

磁気閃光現象に基づく低周波磁界曝露の生体影響に関する検討

Fundamental study of the biological effects under exposure to ELF magnetic fields based on magnetophosphenes

○中川 秀紀¹ 森山 真人¹ 正宗 賢¹ 山下 紘正¹ 小谷 誠² 土肥 健純¹

¹ 東京大学大学院情報理工学系研究科 ² 東京電機大学大学院工学研究科

Hidenori NAKAGAWA¹, Mahito MORIYAMA¹, Ken MASAMUNE¹, Hiromasa YAMASHITA¹, Makoto KOTANI², Takeyoshi DOHI¹

¹ Graduate School of Information and Technology, The University of Tokyo

² Graduate School of Engineering, Tokyo Denki University

Key Words: Eddy Current, Magnetophosphenes, Electromagnetic Induction, Extremely Low Frequency, Magnetic Stimulation

1. 緒言

磁気閃光現象は、頭部を交流磁界内へ置いた際に視覚が認められる現象であり、フランスのダルソンバール (M.A. d'Arsonval) により最初に報告された⁽¹⁾。その発生機序に関する明白な説明はまだ無いが、誘導電流による網膜への刺激が閃光を知覚させると考えられている^(2,3)。至適周波数が約 20 Hz、顕著な周波数依存性を示し、閃光の閾値 (臨界値) は 10 mT 程度とする報告が多い⁽³⁻⁷⁾。かつては磁気環境問題における指標の一つとされ、生体に対する高い再現性を有し、最近に至るまで低周波磁界による生体影響の研究対象とされてきた。

一方で、磁気刺激を広く高齢者・障害者の医療および生活支援に役立てることに期待が高まるが、現状では磁気刺激を利用した福祉機器の開発は殆どなされていない。近年注目されるパルス磁界による脳や筋への刺激は、コイルに大電流を流すリスクなど、福祉機器への実用化に向かない種々の問題点がある。そのため磁気閃光と同等レベルの低周波磁気刺激の利用は、福祉機器開発のための重要な一手段と考えられる。また磁気閃光実験で使用されてきた従来コイルの特徴として比較的サイズが大型であること、ハンドリングし難いことなどがある。他の感覚野に渦電流を誘導する応用研究では、刺激コイルの製作・改良が刺激の最適化条件に関する有用な情報を与えうると確信する。

本研究では、コイル形状の最適化を目的として低周波磁気刺激用の簡易型コイルを製作し、磁束密度分布、周波数特性、被験者の閃光確認データなどから閃光閾値を算出し従来型コイルとの比較を行った。サイズの小型化と同時に、本コイル周辺で発生した渦電流が、近傍の生体部位にどの程度の熱影響を与えうるかを検討したので報告する。

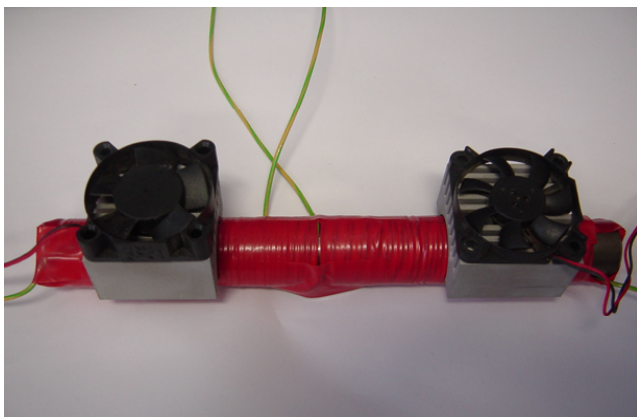


Fig. 1 Photograph of simplified coil system for magnetophosphenes.

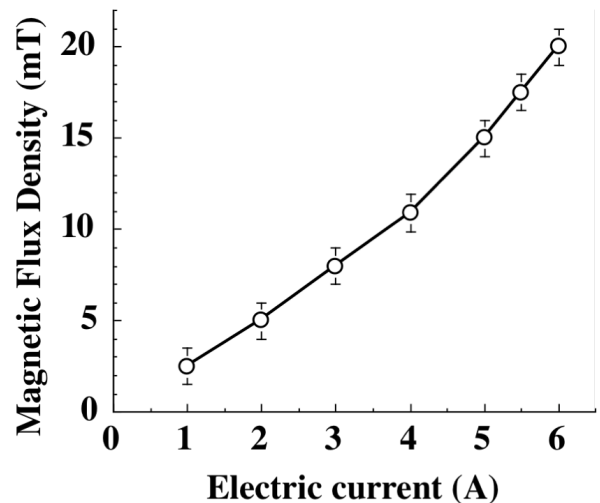


Fig. 2 Current dependence on the magnetization of stimulation coil.

2. 実験方法

2-1 刺激コイル

S45C 鉄芯 (MISUMI, $\phi 3.0 \times 20$ cm) に弱電流回路用フッ素樹脂絶縁可動用電線 (潤工社, 250V ETFE, $S = 0.3 \text{ mm}^2$) を 450 回/10 cm の体裁で二つ分を並べて巻いたコイル (計 900 回/20 cm) を作製した。さらに、放熱対策としてアルミ製インシュヒートおよび空冷ファンを装着した (Fig. 1)。コイルの抵抗を汎用のデジタル式マルチテスターにて測定し、巻数 450 回あたりの直流抵抗 2.9 Ω を得た。

2-2 磁気刺激装置の概略

任意波形ファンクションジェネレータ (KENWOOD, AG-203) で発生させた信号を出力 300W の音楽用パワーアンプで増幅し、並列接続したコイルに電流を流した。アンプの RL 出力端子にはオシロスコープ (IWATSU, SS-5705) を接続し、その電圧波形を測定した。

2-3 コイルからの磁束密度分布および周波数特性

Fig. 2 に、コイルに流した電流と、コイル先端の中心磁極から真直の延長点 ($d = 3$ cm) の磁束密度との関係を示した。ファンクションジェネレータからの信号を 20 Hz の正弦波に固定した後、コイルに流す電流値を変化させた。磁束密度はガウスメータ (東陽テクニカ, LakeShore 421) で測定した。コイル電流と磁束密度とは比例し、6 A を流

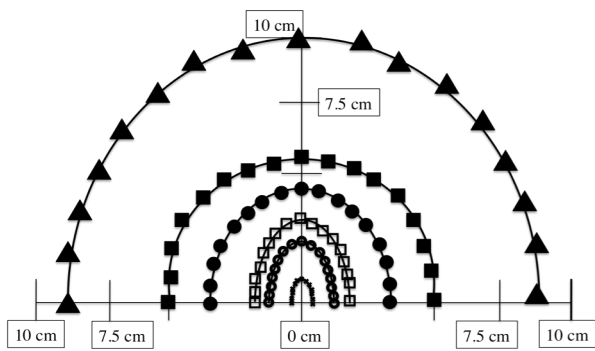


Fig. 3 Distribution of magnetic flux density of stimulation coil. (▲) 0.5 mT, (■) 1 mT, (●) 2 mT, (□) 4 mT, (⊖) 8 mT, (✕) 10 mT.

した際に最大 20 mT の磁束密度が得られた。本測定結果からコイルの自己（合成）インダクタンス 6.39 mH を得た。

コイル周辺の磁束密度の分布を Fig. 3 に示した。コイル先端の中心磁極から真直の延長点 ($d = 1 \text{ cm}$) での磁束密度が 10 mT となるようにコイルに流す電流を調整した。次いでコイル先端を中心とする半径 10 cm の同心円内での磁束密度を 1 cm おきに測定した。コイル先端に対して垂直方向寄りでは磁場が弱まる傾向が観られたが、比較的広範囲での磁気刺激が可能であることが判明した。

Fig. 4 にコイル本体の周波数特性図を示した。電圧一定 (33 V) および正弦波 10~30 Hz の範囲で、既に報告のある磁気閃光閾値 10 mT を遙かに超える 15 mT 以上の磁束密度が本コイルによって得られることを確認した。

2-4 磁気閃光閾値および周波数特性の測定

被験者（20 歳代 4 名、30・50・60・70 歳代各 1 名の計 8 名、全て男性健常者）のこめかみ部に対し、目を瞑った状態で明瞭に閃光を確認しうる位置へコイル先端を導入した。すなわち正面から見た右眼の眼球中心から右側頭部へ 3 cm 程度の場所での磁気刺激（網膜部で 20 mT）を行った。磁界の周波数を 10~30 Hz の範囲に設定し、閃光が確認できなくなるまで磁束密度を下げることで臨界値（閾値）を決定した。測定は 20 Hz から開始し、1 Hz ごと各周波数において 3 回程度繰り返し、結果の再現性を確認した。

研究実施前に「ヒト生命倫理に関わる説明書」を用意し、被験者（研究協力者）に不利益のないよう詳細に説明し、研究協力における同意を得た。また、研究協力はいつでも辞退できることを伝えた。

2-5 コイルの熱による生体への影響

生体への低周波磁気刺激による熱の影響を調べるため、閃光確認時における頭部の温度をサーモグラフィ (NEC, TH7102MX) で追跡した。周波数を正弦波 20 Hz に固定し、上記 2-4 にて記載の位置（網膜部で 20 mT）での磁気刺激を行った。閃光が明白に認められた瞬間を 0 秒として 60 秒間の連続刺激を行い、15 秒おきに熱画像を撮影した。

3. 結果および考察

磁気閃光の測定結果から得た周波数特性図を Fig. 5 に示した。本研究で用いた刺激コイルによる磁気閃光閾値は平均で約 11 mT、至適周波数は被験者全員一致で 20 Hz となり、これらの値は既報⁽³⁻⁷⁾とほぼ一致した。さらに磁気閃光の閾値付近では、チラチラとした感覚ではなく横縞の模様

に見えるとの意見も得られた。今回の被験者中で最も高齢者から得た Fig. 5 (H) の周波数特性図より、老化に伴う磁気閃光閾値の上昇が一定年齢以上で起こる可能性が示された。この結果は高齢者を対象とする支援機器の開発に重要な知見をもたらすことが予想される。

一方、本コイルによる生体内部への渦電流による発熱効果は皆無と考えているが、加熱した鉄芯からの熱が局所的に生体に伝達するような場合、長時間の実験では問題となりうる。Fig. 6 に磁気閃光刺激中における頭部の熱画像を示した。刺激直後の頭部では温度変化を認めず、刺激後 30 秒からは次第にこめかみ部温度の上昇が観られた。磁気刺激中のコイル先端部と被験者頭部との間は常に非接触だが、刺激後 60 秒でこめかみ部の温度上昇が明白であり、長時間の実験では注意が必要である。

被験者自身がコイルを両手に握り、頭部を挟んで刺激する場面において、本研究で使用した刺激コイルは極めて自由度が高いといえる。本コイルで発生しうる磁束が単純に頭部を貫くと仮定した場合、刺激したこめかみ部と反対側の網膜にも Fig. 3 の分布に従った磁束が十分に曝露できると考えられる。ハンドリングの良さに加え、左右のコイルで磁束密度を変える、異なる周波数を作用させるなどで閃光のパターンを変えることが可能となれば、福祉機器の開発へ大きな躍進となることが予想される。

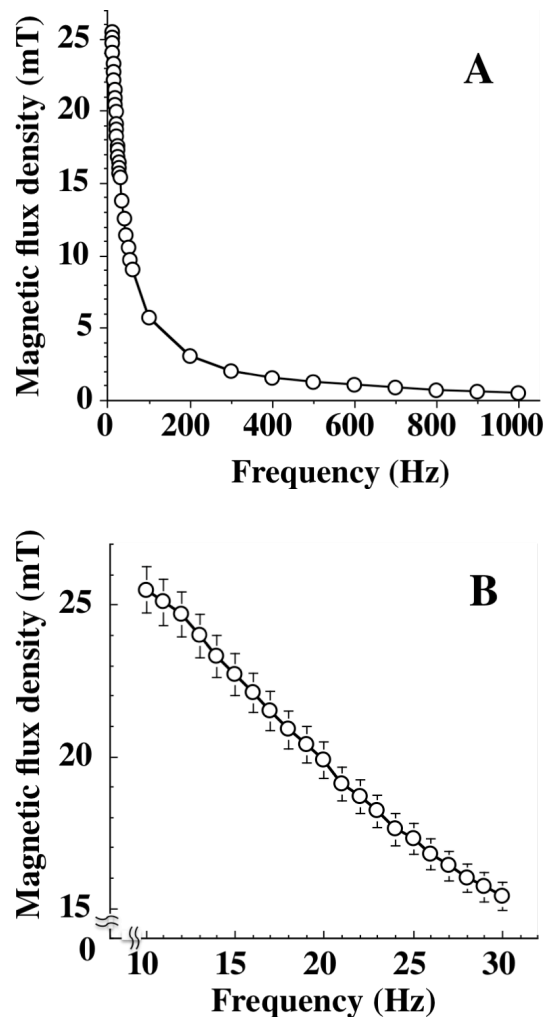


Fig. 4 Frequency response characteristic of stimulation coil. (A) 10–1000 Hz, (B) 10–30 Hz.

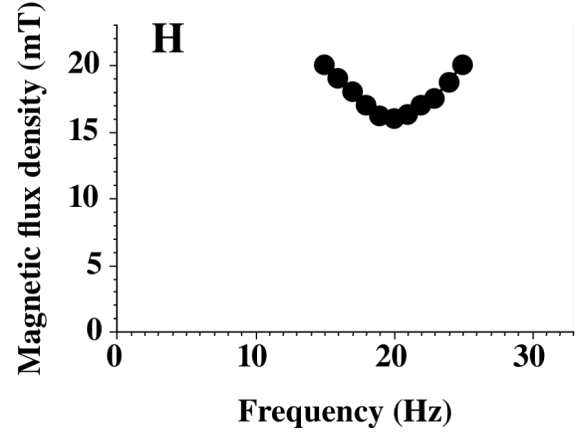
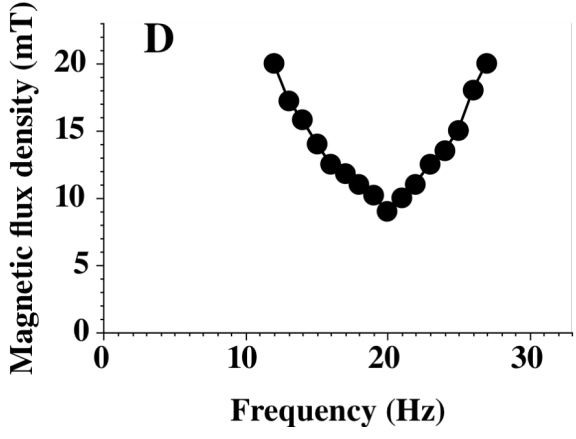
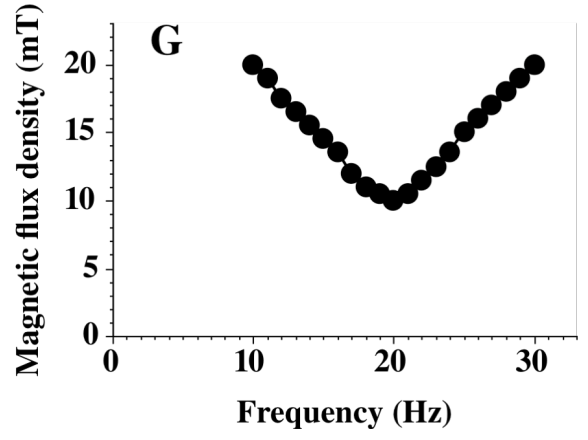
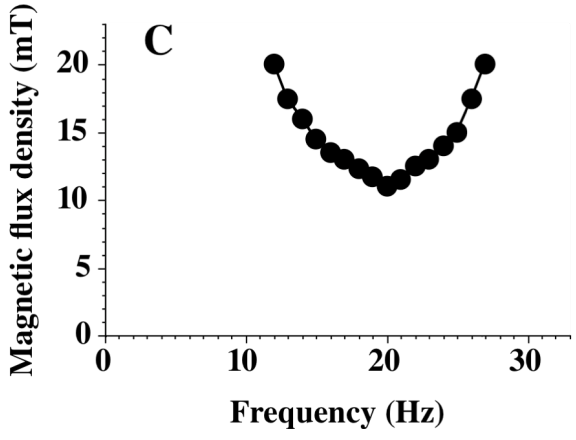
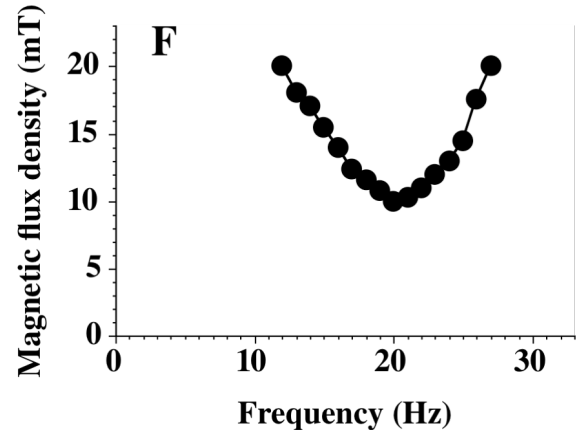
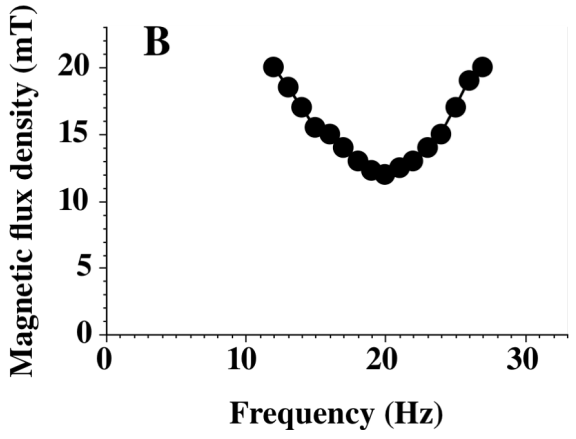
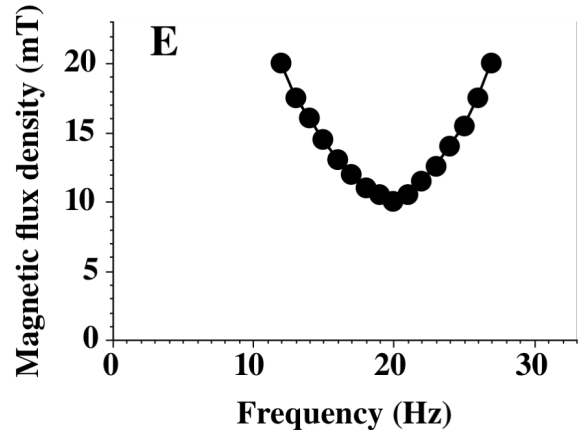
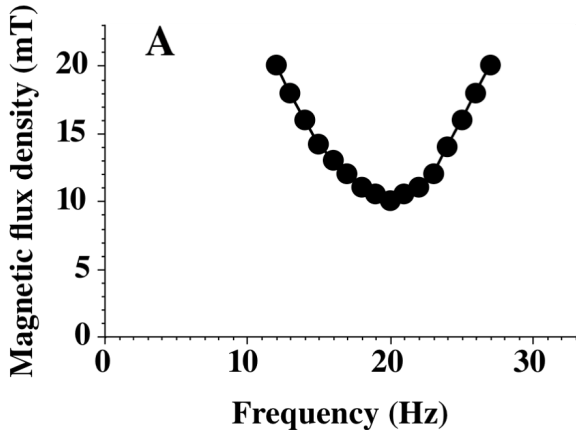


Fig. 5 Frequency response characteristics of magnetophosphenes (n=8, subject A~H).

なお今回の実験終了後に頭痛を訴えた被験者はいなかった。その理由として、測定一回あたりの刺激時間が2~3秒と短いこと、コイルが発する磁界が頭痛を誘発する分布でなかったことなどが考えられる。特に低周波磁気刺激では局所刺激がほぼ不可能であり、コイルから発する磁界の分

布は頭痛などの副作用の軽減も含めた重要な問題と考えられる。これは医療への応用には欠かすことのできない問題である。

4. まとめ

低周波磁気刺激用の簡易型コイルを製作し、磁気閃光閾値について検討した結果、高齢者では閾値が高まる可能性が示された。コイルの発熱による生体への熱影響を調べたところ、渦電流によらない頭部への熱伝達が観察された。また、一回の刺激時間を短く設定し休憩を挟むことで、頭痛など副作用の誘発を防ぐ可能性が示された。

参考文献

- (1) M.A. d'Arsonval, Dispositifs pour la mesure descourants altenatifs des toutes frequences, C.R. Acad. Sci., 48, 450-451, 1896.
- (2) M. Valentinuzzi, Theory of magnetophosphenes, Am. J. Med. Electronics, Apr-Jun, 112-121, 1962.
- (3) P. Lovsund, P.Å. Oberg, Magnetophosphenes: a quantitative analysis, Med. Biol. Eng. Comput., 18, 326-334, 1980.
- (4) K. Dunlap, Visual sensation from the alternating magnetic field, Science, 33, 68-71, 1911.
- (5) C.E. Magnusson, H.C. Stevens, Visual sensations caused by changes in the strength of a magnetic field, Am. J. Physiol., 29, 124-136, 1911.
- (6) P. Lovsund, P.Å. Oberg, Quantitative determination of threshold values of magnetophosphenes, International Symposium on the Biological Effects of Electromagnetic waves Air line, Va, Abstract K-2, 1977.
- (7) 小倉 玄, 多氣 昌生, 磁気閃光の閾値に関する実験的検討, 信学技報 EMCJ, 94, 13-18, 1994.

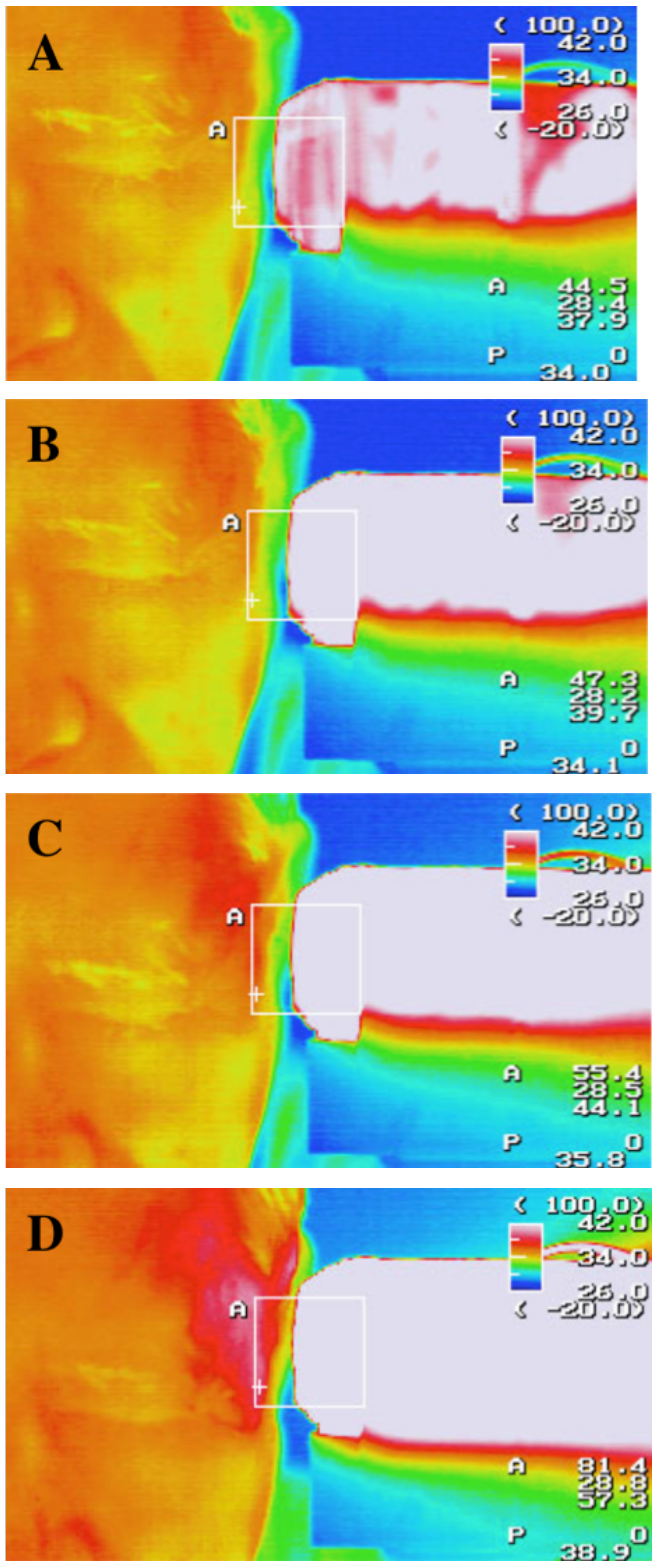


Fig. 6 Thermoanalysis of human temple on the continuous magnetic stimulation. (A) No stimulation, (B) 15 sec, (C) 30 sec, (D) 60 sec.