磁気刺激による脊髄反射

Spinal Reflex Evoked by Magnetic Stimulation

上野照剛・樋脇 治

九州大学工学部電子工学科, 福岡市東区箱崎 6-10-1 (〒812)

S. Ueno and O. Hiwaki

Dept. of Electronics, Kyushu Univ., 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812

A non-invasive method of selective magnetic stimulation of the spinal roots is proposed. The basic idea is to concentrate induced eddy currents in a target by a pair of opposing pulsed magnetic fields. A figure-eight coil is positioned outside the median of the back so that time-varying magnetic fields pass through the body in the opposite directions around the target. Magnetic stimulation of the spinal roots of the human subjects and rabbits was carried out. Each spine level was stimulated selectively, producing electromyographic (EMG) waves related to both the H-reflex and M-wave. Experimental results indicate that the M-wave can be produced by currents flowing either in the rostral or caudal direction, whereas the H-reflex is generated by currents flowing in the caudal direction. The H-reflex elicited by magnetic stimulation will be useful for diagnosis of neuro-muscular system diseases.

Key words: magnetic stimulation, figure-eight coil, eddy currents, localized stimulation, spinal roots, H-reflex, M-wave

1. ま え が き

脊髄神経の機能の診断法として、脊髄反射を解析する方法がある。脊髄反射とは、刺激によって生じた求心性線維からの信号が脊髄内で遠心性線維に伝わり支配筋の筋発射を起こすものである。脊髄反射の一種である H 反射は、通常脛骨神経を電気刺激することにより遠心性の運動神経線維よりも刺激閾値の低い求心性の Ia 線維が比較的弱い刺激で興奮し、この Ia 線維を上行する信号が脊髄内で単シナプ斯的に α 神経細胞群に伝えられて支配筋に反射応答を発現するものである^{1), 2)}。

H 反射は反射弓の興奮性を反映するが、末梢神経機能検査法として最大 H 反射の大きさ、H 反射と M 波の閾値比、H 反射曲線がよく知られている³⁾。我々は、先に逆直パルス磁場対による神経の局所的磁気刺激法を提案したが、この際神経の興奮性が刺激電流の方向により変化することを明らかにした^{4), 5)}。また、この方法を用いて H

反射が誘発できることを報告した^{6), 7)}。本研究では、この逆直パルス磁場対による H 反射を誘発する方法を用いて刺激電流の方向、刺激強度の変化に対する H 反射および M 波の変化を調べた。その結果、H 反射と M 波は刺激電流の方向の変化に対して異なる応答を示すことがわかり反射弓内の興奮性についてより詳しい解析が可能であることを明らかにした。

2. 局所的磁気刺激の方法

ここでは、神経の特定部位を逆直パルス磁場対により局所的に刺激する方法について述べる。Fig. 1 に示すように 8 字形コイルを構成し体表面に設置する。8 字形コイルのそれぞれのコイルに逆向きのパルス電流を流すことにより体内に互いに逆直のパルス磁場を印加する。この逆直パルス磁場対により誘起される渦電流は逆直磁場に挟まれた部分で合流し、互いに強め合うことになる。これにより、8 字形コイルの中心の直下の標的部分の渦電流を上昇させ、神経の興奮性膜の脱分極を生じさせる。ヒトの脊髄反射を誘発する実験には銅線 5 巻線・内径 60 mm・外径 80 mm のコイルを 2 個逆直に接続した 8 字形空心コイルを用い、ウサギを用いた動物実験には銅線 5 巻線・内径 35 mm・外径 55 mm のコイルを 2 個逆直に接続した 8 字形空心コイルを用いた。逆直パルス磁場対を誘起するために容量 3000 μ F のキャパシタに蓄えた電荷を 8 字形コイルに duration 約 0.1 ms で放電した。刺激強度の強さは、コイルに誘起される最大磁束密度で表す。

3. 磁気刺激によるヒトの H 反射の誘発

我々自身を被験者として、逆直パルス磁場対による H 反射の誘発実験を行った。伏臥位の被験者の背部 S1 脊椎レベル近傍の体表面に 8 字形コイルを設置し磁気刺激を行い、腓腹筋より誘発筋電図を記録した。8 字形コイルは誘発筋電図信号が最も大きな振幅が得られる部位に固定し、刺激電流が上から下向きになるようにして刺

Fig. 1 The principle of localized magnetic stimulation of the spinal roots. A figure-eight coil is positioned on the surface of the back.

Fig. 2 The EMG responses recorded from the calf muscles of the left leg of a human to magnetic stimulation at S1 spine level.

刺激強度を変化させ誘発筋電図を測定した。

その結果、Fig. 2 に示すように刺激強度 0.72 T 付近から潜時 26 ms の陰性ピーク（26 ms 波）が出現し始めさらに刺激強度 0.85 T まで上げると潜時 18 ms（18 ms 波）の陰性ピークが出現し始めた。この 26 ms 波と 18 ms 波の振幅の変化を Fig. 3 に示す。26 ms 波、18 ms 波共に刺激強度の増大とともにその振幅は増大している。しかしながら、18 ms 波が刺激強度 0.85 T 付近から急激に増大しているのに対して 26 ms 波は刺激強度 0.91 T あたりから振幅の増大は小さくなっている。ヒトの腰部の磁気刺激により誘発された筋電図のこれら二つの波についてウサギによる同様な動物実験を行い詳細な検討を行った。

Fig. 3 Changes of the amplitude of the EMG signals of a human responded to magnetic stimulation at S1 spine level with the stimulating intensity.

4. 磁気刺激によるウサギの H 反射の誘発

ウサギの背部体表面 L7 脊椎レベル近傍に 8 字形コイルを設置し磁気刺激を行い右足脛骨屈筋に誘発される電位を双極針電極にて導出した。このとき、刺激電流の向きは上から下向きになるようにし刺激強度を変化させ誘発筋電図の変化を観察した。

その結果、Fig. 4 に示すような誘発筋電図が得られた。刺激強度 0.39 T での刺激時には潜時 8 ms に陰性ピークを持つ 2 相性の波形（8 ms 波）が得られた。この波は刺激強度を上げるとともに減衰し、刺激強度 0.81 T での刺激時に消失した。一方、刺激強度 0.47 T 以上では潜時 6 ms に陰性ピークを持つ波形（6 ms 波）が出現し、刺激強度の上昇とともに振幅は増大し強度 0.73 T 以上では飽和した。これら二つの波の刺激強度に対する振幅の変化は Fig. 5 に示すようになり、このグラフの形状と筋電図波形が 2 相性であることおよび二つの波の潜時の差が 2 ms であることより 8 ms 波は単シナプス性の H 波であり 6 ms 波は M 波であることがわかる。

この場合、H 波と M 波の潜時の違い約 2 ms は、求心性線維内を上行する信号の刺激部位からシナプスまでの伝導時間、シナプス遅れ時間、遠心性線維内を下行する信号の刺激部位までの伝導時間の和である。すなわち脊椎近傍の磁気刺激によって得られる H 波と M 波の潜時の違いおよび最大振幅の比は脊椎内の脊髄神経根および前角細胞の興奮性を反映していると考えられる。したがって、H 波と M 波の潜時の差、振幅の比の解析は脊髄神経根および前角細胞のより詳しい機能診断法になると期待される。

5. H 波を誘発する刺激部位の空間的分布

ヒトの S1 脊椎近傍において H 波を誘発する刺激部位の空間的分布を作成した。左足腓腹筋に H 波を誘発す

Fig. 4 The EMG responses recorded from the shank flexor muscles of the right leg of a rabbit to magnetic stimulation at L7 spine level.

Fig. 5 Changes of the amplitude of the EMG signals of a rabbit responded to magnetic stimulation at L7 spine level with the stimulating intensity.

るような部位に8字形コイルを刺激電流が上から下向きになるように設置し刺激強度0.91 TにおけるH波の振幅を測定した。刺激部位は格子間隔10 mmで移動させた。

その結果、左足腓腹筋にH波を誘発する刺激部位の空間的分布はFig. 6のようになった。Fig. 6の等電位線の間隔は0.2 mVである。最も大きな振幅のH波を誘発する部位は正中線より左側方すなわち誘発筋電図を測定した筋と同側30 mmの部位であった。このことよりH波を最も効果的に誘発する部位は脊髄神経が椎骨を通り抜ける椎間孔付近であることがわかる。したがって、磁気刺激により誘発されたH波は脊椎内の脊髄神経および前角細胞の機能を反映しているといえる。

Fig. 6 Mapping of the spatial distributions of H-reflexes responded to magnetic stimulation of the human nerves in a vicinity of S1 spine level which innervates the calf muscles. The curves are quantized by 0.2 mV from 0 to 1.4 mV.

6. 刺激電流の方向に対する神経の興奮性

反射波であるH波と直接的に運動ニューロンを刺激することによって得られるM波について、刺激電流の方向性および強度の変化がそれぞれの波にどのように影響するか調べた。

前述の実験と同じウサギのL7脊椎レベル近傍の刺激部位において8字形コイルを刺激強度0.39 Tから0.91 Tまでそれぞれの刺激強度において8字形コイルを30℃ずつ回転させ磁気刺激を行い右足脛骨屈筋に誘発される筋電図を双極針電極を用いて測定した。その結果、H波、M波の振幅の変化はそれぞれFig. 7およびFig. 8のようになった。H波は刺激強度0.45 Tまでは上から下向きの刺激電流に対して誘発されるが0.52 Tから0.78 Tの間では右上方および左下方に向かう刺激電流に対して誘発される。さらに刺激強度を上げるとH反射の振幅は減衰し始め刺激強度0.91 Tではほとんど消失する。一方、M波は刺激強度0.39 Tでは現れないが、刺激強度0.52 T以上では左上方および右下方に向かう刺激電流にも反応し始める。さらに刺激強度を上げ0.78 T以上の刺激強度では右上方の一方を除く全方向の刺激電流に対して同程度の反応を示すようになる。しかしながら、右上方に向かう刺激電流に対しては全く無反応であった。

前角細胞にシナプスしている神経は多様であり前角細胞に抑制性の効果を及ぼすものもあれば促進性の効果を及ぼすものもありその効果の大きさもさまざまであると考えられる。また、M波を誘発するような刺激強度では運動ニューロンを逆行性に伝導する信号が反射波と衝突しH波の振幅を減小させる。これらの異なる種類の神

Fig. 7 Effect of direction of stimulating currents at L7 spine level of a rabbit on the amplitude of the H-reflex at each stimulating intensity.

Fig. 8 Effect of direction of stimulating currents at L7 spine level of a rabbit on the amplitude of the M-wave at each stimulating intensity.

神経線維はそれぞれ異なる興奮閾値を有しており刺激電流の方向に対しても特有の興奮性を示すと考えられる。一方、パルス磁場により誘起される渦電流は体積導体中に骨のような導電率の低い物質が存在する場合、その振舞は均一導体中の場合とは異なる。したがって、Fig. 7 および Fig. 8 のような刺激電流の方向に対する H 波および M 波の反応は神経興奮の刺激電流の方向に対する特性と誘起される渦電流自身の乱れに起因していると考えら

れる。それぞれの神経線維の刺激電流に対する反応特性については現在検討中であるが、椎骨などの骨の形状に異常がない場合この H 波および M 波の刺激電流の方向に対する反応パターンは神経線維の病態の推定に有用であると期待される。

8. ま と め

ヒトおよびウサギの腰椎近傍を逆直パルス磁場対により局所的に磁気刺激を行うことにより得られる誘発筋電図中の二つの波がそれぞれ H 反射と M 波であることを確認した。H 波を誘発する刺激部位の空間分布図を作成することにより最も効果的に H 波を誘発する刺激部位は脊髄神経が椎間孔を出る部位であることがわかった。さらに H 波、M 波共に刺激電流の強度変化に伴い刺激電流の方向に対しても異なる反応パターンを示すことが明らかとなった。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金一般研究 (B) 63060113, 重点領域研究 (1) 02202130, 財団法人医科学応用財団, 財団法人吉田学術教育振興会奨励金の助成によった。

文 献

- 1) P. Hoffman: *Ergebn. Physiol.*, **36**, 15 (1934).
- 2) M. M. Gassel, P. L. Marchiafava and O. Pompeiano: *Arch. Ital. Biol.*, **103**, 1 (1965).
- 3) 例えば、藤原哲司: “筋電図マニュアル”, 金芳堂 (1984).
- 4) S. Ueno *et al.*: MMM-Intermag Conf. GR-13, Vancouver (1988).
- 5) S. Ueno *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **64**, 5862 (1988).
- 6) 楠脇 治, 上野照剛: 電子情報通信学会, ME とバイオサイバネティックス研究会資料, p. 101 (1989).
- 7) S. Ueno and O. Hiwaki: International Motor Evoked Potential Symposium (1989).

1990 年 12 月 6 日受理, 1991 年 2 月 28 日採録