

有限電気伝導度無限媒質中のダブルカップル震源から生じるピエゾ磁場の時間変化

Piezomagnetic signals arising from a double couple seismic source in a uniform medium with finite conductivity

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, Japan

I investigated a problem whether or not the piezomagnetic effect generates variations in the magnetic field before arrival of seismic waves. A uniform elastic medium with finite electrical conductivity is considered. Double couple moments are assumed as a mechanical source. The solution of governing equations comprising of Maxwell's equations, elasto-dynamic equations, and the linear piezomagnetic constitutive law, is expressed analytically. Using the derived solution, quantitative features of the expected piezomagnetic signals are discussed. When the seismic source time function is given by a step function, considerable amplitudes of signals are expected before arrival of seismic waves. On the other hand, when the source time function is given by Lamp functions, expected amplitudes are quite small. Given that Lamp functions are rather suitable for representing actual seismic source processes, this result indicate that piezomagnetic signals before seismic waves' arrival are difficult to be observed in many cases.

地震が発生すると地震動や応力変化などの力学効果が生じて地中を伝搬するが、地殻における力学効果は同時に電磁気作用も引き起こす。地震動にともなう界面導電現象や応力変化にともなう圧電気・圧磁気効果などがその例である。電磁場変動は、特殊な場合を除いて弾性波よりも速く伝搬するので、定性的には、震源から離れた場所では地震波到達よりも早く電磁場変動が生じるはずである。しかし、有限電気伝導度をもつ固体地球の内部では電磁場は著しく減衰するので、観測可能な大きさの電磁場変動が地震波到達よりも早く観測点で生じるのか否かは明らかではない。そこで次の疑問が生まれる:「地震発生時に、地震波到達の前に観測点に到達する電磁場変動をとらえることはできるのだろうか?」

本研究では、地震発生に伴う力学作用を電磁場に変換するメカニズムとして応力磁気効果(応力変化に伴う岩石磁化の変化)を考えて、有限電気伝導度をもつ無限媒質の内部にダブルカップルモーメントを力源として与えたときに生じる電磁場を評価した。

解くべき方程式は、電磁場の方程式(マクスウェル方程式)、弾性場の方程式、そして、経験的に求められている応力磁気効果の構成関係式(Sasai, 1991)である。無限媒質中のダブルカップルモーメントから生じる弾性波動場についての既知の解を応力磁気効果の構成

関係式と結び付けることにより、考えている無限媒質中での磁化の空間分布およびその時間変化が計算できる。マクスウェル方程式を解くことにより、この磁化分布に対応する電磁場が求められる。特に、震源時間関数（積算すべり量）がデルタ関数またはステップ関数で与えられる場合、積分結果は閉じた形（解析解）で表現される。

解析解に含まれるパラメータの値を適当に指定することで、磁場の時間変化をいくつかの場合について計算した。パラメータは、モーメントテンソル、初期磁化の大きさと方向、弾性乗数または弾性波速度、震源からみた観測点の位置、そして、応力磁化係数（応力変化と磁化変化の間の比例定数）である。震源から観測点までの距離は 25 km に、P 波速度は 5 km/s にそれぞれ固定した。したがって、地震波が観測点に到達するのに要する時間は 5 秒である。応力磁気係数として、多くの場合、岩石実験などから得られる $2 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ 程度の値が仮定されるのだが、実際の地殻の応力磁化係数はこれより 1 桁程度大きい可能性があることも指摘されており（たとえば Nishida et al., 2004）、どの値を用いることが適切かは明らかではない。そこで今回は、各パラメータの値そのものは固定せず、地震発生後十分な時間が経過した後の値（最終値）に対する相対的な大きさのみを議論することとした。地震発生の際の永久変位に対応する応力磁気効果の観測結果（たとえば Johnston et al., 1994）から、最終値はほぼ観測限界と同程度であると見込まれるので、最終値の何倍なのかを調べることは、その磁場変動が検出可能か否かの評価となる。

まず、震源時間関数をステップ関数で与えられる場合（ $t < 0$ でゼロ、 $t \geq 0$ で定数； t は時刻）について、磁場の時間変化を調べた。電気伝導度が 10^{-4} から 10^{-3} S/m 程度と比較的小さい場合には、約 2 秒経過したころ（震源から観測点までの 1/2 程度の距離を地震波が伝わったころ）から最終値よりも大きな磁場変動が生じ、地震波が観測点に到達する直前には最終値の 10 倍程度の磁場変化となることが見積もられた。電気伝導度を 10^{-1} 程度の大きい値にした場合は、地震波到達の直前（約 4 秒経過時）まではほとんど磁場変動は生じないが、それ以降、地震波到達時に近づくにつれて、最終値の数十倍の変化が見積もられた。いずれの場合についても、十分に大きな磁場変化が予想されるといえる。

次に、震源時間関数が 2 つのランプ関数の和で与えられる場合（ $t < 0$ にはゼロ、 $0 \leq t < 10$ 秒には線形に増加、 $t \geq 10$ 秒では定数となる連続関数）について、磁場の時間変化を調べた。震源時間関数がステップ関数で与えられる場合と異なり、地殻の電気伝導度として現実的などんな値を仮定した場合でも、地震波が観測点に到達する前に生じる磁場変動の大きさは最終値と同程度にしかならず、しかも変化が起こり始めるのも遅いことが見積もられた。

現実の地震では、震源過程が一瞬で終わることはなく、すべりには一定の時間を要する。地震の規模として Mw7 程度の場合を想定するならば、震源時間関数をランプ関数の和で与えた後者の計算結果のほうが現実に近いといえる。つまり、最終値を超えるような磁場変動は地震波が観測点に到達する前には生じないことが示唆される。

ただし、今回の計算では、震源の空間的広がりを無視しており、これを考慮することで結果が変わる可能性はある。2008 年岩手宮城内陸地震時に地震波到達よりも早い磁場観測が観測された例（Okubo et al., 2011）では、断層すべりは磁場観測点に向かう方向に進行し

たと推定されている。断層すべりが観測点の方向に向かって進んでくる場合には、むしろ震源時間関数をステップ関数で与えるほうがよい近似となりうるかもしれない。検出可能性を正しく評価するためには、すべりの空間分布を考慮することが必要である。

解析解の導出に必要な不定積分を求める際には、Wolfram Mathematica ONLINE INTEGRATOR (<http://integrals.wolfram.com/>; 2015年1月31日に確認)を利用した。本研究はJSPS 科研費 26800233 の助成を受けて実施した。

引用文献

- Johnston, M.J.S., R.J. Mueller, and Y. Sasai (1994): Magnetic Field Observations in the Near-Field the 28 June 1992 Mw 7.3 Landers, California, Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**, 792–798.
- 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 M7.2, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **305**, 65–72.
- Sasai, Y. (1991): Tectonomagnetic modeling on the basis of the linear piezomagnetic effect. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **66**, 585–722.