

n-GVS の印加間隔の違いが 体平衡機能に及ぼす影響に関する研究

木下史也*

A Study on the Effects of Differences in n-GVS Application Intervals on Balance Function

Fumiya KINOSHITA*

This study investigated the effects of different stimulation frequencies of n-GVS on body balance function. In the experiment, four stimulation conditions (0 Hz, 10 Hz, 30 Hz, and 100 Hz) were established and empirically evaluated using spatial indices and time-series analysis indices of center-of-pressure (COP) sway. The results showed no clear significant differences in quantitative measures such as outer perimeter area or total trajectory length. However, frequency-dependent changes were suggested in qualitative indices, including trajectory length per unit area, power spectral index, DFA scaling exponent, and translational error. In particular, a tendency toward postural stabilization was observed under the 30 Hz stimulation condition, suggesting a modification of control strategy accompanied by changes in temporal structure. In contrast, under the 100 Hz condition, an increasing tendency in postural sway and greater subjective discomfort were observed, indicating the possibility that high-frequency stimulation may exert excessive effects. These findings suggest that the effects of n-GVS are not simply manifested as increases or decreases in the magnitude of sway, but rather as changes in the temporal structure and dynamics of postural control.

1. はじめに

前庭電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation; GVS)は、両耳後に装着した電極に微弱な電流を印加することで、電流値にほぼ比例する強度の擬似的な加速度感覚や角速度を知覚させる方法である。これまでは、めまい患者における前庭機能検査として利用されてきた方法であるが、近年では VR 分野における感覚インタフェースとしても注目されている。前庭器と電気刺激の関係については古くから研究されており、18 世紀末には A. Volta によって、生体に電流を印加することでめまいが誘発されることが報告されている。2000 年代に入ると、GVS にノイズ電流を利用したノイズ GVS (n-GVS)の生理的効果に関する報告が増加し、先行研究では、n-GVS が体平衡機能の改善に有効であることが示されている[1, 2, 3]。一方、n-GVS が生体に及ぼす影響については未だ不明瞭な点が数多く、先行研究も少ない。そのため、n-GVS のメカニズムを解明するためには、基礎研究の蓄積が重要である。n-GVS に関する従来研究では、GVS としてノイズ電流を印加することまでは統一的であるが、印加するノイズ電流の時間的パラメータ、すなわち印加間隔について考慮した研究報告は数が少ない。そこで本研究課題では、n-GVS の印加間隔の違いが体平衡機能に及ぼす影響について実験を行った。

2. 方法

被検者は、健康若年男性 15 名を対象とした。本実験で使用する重心動揺計は、ユニメック社製の平衡機能計 UM-BARII を使用し、サンプリング周波数は 100 Hz とした。n-GVS に用いる前庭電気刺激装置には Neurosoft 社製の直流電気刺激装置 NEUROSTIM を使用した。この装置では、 $\pm 32,767$ の範囲にある任意の 1,024 点の時系列データを 1 Hz 分の直流電気刺激として発生することができる。本実験では統計数理研究所が公開している物理乱数をノイズ電流として入力した。

本実験では、n-GVS の印加間隔の違いが体平衡機能に及ぼす影響について調査するため、印加間隔の異なる条件下で n-GVS を印加し、その際の重心動揺を計測した。n-GVS の印加間隔は 0 Hz, 10 Hz, 30 Hz, 100 Hz の 4 条件とした。印加する電流強度はすべての実験で 300 μ A に設定し、0 Hz 印加時は電流の印加を課さないコントロール実験である。重心動揺の計測は 60 秒間の開眼検査とし、測定姿勢は立位ロンベルグ姿勢とした。測定中は被験者の目の高さに設置した 2 m 先の固視点を注視させた。本実験は順序効果を考慮し、実験条件の提示順はランダムとした。

2026年2月26日 受理

* 豊田理研スカラー

三重大学大学院工学研究科電子情報工学専攻

3. 結果・考察

はじめに、外周面積と総軌跡長では統計学的有意差は認められなかったものの、30 Hz 印加時で総軌跡長が最小となる傾向、100 Hz 印加時で外周面積が最大となる傾向が確認された。これらは仮説と概ね整合する方向性を示したが、効果量は限定的であり、被験者間変動の影響や、健常若年者を対象としたことによる天井効果の可能性も考えられる。一方、単位面積軌跡長では 30 Hz 印加時および 100 Hz 印加時で減少傾向が認められた。この指標の低下は、単位面積あたりの移動距離の減少を意味するため、動揺の空間的広がりや軌跡密度の変化を反映している可能性がある。したがって、n-GVS の印加間隔は動揺量そのものよりも、動揺の空間分布や制御様式に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

次に、時系列解析では、パワースペクトル指数およびスケールリング指数を算出した。パワースペクトル指数は概ね 2 前後で値の変動を示し、姿勢動揺がブラウン運動様の特性を有することが確認された。印加間隔の増加に伴いパワースペクトル指数が増加する傾向がみられたことは、動揺がより長時間相関を有する方向へ変化した可能性を示す。ただし有意差は明確ではなく、慎重な解釈が必要である。一方、スケールリング指数は全条件で 1.5 以上を示し、30 Hz 印加時および 100 Hz 印加時で増加傾向がみられた(図 1)。これは時間構造の持続性が增大した可能性を示すが、一般に適応的制御は 1/f ゆらぎに近づくこととされることから、本結果が直ちに最適化を意味するとは言いえない。

ここで、確率共鳴現象とは、適度なノイズの存在が感覚系の検出能を向上とする理論である。本実験では刺激強度を一定とし、時間間隔のみを操作したが、30 Hz 印加時で安定化傾向がみられたことは、前庭系の応答特性と整合する時間スケールにおいて制御効率が向上した可能性を示唆する。一方で、100 Hz 印加時では安定化効果は明確ではなく、高頻度入力が制御系の積分特性により平滑化、あるいは過剰刺激となった可能性が考えられる。これについて、本実験では各被験者に対する通電感覚閾値も確認し、印加間隔の増加に伴う通電間隔閾値の低下傾向も確認している(図 2)。この結果についても、高頻度刺激が感覚系の知覚特性に影響を及ぼしている可能性を示しており、特に、刺激強度が一定であるにもかかわらず閾値が低下したことは、短い印加間隔において神経活動の時間的加重が生じ、入力が積算された可能性を示している。したがって、n-GVS の効果を検討する際には、刺激強度のみならず時間的パラメータが感覚閾値および姿勢制御の両面に影響を及ぼすことを考慮する必要がある。

4. まとめ

本実験では、n-GVS の印加間隔の違いが体平衡機能に及ぼす影響について検討した。その結果、n-GVS の効果は単純な動揺量の増減として現れるのではなく、姿勢制御の時間構造やダイナミクスの変化として現れる可能性を示唆するものであった。また、刺激強度のみならず、印加間隔という時間的要素が姿勢制御に影響を与える重要なパラメータであることが示唆された点に、本実験の意義がある。今後は、刺激強度と印加間隔の相互作用の検討や、前庭機能低下者・高齢者を対象とした応用研究を行うことで、n-GVS の作用機序の解明および臨床応用への展開が期待される。

REFERENCES

- 1) M. Wuehr, J. C. Boerner, C. Pradhan, J. Decker, K. Jahn, T. Brandt and R. Schniepp, *Brain Stimulation*, **11** (2018) 261-263.
- 2) S. Iwasaki, Y. Yamamoto, F. Togo, M. Kinoshita, Y. Yoshifuji, C. Fujimoto and T. Yamasoba, *Neurology*, **82** (2014) 969-975.
- 3) Y. Yamamoto, Z. R. Struzik, R. Soma, K. Ohashi and S. Kwak, *Annals of Neurology*, **58** (2005) 175-181.

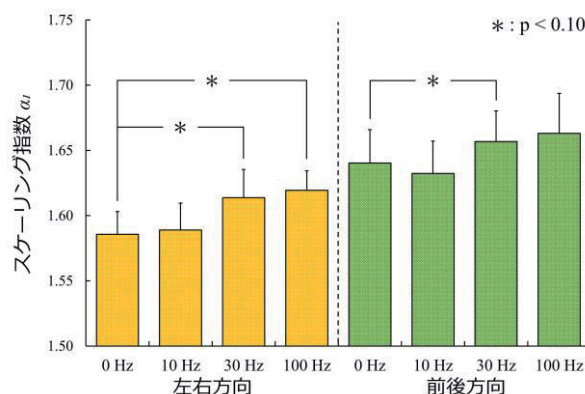


図 1 スケールリング指数の平均値 (平均値 ± 標準誤差).

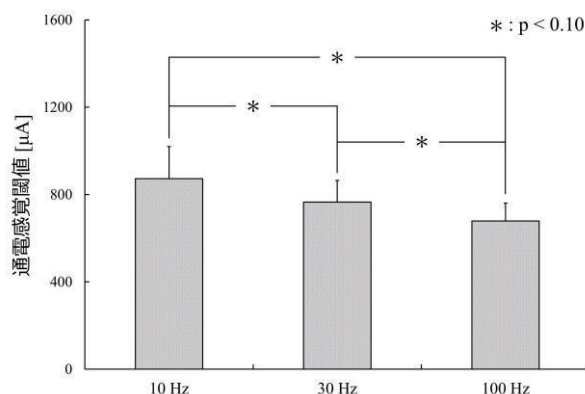


図 2 印加間隔ごとの通電感覚閾値 (平均値 ± 標準誤差).