

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800233

研究課題名(和文)地震時地磁気変動の解明を目指した応力磁気効果動的問題の定式化

研究課題名(英文) Determination of the electromagnetic field arising from time-dependent piezomagnetic effect during ruptures

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) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：地震波が地表に届く前に地磁気に変化が生じることがこれまでに報告されていた。この現象が、応力磁気効果(力が作用した時に岩石中に含まれる磁石の性質が変化する現象)によって説明できるのかを確かめるための研究を行った。

その成果として、理論値を計算するための表現式の導出に成功した。この表現式にさまざまな数値を当てはめて計算した結果、応力磁気効果ではこれまでに報告されている現象は十分には説明できないこと、すなわち、未知の現象が含まれている可能性が高いことが明らかになった。同時に、地震波に先行する電磁場変動を多くの地震について観測するためには、観測技術をさらに向上させる必要があることも示唆された。

研究成果の概要(英文)：There are several reports on electromagnetic (EM) signals that are observed a few seconds prior to arrival of seismic waves. A candidate mechanism that generates such EM signals is the piezomagnetic effect, that is, changes in magnetization corresponding to changes in applied stress. The objective of this project is to derive a set of equations that describes EM signals from the piezomagnetic effect, and to answer whether the piezomagnetic effect accounts the earlier reports or not. I successfully derived the desired equations. Numerical considerations using the obtained equations suggest that EM variations from the piezomagnetic effect during ruptures are not large enough to be observed by using the present technique of observation. This means that EM signals prior to seismic waves should be accounted by other mechanisms.

研究分野：地球電磁気学

キーワード：電磁場変動 地震 弾性波動場 応力磁気効果 電気伝導度 観測可能性 早期地震警報 時間領域

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震波の伝搬に同期して電場や磁場の時系列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多数存在するからである。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(電磁誘導効果)。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る。

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か行われておらず、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。

(2) 研究代表者は、本課題に先行する一連の研究において、地震波が平面波と近似できる程度に震源から離れた場面に焦点を絞り、各メカニズムから生じる磁場変動の理論値と観測値と比較することで既知のメカニズムが観測値を正しく説明するのかを明らかにすべく研究を進めてきた。地震波を平面波として扱える場合は問題は著しく簡単になり、厳密解の導出が可能となる。また、物性不均質がある場合の扱いも比較的容易である。実際に応募者は解を求めることに成功した(Yamazaki 2011a, b, 2012)。

しかし、観測値との比較に関しては、確定的な結論を出すには至らなかった。地震波が平面と近似できる点とは、すなわち震源からの距離が十分大きいということであり、地震波は小さく、したがって対応する磁場変化も小さい。地震動と同時に生じる磁場変化観測値には、地震動によるセンサーの揺れの効果が含まれてしまうため、観測精度自体が低い。もちろんこれは研究開始時点から想定されていたのだが、導出された理論値が観測値と同程度になったため、結論を出すうえで誤差が本質的に影響することが改めて明らかとなってしまうのである。

(3) 観測値にふくまれる揺れの影響の除去、という問題を解決する方法として、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。上記2は地震波伝搬と同時に観測される磁場変動を対象とするものだが、近年は、地震波よりも先に磁場変動が記録されることも報告されている(Okubo et al., 2011)。この報告は震源から30km程度と比較的近い観測点における結果であるので、解析的扱いが容易な平面波近似は妥当ではない。そのために各種理論値の導出は複雑になる。しかし、地震波到達に先行するということは、地震動による見かけの変動である、という可能性が排除されるため、観測値と理論値との比較という点からは有利である。

(4) 研究代表者は、この現象が応力磁気効果に起因するものであるという仮説を立てて、これを検証するための理論解の導出と、観測値との比較を実施することにした。

地震波到達に先行する磁場変動が応力磁気効果起源であるという仮説は、もともとは研究代表者の発案ではなく、Okubo et al. が観測値を報告する論文中で述べている。しかしそこで実施されている計算は、大地の電気伝導度を無視している点、弾性波速度を無限としている点など、現実を正しく反映しない可能性のある仮定に基づいていた。本研究はこれをより正確に扱うものである。

2. 研究の目的

(1) 本研究では二つの到達目標を設定した。ひとつは、応力地磁気効果によって、点震源から広がる弾性波動場に対応してどのような磁場変化が生じるのかを記述する表現式を時間領域で求めることである。もうひとつは、得られる表現式を用いて、これまでに報告されている地震発生時地磁気変化が応力磁気効果によって説明されるのか、それとも他のメカニズムを考えなければ説明できないのかを明らかにすることである。

(2) これらの目標が達せられると、「地震波が地上に到達するよりも早く磁場変化が地上に到達しうるだろうか?それは観測可能な大きさだろうか?」という応用上興味深い問題への答えが得られると期待できる。

現在実用化されている早期地震警報(日本における緊急地震速報)は、地震観測をもとに発せられる。そしてこの方法による警報の早さには、弾性波速度という原理的境界が存在する。もしも、弾性波よりもはるかに速い光の速さで伝搬する磁場変動をとらえて地震発生を検知することができるならば、警報発信時刻を大きく早めることが原理的には可能となる。

もしも応力磁気効果がつくる磁場変化がこれまでに報告されている地震発生時地磁気変化の主要因であることが明らかになれば、地震波に先行する磁場変化をとらえるためにどこに磁力計を置けばよいのか、が決定

できる。たとえば、先行研究(例えば Oshiman 1990, Yamazaki 2011b)によって、磁化境界付近では応力磁気効果が作用しやすいことがわかっている。これらの位置に地磁気連続観測点を置くことが、実用上有用であるとわかる。これが本研究のひとつ目的である。

(3) もうひとつの期待される波及効果は、「地殻の力学現象と電磁気現象の関連性」という基礎科学的問題への理解を進展させ、圧倒的な難問である「電磁気的地震先行現象の有無」についてのヒントを得ることである。

地震に電磁気現象が先行することについての報告は多いが、地震は低頻度現象であり、信頼度の向上は容易ではない。そのため現象の把握自体が難しく、当然、生成メカニズムもわかっていない。そこで考え得る方針のひとつが、「地震直前に何かあるなら、同じメカニズムが震源過程進行中にも働いているはず。ならば、時間軸上でどこにあるのが明確な地震時の現象を調べる方が有効だろう。既知のメカニズムをひとつずつ調べていき、消去法で残るものが何かを探そう」というものである。この方針の中では本研究は、消去法の不可欠な段階のひとつと位置付けられる。

もしも地震時磁場変動が既知の理論ですべて説明されるならば、地震直前の現象についても既知の理論は有効である可能性が高まり、地震直前の現象の予測・理解には既知の理論を深めることが重要だと示唆される。逆に既知の理論で説明できないならば、未知の力学 電磁気変換メカニズムの存在が明らかになるとともに、どの点(例:どんな場所で?どの周波数帯で?)が説明できないかを整理すれば、その未知メカニズムを探るヒントが得られるはずである。いずれの場合も、地震直前電磁場変動解明のために今後なすべき実験・観測に対する指針が得られると期待できる。これが本研究を実施するもうひとつの意図である。

3. 研究の方法

(1) 本研究の方針は、まず応力磁気効果によって地震発生時に生じる電磁場変動の時間変化を記述する表現式の導出を導出し、これに現実の地震を記述するパラメータを代入して観測値と比較を行う、というものである。

(2) 表現式の導出に関しては、研究計画段階では、「半無限媒質中で時間変化する点磁化がつくる電磁場」の表現式をまず求め、これと「弾性波動場」の畳み込み積分を計算することで、所望の結果、すなわち圧磁気効果によって点震源から生じる電磁場変動の表現式を得るという方針を想定していた。

(3) しかし、本研究開始とほぼ同時に、海外の研究者らにより、類似の問題を異なるアプローチで解いた理論計算結果が報告された(Gao et al., 2014)。彼らの導いた解は、周波数領域での解であること、想定しているメカニズムが応力磁気効果ではなく電磁誘導であること、媒質が無限媒質であること、といった違いがあるが、これを時間領域に変換することができれば、本研究の目的の主要部分が達せられると考えた。

(4) そこで当初の方針を修正して、まず Gao et al. (2014) が導いた圧磁気効果を考えるために必要な修正を施したうえで、応力磁気効果に関する類似の解をもとめることにした。これをフーリエ変換することで、時間領域解を求めることとした。いずれも、応用時の利便性のために可能な限り解析解を求めることとした。

(5) そしてこれとは別に、無限媒質と半無限媒質の場合で得られる解は定量的にどのように異なるのか、あるいは異なるのかを検査することとした。上述の Gao et al. の解は無限媒質を対象としたものであるので、本研究で扱うべき半無限媒質の場合にどのような修正が必要となるのかを明らかにするためである。この議論を、2次元問題についての電磁場伝搬の問題を解析的に解くことによって実施することにした。境界の存在がどのような影響を与えるかを考慮するうえでは、3次元的扱いが必要な点震源よりも簡単に扱える2次元問題を解くことで十分である、ということからこの方針を決めた。

(6) こうして得られた表現式とその限界を踏まえたうえで、いくつかの地震の震源過程に対応する磁場変化の理論値を計算し、これを磁場変化観測値と比較することで、観測される磁場変化が応力磁気効果起源か否かを判定する、というのが当初方針であった。

ただしこの比較は、後述のように個別には実施しなかった。

4. 研究成果

(1) まず無限媒質中でのダブルカップル震源から応力磁気効果によって生じる電磁場変動を記述する表現式導いた。まず、地震学で知られているダブルカップル震源からの弾性波動場の表現式を出発点として、応力磁気効果によって生成される磁化変化の時間空間分布の表現式を導いた。そのうえで、これを source term とする電磁場の支配方程式を、媒質が有限電気伝導度をもち、かつオームの法則にしたがう場合について解いた。これによって、所望の表現式を得た。

なお、得られた表現式自体は応力磁気効果を記述とするものだが、その導出の鍵となる

微分方程式の解は、地震動と電磁場生成を説明しうる異なるメカニズム、例えば動的電磁誘導や流導電位から生じる電磁場変動を記述する表現式を導く場合にも利用できるものである。

得られた表現式の形から直ちに、大地の電気伝導度が生じる電磁場変動の大きさ・あらわれ方に大きく影響することが明らかになった。特に、大きな電磁場変動が地震波到達前に生じるためには、大地が比較的低い電気伝導度 ($<1000 \text{ S/m}$) を持つ必要があることが確かめられた。

(2) 次にこの表現式を用いて、現実地震に先行して観測される地磁気変動が応力磁気効果起源でありうるのかを定量的に議論した。上記1の表現式は震源の空間的広がりが無視できる場合について求めたものである。現実的な有限サイズを持つ震源の場合の電磁場変動は、実際の震源過程に対応させて時間・空間的に積分することで得られる。そこで具体的な震源過程に対するものを計算するのに先立って、破壊(すべり)が直線上を観測点に向かって、あるいは観測点から離れて行く、という単純化した震源過程に対して数値計算を行った。

得られた結果からは、M7クラスの地震の場合であり、かつ地震波伝搬方向の影響を受けてもっとも電磁場変動が大きくなると期待される位置であっても、地震波到達前に生じる磁場変動の大きさは、せいぜい観測限界と同程度(高々0.1-0.2nT程度)にすぎないことが示された。地震の規模がこれよりも大きくなっても、地震波が観測点に到達するまでの破壊の初期段階に解放される弾性エネルギーは著しく大きくなるわけではないので、この結論はより大きな地震についてもあてはまる。すなわち、地震波到達前に十分大きな変動があるならば、それは応力磁気効果起源として説明するのは難しいことが明らかになった。

以上の結果は、査読付学術雑誌 *Geophys. J. Int.* に発表した。

なお、この結果を踏まえて、研究の方法4に記述した比較は中止した。観測不能なサイズの変動しか理論値として現れ得ないことが具体的に計算するまでもなく明らかになったからである。

(3) これらとあわせて、大地を想定した有限電気伝導度媒質と大気を想定した絶縁体の二層からなる媒質モデルにおいて有限電気伝導度媒質中のパルス状線電流から生じる電磁場がどのように伝わるかを記述する表現式を導いた。周波数領域におけるこの問題の解は容易に導くことができるのだが、本研究ではこれを時間領域に変換するための適切な積分経路を見出し、時間領域における表現式を得ることに成功した。

この結果は、オープンアクセスの査読付学

術雑誌 *Ann. Geophys.* に発表した。

(4) これを、無限媒質中のパルス状線電流から生じる電磁場の表現式と比較することで、無限媒質と半無限媒質でどのような違いがあらわれるのかを議論した。その結果、両者の定量的な違いは確かにあるものの、電磁場の伝搬速度を知る上では、無限媒質を仮定した計算で十分であることが示唆され、したがって、1.2.で得た無限媒質を仮定した解にもとづく議論の結論は、現実の半無限媒質にも大部分があてはまることが推論される。

以上の結果は、2016年春の学会において発表する(山崎、2016)。

(5) 本研究の成果は以上の通りだが、これらを踏まえると、今後この地震時地磁気変動に関して取り組むべき課題についての指針が次のように浮かび上がる。

地震時地磁気変動を説明しうる主要候補だと考えられていた応力磁気効果がつくる磁場変動は実際には非常に小さい($\sim 0.1\text{nT}$)ということが結論されたわけだが、これは分解能のうえでは現在の観測機器でも検出可能な大きさである。問題は、複雑に変動する地磁気観測値の中からこれをどう分離するか、という点である。地磁気の性質を踏まえた時系列解析の技術を進展させることができれば、将来的にこれが検出可能になるかもしれない。

また、観測値を説明する理論を整備するという観点からは、本研究により地震時地磁気変動を応力磁気効果で十分に説明することができないという否定的な結果が導かれたことにより、他のメカニズムを考慮する必要性が生じた。現時点で考え得るメカニズムとして、電磁誘導や界面導電現象などが有力であるので、これらについても理論計算を実施することにより、観測値がどの程度説明できるのかを調べることは、メカニズム解明のための有力なステップである。

<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*, 184, 626-628.

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

K. Yamazaki (2012), 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, 190, 1393-1403.

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, 305, 65-72.

Y. Gao, X. Chen, H. Hu, J. Wen, J. Tang, and G. Fang (2014), Induced electromagnetic field by seismic waves in Earth's magnetic field, Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 119, 5651-5685, doi:10.1002/2014JB010962.

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

K. Yamazaki (2016a), Temporal variations in magnetic signals generated by the piezomagnetic effect for dislocation sources in a uniform medium, Geophysical Journal International, 206(1), 130-141, doi: 10.1093/gji/ggw125 (査読有).

K. Yamazaki (2016b), An analytical expression for early electromagnetic signals generated by impulsive line-currents in conductive Earth crust, with numerical examples, Annals of Geophysics, 59(2), G0212, doi: 10.4401/ag-6867 (査読有).

[学会発表](計 3 件)

山崎健一, 有限伝導度無限媒質中の食い違い震源および波動場から生じるピエゾ磁気効果起源の磁場変動, 地球惑星科学連合2016年大会, 2016年5月22 - 26日, 千葉県千葉市(講演採択済, 講演番号: SEM35-P01)

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, Validity of Using Full Space Approximation in Calculating EM Variations Generated by the Piezomagnetic Effect, Asia Oceania Geosciences Society 11th annual

meeting, 2014年7月28 - 8月1日, 札幌市(日本), 講演番号: SE40-D4-PM1-CA-004.

[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