

平成23年 5月13日現在

機関番号：15301
 研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21700535
 研究課題名 (和文) 体内埋込型コイルによる低侵襲ニューロジャンクションの研究
 研究課題名 (英文) In-plantable coils to achieve minimally invasive neuroreceptor junction
 研究代表者
 早見 武人 (HAYAMI TAKEHITO)
 岡山大学・大学院自然科学研究科・講師
 研究者番号：60364113

研究成果の概要 (和文)：

電子機器と人間の神経系間の信号伝達を、体内に埋め込んだコイルによって中継する方法の実現可能性について計算機シミュレーションにより検討した。神経を取り巻くように配置したトロイダルコイルに与えた電流パルスは神経を構成する神経線維のうち断面の一部領域または全部に伝達可能であった。トロイダルコイルを用いれば神経線維との直接接続よりは低侵襲で信号中継が実現できると考えられた。

研究成果の概要 (英文)：

Computer simulation was executed to examine the realizability of signal transmission between electric devices and human nervous systems using implanted coil. A toroidal coil surrounding a nerve worked as a neuroreceptor junction, which transmits electric current pulse to all or a part of the nerve fibers in the nerve. It was assured that a toroidal coil has a potential to transmit electric signals minimally invasively in comparison to direct junctions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			0
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：生体物理計測

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：神経磁気刺激、トロイダルコイル

1. 研究開始当初の背景

神経活動を電子機器によって制御する技術

に対する医療現場からの期待は高い。脳深部刺激装置やペースメーカーをはじめとする体

内埋込型治療装置においては、一旦機器を埋め込んだ後に病状の変化に伴って刺激位置を調整しようとする場合再手術が必要となる。そのため患者の負担をより低くする技術が求められている。

刺激位置の移動は、電氣的に表現すれば体内における電流経路を変更するというのである。再手術をせずに電流経路を変える一方法として、渦電流を利用する方法が考えられる。コイルを用いて体内に渦電流を発生させ、その電流によって神経を刺激する技術は経頭蓋磁気刺激装置で用いられている。経頭蓋磁気刺激ではコイルを体外に設置するため手術不要であり刺激位置の移動も容易に行うことができる。ただしコイルから神経までの距離が遠くコイルに大電流を流すことが必要であることからコイル自体も大型となり、焦点がぼけやすい難点がある。

コイルを体内に埋め込めばコイルから神経までの距離が短くなるためコイルに流す電流も少なく済み、小型のコイルでも刺激可能であると考えられる。小さなコイルで狭い領域を刺激すれば高解像度の刺激が可能となる。コイルを使用することで電極では難しい、電流経路の変更も容易になると考えられる。しかし体外にコイルを設置する経頭蓋磁気刺激の研究が広く行われているのに対してコイルを体内に埋め込む方法について検討した研究は少ない。先行研究では末梢神経の周りにトロイダルコイルを配置することにより神経を刺激できることが示されているものの、その解像度や刺激位置制御の実現可能性については明らかでない状況である。

2. 研究の目的

本研究では人体に埋め込んだコイルによって神経を刺激するときの刺激位置の制御可能性について明らかにすることを目的とした。トロイダルコイルを用いた検流計ではコイル

円環内に電線を通し、コイルの巻線に流れる電流を計測する。コイルには電線に流れる電流が生じる磁場を打ち消すように電流が流れるためであり、電磁誘導を応用した仕組みである。この仕組みを逆に利用してコイルに電流を流せば、電線に電流を流すことができる。神経は電氣的には一種の電線と見なすことができるため、神経に電流を流すことも可能であると考えられる。ただし神経は普通の電線とは異なり伝播可能な信号は固有の活動電位波形のみである。活動電位は神経細胞の膜電流が閾値を超えたときにのみ発生する。したがってコイルから神経に信号を伝達するためには、神経にこの閾値を超えるように電流を流すかどうかを制御できることが必要となる。本研究での関心事は、神経を構成する神経細胞のうち一部に対してのみ信号を伝達するような制御が可能かどうかという点である。

3. 研究の方法

トロイダルコイルが神経を刺激する効果は、渦電流に対する人間の神経の応答特性とトロイダルコイルが神経に作る渦電流分布を調べることで明らかになると考えられる。

(1) 渦電流に対する人間の神経の応答特性

人間の神経を興奮させる渦電流刺激の特徴を明らかにするため、神経モデルを用いて渦電流の与え方と神経の興奮の成否の関係を調べた。具体的には、人間の有髄感覚神経である末梢神経β線維の電氣的モデルを過去の神経解剖学、神経生理学の知見に基づきできるだけ忠実に構築した上で、神経線維に活動電位の伝播を生じさせるのに最小限必要なランビエ絞輪からの漏れ電流の強度および持続時間を図1の回路に条件を変えながら与える反復シミュレーションにより算出した。シミュレーションプログラムはMicrosoft Visual C# .NET 2005で作成し、Windows XP上で動作させた。

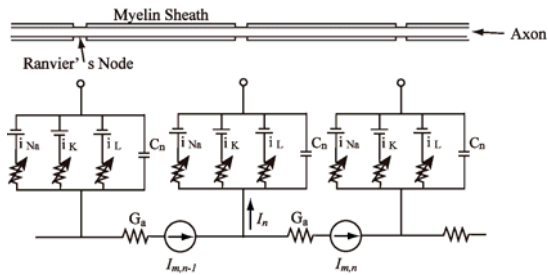


図 1 神経磁気刺激の電気回路モデル

(2) トロイダルコイルが神経に作る渦電流

トロイダルコイルに流した電流によって円環内に生じる渦電流強度を明らかにするため、シミュレーションソフトウェアによる電磁場解析を行った。解析にはFDTD法を採用している米国Remcom社製電磁場解析ソフトウェアXFDTD7.0を使用した。計算にはGPUとして米国nVidia社製計算用グラフィックプロセッサTesla C2060を搭載した計算機を使用し、Windows 7上で動作させた。

トロイダルコイルは外径6.4 mm、内径5.6 mm、断面の直径0.4 mmで巻数100、巻線は完全導体で太さは無視できるものとした。コイルの円環内には同心円状に直径5 mmの円筒が通っており、円筒は電気伝導度3 S/m、比誘電率50の細胞液で満たされているものとした。これはコイル円環内を垂直に突き抜けるように末梢神経が配置された状態を想定したものである(図2)。コイルの巻線にパルス電流を与えたとき、円筒の高さ方向に流れる渦電流の分布をシミュレーションにより算出した。

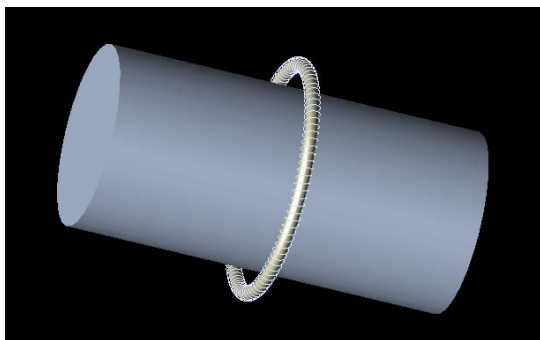


図 2 神経刺激用トロイダルコイルのモデル

4. 研究成果

(1) 渦電流に対する人間の神経の応答特性

神経線維に伝播する活動電位を生じさせるのに必要となる、ランビエ絞輪から流出する電流の電流密度とその持続時間の関係を図3に示す。末梢神経の電気刺激で通常用いられる電流印加の持続時間は、最も短い場合で100 usecである。この条件下で神経線維に活動電位を生じさせるのに必要な電流密度は18 A/m²で、神経線維の直径に依存しなかった。持続時間を短くすると必要な電流密度は反比例するように増大したが、やはり神経線維の直径の影響は受けなかった。

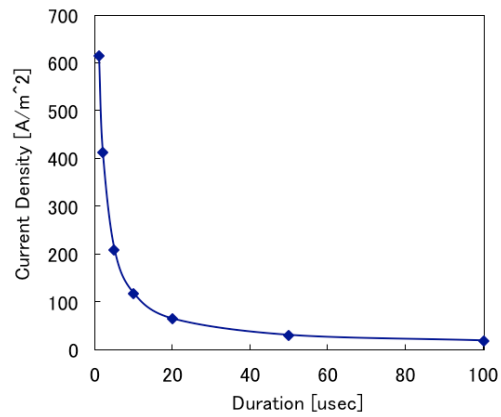


図 3 神経線維の興奮閾膜電流密度と持続時間

末梢神経の伝導検査における電気刺激は、数百本オーダーの神経線維を同時に刺激する技術の代表例である。この検査では皮膚に電極を置き、電流パルスによって神経細胞膜からの電流の流出を促進し神経を興奮させる。神経伝導検査では、同一波形の電流パルスによる刺激を行っても神経線維の直径によって興奮の成否が分かれ、細い神経線維ほど興奮しにくいことが実験的研究により知られている。また研究代表者はこれまでに計算機シミュレーションによってヒトの末梢神経β線維においてこのような現象が生じることを理論的に示している。このように太い神経線維が

優先的に刺激される現象は、細い神経線維を刺激したい場合に必要な強度の電流刺激を与えると太い神経線維が広範囲にわたって刺激されることにつながり、刺激の焦点がぼける原因となる。今回のトロイダルコイルによる神経刺激のシミュレーションにおいて興奮閾電流密度が神経線維の直径に依存しなかったことはトロイダルコイルを用いた渦電流による刺激では焦点が絞られることを示しており、局所的な刺激が実現可能であると考えられる。

(2) トロイダルコイルが神経に作る渦電流

図4は振幅0.5 mA、幅1 nsecのパルス電流をコイル左端から流したとき、円筒断面内に現れる電流密度分布の経時変化を示したものである。電流密度が高い領域は円筒の縁に沿って移動し、神経の外周付近に分布する神経線維ほど強く刺激されることがわかる。また(1)の結果より神経線維の興奮の成否が線維径に依存しないことから、トロイダルコイルの誘導電場によって円筒断面に形成された電流密度分布はおよそ、そのままの形で神経線維が興奮する範囲を表す地図となる。したがってこの例では神経の外周付近の神経線維を選択的に興奮させることになり、結果的にコイルの電流パルスがこれらの神経線維に限って伝達されることを示している。

脳の電気刺激においては多数の神経細胞の中で特定の機能を持つ細胞の集団を探索した上でその集団に絞って興奮を持続させたいという場合が少なくない。トロイダルコイルによる刺激はコイルに流す電流を変化させたり複数のコイルを組み合わせたりすることによって刺激位置を変えることができるため探索が容易なことが利点である。末梢神経においては木の枝のように枝分かれの構造を持つため神経の断面はいくつかの枝を含む場合があ

る。末梢神経の特定の枝に含まれる神経線維に限定して興奮させることも、トロイダルコイルの持つ刺激対象を領域で絞ることが可能であるという特徴に活用することにより実現可能であると考えられる。

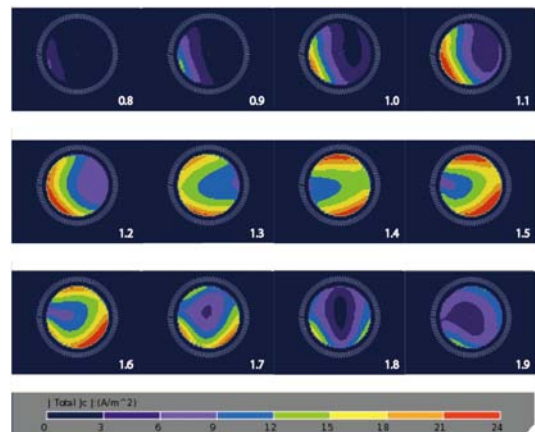


図4 トロイダルコイル円環内電流密度分布の時間変化（白字は刺激開始後経過時間 [nsec]）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計2件）

① 早見武人、村田厚生、伊良皆啓治、上野照剛、トロイドを用いた末梢神経線維の選択的磁気刺激法に関する基礎的検討、第25回生体・生理工学シンポジウム論文集、査読無、2010、pp. 493-494

② 早見武人、村田厚生、伊良皆啓治、トロイダルコイルによる神経刺激に関する基礎的検討、電気学会研究会資料、査読無、MBE-9、2009、pp. 11-14

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早見 武人 (HAYAMI TAKEHITO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・講師

研究者番号：60364113