

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05634

研究課題名（和文）地震動に伴う地磁気・地電位変動の生成メカニズムと検出可能性

研究課題名（英文）Mechanisms and detectability of seismically induced variations in the electromagnetic field

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：地震が起きるとき、地表付近で生じる電磁場の変動がこれまでに観測されている。この現象の生成原因を同定するために必要となる計算方法を確立するとともに、現象の普遍性を確かめるために従来よりも小さな地震に対しても電磁場の変動が見られるのかを確かめるための観測を実施した。その成果として、様々な場面に適用できる計算方法の開発に成功し、また、当初期待したものとは違う形であったが、地震時電磁場変動の新たな事例の観測にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震が起きるとき、地表付近で電磁場の変動がこれまでに観測されている。しかし、この現象がなぜ生じるのか、どんなタイミングでどんな地震に対してどんな場所で生じるのかは明らかではなかった。本研究の成果として、この問題を解明する上での基礎となる計算方法が確立されるとともに、新たな観測によって地震時電磁場変動の事例が積み上げられた。電磁場変動は地震動よりも早く伝搬するという特性があるため、これ等の成果を応用することで、現在実用化されている緊急地震速報をさらに早く出せるようになるかもしれない。

研究成果の概要（英文）：Temporal variations in the electromagnetic (EM) field in association with earthquakes have been observed for several earthquakes. However, their generation mechanisms have not been identified quantitatively although some candidate mechanisms have been proposed. The condition(s) of occurring such phenomena have also poorly been understood. In the present study, we have established a calculation scheme through which we can predict temporal variations in the EM field in association with earthquakes in a variety of situations. Also, we have installed some observation sites at which the EM field are continuously recorded, and successfully catch some EM signals in association with earthquakes, which will be analyzed to reveal underlying mechanisms of the observed phenomena in the near future.

研究分野：地球電磁気学

キーワード：地震 地磁気 地電位 時間変化 電気伝導度 界面導電現象 電磁誘導 地震時電磁場変動

1. 研究開始当初の背景

地震の発生にともなう地磁気・地電位の変動(地震時電磁場変動)は、50年以上前に精密な地球電磁場観測が始まった頃から最近に至るまで多くの観測例がある[例: 1-6]。それらの中には地震波到達よりも前に電場もしくは磁場の変動が観測された事例もあるため[3, 4]、仮にそれが普遍的な現象ならば、電磁場観測を利用することで現在の緊急地震速報を更に高速化できる可能性も考えられる。また、地震時電磁場変動がどのようなメカニズムにより生じるのかということ自体が、現在に至るまで活発な研究対象となっている[最近の例: 7]。

地殻には力学作用を電磁気作用に変換する多くのメカニズムが存在する。例えば、大地は有限の電気伝導度を持つため、それが地球磁場の中を運動することで電流が誘導される(動的電磁誘導)[8]。地殻に含まれる流体が多孔質媒質中を動くことでも電流が生じ、電磁場変動が生成される(界面導電効果)[9, 10]。地殻の岩石がもつ磁化が応力によって変化する効果(応力磁気効果)も電磁場変動の原因となる[11, 12]。これらの存在により、地震時電磁場変動の存在自体は定性的には明らかである。

しかし、実際にどのメカニズムが地震時電磁場変動を作り出すのかは定量的には明らかでなく、地震時電磁場変動があらゆる地震・あらゆる場所において普遍的にみられる現象であるのかもわかってはいない。定量的な検討や普遍性の検証が進まない理由は大きくふたつある。ひとつは、計算方法の問題である。主要なメカニズムの一つである界面導電現象によって生じる地震時電磁場変動の計算手法は確立しており、実際にそれをを用いて観測値との比較が行われているほか、数値例自体を検討することにより、先進波(地震波よりも早く地表に到達する電磁波)が存在することやその性質など、現時点では観測精度の上から部分的にしか捉えられていない現象についても予測がなされている。一方、その他のメカニズムの中で特に重要である動的電磁誘導については、地表の存在しない無限媒質を仮定した場合[13]や地震波が平面波[14]あるいは円筒波[15]の場合など、現実の地殻と比べて大きく単純化された場合についてしかなされていなかった。応力磁気効果など他のメカニズムについても同様である[16]。

研究対象となる観測事例が少ないことも、この問題の研究進展の妨げとなっていた。震源からの距離が大きくなると地震動もそれに伴う地震電磁場変動も小さくなるので、地震電磁場変動の観測研究のためには震源からある程度近い場所で地磁気・地電位の連続記録を得る必要がある。しかし、地球電磁気の連続観測点は地震の観測点と比べるとはるかに少なく、大きな地震時電磁場変動の記録が得られる機会は限られていた。そのため、事例解析に耐える十分なデータは得られていないのが現状であった。

2. 研究の目的

地震電磁場変動研究においてこれまで欠けていた要素を補充する観測、および理論構築(計算技術開発)を行うことにより、「地震電磁場変動の主要な生成メカニズムは何か?」「地震動と同時に、あるいは先行して生じる地震電磁場変動は普遍的な現象か?」という問いに答えることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 理論値算出の基礎となる計算式の導出

地震動と電磁場変動を結びつける重要メカニズムのひとつは界面導電効果であり、これに起因する電磁場変動の計算手法はすでに確立されており、幅広い状況に適用できる。この方法を、動的電磁誘導などにも適用できれば、従来は制限された状況においてしか計算できなかった動的電磁誘導起源の地震時電磁場変動を、幅広い状況に適用できるようになる。そこで、必要な拡張を行うことで計算手法の確立を目指した。

界面導電効果の場合に使える計算法が動的電磁誘導の場合に使えないのは、計算の過程で実行されるハンケル変換の準備として必要な積分の一部が、動的電磁誘導の場合は解析的に得られていないという問題[15]のためであった。これに関連する問題を整理、検討して、必要な計算式を導出し、従来よりも広範囲のメカニズムを組み込んだ地震電磁場変動の理論値(予測値)を算出できる計算コードを作成することとした。

(2) 基礎となる方程式の再検討

従来、地震電磁場変動の原因とされる各メカニズムの寄与は、個別の方程式で議論されてきた。ふたつの主要メカニズムである界面導電現象と動的電磁誘導も、別々の方程式に基づいて別個に計算したうえで議論されてきた[例: 7]。しかし、両者は本来なら同一の方程式系で同時に計算

されるべきであり、そうすることで、これまで知られていなかった結合効果が理論的に予測される可能性もある。

そこで、界面導電効果、動的電磁誘導効果を含め、従来の方程式の導出過程や使用上の問題がないのかを再検討して、既往研究に不適切な点が無いか確認するとともに、より適切な方程式を提示してその方程式に基づく予測を行うこととした。

(3) 地磁気・地電位差連続観測の実施と理論解との比較

地震電磁気変動の事例解析のためには、比較的大きなシグナルが期待できる震源近傍で電磁場観測が行われている必要があるが、既存の観測点だけではそのような機会に恵まれる可能性は低い。大きな地震の余震域、群発地震発生域、あるいは周期的に比較的大きな地震が発生すると期待される場所にあらかじめ観測点を設置する、などの方法をとる必要がある。また、事例解析の際に諸理論の予測値と比較するためには、あらかじめ周辺の地殻物性、特に電磁場変動の大きな影響を与える電気伝導度とその分布が分かっている場所が望ましい。

そこで、豊後水道周辺の構造調査を目的として最近地磁気・地電流法による比抵抗構造推定が行われており、かつ地震活動が活発な南九州日向灘にも近い高知県宿毛市に地磁気・地電位連続観測点を新たに設置し、連続観測を実施することとした。

また、2021年～2022年に、群発地震活動が観測されている能登半島において地磁気・地電流法による構造探査を実施した際、構造探査に用いる時系列に追加して、地震発生時の電磁場変動時系列を可能な限り収録することとした。

4. 研究成果

(1) 動的電磁誘導効果に起因する地震時電磁場変動の計算法の確立と派生的成果

界面導電効果による地震時電磁場変動を計算する方法を動的電磁誘導に適用する際の妨げとなる異方性の問題を解消するため、ベッセル関数のひとつの恒等式を誘導した。この恒等式を用いることで、界面導電効果によって生成される地震時電磁場変動の計算に使用されるハンケル変換に基づく方法を、動的電磁誘導による地震時電磁場変動の計算にも適用可能とした。そしてこの方法を海外の研究者が開発した数値計算コードと結合させることで、従来よりも一般的な状況である層構造媒質中の点震源から放射される球面波に対応して動的電磁誘導効果により励起される電磁場変動を計算できるようになった[17, 18]。

また、このときに導いた式を直接応用することで、地震と磁場変動を結びつけるメカニズムのひとつ、応力磁気効果に関して進展が得られた。応力磁気効果は、岩石の応力変化に伴う磁場の变化である。動的電磁誘導に関連する電磁場変動を計算する際に今回導いた式は、地球磁場の存在に起因する異方性を扱うところに特色があるのだが、応力磁気効果がつくる磁場変動を見積もる際にも同じ異方性の問題が含まれる。そのため、これまで、層構造媒質中の変位源による変位に対応する磁場変動は解析的に閉じた形では得られていなかったが、上記の成果の直接の応用として、今回、半解析解を得ることができた。また、その解を数値的に検討することで、従来の一様媒質を仮定した解がどのように修正されるのかを検討した。そこからは、層構造上の弾性不均質を持つ媒質の場合、変位場と磁場とでは現れ方が違うこと、したがって、地下の力学作用に対して、測地観測とは独立な情報を与えることが示された[19]。

(2) 基礎となる方程式の再検討

本研究の成果として、界面導電効果起源の地震電磁場変動の基礎方程式系に動的電磁誘導の効果を組み込んだ新しい方程式系を導出した[論文投稿準備中]。また、この新しい方程式系を用いて、いくつかの状況において生じる地震時電磁場変動を見積もり、それを従来の方程式系を用いて見積もられた電磁場変動が、すでに十分な精度を持っていることが確認された。これは、新たに導いた方程式系の優位性を主張する結果ではないが、国内外での先行研究によりこれまでに得られている地震時電磁場変動観測例の解釈、あるいは予測の多く[例: 5, 6, 7]が、修正不要であることを再確認したという意味を持つ。

また、当初想定していた界面導電現象、動的電磁誘導の他に、研究実施期間内に海外の研究者により報告された地殻起源の電磁場変動の見積もりについて精査する過程で、圧電効果(圧電鉱物に対する応力変化と電気変位の結合効果)に関して、既往研究の中に基礎方程式の誤った使い方が含まれていることを指摘した。すなわち、圧電効果を記述する方程式には、応力から電場への作用と電場から応力への作用の両方が含まれているが、先行研究の中には、これらを不適切に混同しているために誤った見積もりを行っているものがあることを明らかにした[20]。

(3) 四国西部などへの地磁気・地電位連続観測点の設置・維持

観測開始前から計画していた四国西部の観測点においては、研究実施期間内に近傍で大きな地震は発生しなかったため、期待した地震時電磁場変動の記録はできなかった。しかし、観測点は長期間の観測に耐えられるよう頑強に設置しているため、同地点での観測は研究期間終了後も継続予定であり、今後の地震の発生時に記録が得られると期待される。

一方、観測期間終了間際に実施した能登半島での観測においては、地震発生と同時に地磁気・電位差に変動が観測された。先行研究の事例と比べて、震源に近く、かつ複数の観測点で同時に得られた記録であり、これまで考えられてきたメカニズムが正しいのか、あるいは別のメカニズムが含まれているのか、今後考察を進める予定であり、地震電磁気変動現象の理解につながると期待できる。

引用文献

- [1] Eleman, F. (1965): The response of magnetic instruments to earthquake waves. *J. Geomag. Geoelectr.*, **18**, 43–72.
- [2] Matsushima, M., Honkura, Y., Oshiman, N., Baris, S., Tuncer, M.K., Tank, S.B., Celik, C., Takahashi, F., Nakanishi, M., Yoshimura, R., Pektas, R., Komut, T., Tolak, E., Ito, A., Iio, Y., and Isikara, A.M. (2002): Seismo-electromagnetic effect associated with the Izmit earthquake and its aftershocks. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 350–360.
- [3] Honkura, Y., Matsushima, M., Oshiman, N., Tuncer, M.K., Baris, S., Ito, A., Iio, Y., and Isikara, A.M. (2002): Small electric and magnetic signals observed before the arrival of seismic wave. *Earth Planets Space*, **54**, e9–e12.
- [4] Okubo, K., Takeuchi, N., Utsugi, M., Yumoto, K., and Sasai, Y. (2011): Direct magnetic signals from earthquake rupturing: Iwate-Miyagi earthquake of M 7.2, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **305**, 65–72.
- [5] Gao, Y., Harris, J.M., Wen, J., Huang, Y., Twardzik, C., Chen, X., and Hu, H. (2015): Modeling of the coseismic electromagnetic fields observed during the 2004 Mw 6.0 Parkfield earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 620–627.
- [6] Sun, Y-C., Uyeshima, M., Ren, H., Huang, Q., Aizawa, K., Tsukamoto, K., Kanda, W., Seki, K., Kishita, T., Ohminato, T., Watanabe, A., Ran, J., and Chen, X. (2019): Numerical simulations to explain the coseismic electromagnetic signals: a case study for a M5.4 aftershock of the 2016 Kumamoto earthquake. *Earth Planets Space*, **71**:143
- [7] Gao, Y., Zhao, G., Chong, J., Klemperer, S.L., Han, B., Jiang, F., Wen, J., Chen, X., Zhan, Y., Tang, J., Xiao, Q., and Wang, L. (2020): Coseismic electric and magnetic signals observed during 2017 Jiuzhaigou Mw 6.5 earthquake and explained by electrokinetics and magnetometer rotation. *Geophys. J. Int.*, **223**, 1130–1143.
- [8] Gershenzon, N.I., Gokhberg, M.B., and Yunga, S.L. (1993): On the electromagnetic field of an earthquake focus. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **77**, 13–19.
- [9] Mizutani, H., Ishido, T., Yokokura, T., and Ohnishi, S. (1976): Electrokinetic phenomena associated with earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **3**, 365–368.
- [10] Pride, S. (1994): Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Phys. Rev. B*, **50**, 15678–15696.
- [11] Stacey, F.D. (1964): The seismomagnetic effect. *Pure Appl. Geophys.*, **58**, 5–22.
- [12] Nagata, T., 1970. Basic magnetic properties of rocks under the effects of mechanical stress, *Tectonophysics*, **9**, 167–195.
- [13] Gao, Y., Chen, X., Hu, H., Wen, J., Tang, J., and Fang, G. (2014): Induced electromagnetic field by seismic waves in Earth’s magnetic field. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **119**, 5651–5685.
- [14] Yamazaki, K. (2012): Estimation of temporal variations in the magnetic field arising from the motional induction that accompanies seismic waves at a large distance from the epicentre. *Geophys. J. Int.*, **190**, 1393–1403.
- [15] Gao, Y., Wang, D., Wen, J., Hu, H., Chen, X., and Yao, C. (2019): Electromagnetic responses to an earthquake source due to the motional induction effect in a 2-D layered model. *Geophys. J. Int.*, **219**, 563–593.
- [16] Yamazaki, K. (2016): Temporal variations in magnetic signals generated by the piezomagnetic effect for dislocation sources in a uniform medium. *Geophys. J. Int.*, **206**, 130–141.
- [17] Sun, Y-C., Ren, H., Yamazaki, K., Zeng, L., Huang, Q., and Chen, X. (2021): Semi-analytical solutions of seismo-electromagnetic signals arising from the motional induction in 3-D multi-layered media: part I—theoretical formulations. *Earth Planets Space*, **73**:20.
- [18] Ren, H., Zeng, L., Sun, Y-C., Yamazaki, K., Huang, Q., Chen, X. (2021): Semi-analytical solutions of seismo-electromagnetic signals arising from the motional induction in 3-D multi-layered media: part II—numerical investigations. *Earth Planets Space*, **73**:130.
- [19] Yamazaki, K. (2021): Piezomagnetic fields associated with a dislocation source in a layered elastic medium. *Geophys. J. Int.*, **226**, 2032–2056.
- [20] Yamazaki, K. (2022): Comment on “Piezoelectricity as a mechanism on generation of electromagnetic precursors before earthquakes” by J.H. Wang. *Geophys. J. Int.*, **228**, 792–795.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 K. Yamazaki | 4. 巻 226 |
| 2. 論文標題 Piezomagnetic fields associated with a dislocation source in a layered elastic medium | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Journal International | 6. 最初と最後の頁 2032-2056 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggab160 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Ren Hengxin, Zeng Ling, Sun Yao-Chong, Yamazaki Ken'ichi, Huang Qinghua, Chen Xiaofei | 4. 巻 73 |
| 2. 論文標題 Semi-analytical solutions of seismo-electromagnetic signals arising from the motional induction in 3-D multi-layered media: part II?numerical investigations | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Earth, Planets and Space | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01458-5 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Yamazaki Ken'ichi | 4. 巻 228 |
| 2. 論文標題 Comment on 'Piezoelectricity as a mechanism on generation of electromagnetic precursors before earthquakes' by J.H. Wang | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Journal International | 6. 最初と最後の頁 792 ~ 795 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggab372 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Sun Yao-Chong, Ren Hengxin, Yamazaki Ken'ichi, Zeng Ling, Huang Qinghua, Chen Xiaofei | 4. 巻 73 |
| 2. 論文標題 Semi-analytical solutions of seismo-electromagnetic signals arising from the motional induction in 3-D multi-layered media: part I?theoretical formulations | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Earth, Planets and Space | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01327-7 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 山崎健一 |
| 2. 発表標題 動的電磁誘導により生成される地震波到達前の電磁場変動の観測波形と理論波形 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年度大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ken'ichi Yamazaki |
| 2. 発表標題 Electromagnetic Variations Arising from the Seismic Motional Induction in a Conductive Half-space Medium |
| 3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 15th annual meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山崎健一 |
| 2. 発表標題 半無限媒質中の動的電磁誘導により生成される地震時電磁場変動(2): 数値例 |
| 3. 学会等名 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ken'ichi Yamazaki |
| 2. 発表標題 The Electromagnetic Field Generated by Seismic Sources in a Half-space Medium through a Mechanism of Motional Induction |
| 3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ken'ichi Yamazaki |
| 2. 発表標題 Electromagnetic Variations Arising from the Seismic Motional Induction in a Conductive Half-Space Medium |
| 3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 15th annual meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山崎健一 |
| 2. 発表標題 地震動にともなう動的電磁誘導により励起される電磁場変動 - 半無限媒質の場合と無限媒質の場合の違い - |
| 3. 学会等名 地球惑星科学連合2018年大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 山崎健一 |
| 2. 発表標題 多孔質媒体の振動と電磁場変動を関連付ける方程式の修正 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年度大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-----------|---|--------------------------------------|----|
| 研究 分担者 | 吉村 令慧 (Yoshimura Ryokei) (50346061) | 京都大学・防災研究所・教授 (14301) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|