

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 4 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740304

研究課題名(和文) 既知のメカニズムから予測される地震波伝搬時磁場変動と実際の磁場変動の比較

研究課題名(英文) Comparison between observed and predicted EM signals during seismic wave propagations

研究代表者

山崎 健一 (Yamazaki, Ken'ichi)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：20436588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：地震波の伝搬と同時に電磁場の変動が観測されることがある。この研究では、震源からある程度離れた場所での現象に焦点を絞って、既知の物性理論から予測される地震時電磁場変動を計算し、それを観測事実と比べることにより、仮定した既知の理論だけで観測事実を説明しうるのかを明らかにすることを試みた。その結果、既知の理論だけでは説明できない変動が含まれていることが確認された。このことは、地震動を電磁場変動に変換する未知のメカニズムがまだ存在することを示唆している。

研究成果の概要(英文)：Electromagnetic (EM) variations simultaneous to seismic wave propagations have been sometimes reported. In the present study, I have investigated a problem whether known theories of mechano-EM convergences are accountable for observational facts on co-seismic EM variations. The result implies conventional theories cannot account entire amount of EM variations during seismic wave propagations, meaning that there are still hidden mechanism(s) by which seismic phenomena are converted to EM phenomena in the solid Earth.

研究分野：地殻活動電磁気学

キーワード：地磁気 電磁場変動 地震波 電気伝導度

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 地震波の伝搬に同期して磁場データにゆらぎが記録されることが、地磁気観測の初期から多数報告されている。

この現象の存在自体は、定性的には不思議なことではない。なぜなら、大地に働く力学的作用(地震動)を電磁気現象に変換するメカニズムが既に複数知られているからである。まず、大地は有限の電気伝導度を持っており、地震波伝搬時にはそれが地球磁場の中を動くことによって電流が生じる。また、地殻に含まれる鉱物に作用する応力の変化は、磁化の変化(応力磁気効果)や電気双極子の生成(圧電効果)を励起する。さらに、地殻に含まれる流体が固相の中を動く際に、固液境界における電荷の偏りが揺らされることでも電流は生じる(界面導電効果)。したがって、地震波伝搬時磁場変動の存在自体は明らかであった。

(2) ところが、実際に地震波伝搬に伴って生じている磁場変動の大きさが既知のメカニズムで完全に説明できるのかが、定量的に確かめられているわけではなかった。実際の地殻の物性を考慮した時に、既知のメカニズムを通じて地震波がどのような電磁場変動に変換されるのかの正確な計算は断片的にしが行われておらず、網羅されているわけではないので、定量的な説明可能性は依然不確定であった。

(3) 研究代表者は、本研究に先行する研究において、応力磁気効果によって生成される磁場をきわめて簡単な場合について計算することを試みていた(Yamazaki, 2011a)。ここでは、表面波(レイリー波)によって励起される電磁場変動の厳密な表現式を求め、これによって観測値との若干の比較を行っていた。他のメカニズム、およびより複雑な物性値を与えることで、「観測値が説明できるのか」という問題に対する答えが得られると期待される状況にあった。

## 2. 研究の目的

(1) 「既知の理論(電磁誘導・界面導電効果・応力磁気効果)は地震時磁場変動を定量的に説明できるか」という問いに答えることが本研究の目的である。

(2) 既知の理論と観測事実の比較は、観測される現象に理論による説明を試みるという単純な好奇心だけにとどくものではない。この問題の答えによって、地震「時」の電磁場変動よりも興味深い地震「前」の電磁気現象を考察する上での拘束条件を得ることが副次的な結果として期待される。

地震に先行する電磁気現象は多く報告されているものの、信頼度についての議論が常につきまとい、事実の有無すら明らかではない。そこに内在する問題は、「メカニズムが

絞り込めないから多方面からの検証ができない」、そして「検証ができず信頼できる事象が限定できないから候補となるメカニズムが絞り込めない」という負の循環である。これを打破する方法は、「地震に先行する現象」という考えを一旦離れて、様々な力学作用に対する地殻の電磁気応答を実験的に求める以外にないと思われる。こうしたアプローチは過去に複数試みられている。しかし、先行研究はすべて室内実験であり、地殻の空間スケールで生じる現象を網羅できるとは限らない。

(3) もし「地震時の磁場変動は既知の理論では説明できない」という答えが得られたならば、力学作用を磁場変動に変換する未知のメカニズムが地殻に存在することが示唆されるとともに、この未知のメカニズムの発現条件(例えば諸々の地殻物性に対する依存性)についての情報が得られると期待できる。逆に、もし「地震時の磁場変動は既知の理論で説明できる」という答えが得られたならば、地殻から生じる電磁気現象の発現メカニズムは、少なくとも地震波伝搬時のものに関しては既知のメカニズムで尽くされていることになる。これらの知見は、地震「前」の電磁場変動を生成しうるメカニズムを考察する際に強力な制約条件を与えることになる。と期待できる。

## 3. 研究の方法

(1) まず、もっとも単純な場合として、有限一様電気伝導度をもつ大地と絶縁体の大気という二層からなるモデルを考えた。既知の変換メカニズムのそれぞれ(電磁誘導、界面導電現象、応力磁気効果)を仮定することで、地震学で知られている弾性波動場は電流・磁化の時間変化の空間パターンに置き換えることができるので、対応する電磁場変動を、マクスウェル方程式の解として求めることができる。

弾性波動場として、二次元的なもののみを考えることにした。これによって、扱える対象は震源からある程度観測点が離れた現象に限定されてしまうが、厳密解を得ることが可能となるため、議論が容易になる、という利点がある。

解の導出は手計算によって行った。解の正しさは、いくつかの極限においてより単純な問題に帰着させて確認した。

(2) 次に、水平方向にも構造境界がある場合について、同様にマクスウェル方程式を解くことで弾性波の入射によって励起される電磁場変動の表現式を求めた。

ここでは、特に簡単なものとして、電気伝導度が不連続に変化するふたつの領域が鉛直面を境にして接している場合のみを考えた。現実の固体地球の電気伝導度は、水平方向にも複雑に変化するが、もっとも単純かつ

極端な場合を考察することで、定性的な特徴を抽出することが可能だと期待されるからである。

水平不均質を持つ場合は、一般には電磁場変動を閉じた形で表現できない。そこで、数値積分を含む形で表現することとした。

(3) 以上1、2の計算は周波数領域において行うが、フーリエ変換可能なものについては、さらに時間領域に変換することとした。これによって、時間領域で得られる観測値との直接比較が可能となるとともに、「地震波よりも先に到達する電磁場変動はあるか」というより発展的な問題への答えも得られる可能性があるからである。

(4) 得られた電磁場変動の表現式に、実際のパラメータ（電磁気物性として電気伝導度など、弾性パラメータとして地震動の振幅など）を当てはめることで、既知の理論が予測する電磁場変動の理論値を計算する。これにもとづきさまざまな観測事実が説明できるかを判別する。

#### 4. 研究成果

(1) 電気伝導度が水平成層構造をもつ場合について、地震波が入射したときに電磁誘導によって励起される電磁場変動の表現式を導出することができた。

重要な特徴のひとつとして、地震波の横波のうちSV波のみが電磁誘導効果を介した電磁場変動の生成に寄与し、SH波は寄与しない、という知見が得られた。このことは観測される地磁気変動がどのメカニズムで生成されたかを判断するうえで決定的なものである。なぜならば、この結果の一方で、電磁誘導ではなく界面導電現象が生成メカニズムである場合には、層構造地殻ではSV波ではなくSH波だけが電磁場変動生成に寄与する、という結果（例えばHaartsen and Pride, 1997）が知られているからである。

また、大地の電気伝導度が浅部と深部で異なる場合についての数値例から、地震動に励起される電磁場変動の振幅は、地下のもっとも電気伝導度の高い層の電気伝導度によってほぼ決定されることが確認された。現段階においては観測精度の限界から地震波伝搬時の電磁場変動を観測すること自体が一般には難しいが、将来多くの観測例が得られるようになれば、地震波と電磁場変動の同時観測によって地下の電気伝導度構造を推定することが可能になるかもしれない。

また、位相もある狭い範囲に限定されることが示された。

(2) 水平方向に構造境界を持つ場合についての計算からも、いくつかの結果を得た。研究代表者がすでに得ていた応力磁気効果から生じる磁場変動の定性的な特徴（Yamazaki, 2011b）、および同時期に他の研究者によって

発表された界面導電現象から生じる電磁場変動の定性的特徴（Gersheozon et al., 2014）を合わせて考察することで、構造境界は振幅や位相等に大きく影響を与えることが明らかになった。

(3) 電気伝導度が特に単純な場合、すなわち絶縁大気と有限電気伝導度をもつ大地の2層からなる場合については、適当な複素積分経路を選択することによって、電磁場の表現式をフーリエ変換すること、すなわち時間領域での解を得ることができた。

時間領域での解を得たことにより、「地震波よりも早く到達する電磁場変動はあるか？」などの問いに正確に答えるための道筋が生まれた。

ここで導いた積分結果は、本研究が対象とした二次元問題だけではなく、三次元の問題へも適用可能であるため、より現実的であり実際の状況にも近い点震源モデルなどへも応用することができる。

(4) 理論値と観測値との比較では、いくつかの観測例は仮定した理論で説明されたが、他のいくつかについては仮定した理論では説明できない、という結果が導かれた。たとえば、地震波の到来方向にかかわらず複数の観測点で同一方向（たとえば南北）のみの磁場変動が生じる場合があるのだが、電気伝導度などの物性に著しく作動的な構造を仮定しない限り、今回仮定したメカニズムにおいてはこのような異方性があらわれることはない。また、観測される電磁場変動の振幅も、理論が予測する値は多くの場合に観測値よりも小さい。先行研究では、電気伝導度が大きければ誘導される電流が大きく、したがって生じる電磁場変動も大きくなるであろう、と考えられている場合があるのだが、電気伝導度の影響を正しく考慮した本研究の結果により、電気伝導度を大きくすることは誘導電流を大きくすると同時に遮蔽効果も大きくするため、実際にはさほど大きな誘導場が生じないことが確かめられた。

(5) 理論が観測を説明しないという結果について、2つの解釈がありうる。

ひとつは、報告されている内容が事実と異なるという可能性である。地震波伝搬と同時に生じる地磁気変化をとらえることは、一般には難しい。地震動の到達と同時に、計測機器の方位も動く。これによって、計測機器は見かけの変動を記録してしまう。この見かけの電磁場変動は、近傍の地震計や傾斜計などを用いることである程度は補正できるのだが、補正がどの程度正確に行われているかを評価することは難しく、そのため電磁場変動が真に存在するものかを同定するのは容易ではない。

もうひとつの可能性は、未知のメカニズムが隠されている可能性である。前述の通り、

もしも観測された地震時電磁場変動が真の変動ならば、既知の理論がそれを説明しないという事実は、仮定したものの以外に別のメカニズムが存在することを意味する。たとえば、南北方向に偏った電磁場変動が説明できないという事実は、この未知のメカニズムが、方位依存性をもつ物性に依存したもので、たとえば岩石の磁化構造に依存したものである可能性を示唆している。

今後の方針として、観測の精密化以外に、研究の対象を地震波到達前に限定する、というものが考えられる。地震波到達前の場合、信号は小さいので観測はより難しい。また、遠地を対象とする本研究の結果よりも難しい。とはいえ、観測例はいくつかある(たとえば Okubo et al., 2011)。だが、地震動による電気場計測への影響という観測上の最大の障害は考える必要がなくなる。また、本研究の中で得られた時間領域解は、この場合にも応用することが可能である。

本研究代表者は、この地震発生前の変動を解明するための研究に着手している。現在は、特に応力磁気効果に焦点を絞って理論計算の精密化に取り組んでいる。一方、観測の精密化に関しては多くの研究者によって現在実施されつつある。これらの統合によって、メカニズムの同定がなされることが期待できる。

#### <引用文献>

K. Yamazaki (2011a), Piezomagnetic fields arising from the propagation of teleseismic waves in magnetized crust with finite conductivity, *Geophysical Journal International*, vol. 184, pp. 626-628.

M. W. Haartsen and S. R. Pride (1997), Electrostatic waves from point sources in layered media, *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, vol. 102, pp. 24745-24769.

K. Yamazaki (2011b), Enhancement of co-seismic piezomagnetic signals near the edges of magnetization anomalies in the Earth's crust, *Earth Planets Space*, vol. 63, pp. 111-118.

Naum I. Gershenzon, Gust Bambakidis and Igor Ternovskiv (2014), Co-seismic electromagnetic field due to the electrokinetic effect, *Geophysics*, vol. 79, pp. E217-E229.

K. Okubo, 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 and Planetary*

*Science Letters*, vol. 305, pp. 65-72.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

山崎健一, 地震時電磁場変動の観測値と計算比較、およびその結果の意味, 2014年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, pp. 38-43, 2014, 査読無. URL: [http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/CA/2014/Yamazaki\\_CA2014.pdf](http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/CA/2014/Yamazaki_CA2014.pdf)

K. Yamazaki, Modeling of the Piezomagnetic Field for the 2011 Tohoku-oki Earthquake (Mw 9.0) in Japan, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 363, pp. 9-15, 2013, 査読有. DOI: 10.1016/j.epsl.2012.12.019

K. Yamazaki, Estimation of temporal variations in the magnetic field arising from the motional induction that accompanies seismic waves at a large distance from the epicenter, *Geophysical Journal International*, vol. 190, pp. 1393-1403, 2012, 査読有. DOI:10.1111/j.1365-246X.2012.05586.x

[学会発表](計 4件)

K. Yamazaki, Estimation of Electro-Magnetic Signals Generated by Stress Changes before the Arrival of Seismic Waves, American Geophysical Union's 47th annual Fall Meeting, 2014年12月15 - 19日, サンフランシスコ(アメリカ合衆国)

K. Yamazaki, Feasibility of Detecting Earthquake Occurrences before Quakes at the Site in terms of the Piezomagnetic Effect, American Geophysical Union's 46th annual Fall Meeting, 2013年12月9 - 13日, サンフランシスコ(アメリカ合衆国)

山崎健一, 地震発生直後に応力磁気効果により生じる磁場変化について - 二次元問題の計算例 -, 地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月19 - 24日, 千葉県千葉市

K. Yamazaki, Modeling of the Piezomagnetic Field for the 2011 Tohoku-oki Earthquake (Mw 9.0) in Japan, American Geophysical Union's 45th annual Fall Meeting, 3-7 December 2012年12月3 - 7日, サンフランシスコ(アメリカ合衆国).

[図書](計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

なし

6．研究組織

(1)研究代表者

山崎 健一（YAMAZAKI, Ken'ichi）

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：20436588

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし