

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03500

研究課題名(和文)人間の地磁気感受性の行動・生理計測 - 磁気覚と視覚の干渉効果を利用して -

研究課題名(英文) Behavioral and physiological instrumentations of human geomagnetic reception.  
-Using conflict effects between magnetoception and vision-

研究代表者

眞溪 歩 (Matani, Ayumu)

広島大学・脳・こころ・感性科学研究センター・教授

研究者番号：50273842

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトは磁気感受性を持つ動物が持つ磁気受容体の候補を有しており、潜在意識化で地磁気に対する感受性を持っていてもおかしくない。地磁気はヒトが数分で移動できる時空間では強度一定であるため、この範囲でヒトが受ける地磁気変化は自身の運動による回転変化のみとなる。そこで、地磁気強度一定のもと、様々な回転・スイング地場刺激をヒトに与えた。これに対する生理応答では、北半球在住のヒトが普段浴びていると考えられる地場スイングに対してのみ、脳波のアルファ波の事象関連脱同期現象が観察された。また、行動応答では、回転磁場環境下で平行移動する光刺激への応答の反応時間に干渉効果(Stroop効果)が観察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光、音、力と並び磁気は物理量でありながら、視覚、聴覚、体性感覚と並び磁覚の存在はヒトでは明白ではなかった。本研究の学術的意義は、生理実験と行動実験の両面から、ヒトの磁覚の存在を明らかにしたことである。磁覚のように潜在意識下でのみ処理される感覚情報は、他にもかなり存在すると考えられる。本研究の社会的意義は、本研究で用いたアプローチが他の潜在感覚研究にも転用可能であることである。たとえば、内受容感覚はこの潜在感覚の好例で、顕在化する場合ストレス等との関係が指摘されている。本研究で用いた磁覚と視覚での干渉効果と同じように、ストレスと内受容感覚の干渉効果として捉えることもできる。

研究成果の概要(英文)：Humans possess magnetoreceptor candidates that magneto-sensitive animals possess. Hence, it is no wonder that humans have a subconscious sensation to the geomagnetic field. Since the geomagnetic field is constant in intensity in the spatiotemporal range that humans can move in a few minutes, the only geomagnetic change that they are exposed to within this range is the rotational change caused by their own motion. Therefore, we imposed rotational and swinging magnetic stimuli having the geomagnetic magnitude to human participants. As a result of physiological responses to the stimuli, event-related desynchronization of electroencephalographic alpha waves was observed only in response to the geomagnetic swings to which humans living in the Northern Hemisphere are usually exposed. In the behavioral response, an interference effect (Stroop effect) was observed in reaction time to a left-or-right moving visual stimulus under a clockwise or counter clockwise rotating magnetic field.

研究分野：計測・信号処理工学

キーワード：磁覚 潜在意識 顕在意識 脳波 干渉効果

## 1. 研究開始当初の背景

光、音、力と並び磁気は物理量でありながら、視覚、聴覚、体性感覚と並び磁覚の存在はヒトでは明白ではなかった。少なくとも、経験的にヒトは磁気感受性を顕在意識下では持っていない。一方で、ヒト以外の動物では、バクテリア、節足動物をはじめ、すべての脊椎動物種で磁気感受性を持つ動物が見つかり続けている [Wiltschko, J Comp Physiol A, 2005]。ヒトは、磁気感受性を持つ動物が持つ磁気受容体の候補であるマグネタイトとクリプトクロムを脳内・身体内に有している [Kirschvink, PNAS, 1992; Foley+, Nature Communications, 2011]。また、受容体ではないが第3の受容方式である電磁誘導は [Kalmijn, Science, 1982]、導電体としてのヒトにも起こる物理現象である。したがって、ヒトは潜在意識下であれば磁気感受性を持っていてもおかしくなく、進化の過程で顕在意識下での磁気感受性を失ってしまったと見るのが妥当であろう。

ヒトに対する磁気感受性を調べる行動実験は、目隠しをさせた多数の被験者をバスに乗せ、曲がりくねったドライブの後、出発地点を指示させるという極めて直接的な研究としてマンチエスターで行われ、有意な方向同定結果を得た [Baker, Science, 1980]。なお、目隠しに棒磁石を挟んだ対照群では、ランダムな指示結果であった。したがって、方向定位に磁場情報を利用したことが示唆された。この結果は衝撃的であったため、異なる地域でも追試されたが、再現性に欠ける結果に終わり [Gold+, Science, 1981]、その原因は未だ不明のままである。一般論としては、潜在意識下での感覚を直接問うたがために起こった問題だと考えられる。一方、受容体をクリプトクロムに限定した場合、間接的に磁気感受性を調べた研究がある。クリプトクロムでは、南北の向きを問わず磁力線と平行な方向にある光の量が低下して見えるという性質があり、これを実験的に検証した [Thoss+, J Comp Physiol A, 2003; Thoss+, Vision Research, 2007]。この実験では、クリプトクロムの最も特徴的な性質である「南北方向はわかって南と北は区別できない」という性質を調べていない不備がある。

一方、ヒトの磁気感受性を調べる生理実験は、人工的な磁気刺激下での脳波応答を調べる実験として多数実施されてきた。人工的な磁気刺激は、ヒトを取り囲むコイルを用意し、そこに電流を流して生成する。このときコイルサイズのみならず、磁気刺激の大きさを地磁気強度程度にしても、必要になる電源は意外に大掛かり(高価)になる。一方で、トランスを介して商用電源をコイルに直結すれば、大幅に簡易な実験となる。このためか大半の実験は、50 Hz や 60 Hz の変動磁場をヒトに与えている [Cook+, Bioelectromagnetics, 1992; Bell+, Electroencephal. Clin. Neurophysiol. 1992; Sastre+, Clin Neurophysiol, 2002; Ghione+, Neuroscience Letters, 2005]。詳細は割愛するが、これらの文献での脳波応答の有無は順に+, +, -, +であった。しかし、動物は数 Hz 以上の磁場変化には応答しないことが知られており [Kirschvink+, J. Expt. Biol., 1997]、これらの人間に対する実験結果は、少なくとも方向などを感知する意味での磁気感受性とは言えない。この他にも、動物実験による知見として、動物の磁気感受性は地磁気強度から 20-30% 離れたり [Wiltschko+, J. Comp. Physiol. A, 2005]、電磁波 (Radio Frequency: RF) 雑音に晒されると、シャットダウンしてしまう [Engels+, Nature., 2014] ことも知られていた。以上、研究開始当初の当該分野の状況として、ヒトの磁気感受性の有無は、行動実験からも生理実験からも明確ではなかった。

本科研基盤(B)研究に直結する背景として、本研究に先んじて、2014-2017年に Human Frontier Science Program の助成の下、カリフォルニア工科大学の Kirschvink 教授、Shimojo 教授と共同研究: Psychophysical and neuroengineering approach to human magnetoreception を遂行した。本科研基盤(B)研究は研究代表者単独の研究であるが、研究協力者として同教授らとは必要に応じた共同ができる状態にあった。

## 2. 研究の目的

本研究では、「ヒトは地磁気感受性を未だ保有しているのか?」という問いに対し、その存在を行動・生理実験で示すことを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 概要:

「研究開始当初の背景」で述べたように、これまで実施されてきたヒトの磁気感受性を調べる実験には、不備や問題点が含まれていた。少なくとも、動物実験の知見から、磁気刺激強度は実験場所の地磁気強度に合わせる、周波数変化は数 Hz 以下にする、実験は RF シールドルーム (Faraday cage) 内で行なうことは必須と考えた。さらに磁場変化について考えてみると、地磁気はヒトが数分 (=標準的な実験 1 ランの時間) で移動できる時空間では強度一定であるため、この範囲でヒトが受ける地磁気変化は、平行移動や強度変化はあり得ず、自身の運動による相対的な回転変化のみとなる。そこで、地磁気強度一定のもと、様々な回転 (360 度の回転) やスイング (360

度に満たない回転)する磁場刺激をヒトに与え、これらに対する生理計測実験，行動計測実験を行なった。

生理計測実験：

生理計測実験では、脳波のアルファ波における事象関連脱同期現象を調べた。アルファ波の事象関連脱同期は、刺激の脳内処理に先んじてアルファ波の振幅が低下する現象である。古くはアルファサプレッションとも呼ばれ、顕在意識下での感覚情報処理の過程では必ず観察されるといってよい。したがって、磁気刺激に対してもアルファ波の事象関連脱同期が観察されれば、磁気刺激に対して何らかの脳内処理が行なわれていることの証左となる。

本生理計測実験では、図 1A に示す実験装置を用い、被験者は全くの暗闇の中、課題はなく、安静閉眼でただ座っているだけであった。この状態で、被験者の脳波を測定した。磁気刺激は±90度の水平面内の所要時間 0.2 s の等速スイングで、スイングの回転方向は時計回り(CW)と反時計回り(CCW)、磁力線の向きが前方下方向(DecDn.CW.N, DecDn.CCW.N)と後方上方向(DecUp.CW.S, DecUp.CCW.S)を用意した。これらの磁気スイング刺激に対するアルファ波の事象関連脱同期の比較を行なった(図 1B)。また、同じく前方下方向と前方上方向(DecUp.CW.N, DecUp.CCW.N)のスイングに対するアルファ波の事象関連脱同期の比較も行なった(図 1D)。前者の比較は、ヒトの磁気受容体がクリプトクロムコンパスなのかを調べている。クリプトクロムは南北を区別できないため、クリプトクロムから見ると DecDn. {CW/CCW}.N と DecUp. {CW/CCW}.S は本質的に同じで区別できず、脳波応答も同じになることが期待される。一方、後者の比較は、ヒ

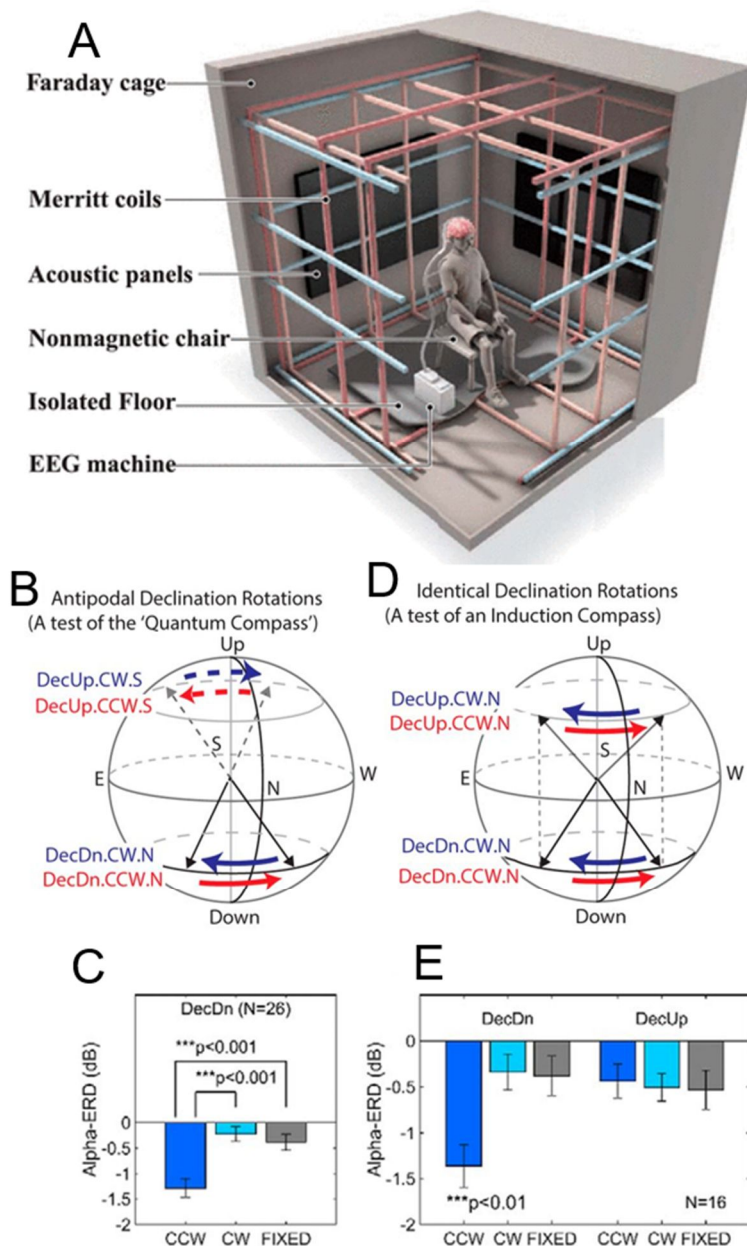


図1 ヒトの地磁気感受性の生理実験

トの磁気受容体が電磁誘導コンパスなのかを調べている。電磁誘導は磁場変化(交流磁場)に対してしか生じないため、電磁誘導から見ると DecDn. {CW/CCW}.N と DecUp. {CW/CCW}.N は本質的に

に同じで区別できず、脳波応答も同じになることが期待される。なお、磁場の強度、傾斜角は実験室(カリフォルニア工科大キャンパス内)における地磁気の値を用いた。

行動計測実験：

生理計測実験では、磁場情報が脳内で処理されていることを示唆しているものの、ナビゲーション情報として処理されているかどうかは不明である。磁場のナビゲーション利用については、方向に関係する行動計測実験によって調べる必要がある。ここで、先行研究での潜在意識下での処理結果を直接問うたことによる問題を踏まえ、方向に関係しかつ顕在意識下に登る感覚と磁覚との間で何らかの干渉効果を引き起こし、間接的に磁気感受性を計量する戦略をとった(図2A)。

まず、所要時間4sの時計回りか反時計回りの等速回転磁場に被験者を暴露した。ただし、この回転磁場はゴルフスイングのような軌道で、前方に傾斜させた(傾斜角は実験装置の都合で35度)。この傾斜に合理的理由は見い出せていないが、いくつか行なった予備実験の結果からこのように設定した。また、磁力線の方向を反転させ、北半球条件と南半球条件を用意した。なお、磁場の強度は実験地(東大、広大)における地磁気の値を用いた。この磁場刺激と同時に、所要時間0.5sの左か右かへ平行移動する光刺激をLEDアレイで呈示した。この刺激は、被験者正面における磁力線ベクトルの回転を左右方向に置き換え、その方向が視覚刺激の移動方向と一致した場合、ちょうど磁力線ベクトルの先端にライトが点いたように見えるように設定した。なお、磁気刺激の回転方向と視覚刺激の移動方向はランダムに設定しているため、これらの方向が一致しない場合は、磁力線ベクトルの先端と視覚刺激は被験者正面で反対向きにすれ違うようになる。被験者への課題は、顕在意識下に登る視覚刺激の移動方向に対し、バーハンドルの回転によって素早く反応するというものであった。期待される結果は、移動方向の一致・不一致による干渉効果：Stroop-like効果の発生であった。Stroop効果とは、赤字で書かれた赤と青という文字の色を答える場合、文字の意味と色が一致した場合の方が、早く回答できるという効果であり、

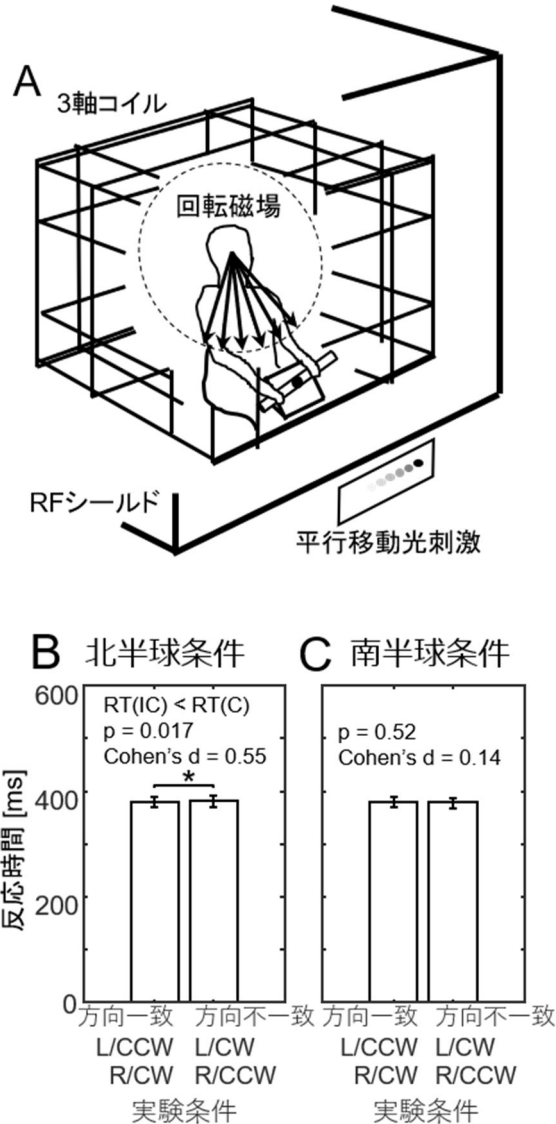


図2 ヒトの地磁気感受性の行動実験

これと類似しているが意味処理が関係しない干渉効果を Stroop-like 効果と言う。干渉効果には、与えられる刺激と反応に使う装置との相性によって、その効果の大小が影響を受けるとされる。すなわち、回答を求められない刺激の属性に装置が適していると、干渉効果は増大する。本実験での応答装置としてのバーハンドルは、回転への反応により適しており、平行移動への反応にはあまり適していないが、Stroop-like 効果の増大を狙っていた。

#### 4. 研究成果

##### 生理計測実験：

磁気スイングへの脳波計測結果では、どちらの比較においても DecDn.CCW.N にのみ、アルファ波の事象関連脱同期が有意に生じた(図 1C, 1E)。また、磁場スイング自体を知覚したという報告は全くなかった。まず、脳波応答が得られたことから、ヒトは潜在意識下では地磁気感受性を持っていることが示唆される。つぎに、磁気受容方式について考察する。この非対称な脳波応答結果を、クリプトクロムコンパスと電磁誘導コンパスは、個々単独では説明することができない。これに対し、南北を区別でき、直・交流にも反応できる可能性を持つマグネタイトコンパスは、単独であってもこの非対称性を再現できる。ただし、反時計方向のスイング(CCW)にしか応答が生じなかった理由は不明であった。最後に、前方下方向への磁力線に対してのみしか反応が得られなかったことについて考察する。この磁場は北半球において通常曝されている磁場に相当する。被験者は性別、年齢、人種はさまざまであったものの、北半球在住者に限られていたことが影響したものと考えている。

##### 行動計測実験：

本実験では、磁場刺激の回転方向と光刺激の平行移動方向の被験者正面における一致・不一致に関する反応時間の Stroop-like 効果が、有意に発生した。また、磁場回転自体を知覚したという報告は全くなかった。まず、Stroop-like 効果が生じたことから、ヒトは潜在意識下ではナビゲーション(方向同定)に関係する地磁気感受性を持っていることが示唆される。つぎに、この Stroop-like 効果は、方向不一致のときに反応時間が短くなるという、通常の Stroop, Stroop-like 効果とは逆の現象であった。このことから、磁場の回転は自己運動感覚(ベクシオン)を引き起こしたと考えられる。通常、地球磁場の方向は変化せず、被験者自体が回転することによって、相対的に磁場の回転は起こる。したがって、潜在意識下では磁場の回転ではなく、逆方向への被験者の仮想的回転となるベクシオンが生じたと考えられる。なお、視覚刺激は呈示範囲が視野全体に対して小さいため、ベクシオンを起こし得ない。最後に、被験者は全員北半球在住者に限られ、かつ Stroop-like 効果は北半球条件でのみ生じたことから、この実験結果は北半球での実験に特有の性質であると推察される。このことは、上記の生理計測実験とも符合しているし、機会があれば南半球でも本実験を実施してみたい。

##### 生理・行動計測実験をまとめて：

上記の、生理・行動計測実験の成果から、ヒトはナビゲーションの意味での地磁気感受性を潜在意識下では未だ保有していると結論付ける。

しかし、全く異なる視点も与えている。生理実験結果はマグネタイトコンパスを支持しているようであるが、反時計方向のスイングにしか応答していないという点で、他の2つのコンパス同様、説明不可能性を有している(ただし、マグネタイトのみならず、クリプトクロムも電磁誘導もこの説明不可能性を有している)。本研究を遂行する中で、電磁誘導が脳内や身体内に流す電流が神経膜電位に与える影響について考えるようになった。この電流は、神経活動に伴って流れる体積電流と同様に脳内や身体内を流れているし、脳波計で脳波と同じレンジで測定できることから、大きさも脳波と同等であることがわかる。この体積電流の分布は、頭表・身体表に負性インピーダンスを取り付けると、バイパス路への体積電流引き込み・追い出しから、ある程度制御することができる。この制御法は、対脳であれば経頭蓋細胞外インピーダンス制御(transcranial extracellular impedance control: tEIC)、対身体であれば経皮的細胞外インピーダンス制御(percutaneous EIC: pEIC)という。t/pEICによっても顕在意識下の反応は変調を受ける。実際のところ神経活動による体積電流と電磁誘導による電流は、ベクトル場として異なるのだが、電磁誘導が本生理・行動実験成果を引き起こした可能性は否定できない。

磁場とは異なり、たとえ知覚可能な物理量・化学量であっても、その処理の大部分は潜在意識下で行なわれ、顕在意識下に登る情報はごくわずかである。しかし、本研究での Stroop-like 効果を見ると、潜在意識下にしか存在しない情報も、顕在意識下での意思決定に影響を与えていることがわかる。本研究で培った潜在意識下へのアプローチを、今後、他の潜在意識下での情報処理の解明に活かしていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wang Connie X., Hilburn Isaac A., Wu Daw-An, Mizuhara Yuki, Couste Christopher P., Abrahams Jacob N. H., Bernstein Sam E., Matani Ayumu, Shimojo Shinsuke, Kirschvink Joseph L.	4. 巻 6
2. 論文標題 Transduction of the Geomagnetic Field as Evidenced from alpha-Band Activity in the Human Brain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 eneuro	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1523/ENEURO.0483-18.2019	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 A. Matani
2. 発表標題 Significant influence of task-irrelevant stimuli on task performance
3. 学会等名 Neuroscience 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田侑祐, 眞溪歩
2. 発表標題 経頭蓋細胞外インピーダンス制御(tEIC)による情報処理の脳間通信
3. 学会等名 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 眞溪歩
2. 発表標題 経頭蓋細胞外インピーダンス制御(tEIC)について
3. 学会等名 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 眞溪 歩	4. 発行年 2020年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 1
3. 書名 科学 2020年2月号「広辞苑を3倍楽しむ 107 第六感」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>メディア発表, 講演                  2022.03.17 NHK BS3 ヒューマニエンス「“天体のチカラ” 絶滅と進化のインパクト」                  2021.09.06 量子科学技術研究開発機構 高崎研究所オープンセミナー 講演                  2021.03.14, 21 BSフジ ガリレオX「我々の祖先は道に迷わなかったのか? 自然観察で道を見つける ナチュラル・ナビゲーション」                  2019.10.18, 25 InterFM897 The Dave Fromm Show「電気じかけの脳 -電氣的ドーピングの可能性と眠った人間の第六感」                  2019.08.20 毎日新聞「パワースポットと「第六感」 磁場と脳波の関係、測定したら...」                  2019.07.29-2019.08.01 bayFM Love Our Bay 出演                  2019.05.20 京都大学宇宙物理教室・附属天文台 講演                  2019.04.15 つくばサイエンスニュース「人も地磁気を感じていた!？」                  2019.03.20 朝日新聞「地球の磁場、人も感じる? 脳波に反応、渡り鳥と同様」                  2019.03.20 日経新聞「人間も地磁気を感じ日米グループ、脳波を測定」                  2019.03.20 FNNプライムオンライン「あなたも「地磁気」を感じる“第六感”がある!? 何に役立つのか 東大の研究者に聞いてみた」                  2019.03.19 産経新聞「人間の「第六感」 磁気を感じる能力発見 東大など」                  2019.03.19 フジテレビ めざましテレビ 出演                  2019.03.19 J-WAVE TOKYO MORNING RADIO 出演                  2019.03.18 Science News "Humans&amp;#8212;like other animals&amp;#8212;may sense Earth's magnetic field"</p>
--

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
研究協力者	カーシュビnk ジョセフ  (kirschvink joseph)	California Institute of Technology	
研究協力者	下條 信輔  (shimojo shinsuke)	California Institute of Technology	

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
---------	---------

米国	California Institute of Technology			
----	------------------------------------	--	--	--