (b) EP-ROM再生装置のブロックダイアグラム



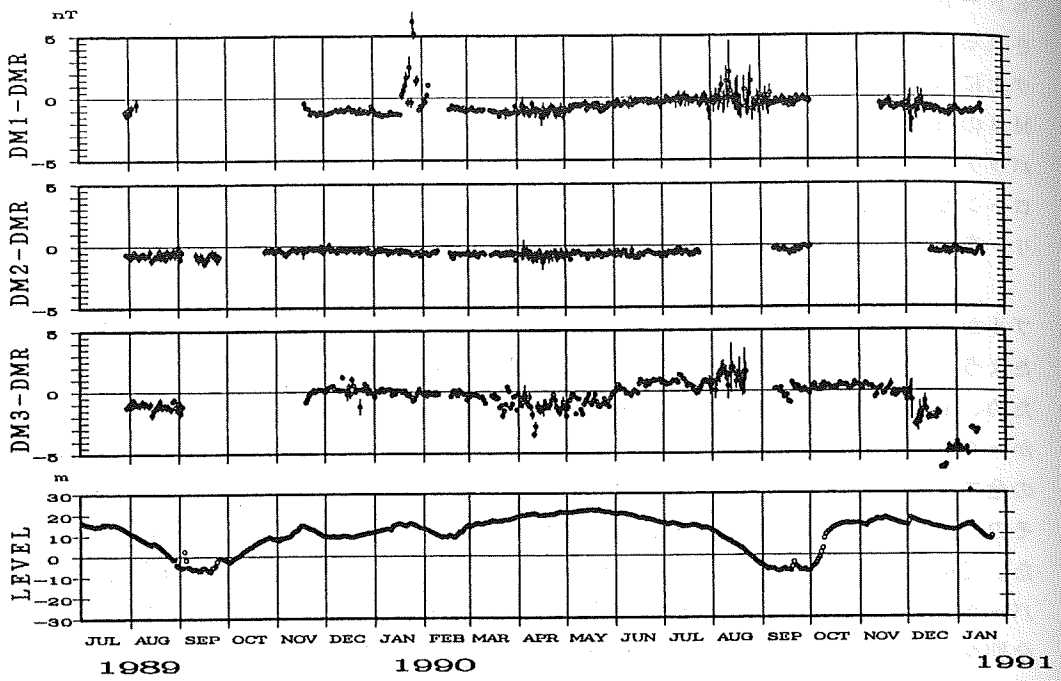
第3図 プロトン磁力計観測システム

EP-ROMの中に記録されているデータは、図2(b)のブロックダイアグラムに示されるようなデータ再生装置によりEP-ROMからコンピュータに取り込まれディスク上に保管される。また、プロトン磁力計の電源には、バッテリーを用い、DM1~DM3の各測点では、図3に示すような方式で、昼間に太陽電池によるチャージを行ないバッテリーをバックアップする方式を用いた。一方DMRでは、民家の一部を借用しプロトン磁力計を設置することができたので、AC100Vの商用電源を用いて、バッテリーをバックアップした。

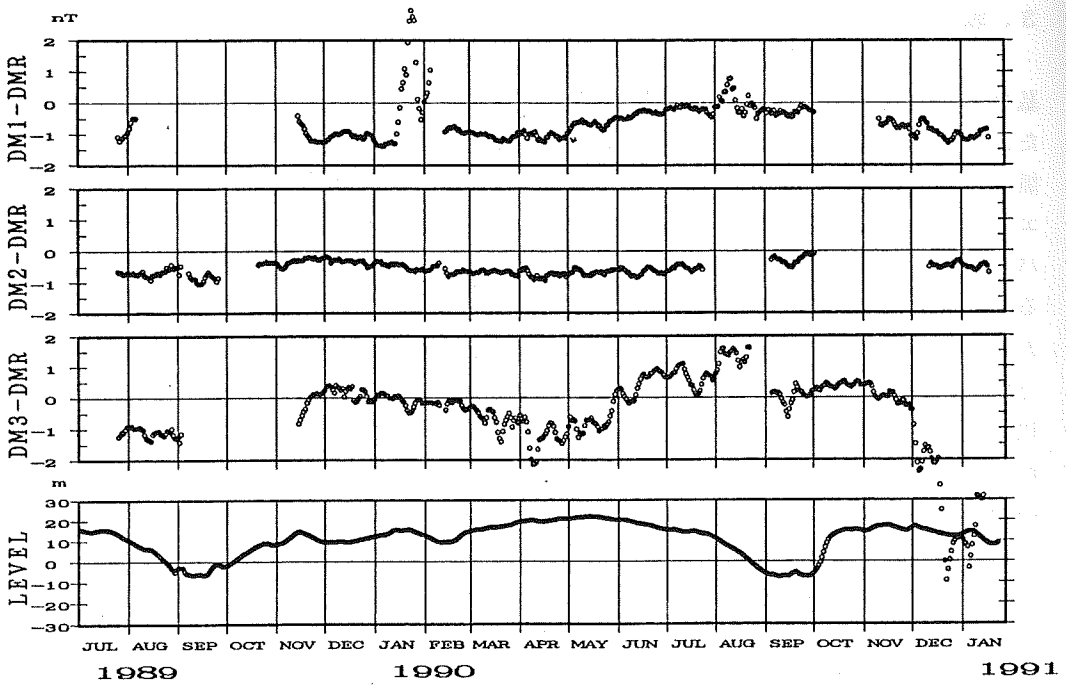
観測開始初期には、プロトン磁力計の不調、太陽電池チャージシステムのトラブルが発生しデータの欠測を生じた。また、DM1~DM3の各測点はすでに上に述べたような理由から、できるだけ、大きな全磁力変化が期待できる位置を選んで設置したため、必ずしも、太陽電池によるチャージシステムにとっては、良好な位置とは言えなかった。つまり、ダム周辺が山で囲まれているせいもあり、昼間太陽が出ている時間帯の全ての時間にわたって、太陽電池への日射が得られないと言うような条件であった。そのため、時々バッテリーへのチャージが十分でないまま計測が行なわれた期間もあった。その期間は、計測されたデータのバラツキが大きくなり計算された地点差のエラーが大きくなっている。充分な励磁電流が得られなかったためである。しかしながら、全期間を通して、ダム地磁気効果を検出するための、良好なデータを得ることができている。

3. 観測結果

地磁気日変化等の、外部磁場変動を除去するため、DM1~DM3の各測点と基準観測点のDMRとの間で、同一時刻のデータを用いてその差を取り地点差を計算した。得られた地点差は0h~4hの夜間4時間の全磁力のデータを用いて得られた平均値である。図4に結果を示す。なお図4には、ダムの水位変化も合わせて示されている。エラーが大きくなり地点差の値がバラついている部分は、すでに上に述べたように、バッテリーへのチャージが十分でなかった期間である。また、1990年後半に見られるデータの欠測は、記録用EP-ROMにおけるトラブルのためである。図4では、ダムの周辺の3つの観測点でそれぞれ、水位の変化と相関の良い全磁力変化があることが分かる。つまり、水位の上昇に伴って全磁力の減少、また逆に、水位の下降に伴った全磁力の増加が見られる。これをもう少し明瞭にするため、図4の結果に5日間の移動平均をとりスムージングをかけたものを図5に示す。DM1とDM2では、ほぼ同程度の変化、DM3では、他の2点とセンスは同じだが、数倍程度の大きさの変化があることが分かる。なお、測点DM1の1990年1月の中旬から2月中旬に見られる比較的大きな変化は、バッテリーの電圧低下による励磁電流の減少によるデータのバラツキによるものが見掛けのものである。1990年8月のものも同様である。また、DM3では、1990年12月以降非常に大きな変化が見られるが、これは、観測点DM3の近くを走る国道の道幅拡張のための鉄製の構築物のためである。工事は、12月から開始



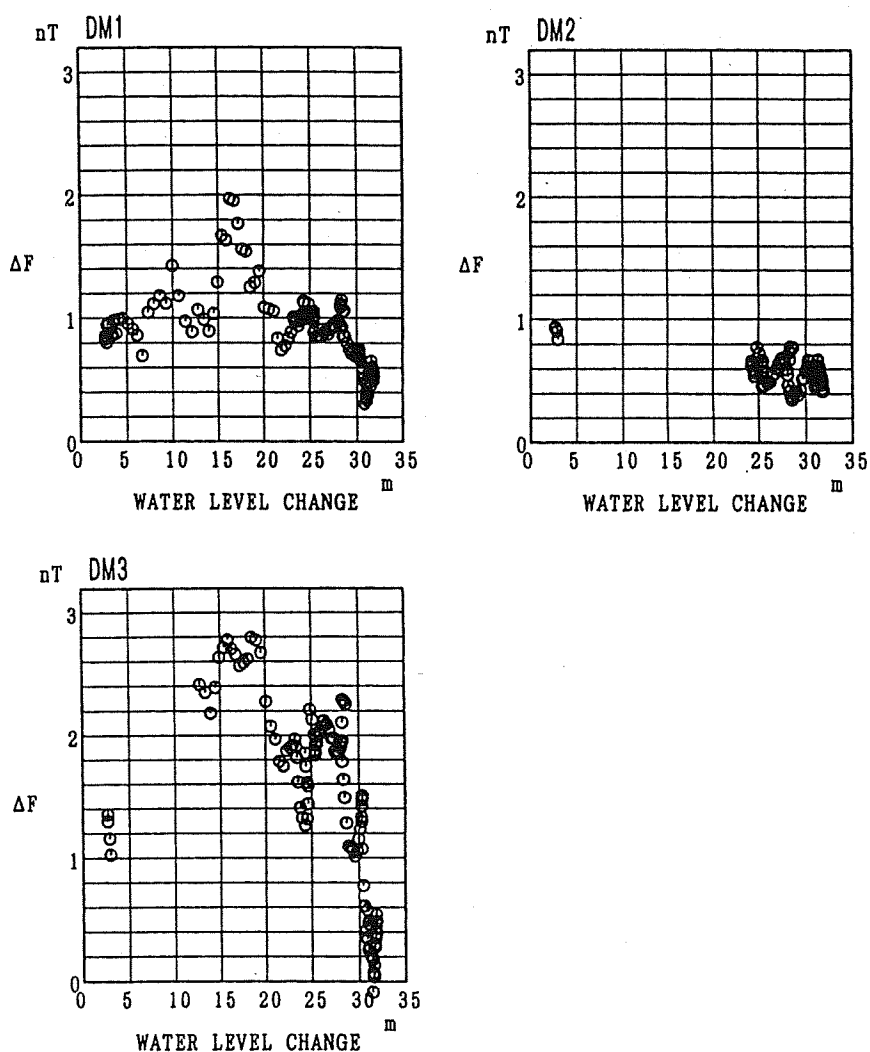
第4図 DMRを基準とした夜間0^h~4^hの地点差の平均および水位の日平均値



第5図 第4図の結果の5日間の移動平均値のプロット

され現在進行中である。工事終了を待って、この工事に伴う見掛け上の変化は、補正されるべきである。

水位変化と各測点での全磁力変化との相関を見るために、1990年5月1日から1990年9月15日までの図5に示される5日間の移動平均値を用いて、全磁力変化を縦軸に、ダム水位の変化を横軸にとってデータをプロットしたものを図6に示す。この図によってもDM3での水位変化に対する全磁力変化の割合が他の2点DM1、DM2に比べて大きいことが見て取れる。図6に示された各測点DM1～DM3での水位変化に対する全磁力変化係数 α を最小二乗法により求めると、表1のようになった。DM3での水位変化に対するレスポンスは、DM1、DM2より大きいことが分かる。



第6図 水位の上昇に対する全磁力の変化。縦軸・横軸共に、変化の相対量を表す。

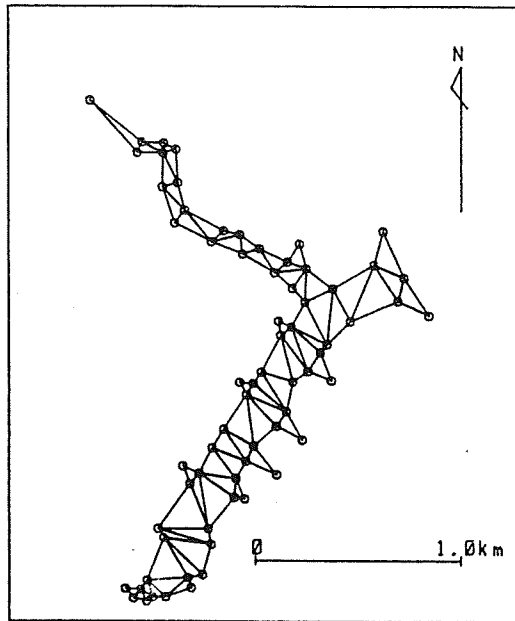
しかし、これら3点での α は、その値のセンスおよびその絶対値において、外国で得られている結果と同程度のオーダーである。これらの値も表1に合わせて示されている。ただし、オリジナルのデータでは、水位変化ではなく、ダムに蓄えられた水量の変化で示されているものもあるので、その場合には、湖の表面積を用いて水位変化に換算してある。

4. モデル計算

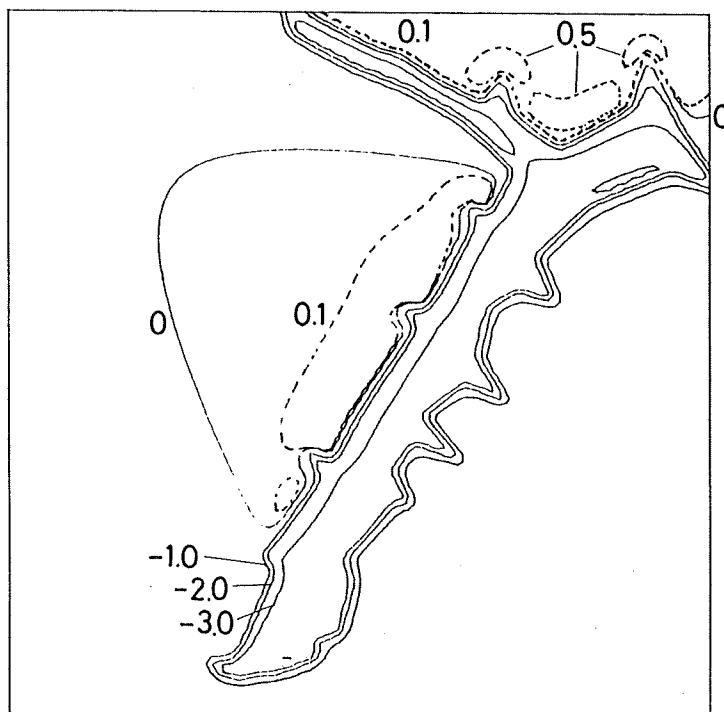
水位変化によって引き起こされる、湖の底での圧力変化に伴う、全磁力変化は、この菅沢ダムの場合どの程度であるかを、モデル計算によって試算してみた。計算方法は、理論の項で説明されている方法を用いている。つまり、湖を三角形要素で近似して、その三角形に加えられる負荷によって作り出されるピエゾ磁場を全体として重ね合わせて、全体の全磁力変化を算出する方法である。図7に、モデル計算で用いた、三角形要素を示す。モデル計算では、この三角形要素すべてが、同じ水位変化をしたと仮定してある。つまり、たとえ水位が下がっても、湖の全水面の面積は、不変ということになる。実際の湖は、3次元的な形状をしているため、水位が下がると、それにつれて全水面の面積も、小さくなることが予想される。

モデル計算の結果を図8に示す。このモデルでは、応力磁化係数 β を $1.0 \times 10^{-4} \text{ 1/bar}$ 、岩石の帯磁 J_0 を $5.0 \times 10^{-3} \text{ emu/cc}$ 、磁場の偏角、伏角はそれぞれ、 49.0° 、 6.5° W としてある。また、湖底は、センサーの位置から、10m下にあるとして計算を実行した。そして、水位変化は100mの上昇を仮定してある。つまり、ほぼ10barの変化があったことになる。図8に結果を示す。図中の数字の単位はnTである。菅沢ダムのそれぞれの測点で観測された全磁力変化と同程度の変化値になっている。しかしながら、用いた各種のパラメータの内、岩石の帯磁 $J_0 = 5.0 \times 10^{-3} \text{ emu/cc}$ は平均的な岩石の磁化からすれば、非常に大きな値である。菅沢ダム周辺の岩体は花崗岩であり、この値は、かなり高めの設定になっている。しかも、仮定している水位変化は、100mと実際の菅沢ダムの水位変化30mの三倍強程度の値である。仮に岩石の帯磁 J_0 がここで用いた値以上とすれば30m程度でも観測値を説明することができるが、すでに表1に示したように外国での観測例でも今回と同様な水位に対するレスポンス α の値が求められている。もし、岩石の帯磁に総ての原因を押しつける立場を取るなら、どのダムの観測例もたまたま非常に岩石の帯磁の大きい場所でなされた結論しなければならなくなる。したがって、今回の菅沢ダムでの観測結果および外国での結果を総合的にかつ合理的に解釈するためには、地殻を構成する平均的な岩石の応力磁化係数 β は、実験室で求められた代表的な値 $1.0 \times 10^{-4} \text{ 1/bar}$ より一桁程度大きいと考えるべきであろう。そうすれば、今回観測された全磁力変化を無理なく説明することができる。

第7図 水位変化に伴なう全磁力変化のモデル計算のために使用した湖の形状を近似するための三角形要素。



第8図 100mの水位変化(上昇)があった場合の全磁力変化。単位はnT。



5. まとめ

前節で述べたように、フィールドでの平均的な岩石の応力磁化係数 β は、実験室で求められた代表的な応力磁化係数より、少なくとも、1桁ほど大きい可能性が強い。実験室内レベルの実験と、今回のフィールド実験での実験条件の大きな相違点は、応力変化の時定数である。このフィールド実験では、2~3ヵ月の時定数を持つ水位変化によるロードを利用している。この時定数の違いもポイントになるかもしれない。つまり、Hamano et al.(1989)によって示されているように、凝灰岩などの多孔質でもろい岩石のように、平均的な、地表付近の岩石は、「測定されてきた頑丈な岩石試料」よりは、「凝灰岩などの多孔質でもろい岩石」に近く、 β が一桁以上大きくなるのか、それとも、応力変化の時定数の違いによるものなのかとすることも問題になるだろう。観測を続け今後の課題としなければならないだろう。

一方、すでに指摘したように、測点DM3での、水位変化に対する全磁力変化係数 α が測点DM1、DM2での値よりもその絶対値が数倍大きい。しかし、図8に示される結果を見れば、むしろDM3での α が他の2点よりも小さくなることが予想される。このくい違いの原因は何であろうか？ 今の所、3つの原因が考えられる。a) ダムの形状が3次元的であるため、ダムの側壁からの水圧の効果を考慮すべきである。b) 水位の変化に伴って、水面の全面積が変化する(水面の境界形状が変化する)。c) 岩石の帯磁構造が非均質である。これらの3つの内から主な原因を特定するには、ダムの3次元的な形状を考慮に入れたモデル計算を行なう必要があるとともに、もうしばらく観測を続け、データのスタッキングを行なう必要があろう。

水位上昇に対する全磁力変化の割合

測点 (または出典)	α [nT/m]
鳥取 菅沢ダム	
DM1	-0.014
DM2	-0.013
DM3	-0.065
Davis and Stacey (1972)	-0.040 (*)
Abdullabekov et al. (1979)	-0.085 (*)
Brennan and Hastie (1979)	-0.019 (*)
Zhan (1989)	-0.280

(* 水量変化より水位変化に換算したもの)

表1 水位の上昇に対する全磁力変化の割合。

参考文献

- 宮腰潤一郎, 西田良平, 塩崎一郎, 笹井洋一, 大志万直人, 巨大貯水ダムにおける地磁気・地電位差観測(序報), *CA研究会論文集*, 195-203, 1990.
- Abdullabekov, K.N., YE. Berdaliyev, A.N.Pushkov and V.A.Shapiro, Local variation of the geomagnetic field during the filling of a reservoir., *Geomagnetism and Aeronomy*, 19, No.2, 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 and Appl. Geophys.*, 112, 811-819, 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.
- Johnston, M.J.S., Local magnetic fields, uplift, gravity, and dilational strain changes in southern California, *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, 933-947, 1986.
- Oshiman, N., Enhancement of tectonomagnetic change due to non-uniform magnetization in the earth's crust --two-dimensional case studies--., *J. Geomag. Geoelectr.*, 42, 607-619, 1990.
- Oshiman, N., M.K.Tuncer, Y.Honkura, S.Baris, O.Yazici, and A.M.Isikara, A strategy of tectonomagnetic observation for monitoring possible precursors to earthquakes in the western part of the North Anatolian Fault Zone, Turkey., *Tectonophysics*, 1991, in press.
- Rikitake, T., Magnetic and electric signal precursory to earthquakes: an analysis of Japanese data., *J. Geomag. Geoelectr.*, 39, 47-61, 1987.
- Sasai, Y., A surface integral representation of the tectonomagnetic field based on the linear piezomagnetic effect. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo, 58, 763-785, 1983.
- Stacey, F.D., The seismomagnetic effect., *Pure and Appl. Geophys.*,

58, 5-22, 1964.

Zhan Zhijia, Investigations of tectonomagnetic phenomena in China., *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 57, 11-22, 1989.

Zlotonicki, J. and Cornet, F.H., A numerical model of earthquake-induced piezomagnetic anomalies. *J. Geophys. Res.*, 91, 709-718, 1986.