

**地震時電磁場変動の観測値と計算値の比較、およびその結果の意味****Comparison between observed and theoretical variations in the electromagnetic field and implication of its result**

山崎健一

Ken'ichi Yamazaki

京都大学防災研究所地震予知研究センター宮崎観測所

Miyazaki Observatory, Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

**Abstract**

Variations in the electromagnetic field accompanying with seismic events have been reported to be observed. The piezomagnetic effect is one of the possible mechanisms which generate such variations. Calculation based on a conventional constitutive law of the piezomagnetic effect provides a reasonable prediction of the observed phenomena. The agreement between observed and calculated phenomena implies that the piezomagnetic effect is a plausible mechanism that generates the phenomena. The author believe this result has at least two meaning. First, it means that observation of EM field possibly improve the conventional earthquake early warning system. Second, it means that observation of EM field possibly provides a hint to assume basic properties of large scale condensed matters. Because of the second point, the author expects we can expand the definition of "Geophysics" in such a way that it includes not only "Science of the Earth using physics" but also "Physics using observation of the Earth".

**1. はじめに**

地震の発生および地震波の伝搬に同期する電磁場変動（以下、地震時電磁場変動と呼ぶ）の観測例がこれまでに複数報告されている[たとえば Eleman, 1969; Matsushima et al., 2002; Honkura et al., 2009, Okubo et al. 2011]。地震発生「前」の電磁場変動と異なり、発生「時」の電磁場変動は、存在自体はある意味でほぼ自明である。なぜならば、さまざまなメカニズム、たとえば、地震動による多孔質媒質内の流体運動から生じる流動電位や地球主磁場内部で有限電気伝導度の地殻が動くことによる電磁誘導、あるいは差応力の変化による岩石磁化の変化（応力磁気効果、あるいはピエゾ磁気効果）などによって、力学作用は電流・磁化変化に変換されることが実験的・理論的にわかっているからである。しかし、各メカニズムがつくる電磁場変動が観測可能な大きさを持つことはまったく自明ではなく、計算して初めてわかることである。

以下は、地震時電磁場変動についての計算に関して、筆者が 2013 年度 CA 研究会の若手セッションにおいて講演した内容である。同セッションの趣旨に沿って、というよりは甘えて、完成された研究成果ではなく、研究の計画あるいは筆者の抱負に近い内容を講演させていただいたので、本稿もまた完成された研究論文の形をとってはいない。筆者は、CA 論文集はそのような文章も許容する媒体であると信じるものである。なお、このような断り書きは蛇足であると指摘されるかもしれないが、論文を書きなれていない方が正式な、すなわち形式を重んじる学術誌等に投稿する論文を書く際には本稿を参照されないように、というお願いの意味を含んでのものであるので、そのまま残しておく。

## 2. 応力磁気効果から生じる地震時磁場変動

応力磁気効果は前述のとおり、変換メカニズムのひとつである。近年の重要な報告のひとつとして、岩手宮城内陸地震の発生時に検出された磁場変動 [Okubo et al. 2011] を挙げたい。筆者がこの例を特に重要だと考えるのは、それが地震波の到達に先行して観測されているからである。Okubo et al. では、これが応力磁気効果によって生じたものと仮定して震源過程をあらわに考慮した理論計算を行い、それが観測値を説明すると結論している。

応力磁気効果は、岩石試料に作用させる応力を変化させて磁化を測定する実験によりその性質が求められている [たとえば Nagata (1970) およびその引用文献]。岩石実験の結果からは、地殻応力の範囲では岩石磁化の変化  $m$  と差応力テンソル  $\Delta T$  の間に良い精度で線形関係が成り立つことが示唆されている。それは次の形で表現される [Sasai, 1991]:

$$m = \beta \Delta T M \tag{1}$$

ただし  $M$  は応力が作用していない状態で岩石がもつ磁化ベクトル（初期磁化）であり、 $\beta$  は比例係数（応力磁化係数）である。

応力磁気効果から生じる電磁場変動の計算は以下の流れで行われる。まず地殻の弾性的性質を適当なものに、たとえば半無限一様などに仮定することにより、さまざまな応力源から生じる応力場は計算できる。そこで初期磁化の分布を仮定すれば、応力場と構成法則 (1) によって磁化分布が計算できる。そうすれば電磁場の支配法則を用いることで、そこから生じる電磁場変動は計算できる。

電磁場の支配法則は一般的な場合にはマクスウェル方程式および物質中の電場・磁場についての構成法則である。磁化が残留磁化のみであること、およびオームの法則が成り立つことを仮定すると、磁場変化量（地球主磁場を除いたもの） $B$  の支配方程式は次のように書ける：

$$\nabla^2 B(x, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} B(x, t) - \mu_0 \sigma \frac{\partial}{\partial t} B(x, t) = -\mu_0 \nabla \times (\nabla \times m(x, t)) \tag{2}$$

ここで  $\mu_0$  は真空の透磁率、 $c$  は真空中の光速度であり、 $x$  は位置をあらわす。磁化が誘導磁化を含む場合でも、この式は十分な精度で成り立つ。場が時間変化しない場合、すなわち静的な場合には、左辺

第二・第三項が消えてポアソン方程式に帰着するので、解を簡単な形で書き下すことができる。一方、時間変化を考えた場合は、解を閉じた形で求めることは難しい。変位電流項を無視すると左辺第二項はゼロになるが、それでもなお、解の表現式は複雑である。ただし、無限媒質や半無限媒質といった比較的単純な物性構造を仮定し、さらに磁化分布の形状に制約を加えると、比較的簡単な形の解が得られる場合もある。

### 3. 観測値と計算値の比較例

さて、Okubo et al. [2011] には観測値と計算結果があわせて示されており [彼らの論文の fig. 10], 各成分の変化の符号は確かに一致しているのだが、よく見ると、時間変化の形はあまり一致していないようにも思われる。特に、立ち上がり方は計算値のほうが明らかに急である。

観測値と計算値の不一致の原因として考えられるのは、観測値の精度の不足、理論値の精度の不足、そして「応力磁気効果が原因である」とする仮説の間違いのいずれかであろう。Okubo et al. の計算において、より精密化することが望まれる点のひとつは、応力場および電磁場の時間変化の考慮である。彼らの計算では、静的なものに基づいた公式 Utsugi et al. [2000] の結果が利用されている。これは、時刻  $t$  の磁場は、 $t$  における断層の食い違い変位をもとにして静的弾性場を計算し、そこから生じる静的磁場変化を計算している、ということに相当する。そのため、弾性波と電磁場はどちらも静的なものとして扱われている。

筆者は電磁場の時間変化を部分的に考慮した場合に結果がどのように変わるかに注目した。大気を絶縁体、大地を有限電気伝導度  $\sigma$  をもつ半無限一様媒質とした場合について、式 (2) の変位電流項 (第二項) を無視したものを解くことでその性質を調べた。

解の具体的な形 [2014 年連合大会で発表予定] をここに示すことは省略するが、それが次の性質をもつことを指摘しておきたい。オームの法則を仮定し、さらに変位電流項を無視した式 (2) は、磁場に関する拡散方程式となる。よって、地中で発生した磁化の時間変化は、あるローパスフィルタを通された形で地上での磁場変化をつくる。そしてこのフィルタを表現する伝達関数は、特徴的な時間として  $t_{\text{prop}} = \mu_0 \sigma R^2 / 4$  ( $R$ : 震源—観測点間距離) をもつ。たとえば大地の比抵抗を  $100 \Omega\text{m}^{-1}$ 、震源—観測点間の距離を  $30 \text{ km}$  とすると、この時間は約  $2$  秒となる。

Okubo et al. [2011] による計算で用いられている震源時間関数に適切なローパスフィルターをかけ、そこに  $1$  秒程度の遅れをとみなわせたら、観測値により近いものが得られる。もちろん、この計算は非常に大雑把なものではあるが、電磁場の時間変化をより正しく扱うことで観測値と計算値が接近したという事実は、Okubo et al. の報告した地震時磁場変動が、彼らの指摘通り応力磁気効果起源であるとする仮説に対して肯定的である。

### 3. 観測値と計算値の比較の意義

ほとんどの地球物理観測においても同様だが、計算結果が厳密に観測値と一致することは、観測誤差

がゼロであったとしても一般には期待できない。計算結果には、大なり小なり無視された不確定要素の影響が含まれるからである。応力磁気効果の計算の場合、初期磁化の構造は一般には不明である。それを地上での磁気測定の結果から推定したとしても、一意に決まることはない。そして、この非一意性は、応力磁気効果の計算結果に対して、きわめて特殊な場合を除いて、やはりひきつがれる [Yamazaki, 2009, 2011]。

それでも計算を行うのは、「パラメータの修正などの精密化によって観測値と計算値は一致しうるか、それとも現実的なパラメータの範囲では決して一致しえないか」を確認するためである。「一致しうる」という結果が得られたのなら、十分肯定的な結果だと考えてよい。さらに、今回は肯定的な結果を得たのだが、「決して一致しえない」ことが確かめられたとすれば、それは仮定した理論が説明しえないことの強い証拠となる。もしもそうやって既知のすべてのメカニズムが否定されたなら、そこには未知のメカニズムが隠れていることが確実に言えるのだから、意義は大きい。

ところで、観測される地震時電磁場変動の原因を明らかにすること、あるいは少なくとも候補を絞り込むことには、単に現象の成因を知るという好奇心を充足するだけではなく、より広い意味がある。筆者の考える主要な意義を二つ、以下に述べたい。

第一の意義は、メカニズムの解明によって、電磁場の **Earthquake Early Warning (EEW) system** への応用可能性が評価できる、ということである。

力学—電磁変換メカニズムの存在がいろいろあることが知られており、かつ地震波よりも電磁波よりも速いという事実から、電磁場変動の観測が **EEW** に利用しうることは、メカニズムを同定するまでもなく自明であると思われるかもしれない。確かに定性的には存在することは、力学作用—電流・磁化変化の変換を記述する構成法則が正しいとすればほぼ自明なのだが、先述のように、定量的にどれだけの大きさかということ自明ではない。さらに後述するように、実験室で得られる応力磁化係数をフィールドに延長できるかという問題が残っており [たとえば Sasai (1991); Nishida et al. (2004)], 観測値との比較によってはじめてその定量的性質は明らかになる。

また、電磁的な地震発生シグナルが **EEW** に有用であることは、「現実にそれが観測されているのだから自明なことだ」と思われるかもしれないが、そうではないことをあわせて指摘しておきたい。メカニズムがわからない段階では、それがきわめて特殊な条件でのみ発生しうる事象だという可能性があるし、またその特殊な条件がいかなるものかも全くわからない。つまり、メカニズムがわからなければ、その応用可能性は不明であるし評価する方法もない。一方で、ある特定のメカニズム、たとえば応力磁気効果が原因であることが確からしいとわかったならば、それがどこで期待されるかはある程度予想できる。応力磁気効果の場合ならば、それが初期磁化強度に比例することがわかっているのだから、磁化がある程度強い場所においては地震時磁場変動の検出が期待できる、ということがわかる。これには大きな意味がある。

第二の意義は、メカニズムの解明により、制御実験が困難な物理現象の支配法則に対して自然現象の観測から拘束が与えられるかもしれない、という点にある。

応力磁気効果の問題の場合、計算の基礎となる構成法則は、より基礎となる別の理論から一意に導かれたものではなく、多くの実験結果がその正しさの根拠となっている。ところが、応力磁気効果についての実験の大部分は、試料に応力を加えてから十分な時間が経過したのちの平衡状態を対象としたものである。時間変化を含んだ形で応力磁気効果についての実験を行うことは難しそうである。したがって

構成法則も、時間をあらわには含まない平衡状態を対象としたものとみるべきである。ところが、地震発生後の応力場は、あきらかに急激な時間変化を含む動的なものである。静的な現象について得られた法則が動的な現象に拡張できることは自明とは程遠く、一般には正しくない。にもかかわらず、平衡状態に対する応力磁気効果の構成法則が観測された地震時磁場変動を説明しうるのだとすれば、それはこの構成法則が動的な場合にもあてはまること、つまり、応力変化を受けた場合の磁性体の平衡状態への緩和時間がきわめて短いことを示唆する。

#### 4. 展望

一般に、実際に発生している地学現象と、それを記述すると考えられる理論の根拠を与える実験の間には、時間や空間のスケールに大きな開きがある。前節の最後では、実験可能な時間スケールで得られた構成法則がより短い時間スケールに外挿できるか否かを判別するうえで、地震時磁場変動の観測値と理論値の比較が有用でありうることを述べたが、同様のことは空間スケールの問題についてもいえる。再び応力磁気効果を考えると、実験室で得られる応力磁化係数  $\beta$  の値と実際の地殻における  $\beta$  の値は桁が異なるのではないかという指摘がある [大志万ほか, 1991; Zhan, 1989, Nishida et al., 2004]。この指摘の根拠は、種々の状況で観測される磁場変動の大きさは、実験で得られた  $\beta$  よりも大きな値を仮定しないと説明できない、という事実にある。ここにも、観測値と計算値の比較が、計算の基礎となる理論自体を推定する根拠として用いるという例を見ることができる。磁性以外でも、岩石摩擦に関する室内実験結果から推定された速度状態依存摩擦構成法則（たとえば Ruina [1982]）が現実の地震活動をある程度再現することなどは、観測事実が構成法則の妥当性を示唆している例といえるだろう。

観測値と計算値の比較によって背景にある理論の妥当性を調べるというアプローチは、言い換えれば、「地球を使って物理を研究する」というアプローチである。これは、「物理を利用して地球を調べる」という通常の地球物理の流れとは逆である。だがこれは、既存の物理理論、特に物性理論が到達しえない理論の枠組みを発見する可能性を秘めているのではないかと筆者は考えている。実際に（正直に言うと筆者は詳しくは知らないのだが）「地球」を「宇宙」に置き換えたものはすでに実践されているという。

なお、観測値と計算値の比較によって理論あるいは物性定数を推定しようとする際にボトルネックとなるのは、計算技術よりもむしろ良質な観測値の取得とその処理である。応力磁気効果については、ダム貯水による応力変化を利用する方法 [たとえば Zhan, 1989; 大志万ほか, 1991; 坂中ほか, 1999] や、プレート運動にともなう地殻応力の蓄積過程を利用する方法 [Nishida et al. 2004]、あるいは地震発生時の地磁気変化を利用する方法 [Utada et al., 2011; Yamazaki, 2013] による応力磁化係数の推定が試みられている。しかしいずれの場合にも、観測される磁場変動から応力変化に起因する成分だけを取り出すところにも難しさがある。さらに、観測自体が大変な労力を伴うことが必要であるのはもちろんである。とはいえ、観測の重要性はいまさら改めて指摘するまでもないことであり、すでに先人が多大な労力をはらっている。この上さらに作業を増やすことは現実的ではないと思われる。この分野に本質的な貢献をする可能性は、観測とその維持にかかる労力を軽減し、高密度・長期間の安定した観測を容易ならしめる安価かつ小型の観測機器の開発にこそあるのではないかと、遅まきながら最近筆者も考えている。

## 引用文献

- Eleman, F. (1965), The response of magnetic instrument to earthquake waves, *J. Geomag. Geoelectr.*, **18**, 43–72.
- Honkura, Y., Y. Ogawa, M. Matsushima, S. Nagaoka, N. Ujihara and T. Yamawaki (2009), A model for observed circular polarized electric fields coincident with the passage of large seismic waves, *J. geophys. Res.*, **114**, B10103.
- Matsushima, M., Y. Honkura, N. Oshiman, Ş. Barış, M. K. Tunçer, S. B. Tank, C. Çelik, F. Takahashi, M. Nakanishi, R. Yoshimura, R. Pektaş, T. Komut, E. Tolak, A. Ito, Y. Iio and A. M. Işıkara (2002), Seismoelectromagnetic effect associated with the Izmit earthquake and its aftershocks, *Bull. seism. Soc. Am.*, **92**, 350–360.
- Nagata, T. (1970), Basic magnetic properties of rocks under mechanical stresses, *Tectonophysics*, **9**, 167–195.
- Nishida, Y., Y. Sugisaki, K. Takahashi, M. Utsugi and H. Oshima (2004), Tectonomagnetic study in the eastern part of Hokkaido, NE Japan: Discrepancy between observed and calculated results, *Earth Planets Space*, **56**, 1049–1058.
- Okubo, K., N. Takeuchi, M. Utsugi, K. Yumoto and Y. Sasai (2011), Direct magnetic signals from earthquake rupturing: Iwate-Miyagi earthquake of M 7.2, Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **305**, 65–72.
- 坂中伸也・住友則彦・大志万直人(1999), 『喜撰山ダムにおけるダム磁気効果検出の試み』, 1999年CA研究会論文集, 143–150.
- 大志万直人・笹井洋一・宮腰潤一郎・西田良平・塩崎一郎 (1991), 『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)-』, 1991年CA研究会論文集, 137–148.
- Ruina, A. (1982), Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, **88**, 10359–10370.
- Sasai, Y. (1991), Tectonomagnetic modeling on the basis of the linear piezomagnetic effect. 東京大学地震研究所彙報, **66**, 587–722.
- Stacey, F. D. (1964), The seismomagnetic effect, *Pure Appl. Geophys.*, **58**, 5–22.
- Yamazaki, K. (2009), Calculation of the piezomagnetic field arising from uniform regional stress in inhomogeneously magnetized crust. *Earth Planets Space*, **61**, 1163–1168.
- Yamazaki, K. (2011), Calculation of the piezomagnetic field arising from uniform regional stress in inhomogeneously magnetized crust (II): Limitation in general cases. *Earth Planets Space*, **63**, 1217–1220.
- Yamazaki, K. (2013), Improved models of the piezomagnetic field for the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **363**, 9–15.
- Zhan, Z. (1989), Investigation of tectonomagnetic phenomena in China, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **57**, 11–22.