

干渉波電流刺激による身体動揺低減効果の検討

大阪電気通信大学 野村 国彦

Effect of Interferential Current Stimulation on Postural Sway

by

Kunihiko Nomura

Osaka Electro-Communication University

ABSTRACT

In earlier studies of postural control system, electrical stimulation had been almost used as a disturbance to vestibular system. In this study, to consider whether an electrical stimulation method can be used as a support system for postural maintenance of human quiet standing, we developed the interferential current (IFC) stimulation device. We examined effects of IFC stimulation on center of pressure (COP) trajectory during one leg quiet standing with opened-eyes in the following conditions: 1) without stimulation, 2, 3, 4) IFC stimulations with 40, 60, 80 % sensation threshold intensities. We calculated four parameters relative to postural sway, which were corresponded to a variance of COP sway in mediolateral (ML) and anteroposterior (AP) directions (ML SD and AP SD) as “sway degree” in each direction, an area of 95% confidence ellipse for COP distribution as “swept area” and a COP trajectory path length in unit time as “average velocity”. As a result, ML SD and swept area were significantly decreased during the applied IFC stimulation at 80% sensation threshold intensity. On the other hand, AP SD and average velocity were not changed by IFC stimulation. These results suggest that IFC stimulation at sensation-subthreshold intensity may enhance a sensitivity of position sensing of knee joint. We confirmed that IFC stimulation at sensation-subthreshold intensity was effective support method for postural maintenance, especially postural sway in ML direction, during

要 旨

これまで姿勢制御に関する研究において電気刺激は主に前庭感覚への外乱として用いられてきた。本研究では、電気刺激が姿勢維持の支援として利用可能かどうかを検討するために、感覚閾値下の刺激強度での干渉波電流 (IFC) 刺激を膝関節に経皮的に印加し得る電気刺激装置を開発し、IFC 刺激による足圧中心点 (COP) 動揺の低減効果を若年健常者で調べた。30秒間の片脚立位を開眼で行い、その際、IFC 刺激なし、40% 感覚閾値、60% 感覚閾値および80% 感覚閾値強度の IFC 刺激の4条件における COP の軌跡を計測した。その結果、80% 感覚閾値強度での IFC 刺激時の COP 動揺において左右方向の動揺が有意に低減し、さらには COP 動揺面積も有意に減少した。一方で、前後方向の COP 動揺や単位時間当たりの移動距離に関しては、IFC 刺激有り無しにおいて違いは観察されなかった。試作した IFC 刺激装置による感覚閾値下の IFC 刺激が若年健常者の片脚立位時における横方向の COP 動揺を低減し、動揺面積を小さくさせる効果があることが確認された。

1. はじめに

超高齢社会を目前にした日本の社会において、高齢者の転倒事故予防・防止は、高齢者にとって QOL の高い生活を営む上で非常に大きなウェイトを占める。高齢者の場合、加齢に伴う各種感覚機能の低下が一つの要因となり、姿勢維持能力が低下する。この低下した姿勢維持能力と複雑に変化する環境要因との関係において最悪の場合、転倒事故につながると考えられている。

立位姿勢は、人間が活動する上で最も基本的で

重要な活動である。この立位姿勢は、視覚、前庭感覚および体性感覚からの求心性神経活動の情報が統合され、至適な筋出力が行われることで、適切な状態が維持される。このように、立位姿勢の維持には、入力と出力、すなわち外部の環境変化に依存したあるいは生体内部の環境変化に依存した感覚器系からの入力と、それに応答する形で適切に調節された筋張力という出力との関係が適切であることが必要となる。しかし、高齢者の場合、これら入力系および出力系ともに機能が低下するため、立位姿勢の維持が困難になってしまう。

姿勢維持をサポートする視点に立てば、これら入力系および出力系のどちらかあるいは両方をサポートし姿勢の安定性を向上させることが考えられる。出力系をサポートする場合には機能的電気刺激を用いた研究があげられる⁸⁾。機能的電気刺激は片麻痺患者のように効果器が残存しており、神経支配が正常でない場合に用いることが多い。しかし、高齢健常者の場合、主観的に刺激が高いと感じられるような電気刺激を印加することは、日常生活の中において適切ではないと考えられる。そこで、本研究では、主観的に強いと感じられるような刺激を避け、すなわち筋活動が生じるほどの強度の高い刺激を避け、感覚器系への弱い刺激により立位姿勢のサポートを実現する手法の提案を行う。

ここで、感覚機能の低下について少し考えてみる。感覚機能の低下とは、閾値型非線形特性を有する受容器の閾値上昇、すなわち受容器感度の低下によるものと考えられる。そのため、受容器感度を向上させることが、立位姿勢の安定性向上につながると考えられる。近年、足裏への振動刺激や膝関節への電気刺激印加により、高齢者の静止立位時の身体動揺は低減することが報告されてい

る^{9,17)}。これら報告では、いずれもガウス分布したホワイトノイズを用いており、この身体動揺の低減効果は、確率共振理論の下で受容器の感度が向上したためと考えられている⁵⁾。しかし、電気刺激を用いた感覚器系への刺激として、ノイズ様の刺激が受容器感度の向上のために最も有効なのかどうかは不明である。そこで、本研究は、皮膚インピーダンスを低く抑え得る干渉波電流 (Interferential current, IFC) の印加が姿勢維持に及ぼす影響を検討した。

2. 研究方法

2. 1 干渉波電流刺激の原理と刺激装置

生体に印加する電気刺激の種類は多岐に渡る。その中でも、感覚器系に働き掛けるために用いる電気刺激手法は、一般的には、パルス状の電気刺激が用いられる。この電気刺激のパルス幅に依存して皮膚インピーダンスが変化するため、通常、1msec以下のパルス幅を用いる。このパルス波をバースト状に連続させることで、刺激感を与える^{10,11)}。この手法は、筋電義手の操作性向上のために、感覚情報を代替的にフィードバックする手法として精力的に研究開発された^{2,19,20)}。しかし、通常この刺激手法を用いた場合、電極直下の皮膚表面付近にしか刺激感覚が得られない。その一方で、本研究で用いるIFC刺激は皮膚表面付近だけでなく、生体内部で刺激感覚を誘起させることが可能な手段である。

IFC刺激は、理学療法分野において電気治療等で用いられることが一般的である。これは、2組の電極対にそれぞれ異なる周波数の交流電流を通電させ、生体内部で2組の交流電流が干渉する効果を利用し、皮膚から離れた深部において刺激効果を生じさせるものである^{12,14,21)}。IFC電流刺激で用いられる周波数は中周波領域に属する4000~5000Hzがよく用いられる^{1,13)}。この周波数での交流電流を生体に通電すると、皮膚抵抗が低く、痛みも無く通電することが可能となる。電気治療では、通常、2組の交流電流の周波数は若干異なり、その差分の周波数で刺激強度が変化する手法が用いられる。

本研究では、2組の交流電流の周波数を同じ5000Hzに設定した。このように同じ周波数の交流電流を用いる場合、2組の交流電流の位相差を変化させることで、刺激効果の違いを生むことが可能となる。例えば、位相差を180度に設定すると、深部での干渉する交流電流が打ち消しあい、深部に刺激感を得ず、逆に電極直下に刺激感を感じるようになる。一方、位相差を0度に設定すると、電極直下に刺激感を感じるというよりも、深部に電気刺激感を感じることを確認している¹⁵⁾。本研究で開発したIFC刺激装置は、図1に示すように、1つの発振器、位相コントローラおよび2つの絶縁アンプで構成されている。発振器から生成された中周波交流電流をまず2つの交流電流に分配し、一方のみを位相コントローラに接続する。

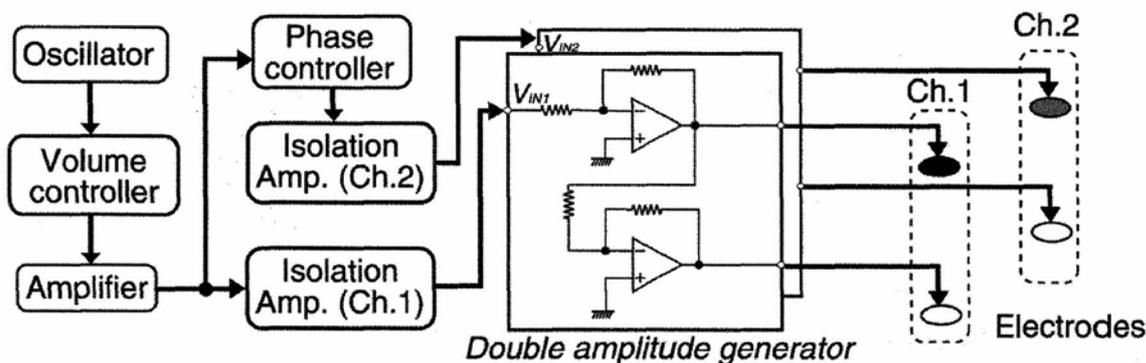


図1 電圧制御型IFC刺激装置のシステム構成

そして、それぞれを絶縁アンプにより絶縁することで2組の交流電流を生成する。本研究ではヒトに用いるため、安全性を考慮し、電圧制御型の刺激装置として試作した。

2.2 被験者

実験には、若年健常男性6名（年齢 22.3 ± 0.8 歳，身長 171.2 ± 10.4 cm，体重 66.2 ± 8.9 kg）が参加した。参加した被験者は整形外科的な異常を有さない者であった。実験参加者には事前に実験の主旨と内容について十分に説明した後同意を得た。なお、本研究はヘルシンキ宣言に則り、危険等に十分配慮して行われた。

2.3 プロトコール

IFC刺激を感覚閾値以下の強度で膝関節に印加した際の身体動揺低減効果を検討するために、最初に感覚閾値強度を計測した。まず被験者の膝関節の内側および外側に4つの刺激用の導電性粘着パッド型電極（オムロン社製，HV-F02PAD）を貼付し、2組の中周波交流電流が水平面でクロスするように刺激用電極を配置した（図2）。電極貼付後10分以上経過した後に感覚閾値を5回計測し、その平均値を感覚閾値とした。また、これら2組の中周波交流電流の強度は同じで0位相で用

いた。本研究では、1) 電気刺激なし (cont.)，2) 40% 感覚閾値強度 (40%)，3) 60% 感覚閾値強度 (60%)，4) 80% 感覚閾値強度 (80%) のIFC刺激の4つの条件を設定した。これら条件下において30秒間の片脚静止立位を各条件8回ずつ計32回行った。試行順はランダムに行った。計測と計測の間は1分以上の座位安静による休憩をとり、さらに6回毎に3分以上の休憩をとった。この休憩の取り方は、休憩前の試行がcont.条件および刺激ありの条件の別にかかわらず、同様に行った。本実験で用いた電気刺激は感覚閾値下の刺激強度のため、高位中枢での感覚情報処理は行われない前提である。そのため、刺激感の残留効果はないものとする。但し、末梢における感覚器あるいは神経への電気刺激の残留効果の有無は不明であるが、本研究では残留効果がないものと考えを行った。図3に示すように、片脚立位の姿勢については、膝関節を過伸展させることのないように指示

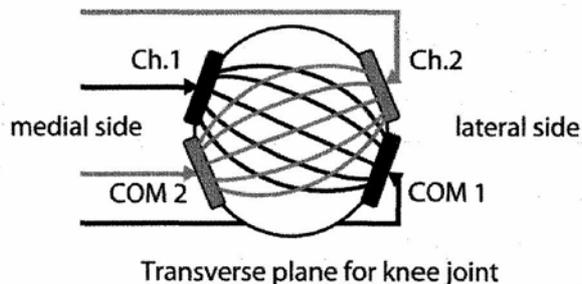


図2 膝関節と刺激用電極との位置関係

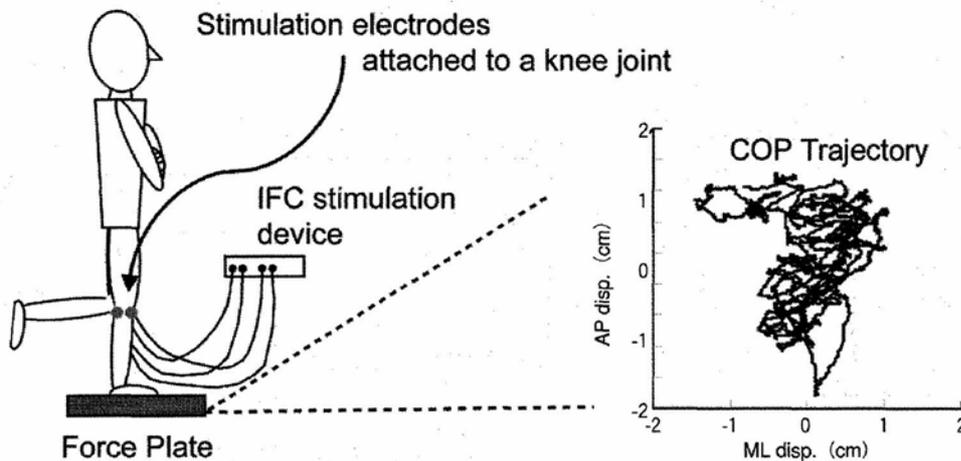


図3 実験設定の概要図

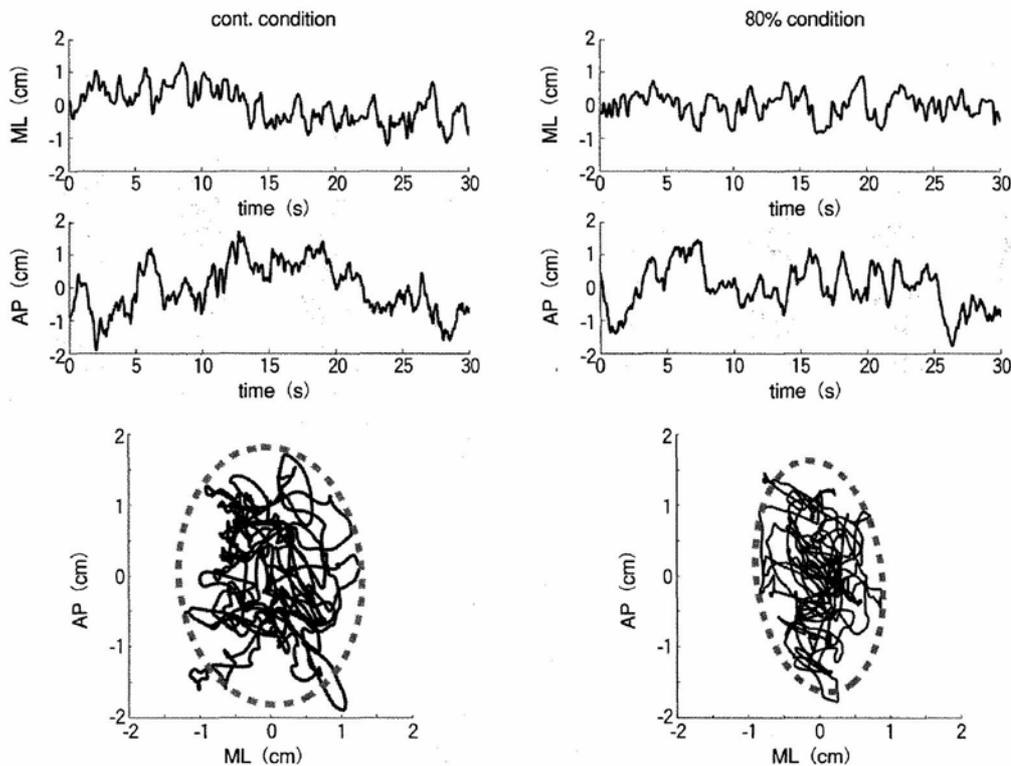


図4 電気刺激なし（左列）と80%間隔閾値強度でのIFC刺激時（右列）のCOP時系列、COP動揺軌跡の例
COP動揺軌跡図の点線は95%確率楕円を示している。IFC刺激ありのときは、ML方向の動揺が少なく、COP動揺軌跡が縦長になっている。

した。また両腕は胸の前でクロスさせ、計測中体から離さないように指示した。また、各被験者は各自の利き脚により片脚立位を行った。

2.4 計測

身体動揺を評価するために、本研究ではフォースプレート（AMTI社製、OR6-5-2000）を用いて足圧中心点（Center of pressure, COP）の動揺を計測した。フォースプレートから出力される横軸（x軸）周りのトルク（ M_x ）と縦軸（y軸）周りのトルク（ M_y ）および鉛直方向の力（ F_z ）を200Hzでサンプリングし、これらトルクと力からCOP座標を得た。

2.5 分析

膝関節へのIFC刺激印加が身体動揺におよぼす影響を評価するために、COP時系列から以下の4つの項目の評価指標について計算した。1) COPの動揺面積として95%確率楕円の面積、2) 単位

デサントスポーツ科学 Vol. 29

時間当たりの軌跡長、3, 4) 左右および前後方向の標準偏差（ML SDおよびAP SD）。それぞれのパラメータについては、一元配置分散分析のF検定で有意差があった場合、ダネットで多重比較を行った。P<0.05を統計的に有意とした。

3. 実験結果

図4は、ある被験者の電気刺激なし（cont.条件）と80%感覚閾値強度でのIFC刺激時のCOP時系列、COP動揺軌跡を示している。IFC刺激なしのcont.条件と80%感覚閾値強度でのIFC刺激時のML SDは、それぞれ、0.53cmおよび0.37cmであった。またAP方向に関するAP SDは、それぞれ、0.75cmおよび0.67cmであった。1行目の時系列の結果からはIFC刺激ありでML方向の動揺が小さくなったことが明確ではないが、COP動揺軌跡の図からは明らかである。IFC刺激を印加することで、このような傾向が全被験者に見られ、特に80%条件下でよく見られた。一方で、AP方向

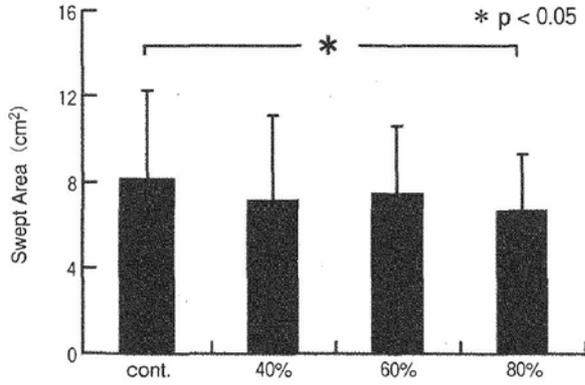


図5 95%確率楕円の面積における条件間の違い

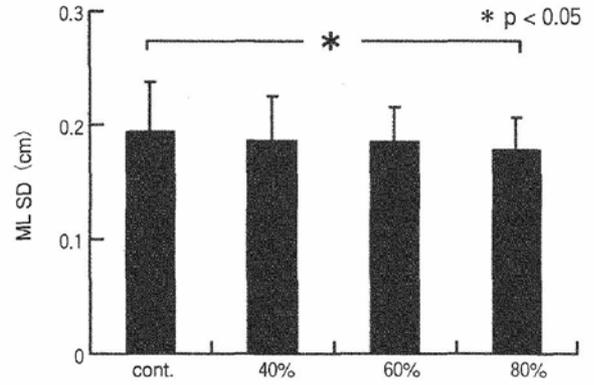


図7 ML方向の標準偏差における条件間の違い

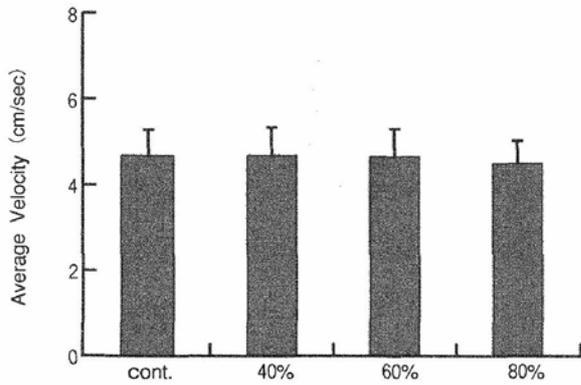


図6 各条件における単位時間当たりの移動距離

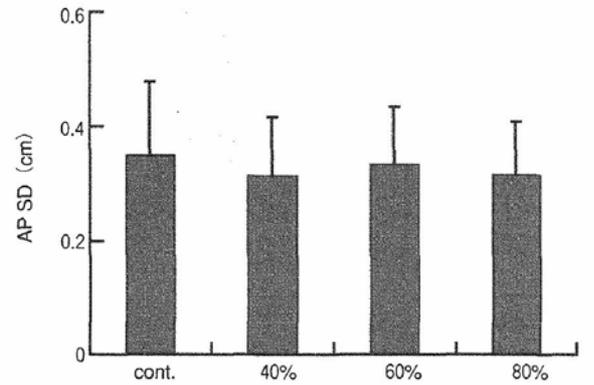


図8 各条件におけるAP方向の標準偏差

動揺に関しては、IFC刺激の有無の影響が明確には見られなかった。

図5～8は、各条件における各パラメータの平均と標準偏差を表している。動揺面積(図5)およびML SD(図7)に関して、cont.条件と80%条件の間に統計的に有意な違いが見られた。その一方で、単位時間当たりの移動距離(図6)およびAP SD(図8)に関しては、条件間で有意差が見られなかった。

4. 考察

IFC刺激の印加電圧が80%感覚閾値の場合、IFC刺激印加なしに比べ、ML SDが有意に減少し、それと同時にCOP動揺面積が減少した。一方で、AP SDには有意な違いが見られなかった。これらは、ML方向の動揺が小さくなったことで動揺面積が小さくなったことを示しており、IFC刺激にはML方向の動揺を抑える効果があることを示唆している。一方で、単位時間当たりの移動

距離については、IFC刺激との関係が見出されなかった。このことは、COPをある平衡点に維持する際に、その平衡点からのズレを修正する速度にIFC刺激は影響を及ぼさないことを示している。

これまで、立位姿勢制御の研究において電気刺激を用いたものの多くは、前庭系への電気刺激が多かった^{3,7,22)}。これらの研究では、前庭系への電気刺激により、外乱を与え、その際の姿勢動揺の変化や筋活動を評価することで、前庭系の感覚情報と姿勢制御との関係を調べるものであった。このように、電気刺激が姿勢の安定性向上といった、支援的な手法として利用されることはほとんどなかった。電気刺激を姿勢維持に対する支援的な手法として用いた数少ない研究グループとして、ボストン大学のCollinsらのグループが挙げられる^{4~6,9)}。彼らが用いた電気刺激は、通常用いられるパルス状のバースト波や正弦波状の交流電流ではなく、電流量(振幅)がノイズ様に変化するものを用いた。このノイズを印加することで、感

覚機能の向上^{4,6)} や身体動揺^{5,9)} の低減効果を報告している。

Collinsらは、印加するノイズ強度が低すぎても高すぎても真の信号の検出が悪くなり、逆にある強度において信号検出が向上する至適な強度のノイズが存在するという確率共振理論が生体に備わっていると述べている。彼らは、ノイズ様の電気刺激の効果を調べる前に、指先の触覚に対してノイズ様に変化する振動刺激の効果を調べた⁴⁾。それによると、指先に加える圧力を閾値下の検出できない程度のパルス状変化としてランダムなタイミングで与えたとき、この信号（真の信号）は当然検出されない。しかし、同時にノイズ様に変化する振動刺激を印加すると、もともと検出できなかったパルス状変化を検出できるようになるノイズ強度が存在することを報告した。これは、指先に加えられたノイズが生体機能を向上させていることを示唆している。

さらに彼らは、ノイズが外的環境からによるものだけでなく、生体内に存在してもこの現象は観察されると考え、ノイズ様に変化する電気刺激を指先に加えた際のノイズの効果を検討した¹⁸⁾。その結果、機械的なノイズと同様に、電気刺激においてもノイズの効果が認められたことを報告した。その後彼らはこの理論が身体動揺の制御にも存在するものとし、振動刺激¹⁶⁾、電気刺激⁹⁾とともにノイズ様に変化する刺激が身体動揺を低減させる効果があることを報告した。

われわれが用いた電気刺激は電圧制御型のIFCであり、印加される電圧は正弦波状に変化する。印加する電圧に関してはノイズ様に変化することはない。そして、媒質のインピーダンスが均一の場合、理論的に交差した電極対で囲まれる中心が最も電場が高くなるものと考えられる。しかし、電極対で挟まれる範囲の生体インピーダンスが均一ではないと考えられ、さらには、静止立位時に微小に変化する膝関節への力により、周辺組織に

加わる圧力も変化する。生体インピーダンスが変化した場合、流れる電流は変化する。そのため、IFC刺激により生じる生体内での電場効果は、固定の場所で、電圧と同じような振幅変化をしているという仮定は成り立たない。すなわち、実際には、電場の最も強い場所も、その強度も時々刻々とノイズ様に変化すると考えられる。これらのことから、本研究の80%感覚閾値強度でのIFCが身体動揺を低減させた効果は、確率共振理論の下で生じた現象なのかもしれない。

電気刺激の効果が身体動揺のML SDに作用したが、AP SDに作用しないという本研究の結果は、Gravelleらの報告⁹⁾と一致する。この結果は、膝の位置知覚に電気刺激が作用した結果かもしれない。Gravelleら⁹⁾と同様本研究においても、膝関節を完全には伸展させずに、フレキシブルにさせた。このことにより、身体重心のML方向への変位時に、股関節の外転・内転が生じ、結果として膝関節の外側・内側への変位が生じたと考えられる。この膝の空間的変位に対して、IFCを印加することで位置知覚の感度を向上させ、ML方向の動揺を小さくさせたのかもしれない。

本研究では、IFC刺激装置の開発とそのIFC刺激が身体動揺低減効果を有するのかを若年健常者を用いて検討した。静止立位時の姿勢制御において、若年健常者は高齢者に比べ多様なストラテジーを駆使することができると考えられる。にもかかわらず、80%感覚閾値強度のIFC刺激により動揺面積を小さくすることができた。このことは高齢者への応用可能性を示している。しかし、本研究で用いた片脚立位30秒間という試行をそのまま高齢者に適用することは困難である。今後高齢者にIFC刺激の効果を評価するためには、さらに両脚立位時に用いることが可能な装置に拡張する必要がある。このことについては、今後の課題である。また、IFC刺激が位置感覚や各種感覚器の感度を向上させた可能性を評価することも今後の

研究で明らかにしていく必要がある。

5. 結 論

若年健常者の片脚立位時のCOP動揺に対して、感覚閾値下の強度での膝関節へのIFC刺激印加は、ML方向への動揺を低減させる効果があることが確認された。これらの結果から、本研究で試作したIFC刺激装置は、日常生活内での利用が可能で、さらには、側方への転倒が多い高齢者に対する身体動揺低減効果が期待できることが示された。

謝 辞

本研究に対し助成賜りました(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 青木幹昌. 理学療法分野における干渉波療法の現状と今後の課題. 物理療法研究会会誌, 1 (1) : 15-20 (1994)
- 2) T. W. Beeker and J. During A. Den Hertog. Artificial touch in a hand-prosthesis. *Med. Biol. Eng.*, 5 (1) : 47-49 (1967)
- 3) M. Cenciarini and R. J. Peterka. Stimulus-dependent changes in the vestibular contribution to human postural control. *J. Neurophysiol.*, 95 (5) : 2733-2750 (2006)
- 4) J. J. Collins, T. T. Imhoff, and P. Grigg. Noise-mediated enhancements and decrements in human tactile sensation. *Phys. Rev. E.*, 56 (1) : 923-926 (1997)
- 5) J. J. Collins, A. A. Priplata, D. C. Gravelle, J. Niemi, J. Harry, and L. A. Lipsitz. Noise-enhanced human sensorimotor function. *IEEE. Eng. Med. Biol. Mag.*, 22 (2) : 76-83 (2003)
- 6) N. T. Dhruv, J. B. Niemi, J. D. Harry, L. A. Lipsitz, and J. J. Collins. Enhancing tactile sensation in older adults with electrical noise stimulation. *Neuroreport*, 13 (5) : 597-600 (2002)
- 7) R. C. Fitzpatrick and D. L. Day. Probing the human vestibular system with galvanic stimulation. *J. Appl. Physiol.*, 96 (6) : 2301-2316 (2004)
- 8) 藤田欣也. 電気刺激を用いた生体インタフェース. ヒューマンインタフェース学会誌, 6 (1) : 27-30 (2004)
- 9) D. C. Gravelle, C. A. Laughton, N. T. Dhruv, K. D. Katdare, J. B. Niemi, L. A. Lipsitz, and J. J. Collins. Noise-enhanced balance control in older adults. *Neuroreport*, 13 (15) : 1853-1856 (2002)
- 10) K. A. Kaczmarek, J. G. Webster, P. Bach-y-Rita, and W. J. Tompkins. Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems. *IEEE. Trans. Biomed. Eng.*, 38 (1) : 1-16 (1991)
- 11) K. A. Kaczmarek, J. G. Webster, and R. G. Radwin. Maximal dynamic range electrotactile stimulation waveforms. *IEEE. Trans. Biomed. Eng.*, 39 (7) : 701-715 (1992)
- 12) H. U. May, F. J. Nippel, A. Hansjurgens, and K. Meyer-Waarden. Acceleration of ossification by means of interferential current. *Prog. Clin. Biol. Res.*, 187: 469-478 (1985)
- 13) T. A. Mehreteab. Therapeutic Electricity. In *Physical Agents: A Comprehensive Text for Physical Therapists*, B. Hecox, T. A. Mehreteab and J. Weisberg. *Appleton & Lange, Norwalk*, pp. 255-272 (1994)
- 14) H. Nemeč. Interferential therapy: a new approach in physical medicine. *Br. J. Physiotherapy*, 12: 9-12 (1959)
- 15) K. Nomura, M. Saihara, and M. Yoshida. Development of electrical stimulation method for moving a stimulus point using interferential current. In *IFMBE Proceedings WC 2006, Vol. 14 of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, pp. 3085-3088 (2006)
- 16) A. A. Priplata, J. B. Niemi, J. D. Harry, L. A. Lipsitz, and J. J. Collins. Vibrating insoles and balance control in elderly people. *Lancet*, 362 (9390) : 1123-1124 (2003)
- 17) A. Priplata, J. Niemi, M. Salen, J. Harry, L. A. Lipsitz, and J. J. Collins. Noise-enhanced human balance control. *Phys. Rev. Lett.*, 89 (23) : 238101 (2002)
- 18) K. A. Richardson, T. T. Imhoff, P. Grigg, and J. J. Collins. Using electrical noise to enhance the ability of humans to detect subthreshold mechanical cutaneous stimuli. *Chaos*, 8 (3) : 599-603 (1998)
- 19) R. N. Scott, R. H. Brittain, R. R. Caldwell A. B. Cameron, and V. A. Dunfield. Sensory-feedback

- system compatible with myoelectric control. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 18 (1) : 65-69 (1980)
- 20) G. F. Shannon. A myoelectrically-controlled prosthesis with sensory feedback. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 17 (1) : 73-80 (1979)
- 21) E. Szehi and E. David. The stereodynamic interferential current -a new electrotherapeutic technique. *Electromedica*, 48 (1) : 13-17 (1980)
- 22) D. L. Wardman, J. L. Taylor, and R. C. Fitzpatrick. Effects of galvanic vestibular stimulation on human posture and perception while standing. *J. Physiol.*, 551 (3) : 1033-1042 (2003)