

# 地磁気全磁力の鉛直勾配と大地表層の磁性

香川大学教育学部 水野浩雄

## The Vertical Gradient of Geomagnetic Total Intensity and Its Implications for the Subsurface Magnetism of Japan

Hiroo Mizuno

Department of Earth Sciences, Kagawa University

### 1. はじめに

地球磁場の永年変化の分布を明らかにする目的で、日本の一等磁気測量は1940年代の終わりから国土地理院により実施されてきた。全国に約100点の一等磁気点が設置されている。国土地理院型の磁気儀により磁場の全成分が測定された。1971年からは、磁場の強さの測定にはプロトン磁力計を用いることになった。磁気点に三脚を置き、その上に磁気儀を設置する。プロトン磁力計のセンサーはすこし離れたところに補助点を決めてそこに置く。経緯儀の中心点と補助点の間の全磁力の差を補助点に於ける全磁力測定値に加えて、経緯儀の中心点の全磁力を決める。経緯儀の中心点と補助点の間の全磁力の差を測定する際に、経緯儀の中心点とそこから60cm下の点の全磁力差をも測定するよう、作業規定に定めた。磁気点に於ける全磁力の鉛直勾配の測定である。一等磁気点では幾年かを隔てて測定が繰り返される。その際に、こうして決められた全磁力鉛直勾配に大きな変化がなければ、磁気点の近傍における磁場の人工攪乱がないとの判断に一つの根拠を与えるものになる。

測地学では、重力の鉛直勾配は重要な理論的な役割を与えられている。重力の勾配の測定も行われてきた。それにたいして、地球磁場の勾配の測定や解析はほとんど行われてこなかった。宮腰・他(1993)は磁場の鉛直勾配を測る目的で、気球にプロトン磁力計を載せて高度を変えて測定を行った。こうした試みはむしろまれである。吉岡断層をほぼ南北方向に切る測線上に50m間隔で9点の測定点が設けられた。最高の測定高度は約100mである。高度と共に全磁力が減少する点と、それが増大する点もあることが確認された。宮腰・他(1993)はそれに、二次元の磁性岩体モデルによる解釈をあたえた。

1971年以来今日にいたる間に、一等磁気点で得られた全磁力鉛直勾配のデータはかなりの量にのぼる。本報告ではその全データを用いて、大地表層の磁性に関する考察を行う。

### 2. 地磁気全磁力鉛直勾配の測定

磁気点において観測の設営をしたのち、全磁力鉛直勾配を測定する。まず、プロトン磁力計のセンサーを磁気儀の中心点にあたる位置において、5ないし10回、全磁力を測定する。次に、そこから60cm下にセンサーをおいて同じ測定をする。上、および下の測定をそれぞれ平均し、それらの差をとる。これから1mの高さの差に対する全磁力差を求めて、全磁力鉛直勾

配とする。本報告においては全磁力鉛直勾配は鉛直上向きに正とする。

一等磁気点は約 100 点である。磁気点の中には周囲の状況が変わり、磁場の観測ができなくなり、別の点に移転することを与儀なくされるものが少なくない。そうした場合、旧点、新点ともに全磁力鉛直勾配がきまる。それで、同一の磁気点番号にたいして、場所が異なる複数地点の鉛直勾配が利用可能になる。1971 年以降今日までのデータにより、全部で 174 地点における全磁力鉛直勾配が求められた。それらのデータは、Mizuno(1995)に掲載されている。

それら 174 地点のうち 39 地点は、一回しか測定がない。その他の 135 地点は 2 回、もしくはそれ以上の繰り返し観測がある。同一の地点で 12 回観測が繰り返されている磁気点が 3 点ある。同一地点で複数回繰り返し観測があるときには、それぞれの観測時に求められた全磁力鉛直勾配の平均値を求め、その地点の全磁力鉛直勾配とする。

複数回の繰り返し観測があるときに、それぞれの観測時に求められた全磁力鉛直勾配のばらつきがどの程度であるかは、一等磁気測量の成果の信頼性を見る上での一つの手がかりになるであろう。その意味から、全磁力鉛直勾配の測定を作業規定に盛り込んだことは、すでに述べた通りである。20 年余りのデータの蓄積からこの点をみると、期待したよりはそのばらつきは大きい。

そのばらつきの度合を示すものとして、個々の点において、繰り返し観測により求められた全磁力鉛直勾配の最大値と最小値の差を考察する。2 回、もしくはそれ以上の繰り返し観測がある 135 地点のうち 92 地点においては、その最大値、最小値の差は 10nT/m 以下である。だが、3 点に 1 点の割合でそれ以上の差を示しており、20nT/m を超える差を示す点が 13 ケ所ある。

同一地点で繰り返し測定された全磁力鉛直勾配の最大値と最小値の較差としては、これは当初の予想以上に大きい。その原因としては、次のようなものが考えられよう。第一は、プロトン磁力計の誤差、第二には上述の手順で鉛直勾配を測定している間に起こる磁場の変化、そして第三に、人工磁場の影響である。

経緯儀の中心点とそこから 60cm 下の点で、それぞれ 5 回ないし 10 回の測定をするのに要する時間は 1 分か 2 分である。磁気測量はできるだけ静穏日に実施することになっているから、この測定の間磁場の変化は一般には小さい。したがってそれは、全磁力鉛直勾配には殆ど影響しない。

一等磁気測量に用いられているプロトン磁力計は 1nT の読み取りである。経緯儀の中心点、および、それより 60cm 下の点における 5 回、ないし 10 回の測定のばらつきを標準偏差としてあらわして、一測定の誤差を見積ると、0.55nT となる。プロトン磁力計の誤差により、上記のような全磁力鉛直勾配の違いが生じるとは考えられない。

磁気測量に携わる者は、磁気点の周囲に人工攪乱源がないことを確かめなければならない。そのために細心の注意を払う。磁気点の場所の選定に当たっては、人工攪乱源がないこと、将来にわたりそれが保たれるであろうことが殆ど唯一の基準になる。したがって一般的には、全磁力鉛直勾配のばらつきが人工攪乱によるとは考え難い。しかし、多くの中には、場合によるとそうした事情がないとは言えない。20nT/m を超える 13 例中、5 例については、複数の

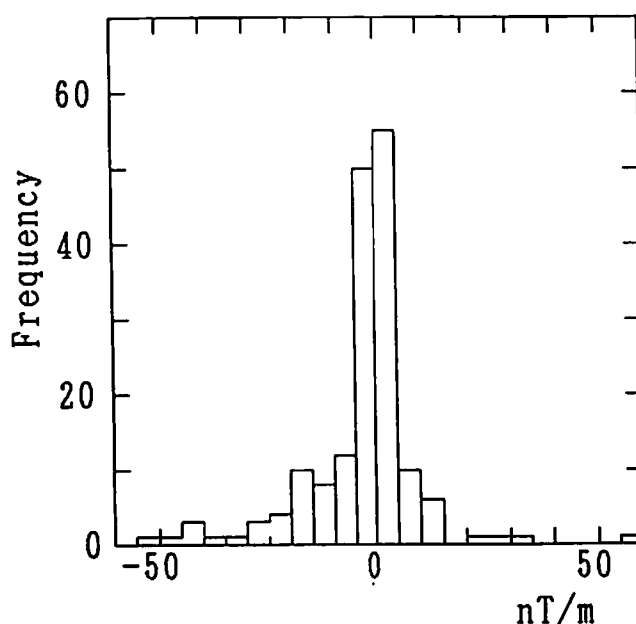
繰り返し観測のうち最後のものだけが他のものと隔たった勾配を与えている。他の2例においては、複数の繰り返し観測が二つのグループに分かれ、それぞれのグループの中では勾配に大差がないが、両者には隔たりがある。こうしたことは人工攪乱の影響がありはしないかと思わせる。いずれにしても、地球磁場の観測に携わる者は、人工攪乱を避ける為に、あらゆる可能な努力を払わなければならない。

なお、Mizuno(1995)には、全磁力鉛直勾配が決定された174地点について、磁気点番号、磁気点名、緯度、経度、繰り返し観測回数、繰り返し観測による全磁力鉛直勾配の最大値と最小値、繰り返し観測による全磁力鉛直勾配の平均値が集録されている。

### 3. 全磁力鉛直勾配の頻度分布

全磁力鉛直勾配が決定された174地点の中で5地点においては、全磁力鉛直勾配の絶対値が100nT/mを上回る。それらは、(65)熊本、(98)父島、(100)八丈島、(102)伊豆大島、(593)坪田である。(65)熊本を除き、他は火山に関係した所にある。火成岩の強い磁性が、100nT/mを上回る大きな鉛直勾配をもたらしている。これらのデータを除き、169個のデータにより、全磁力鉛直勾配のヒストグラムを画いたのが第1図である。5nT/mの区分毎に頻度が与えられている。前項に述べたように、個々の地点で得られた全磁力鉛直勾配のばらつきは期待されたよりは大きい、それでも第1図のヒストグラムから、全磁力鉛直勾配の頻度分布の特徴を読み取ることは可能である。

地球の磁場の大部分は地心双極子で説明される。もし、地心双極子だけを考えるならば、日本付近では全磁力鉛直勾配は-0.02nT/mの程度である。しかし、観測された全磁力鉛直勾配はその絶対値においてはるかに大きい。しかもそれは、正及び負の値が同じような頻度で



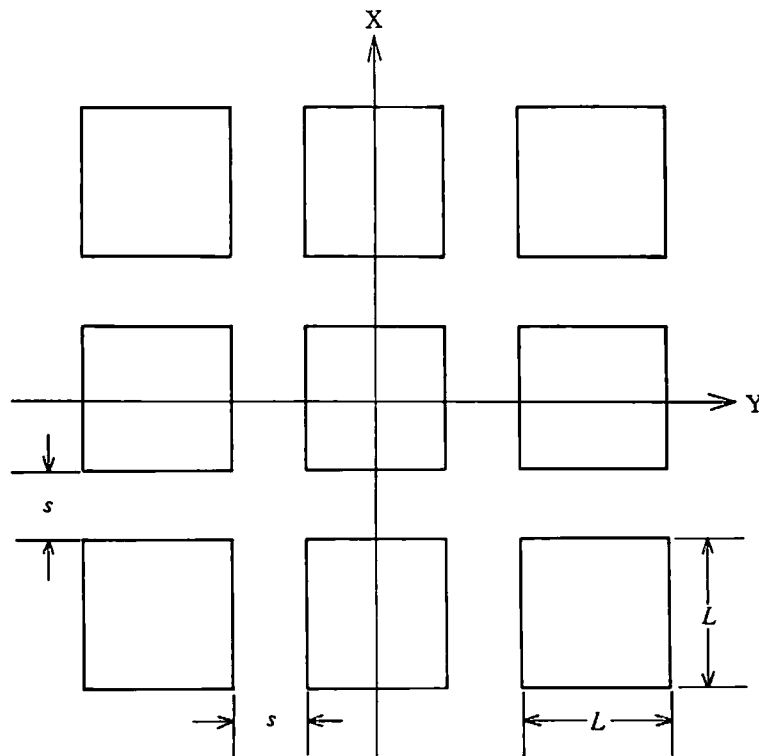
第1図 測定による全磁力鉛直勾配の頻度分布

あらわれている。絶対値が  $5\text{nT/m}$  の区分に全体の約  $60\%$  が含まれている。絶対値が  $5\text{nT/m}$  から  $10\text{nT/m}$  の間の区分には全体の約  $13\%$  が含まれ、全体の約  $4$  分の  $1$  は絶対値が  $10\text{nT/m}$  より大きい。このようにして、勾配がゼロの近くに高いピークをもち、正負両側にはほぼ対称的な分布をなし、絶対値の最大は  $50\text{nT/m}$  程度と考えられる。これが全磁力鉛直勾配の頻度分布の特徴と考えられる。本報告は、この頻度分布をもたらす原因について考察する。

このような特徴をもつ全磁力鉛直勾配の頻度分布は、地表面下の磁化が非一様であるときにのみ可能である。地表面が平面であるとする。もし、地表面の下が一様に磁化した層からなるときには、地表面より上で観測される全磁力鉛直勾配には、その影響はない。それで、第 1 図の頻度分布を再現する地表面下の磁化の非一様性のモデルを検討する。

#### 4. 地表面下の磁化の非一様性のモデル

磁化した直方体が地表面下にあるとする。その上面は水平で、側面は鉛直であるとする。上面は正方形で一辺を  $L$ 、鉛直下方には辺長が  $D$  とする。上面の深さを  $d$  とする。上面の中心に座標の原点をとり、上面の辺に平行に  $x$  軸、 $y$  軸をとる。 $z$  軸は地表面から鉛直下方にとる。同じ直方体が水平方向に間隔  $s$  を隔てて並んでいるとする。第 2 図はそれを上から見たものである。直方体の並びは  $x$  軸方向にも  $y$  軸方向にも、無限に広がっているものとする。直方体は  $x-z$  平面に平行な平面内に磁化しているものとし、磁化の強さは  $M$ 、磁化方向と水平面とのなす角を  $I$  とする。



第 2 図 磁化した直方体の配列による大地表層の非一様磁化モデル

磁気点を選点するときには、人工攪乱がないことをほとんど唯一の基準としている。地表面下の磁化との関係でどのような位置にあるかは考慮していない。したがって、磁気点の選点は、第2図に示された地表面の上で一点を任意抽出することに等しい。このようにして抽出された点における全磁力鉛直勾配は、定まった頻度分布に従う。この分布は、 $L$ 、 $D$ 、 $s$ 、 $d$ 、 $I$ および $M$ が与えられれば、計算により求められる。

Bhattacharyya(1964)は磁化した直方体がもたらす全磁力の異常を研究した。上面が水平面で、直方体全体が一様に磁化しているとの仮定のもとに、任意の点における全磁力異常、およびその一次、二次微分を求める厳密式を導いた。その中からここで用いる式を以下に引用する。

ここでは直方体の磁化の方向が、そこでの地球の磁場の方向と同一の場合に限ることとする。第2図のように座標系を定め、観測点の位置は $(x, y, z)$ で現されるとする。直方体の中の体積要素の座標を $(\alpha, \beta, \gamma)$ とする。 $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\gamma_0$ を次のように定める。

$$\alpha_1 = \alpha - x$$

$$\beta_1 = \beta - y$$

$$r_0^2 = \alpha^2 + \beta^2 + d^2$$

$\alpha_1$ の上限、下限をそれぞれ、 $\alpha_u$ 、 $\alpha_l$ とし、 $\beta_1$ の上限、下限をそれぞれ、 $\beta_u$ 、 $\beta_l$ とする。磁化した直方体による任意の点における磁場は、直方体の中の体積要素による磁場を直方体全体にわたり積分して求められる。直方体の側面が鉛直下方に無限に深い場合には、観測点における全磁力の鉛直上向きの勾配は次の式により与えられる。

$$-\frac{\partial}{\partial z} F(x, y, z) = -M \left[ \cos^2 \delta \frac{\alpha_1 \beta_1 \{r_0^2 + (z+d)^2\}}{r_0 \{\alpha_1^2 \beta_1^2 + r_0^2 (z+d)^2\}} - \sin^2 \delta \frac{\alpha_1 \beta_1}{r_0 \{(z+d)^2 + \alpha_1^2\}} \right. \\ \left. - 2 \sin \delta \cos \delta \frac{\beta_1 (z+d)}{r_0 (r_0^2 - \beta_1^2)} \right] \Bigg|_{\alpha_l}^{\alpha_u} \Bigg|_{\beta_l}^{\beta_u}$$

ここで、 $\delta$ は、 $90^\circ - I$ である。 $\alpha_1$ について $\alpha_l$ から $\alpha_u$ まで、 $\beta_1$ について $\beta_l$ から $\beta_u$ まで定積分を行った。

直方体の鉛直方向の辺が有限の場合にも、上式を用いてそれによる全磁力鉛直勾配を求められる。その直方体の上面の深さを $d_1$ 、下面の深さを $d_2$ とする。そのときには、上面の深さが $d_1$ で無限に深い直方体による勾配と、上面の深さが $d_2$ で無限に深い直方体によるものとを計算し、前者から後者を差し引けばよい。

第2図に示すような地表面下の非一様帯磁のモデルに基づいて、全磁力鉛直勾配の頻度分布が次のようにして求められる。第2図の上で、中心が原点に一致し、辺が $x$ 軸、 $y$ 軸に平行な正方形の領域をとる。その辺の長さは $L+s$ である。この領域は、原点に上面の中心をもつ直方体の部分を含み、かつ、その周囲の直方体との間の磁化していない部分にもわたっている。この正方形の領域を、 $x$ 方向、および $y$ 方向にそれぞれ間隔 $l$ の直線を引いて仕切り、それらの交点（格子点）の上で高さが $z$ の点において、地表面下の磁化した直方体による全磁力鉛直勾配を計算する。直方体は無限個あるが、実質的な影響という点において、格子点からある範囲のものを考慮すれば足りる。計算で求められた頻度分布が実際に充分近いためには、格子点間隔 $l$ を小さくとらなければならない。

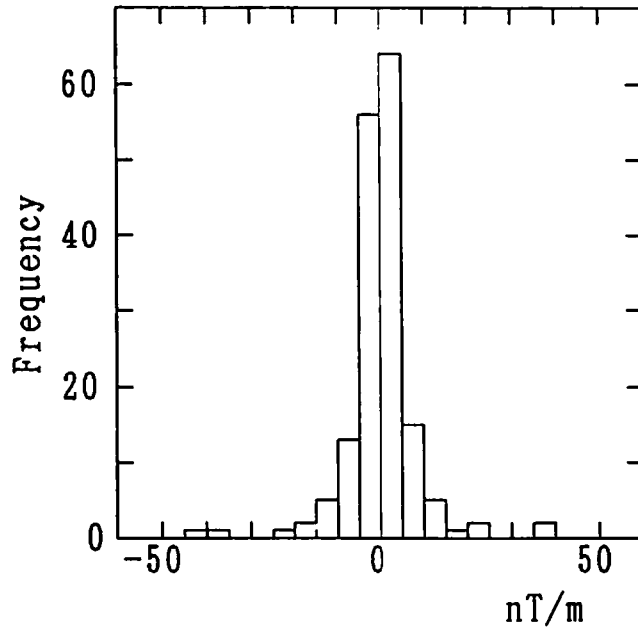
直方体の上面の一辺 $L$ が大きすぎ、または小さすぎると、非一様磁化の効果が低下する。直方体の間隔 $s$ についても同様である。したがって、 $L$ 、 $s$ については、非一様磁化の影響を發揮できる適当な大きさがあるはずである。磁気双極子による磁場は、双極子からの距離の3乗に反比例する。磁場の勾配は、したがって、距離の4乗に反比例する。全磁力鉛直勾配は観測点にごく近いところにある磁性体により左右されるであろう。それで、直方体の上面の深さ $d$ は0mとした。

直方体の磁化の強さ $M$ は、種々の岩石の磁化の強さを考慮するならば、自ずからある範囲に限られる。それは火成岩の磁化よりは小さくしなければならない。火成岩の磁化は数A/mから数十A/mとみればよいであろう。堆積岩は地球磁場による誘導磁化を示す。また、堆積環境によっては堆積残留磁化を獲得する。いずれにしても堆積岩の磁化は火成岩に比べて著しく小さく、 $10^{-2}$ A/m程度とみればよいであろう。直方体の磁化の強さ $M$ はこれらの間になければならない。直方体は地球磁場と同じ方向に磁化していると仮定する。それで $I$ は、日本中央部の地球磁場の伏角により、 $50^\circ$ とした。全磁力鉛直勾配を計算する点の地表面からの高さ $z$ は1mとした。

上記の事柄を考慮したうえで、パラメーター $L$ 、 $D$ 、 $s$ 、 $M$ にいろいろな値を与えて、モデル計算を行い、得られた頻度分布を第1図と比べて、両者が一致するパラメーターの組を探した。その結果、次のモデルが第1図の頻度分布に近い分布を与えることが見いだされた。すなわち、直方体上面の一辺の長さ $L$ 、直方体の鉛直方向の一辺の長さ $D$ はともに40m、直方体同志の間隔 $s$ は20m、磁化の強さ $M$ は0.2A/mである。

このモデルから得られた全磁力鉛直勾配の頻度分布を第3図に示す。ただし縦軸のスケールは、各区分に対する頻度の合計が169になるように規格化されている。それで、第1図と第3図が比較できる。モデルから求められた頻度分布は、観測から決められたその特徴をよく再現している。

0.2A/mという弱い表層磁化によるものであるにもかかわらず、40nT/mにのぼる全磁力鉛直勾配が生じることになっている。これは直方体モデルによるためのedge effectである。第3図の勾配がゼロ前後のピークは第1図のそれよりもやや高い。磁化の強さとして0.2A/mよりやや強めのほうがよりよい一致が得られるかもしれないが、この考察ではごく大ざっぱな見積りとどまる。



第3図 磁化した直方体の配列モデルによる全磁力鉛直勾配の頻度分布

## 5. 結論

1971 以来、一等磁気測量で得られた 174 地点における全磁力鉛直勾配の解析を行った。

同一の地点で繰り返し観測が行われ、全磁力鉛直勾配が複数回決められたものからみると、それら相互のばらつきは当初考えられたよりも大きい。場合によると、人工磁気攪乱によるものも含まれているかもしれない。地球磁場の測定に際しては、測定点の周囲の磁気的な状況に十分に注意しなければならない。

測定で決められた全磁力鉛直勾配は、勾配がゼロの付近にピークをもち、正負の両側にはほぼ対称的な頻度分布を示す。この分布は大地表層の非一様な磁化によってのみ説明ができる。上面が正方形の直方体が規則的に並んでいるモデルにより、この頻度分布を再現できるものを求めた。その結果、直方体上面の一辺は 40m、上面の深さは 0m、直方体の鉛直方向の辺は 40m、隣合う直方体の間隔は 20m、磁化の強さを 0.2A/m としたときに、測定から得られた全磁力鉛直勾配の頻度分布の特徴を再現できることが示された。

言うまでもなく、このモデルは大地表層の磁化の非一様性の平均的な程度をあらわすに過ぎない。実際には、大地表層の磁性はこのように規則的で単純なものではないであろう。その大きさ、方向ともに複雑な分布をなしているであろう。それにもかかわらず、20 年余りにわたり、一等磁気測量の際に集められた全磁力鉛直勾配のデータは、大地表層の磁性の輪郭を示すのに役立つものとなった。

プロトン磁力計が実用化したことにより、全磁力に関する限り空間的な勾配の測定が簡単に行えるようになった。磁気点において、三次元的な格子点をくみ、磁気点で繰り返し測定

をする度に、これらの格子点で正確に同一の位置で全磁力を測り、その空間的な勾配を決定するようにすることが極めて望ましい。その結果は、人工磁気攪乱の有無を監視するのに役立つであろう。異なる地質条件の地域に Test field をいくつか設け、全磁力鉛直勾配が観測できる磁気点網を展開すれば、大地表層の磁性に関して、より詳しい知見が得られるであろう。

著者は1979年1月のCA研究会において、全磁力鉛直勾配に関する報告を行った。当時得られていたデータは今回よりもずっと少なかったが、それでも今回指摘した頻度分布の特徴はすでに認められた。その時に、笹井洋一氏から「一等磁気点は北極星観測の必要上、斜面の北側に位置することが多い。それで、正の全磁力鉛直勾配が現れるのは理解できる」とのコメントを頂いた。著者はそのことを念頭においてはいたが、とりあえず大地を平面として取り扱った。その結果、頻度分布の特徴はおおかた再現され、この線に沿う限り、さらに細かな検討は今のデータではなし難いと考えられる。

国土地理院の藤原智氏から次のコメントがあった。すなわち「経緯儀中心の下、60cmで測ったとしているが、実際にはその位置は明確に60cmになってはいない。大体の所に手でセンサーをもっていつているだけである。そもそもそうした重要な意味のある測定だとは思っていなかったから、時には磁性を帯びたものを持ってやっていたこともあるかもしれない。だから、このデータは、こうした解析ができるようなものではない」これは、地球磁場の測定に携わる者の初歩的な心構えにかかわるものとして、重視せざるをえない。藤原氏が観測者として署名している「地域差観測手簿」にも、経緯儀中心と下においたセンサーの間隔が60cmと、図に記載されている。もちろんそのように記載されているからといって、厳密に60cmであるとは誰も思いはしないであろう。しかし、そのように記載されている以上は、60cmであらしめるべく、必要な注意と可能な努力は払ったものと受け取るのは当然である。測定がそのように行われているならば、60cmという上下間隔に含まれるであろう誤差を考慮してもなお、本論の結論にいささかの影響もないことは明かである。このことから強調しておかなければならないのは、データは原簿に遡って（一般には源泉に遡って）公開されなければならない、ということである。

#### 参考文献

- Bhattacharyya B.K. (1964), Magnetic Anomalies Due to Prism-Shaped Bodies with Arbitrary Polarization, *Geophysics*, 29, 4, 517-531.
- 宮腰潤一郎、塩崎一郎、西田良平、岡田昭明、大志万直人 (1993)、係留バルーン磁力計による活断層構造の調査、Conductivity Anomaly 研究会 (1993) 論文集、142-153.
- Mizuno H. (1995), The Vertical Gradient of Geomagnetic Total Intensity and Its Implications for the Subsurface Magnetism of Japan, *Mem. Fac. Educ. Kagawa Univ.*, II, 45, 1-17.