

交流磁気刺激における刺激領域制御のための ヘルムホルツコイルと磁性体を用いた局所的な磁場増強

Local enhancement of magnetic field using a Helmholtz coil and a magnetic material for controlling stimulus area in alternating magnetic stimulation

○ 山岡賢悟（東京電機大学） 桑名健太（東京電機大学） 太田裕治（お茶の水女子大学）
小谷誠（東京電機大学） 土肥健純（東京電機大学）

Kengo YAMAOKA, Tokyo Denki University, Kenta KUWANA, Tokyo Denki University,
Yuji OHTA, Ochanomizu University, Makoto KOTANI, Tokyo Denki University,
Takeyoshi DOHI, Tokyo Denki University

Abstract: This paper reports a generating method of a locally-enhanced magnetic field using a Helmholtz coil and a magnetic material for controlling stimulus area in alternating magnetic stimulation. Though magnetic stimulation is less chronic and invasive than medicine or electrical stimulation, it is a problem for limited area stimulation that the magnetic field is induced over a wide area. Therefore, locally-enhanced magnetic field is needed. The purpose of this study is to simulate the relationship between the dimensions of the magnetic material and the magnetic field localization in the proposed method. The results show that the diameter of the magnetic material determines the high intensity area of the magnetic flux density and the length determines the intensity of the magnetic flux density. Therefore, it is feasible to control the stimulus area by designing the dimensions of the magnetic material.

Key Words: Magnetic stimulation, Alternating magnetic field, Local enhancement, Helmholtz coil, Magnetic material

1. 背景

現在、便秘治療として薬剤治療と電気刺激による治療がある。薬剤治療では、即効性という利点があるが、慢性化や依存性という欠点がある。電気刺激による治療では、慢性的な便秘の治療が可能であるが、電流を流す事による痛み、また、肛門に電極を入れなければならない、羞恥心から治療を受けにくいといった欠点がある。そこで、依存性や侵襲が低く、着衣で治療が可能な磁気刺激による治療が注目されている。現在、パルス磁気により排便を司る仙骨神経周辺を刺激することで、直腸内圧の上昇が確認されており、磁気刺激による便秘治療の可能性が示されている⁽¹⁾。しかし、パルス磁気刺激では数千 A という大電流を流す必要があるため危険がある。そこで、我々は安全性の高い交流磁気刺激による便秘治療について研究を行っている⁽²⁾。交流磁気刺激では、低電流のためパルス磁気刺激と比べ、安全性が高いと考えられる。しかし、いずれの磁気刺激においても、コイルにより磁場を発生させる性質上、広範囲に磁場が分布するため、刺激部位だけでなく周辺の領域も同時に刺激してしまう可能性がある。そのため、領域を限定した刺激実現のため、磁場の制御が求められる。

2. 目的

本研究の目的は、刺激範囲を限定した磁気刺激のために、ヘルムホルツコイルと磁性体を用いた局所的に磁場の増強が可能な磁場発生方法を提案し、磁性体サイズと磁場の局所性の関係をシミュレーションにより評価することである。

3. 一様磁場中への磁性体配置による局所的な磁場増強

刺激部位のみを限定して刺激するために、磁性体を利用する。磁性体には、磁場を集めて局所的に大きくする性質があるので、刺激部位近傍に配置することで局所的な刺激の可能性が示唆されている。しかし、ソレノイドコイルのように、不均一な磁場を発生させるコイルを使用した場合、

コイルと磁性体の位置関係が変わってしまうと、磁性体の位置により、磁場が大きくなる位置が複数箇所発生してしまう。そのため、刺激したい領域以外の部分において刺激が起こってしまう可能性がある。そこで、一様な磁場を発生させることが出来るヘルムホルツコイルを利用することを提案する。ヘルムホルツコイルは、同形状のコイルを2つ使用し、コイル半径だけ2つのコイル間距離を離して配置したコイルで、コイル間に一様な磁場を発生させることができる。

ソレノイドコイルおよびヘルムホルツコイルにより発生させた磁束密度分布を Fig. 1 に示す。磁束密度分布は、コイルの中心軸に対して対称となっているため、コイル中心軸から半分の領域を示す。横軸はコイル中心軸からの距離となっており、縦軸はそれぞれのコイル中心軸の磁束密度の値で正規化した磁束密度を表す。ソレノイドコイルでは、中心軸から 50 mm 付近から磁束密度が上昇して約 250 mm で最大となっており、磁場が不均一になっていることがわかる。一方、ヘルムホルツコイルでは、140 mm 付近まで一様な磁束密度となることがわかる。これらのコイルが発生する磁場中に磁性体を配置することを考えると、ソレノイドコイルにおいては、磁性体位置によって、複数箇所

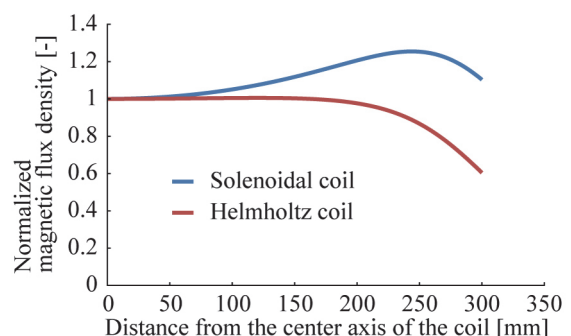


Fig. 1 Comparison of the magnetic flux density between a Helmholtz coil and a solenoid coil

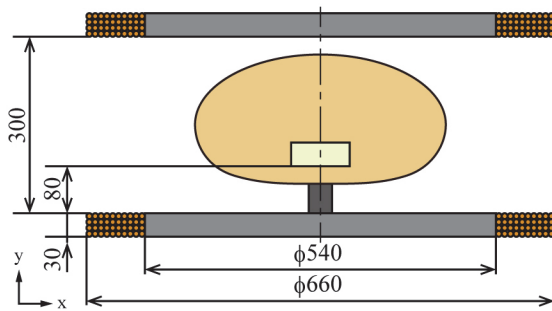


Fig. 2 Dimensions of the magnetic stimulation model

最大値を取る可能性がある。一方、ヘルムホルツコイルの場合は、磁性体近傍のみの磁束密度が大きくなるため、磁束密度が大きくなる領域を磁性体近傍1箇所に限定することができる。したがって、ヘルムホルツコイルと磁性体を用いることで、局所的に磁場増強が可能となる。ヘルムホルツコイルにより発生する磁場の大きさが、刺激することができる閾値以下であり、磁性体により磁束密度が大きくなった限定的な範囲でのみ、刺激の閾値を超えることが出来れば局所的に刺激を行う事が出来る。

4. 磁場シミュレーション

ヘルムホルツコイルと磁性体を使用して磁場を発生させたとき、磁性体形状を変化させることによる磁場への影響を確認するために磁場解析を行った。ヘルムホルツコイルにより磁気刺激を行うとき、ヘルムホルツコイルを構成する2つのコイル間に人体と磁性体を配置する。磁性体の配置は、仙骨のある人体背面側とし、形状を円柱とした。コイル間距離は、人体と磁性体が入ることを考慮して300 mmとし、ヘルムホルツコイルではコイル間距離がコイル半径と等しくなることから、コイル直径はコイル間距離の2倍の600 mmとした。磁性体の透磁率は実際に使用することを予定している磁性体の値である 1.0×10^4 H/m を用いた。また、人体に関しては磁性体に比べて十分透磁率が小さいため、空気の層として扱った。上記の条件のもとで Fig. 2 のようにモデル化し、解析を行った。解析には、有限要素法解析ソフト ANSYS を使用した。磁束密度分布はコイルの中心軸に対し対称となっているため、コイルの中心軸を境に半分領域のみのシミュレーションを行った。

Fig. 3 に、磁性体の径を変更した解析結果を示す。磁性体の長さは、50 mm として解析を行った。横軸は、仙骨中心からの x 軸方向の距離となっており、縦軸は、磁性体を使用していないときの仙骨中心部 ($x = 0$ mm) の磁束密度の値で正規化した磁束密度を示している。解析の結果、 $\phi 40$ から $\phi 100$ では、磁束密度の最大値が径によらず 1.3 となっており、磁束密度が大きくなっている領域が変化した。

Fig. 4 に、磁性体の長さを変更した解析結果を示す。磁性体の径は、 $\phi 50$ mm として解析を行った。Fig. 3 と同様、横軸は、仙骨中心からの x 軸方向の距離となっており、縦軸は、磁性体を使用していないときの仙骨中心部 ($x = 0$ mm) の磁束密度の値で正規化した磁束密度を示している。解析の結果、磁性体の長さが長くなるほど、磁束密度が大きくなり、磁束密度の大きくなる範囲は変わらなかった。したがって、磁性体径により磁束密度が大きくなる範囲を変えることができ、磁性体長さにより磁束密度を大きくできることが分かった。

5. 結語

本研究では、刺激部位を限定して磁気刺激を行うために、

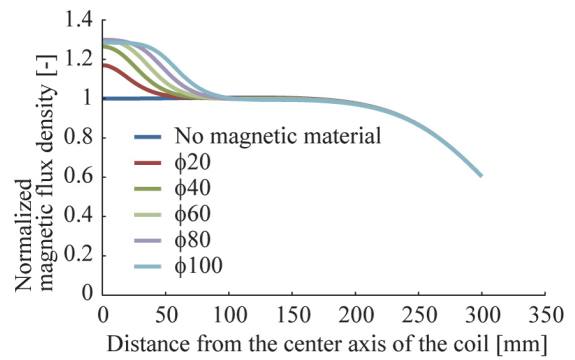


Fig. 3 Distribution of the magnetic flux density according to the diameter of magnetic material

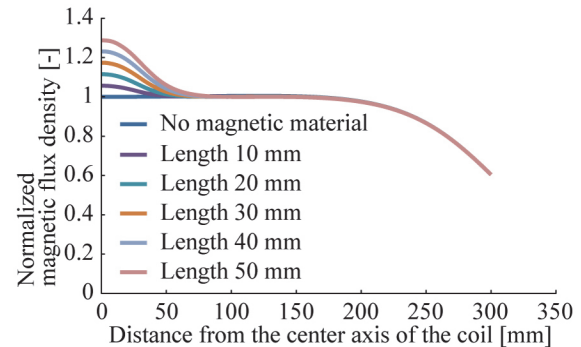


Fig. 4 Distribution of the magnetic flux density according to the length of the magnetic material

ヘルムホルツコイルと磁性体を用いた局所的な磁場増強の方法を提案し、シミュレーションにより評価を行った。提案方法は、ヘルムホルツコイルにより一様な磁場を発生させ、磁性体を一様な磁場内に配置することで、磁性体近傍において局所的に磁束密度を大きくすることができる。シミュレーションモデルとして、ヘルムホルツコイルの一様な磁場中に磁性体・仙骨モデルを配置したものをを用い、仙骨モデル部の磁束密度を算出した。磁性体の径・長さを変えてシミュレーションを行った結果、磁性体径により磁束密度が大きくなる範囲を変えることができ、磁性体長さにより磁束密度の大きさを大きくできることが分かった。仙骨神経を刺激する場合、仙骨のサイズが約 100 mm であり、刺激対象となる仙骨神経が通る仙骨孔は約 60 mm の範囲にあるので、 $\phi 60$ 前後の磁性体径を使用することで刺激範囲を限定して刺激をすることが可能になると考えられる。

これらの結果より、ヘルムホルツコイル間の一様な磁場内に刺激したい領域に合わせて設計した磁性体を配置し、磁性体近傍の磁場のみを大きくすることで刺激範囲を限定した磁気刺激の可能性が示唆された。今後は、実際にヘルムホルツコイルを試作し、磁束密度の実測を行う。その結果をふまえて仙骨刺激を対象とした装置開発を行っていく。

参考文献

- (1) Masayuki Kubota, Naoki Okuyama, Yutaka Hirayama, Kumiko Kobayashi, Kanako Satoh, "Effect of sacral magnetic stimulation on the anorectal manometric activity: a new modality for examining sacro-rectoanal interaction," *Pediatric surgery international*, vol. 23, pp. 741-745, 2007.
- (2) 山岡 賢悟, 桑名 健太, 太田 裕治, 小谷 誠, 正宗 賢, 土肥 健純, "交流磁気刺激による便秘治療のための刺激対象周辺の磁束密度シミュレーション," 第1回看護理工学会学術集会, p.49, 東京, Oct. 5, 2013.