

ルのような現象が直立姿勢の安定化に寄与している可能性もある。これらの点については引き続き調査していきたい。

F. 結論

ランダムな時間間隔でヒト脛骨神経に電気刺激を加えると、直立姿勢時の安定性が高まることがわかった。

G. 研究発表

1. 論文発表

Nozaki D, Aramaki Y, Masani K, Sato T, Nakazawa K, Yano H, Reciprocal angular acceleration of the ankle and hip joints during quiet standing in humans. *Experimental Brain Research* 136:463-473, 2001

Nozaki D, Kawashima N, Aramaki Y, Nakajima Y, Akai M, Yano H, Nakazawa K, Autonomous activity of human spinal motoneurons with less involvement of the motor cortex., submitted.

Yamamoto Y, Hidaka I, Nozaki D, Iso-o N, Soma R, Kwak S, Noise-induced sensitization of human brain. *Physica A*, in press.

Miyoshi T, Nozaki D, Sekiguchi H, Kimura T, Sato T, Nakazawa K, Yano H, Somatosensory graviception inhibits the soleus H-reflex in human erect posture

revealed by parabolic flight experiment., submitted

Masani K, Nakazawa K, Kouzaki M, Nozaki D, Ankle extensor muscle activity induced due to postural sway during quiet standing., submitted.

野崎大地、ニューロンの入出力関係を変調する確率論的メカニズム、*体育の科学* 51:203-207, 2001

2. 学会発表

Nozaki D, Nakazawa K, Principle determining activation pattern of synergistic muscles in isometric leg extension., The 31st Annual Meeting of Society for Neuroscience (San Diego, USA), 2001

Hidaka I, Nozaki D, Yamamoto Y, Only noise can sensitize human baroreflex system., The first SIAM Conference on the Life Sciences (Boston, USA), 2002

Kitajyo K, Nozaki D, Yamamoto Y, Human perception-action coupling enhanced by stochastic resonance., The first SIAM Conference on the Life Sciences (Boston, USA), 2002

厚生科学研究補助金（長寿科学総合研究事業）

分担研究報告書

高齢者の転倒防止を目的とした感覚神経への電気刺激手法の確立

-重心動揺に応じた強度の電気刺激を皮膚感覚神に与えた場合-

分担研究者 中島八十一（国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所、
感覚機能系障害研究部部長）

研究要旨 高齢者の直立姿勢保持能力を改善することを目的として、人差し指の皮膚への電気刺激を介して、身体重心動揺に関する情報をフィードバックする、という方法の効果を検討した。電気刺激（幅 1ms の矩形波）の頻度は一定（20Hz）とし、身体重心位置および身体重心速度に比例させて電気刺激強度を変調した。ところが、どちらのタイプの電気刺激であっても、こうした皮膚感覚を通じてのフィードバックは直立姿勢安定性にはほとんど寄与しないか、むしろ安定性を損なうということが明らかになった。

A. 研究目的

近年、Jeka らの一連の報告によって(J. Neurophysiol 79, 1998 など)、直立姿勢時に指などが静止物に微かに触れているだけで、直立姿勢の安定性が大幅に改善することが実証されている。彼らの主張の重要な点は、この安定性改善の効果が、静止物に触れていることによる力学的な効果ではなく、皮膚を通じて身体動揺がフィードバックされることによる神経生理学的な効果である、という部分にある。

もし、彼らの主張が正しいのだとすれば、身体重心位置情報に応じて強度が変調されるような電気刺激を皮膚感覚に与えれば、直立姿勢の安定性を向上させることが可能なのである。本分担研究の目的は、重心位置情報に依存して刺激強度が変調するよ

うな皮膚感覚刺激を人差し指に与えたときの直立姿勢安定性に効果について検討することであった。

B. 研究方法

1. 被験者

被験者は健常者(22-40 歳)10 名であった。
(倫理面の配慮)被験者には、あらかじめ研究の目的について説明し、実験参加の同意を得た。ここで用いられている電気刺激を用いた実験については、当センターの倫理委員会の承認を得ている。電気刺激の強度は高々20V 程度であり、被験者にとって痛みはほとんどないが、安全のため、常時電気刺激強度をモニタし、異常な電圧が生じた場合にはただちに電気刺激装置を停止できるような体制を整えた。

2. 直立姿勢時の身体動揺計測

床反力計(Kistler, 9281B)および高精度レーザー変位計(キーエンス, LK2500)4台からなる計測システム(Nozaki et al., Exp. Brain Res. 136, 2001)によって、直立姿勢時の微小な身体動揺を計測した(計測システム等については総括研究報告書資料1参照)。被験者には、閉眼し、リラックスした状態で直立姿勢を保持してもらうように指示した。一試行あたりの計測時間は30秒間とし、各条件について3回の計測を行った。データは100HzでA/D変換し、コンピュータに取り込んだ。

取得したデータには4次のバターワースフィルタ(遮断周波数5Hz)をかけ、平滑化処理を施した。

3. 電気刺激条件

リング型刺激電極を用い、幅1msecのパルス状の電気刺激を人差し指指先に与えた(刺激システム等は総括研究報告書資料1を参照のこと)。電気刺激頻度はプレテストによって被験者に刺激の変調が分かり易いと思われた20Hzを採用した。

我々の開発した計測システムをもちい、リアルタイムでレーザー変位計データから算出した身体重心情報に応じて電気刺激強度を変調した。用いた身体重心情報は以下の二つである。(1)身体重心速度(前後方向)に比例した強度の電気刺激を加える実験。(2)設定した平衡位置から身体重心位置までの距離(前後方向)に比例した強度の電気刺激を加える実験。

3-1. 重心速度比例条件

まず最初に被験者が刺激を感じる皮膚感覚閾値を設定した。そこで図1に示すような関数によって、レーザー変位計からリアルタイムで算出される身体重心速度に応じて、電気刺激装置の出力を変調するようにした。2通りのゲイン(2V/(m/s)、4V/(m/s))を用いた

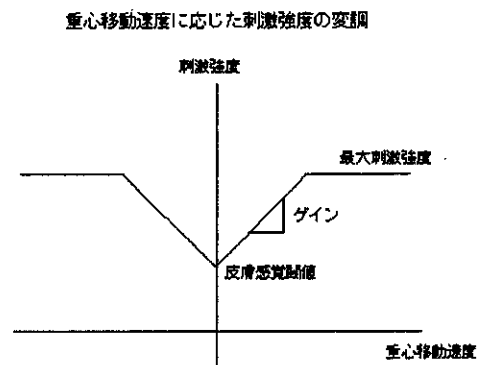


図1: 身体重心速度から電気刺激強度を決定する関数

被験者の皮膚感覚閾値を最低出力強度とし、あらかじめ決定したゲインにしたがって強度が変調される。ただし安全のため、最大刺激強度は一定の値に抑えた。

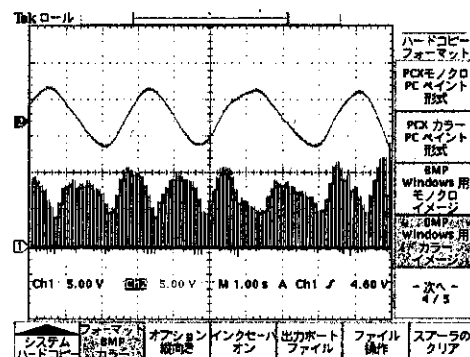


図2: 重心位置(青)と電気刺激強度(紺)の関係(重心速度制御) 重心位置の変化が大きくなるほど、刺激強度が大きくなっている。

3-2. 重心位置比例条件

まず最初に被験者が刺激を感じる皮膚感

覚閾値を設定した。また、被験者に最もリラックスして直立できる姿勢をとってもらい、そこで電気刺激強度が最低となる平衡位置を設定した(図3)。図3に示すような関数にしたがって、レーザー変位計からリアルタイムで算出される身体重心位置と平衡位置との差に比例して電気刺激装置の出力を変調するようにした。2通りのゲイン(4V/cm、6V/cm)を用いた。

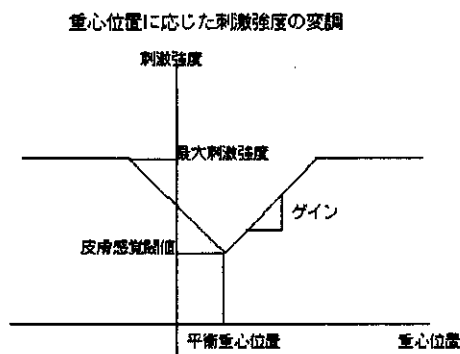


図3:身体重心位置から電気刺激強度を決定する関数
被験者の皮膚感覚閾値を最低出力強度とし、平衡位置と身体重心位置との距離差とあらかじめ決定したゲインにしたがって強度が変調される。ただし安全のため、最大刺激強度は一定の値に抑えた。

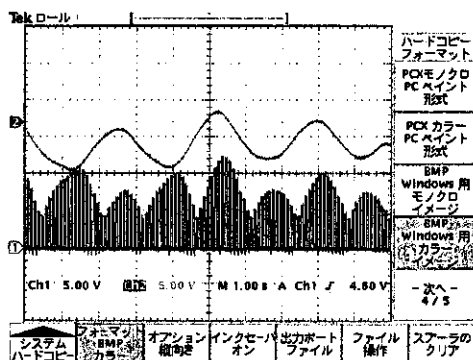


図4:重心位置(青)と電気刺激強度(紺)の関係(重心位置制御)
重心位置が平衡点から離れるほど、刺激強度が大きくなっている。

4. 直立姿勢安定性評価

野崎分の分担報告書と同様に拡散プロットを用いて、直立姿勢の安定性におよぼす、電気刺激の効果を評価した。それに加え、通常用いられる直立姿勢安定性の指標として、足圧中心動揺の前後方向成分(図5下)およびその時間微分値(図5上)から、各々の標準偏差を計算した。

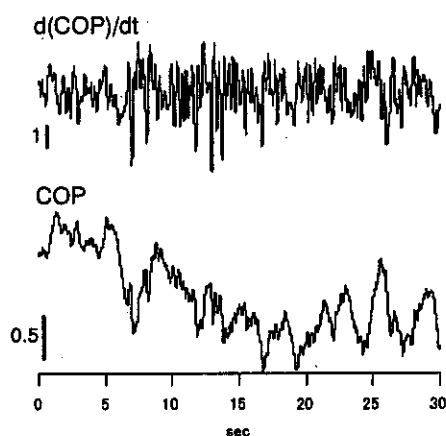


図5:足圧中心位置データの一例
30秒間のデータ。足圧中心位置(下)と時間微分したもの(上)。

C. 研究結果

図6に電気刺激を加えたときの足圧中心位置変動量(標準偏差)を示す。電気刺激によって動揺量は減少傾向にあったが、動揺量が最も減少したのは重心位置をフィードバックした刺激を加えたときであった(ただし、刺激を用いないときとの統計的有意差は無かった)。

足圧中心位置を時間微分した値(≡重心速度)の変動量は、重心速度をフィードバックしたときにむしろ増加した(図7)。一方、重心位置をフィードバックしたときには、やや減少傾向にあった。

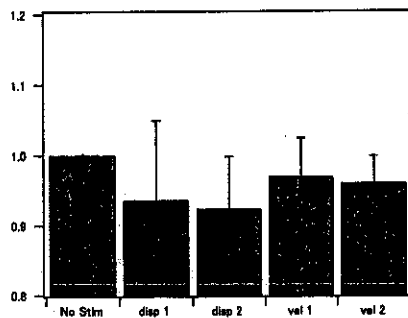


図6：直立姿勢安定性に及ぼす電気刺激の効果（足圧中心動揺の標準偏差：全被験者の平均値と標準誤差）
電気刺激無し条件での値で規格化（図7，8も同様）

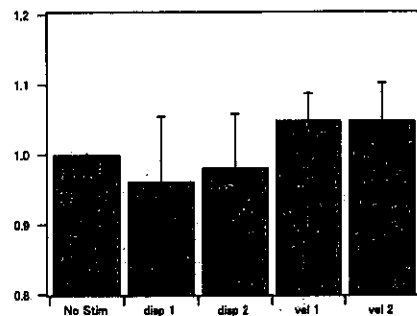


図7：直立姿勢安定性に及ぼす電気刺激の効果（足圧中心位置時間微分値の標準偏差：全被験者の平均値と標準誤差）

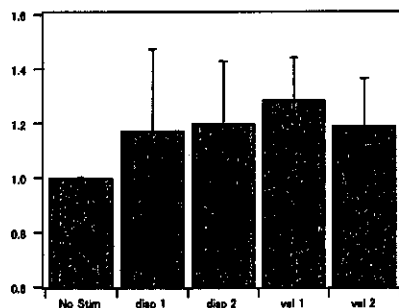


図8：直立姿勢安定性に及ぼす電気刺激の効果（拡散係数の平均値と標準誤差）

拡散係数の値は、電気刺激を用いることにより、重心位置、重心速度フィードバックの両方で増加した。

被験者の典型的な感想は、電気刺激が入

ることにより、身体の動揺がよく自覚でき、体の揺れを抑えることができた、というものであった。

D. 考察

図6, 7, 8に示すとおり、人差し指への重心情報フィードバックはほとんど効果が認められなかった。重心位置に比例したフィードバックを用いた場合には、図6に示すとおり、足圧中心動揺量そのものは減少傾向にあったが、これは、電気刺激が最も弱まるという位置がリファレンスポイントとしての役目を果たすことため、直立姿勢時にみられるドリフト(図5下段参照)が除去されることに起因すると考えられる。通常の平衡感覚試験では、足圧中心の変動量をその標準偏差で評価するため、電気刺激の効果は一見ありそうに見えるが、図8に示すとおり、拡散係数で評価すると、電気刺激の効果はむしろ直立姿勢の不安定化に働いている。

重心速度フィードバック時には、被験者は最も身体の揺れをよく自覚でき、揺れを減少できたような気がする、という感想をもっていたが、こうした感想とは逆に、拡散係数(図8)はおろか、フィードバックした変量そのものともいえる足圧中心位置の時間微分値の変動量すらも増加していた(図7)。

皮膚感覚入力に対してキーをたたくという単純反応課題での反応時間は120-200msecとされている。人差し指皮膚感覚によって身体重心情報を認知するプロセスに数十msec、下肢筋群への神経情報伝達にさらに時間を要する、と考えれば、皮膚感覚から実際の重心位置補正に至るまでのプロセスには、少なくとも

も150msec程度の時間遅れが存在するはずである。システム制御論からすると、フィードバック系でのこのような時間遅れの存在は、システムを不安定化する。電気刺激が直立姿勢の安定化にほとんど寄与しなかったという本研究の結果はこうしたフィードバック系の時間遅れの存在に起因するものかもしれない。

ただし、上記のような時間遅れの問題を解決するための方策として以下の二つをあげ、今後検討していきたい。(1)学習プロセスによる遅れ時間の短縮。(2)より複雑なフィードバック系の実装。(1)について、本研究では、重心情報に対して皮膚電気刺激の変化を十分に学習させる時間を与えていない。十分な時間をかけ、重心情報→電気刺激の変換を学習することにより、フィードバック系の遅れ時間を短縮出来る可能性がある。(2)について、本研究では、重心位置のフィードバック、重心速度のフィードバックの各々しか用いなかったが、PID制御のような制御法を実装し、制御パラメータをチューニングすることによって、遅れ時間が

ある状態でもある程度の効果が得られる可能性がある。

E. 結論

直立姿勢保持時の重心位置情報を人差し指の皮膚感覚へフィードバックさせることにより、直立姿勢を安定化できるかどうかを検討した。その結果、こうしたフィードバックは直立姿勢の安定化にほとんど寄与しないか、その時間おくれのためにむしろ安定性を損なう可能性があることが分かった。

F. 研究発表

1. 論文発表

Nozaki D, Kawashima N, Aramaki Y, Nakajima Y, Akai M, Yano H, Nakazawa K, Autonomous activity of human spinal motoneurons with less involvement of the motor cortex., submitted.

研究成果の刊行に関する一覧表

○雑誌

Nozaki D, Aramaki Y, Masani K, Sato T, Nakazawa K, and Yano H, Reciprocal angular acceleration of the ankle and hip joints during quiet standing in humans. *Experimental Brain Research* 136:463-473, 2001

Yamamoto Y, Hidaka I, Nozaki D, Iso-o N, Soma R, Kwak S, Noise-induced sensitization of human brain. *Physica A*, in press.

野崎大地、ニューロンの入出力関係を変調する確率論的メカニズム。 *体育の科学* 51:203-207, 2001

Nozaki D, Kawashima N, Aramaki Y, Nakajima Y, Akai M, Yano H, Nakazawa K, Autonomous activity of human spinal motoneurons with less involvement of the motor cortex., submitted

Miyoshi T, Nozaki D, Sekiguchi H, Kimura T, Sato T, Nakazawa K, Yano H, Somatosensory graviception inhibits the soleus H-reflex in human erect posture revealed by parabolic flight experiment., submitted

Masani K, Nakazawa K, Kouzaki M, Nozaki D, Ankle extensor muscle activity induced due to postural sway during quiet standing., submitted.

○学会発表

Nozaki D, Nakazawa K, Principle determining activation pattern of synergistic muscles in isometric leg extension., The 31st Annual Meeting of Society for Neuroscience (San Diego, USA), 2001

Hidaka I, Nozaki D, Yamamoto Y, Only noise can sensitize human baroreflex system., The first SIAM Conference on the Life Sciences (Boston, USA), 2002

Kitajyo K, Nozaki D, Yamamoto Y, Human perception -action coupling enhanced by stochastic resonance., The first SIAM Conference on the Life Sciences (Boston, USA), 2002