

地域在住虚弱高齢者に対する筋力増強トレーニングの最適負荷見極めにおける，加速度時系列スペクトルのエントロピーの有用性の検討

Evaluating the Usefulness of Power Spectrum Entropy of Acceleration Time-series in Setting the Load for High-intensity Strength Training for the Frail Elderly

小島 基永¹⁾ 大淵 修一¹⁾

MOTONAGA KOJIMA¹⁾, SHUICHI OBUCHI¹⁾

¹⁾ Tokyo Metropolitan Institute of Gerontology: 35-2 Sakae-cho, Itabashi-ku, Tokyo 173-0015, Japan. TEL+81 3-3964-3241 ext.3114 E-mail: tim888@tmig.or.jp

Rigakuryoho Kagaku 27(3): 291-296, 2012. Submitted Dec. 5, 2011. Accepted Jan. 26, 2012.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to evaluate the usefulness of power spectrum entropy of acceleration time-series in setting the load for high-intensity strength training for the frail elderly. [Subjects] Twenty-one community-dwelling elderly persons requiring long-term care. [Methods] All movements of the subjects were distinguished as good movements from poor movements by an experienced physical therapist during evaluation to set the load. The entropy of spectrum of acceleration was measured and compared between the good movements and poor movements. [Results] Significant differences were found by paired t-test analysis of the subjects ($p=0.000$, 95%CI: 0.12-0.30 bit), except for 6 subjects who performed their movements within a narrow range. [Conclusion] The current results suggest that the entropy derived from the spectrum of the acceleration time-series during movement is useful for setting the load in high-intensity strength training, as well as attention to reduced range of movement.

Key words: high-intensity strength training, smoothness, entropy

要旨:〔目的〕高齢者向けマシントレーニングで，判定者の熟練度に依らない負荷見極め方法の確立を目指し，動作中加速度の時系列スペクトルから算出するエントロピーの有用性を検討した．〔対象〕デイサービス利用者21名とした．〔方法〕運動指導者による負荷見極めによる判定が，良好である動作と不良である動作それぞれにおいて算出したエントロピーを比較した．〔結果〕動作の範囲が負荷の増大とともに小さくなった6名を除いた比較で，不良と判定された動作において，統計学的に有意に大きなエントロピーが認められた．〔結語〕運動指導者による動作範囲の低下への注意に，このエントロピーを組み合わせると，より定量的な評価に基づく負荷の見極めが可能になる．

キーワード: マシントレーニング，運動の滑らかさ，エントロピー

¹⁾ 東京都健康長寿医療センター研究所 福祉と生活ケア研究チーム (在宅療養支援): 東京都板橋区栄町35-2 (〒173-0015) TEL 03-3964-3241 (内線3114)

I. はじめに

平成18年度に介護保険制度が予防重視型へと改正されて以来、マシンを使用した高齢者向けの包括的な運動トレーニングは、介護予防事業における有力なプログラムとして、通所の事業所を中心とした全国の施設で展開されており、その効果も確認されてきている¹⁾。

ところで、このプログラムの典型的なプロトコルに於いて、最適な負荷量の見極めは、理学療法士や運動指導員などの運動指導者による評価に依っている。こうした評価に関するマニュアル²⁾はあるものの、関わる運動指導者の熟練度によって、その評価の確からしさが変動する可能性がある。また、厚生労働省の運動器の機能向上プログラムに関する指針³⁾においても、幅広い事業主体によって展開されるプログラムでは、その内容が適切なかたちで実施されることが課題であるとされている。特に、マシンを使用した高齢者向けの包括的な運動トレーニングは、フィットネスクラブといった一般の健康増進施設にも拡がりをみせており、必ずしも熟練した運動指導員が現場に配置されていないことが考えられ、運動指導者の熟練度に左右されない、最適な運動負荷量の見極め方法の確立が必要である。

最適な負荷量決定のための評価は、負荷の増加に伴って生じる動作の円滑さの低下などから判断される。我々はこれまで、動作中の加速度の時系列スペクトルから算出するエントロピーには、対象となる動作の円滑さの低下に伴ってより大きな値を示す性質があることから、これを活用することの有用性を報告³⁾している。このエントロピーによる指標をマシントレーニング動作に適用すると、負荷量の最適値超過に伴い動作の円滑さが低下する状態を、より大きな値として表すことができると考えられ、これが負荷見極めの指標として役に立つ可能性がある。

そこで本研究では、運動指導者の熟練度に左右されない負荷見極め方法の確立を目指して、従来の負荷見極めの手順に、エントロピーによる動作の円滑さを示す指標を加えることの有用性を検討することとした。

II. 対象と方法

1. 対象

東京都区部にあるAディサービスの利用者21名（男性8名、女性13名、平均年齢 $\pm 1SD$: 78.8 ± 6.4 歳）を対象とした。対象者の要介護度は、要支援1が3名、要支援2が6名、要介護1が4名、要介護2が6名、要介護3が2名であった。また、対象者の平均トレーニング歴 $\pm 1SD$ は、 26.0 ± 17.3 ヶ月であった。

なお、対象者には、研究の主旨と内容を説明し、その同意を文書によって得た。また、本研究の計画は、東京

都健康長寿医療センター研究部門倫理委員会の承認（承認番号平成22年度11番）を得た。

2. 方法

トレーニングマシンには、プログラムの中でも特に重要であると位置づけられ、また運動指導者による判定が負荷見極めの中心的な役割を果たすレッグプレス・マシン²⁾を使用した。このマシンの重錘部分に加速度計(CXL04GP1, クロスボー社製, 測定範囲 $\pm 4G$)を、トレーニングマシンから生じる機械的な振動の影響を取り除くための防振ゴムと共に取り付けした上で、運動指導者1名（理学療法士：専門職としての経験年数20年、高齢者向けマシントレーニングに関する経験年数8年）によるトレーニングの最適負荷見極めを行った。

運動指導者による最適負荷見極めの判定基準は、標準的なマニュアル²⁾に則った。まず1RM(1回の最大挙上力)テストを実施し、次に1RM値の60%を最適負荷量とした。1RMテストでは、“力を入れてから動き出すまでの時間が明らかに遅くなる”、“上げるときと下ろすときの速さが違う”といった状態が出現したら、これを不良なトレーニング動作であると判定し、不良動作が出現するまでの良好な動作における負荷量の最大値を1RM値とした。また、“呼吸について指示しても息をとめていきんでしまう”、“正しいフォームで行うことができない”、“痛みや違和感を訴える”といった場合は即座にテストを中止し、やはり、こうした状態が出現するまでの負荷量の最大値を1RM値とした。なお、負荷見極めテストを受ける対象者の条件を、“トレーニングの基本的な技能を修得していること”、“高負荷トレーニングへの適応が可能であること”としており、どの対象者も連続20回程程度の運動トレーニングには慣れていたが、対象者の疲労による影響を避けるため、負荷見極めのための1RMテストの回数は、最大でも6回を超えないように計画した。

加速度情報は、5 Hzの高域遮断フィルタを用いた100 Hzのサンプリング周期にて採取した。採取した加速度情報から、動作の中間にあたる7秒間について、ハニングの窓関数を用いた高速フーリエ変換によって時系列スペクトルを求め、この第1成分を除く5 Hzまでの成分を正規化したものからエントロピーを算出した。具体的には、この正規化した時系列スペクトルの各要素を i とし、各要素の成分量を P_i とした場合、エントロピー(H)は、 $H = -\sum (P_i \times \log_2 P_i)$ より求められる。なお、取り得るエントロピーの最大値は、算出に用いる時系列スペクトルの要素数(N)で一義的($\log_2 N$)に決まり、この場合、要素数は34で5.09 bitであった。

また、本研究で使用したトレーニングマシン(リハトレーナー、システム・インスツルメンツ、東京)には、重錘の最大移動量である250 mmに対して、1/16 mmの分解能で、その移動量を検出できるロータリエンコーダがつ

いており、トレーニング動作の範囲を定量的に得るために、100 Hzのサンプリング周期でこの位置情報も収集した。ここで、各個人の最大動作範囲を100%としたときの当該トレーニング動作範囲の割合を、動作維持率と定義した。

統計解析としては、まず、運動指導者により良好と判定された動作と、不良と判定された動作の間の相違を、それぞれで算出されたエントロピーの値について、対象者毎の対応のあるt検定を用いて検討した。この検討にあたって、負荷見極めで同じ範疇にはいる動作が2つ以上あった場合には、それらのエントロピー値の平均を代表値とした。続いて、得られた全てのトレーニング動作について、“良好判定”と“不良判定”を従属変数、“エントロピー”と“動作維持率”を独立変数とする、強制投入法によるロジスティック回帰分析を行い、負荷見極めのための判別予測式を検討した。

さらに、実施されたマシントレーニング自体の有効性を確認し、本研究での負荷見極めの妥当性を検討するた

めに、負荷見極めを挟んだ3ヶ月間の運動能力（握力、片脚立ち、Timed-up-and-go、歩行時間¹⁾の変化を把握した。

全ての統計解析の有意水準を、5%とした。

III. 結 果

対象者毎に実施されたトレーニング動作の回数は最大でも5回に留まっており、疲労による影響を考慮して計画した6回を下回る動作回数で判定が付けられた。

対象となった21名の結果一覧を表1に示す。21名における対応のある検定では、良好と判定された動作（エントロピーの平均値±1SD：3.37±0.32 bit）に比べて、不良と判定された動作（エントロピーの平均値±1SD：3.47±0.32 bit）で、統計学的に有意に大きなエントロピー値が認められた（p=.049）。

21名のうち、“不良と判定される動作で動作の円滑さが低下しエントロピー値が大きくなる”という仮説に反

表1 対象者毎のエントロピー値と動作範囲維持率

ID	判定良好時 エントロピー (bit)		判定不良時 エントロピー (bit)		エントロピー の差 (bit) B - A	動作範囲 の維持率 (%)	要介 護度	主な既往
	A	度数	B	度数				
1	3.06	2	3.42	2	0.36	84.9	支援2	
2	3.30	4	3.02	1	-0.28	82.9	支援1	
3	3.24	1	3.53	1	0.29	98.7	介護2	脳卒中
4	3.75	2	3.73	1	-0.02	85.9	支援2	腰痛
5	3.44	3	3.27	1	-0.17	85.4	介護2	
6	3.90	2	3.96	2	0.06	89.5	介護1	腰椎脊柱管狭窄症
7	3.33	3	3.34	1	0.01	91.4	介護1	
8	3.33	3	3.77	1	0.44	92.9	支援1	左膝人工関節
9	3.43	2	3.33	2	-0.10	79.7	支援2	パーキンソン病
10	3.47	2	3.62	2	0.15	91.1	介護3	脳卒中
11	2.86	1	2.94	1	0.08	92.4	支援2	
12	3.53	2	3.63	3	0.10	88.9	介護2	
13	3.84	1	3.88	1	0.04	95.6	介護3	脳卒中
14	2.73	3	3.27	1	0.54	90.0	介護2	
15	3.64	3	3.30	1	-0.34	86.7	介護2	脳卒中
16	3.71	4	3.96	1	0.25	84.1	介護2	
17	3.61	3	3.73	1	0.12	90.9	介護1	脳卒中
18	3.11	2	3.31	1	0.20	85.0	支援2	
19	3.09	4	3.25	1	0.16	88.9	支援2	
20	2.96	2	2.89	3	-0.07	85.5	支援1	
21	3.49	3	3.85	2	0.36	91.4	介護1	左膝ACL断裂

※エントロピーは、度数（同じ範疇に判定された動作）が2つ以上の場合は、その平均を代表値として示した
 ※動作範囲維持率：本人が示した、トレーニング動作の最大範囲に対する最小範囲の割合
 ※主な既往については、把握できたものだけを示す

して、不良と判定された動作でより小さなエントロピー値を示した6名(表1で、エントロピーの差がマイナスになっている者)では、負荷量の増大に伴ってトレーニング動作の範囲が最大値に比べ最小値で平均84.3%低下しており(仮説通りの結果を示した15名における低下の平均は90.4%であった)、動作範囲に縮小がみられた。

これら6名を除く15名における、負荷見極めで良好と判定された動作(エントロピーの平均値 \pm 1SD: 3.35 ± 0.34 bit)と、不良と判定された動作(エントロピーの平均値 \pm 1SD: 3.56 ± 0.30 bit)の間の対応のある検定ではやはり、不良と判定された動作で、統計学的に有意に大きなエントロピー値が認められ($p=.000$)、この時の95%信頼区間は、0.12~0.30 bitであった。

負荷見極めのためのトレーニング動作は、対象者全てを合わせると82回(良好と判定されたものは52回、不良と判定されたものは30回)であった。得られた全てのトレーニング動作82回における、“良好判定”と“不良判定”を従属変数、“エントロピー”と“動作維持率”を独立変数とした、強制投入法によるロジスティック回帰分析では、動作維持率のみが有意($p=.000$)な予測式、 $x = 17.765 + (-0.196 \times \text{動作維持率})$ が、判別の中率74.4%で算出された。すなわち、動作維持率が90%と91%の間に、良好判定と不良判定の境界があることが示された。

さらに、この結果を受けた追加的な解析として、動作維持率が91%以上であったトレーニング動作($n=57$)を対象に、良好($n=42$)・不良判定($n=15$)間のエントロピー値をMann-WhitneyのU検定で比較したところ、良好(中央値: 3.41, 四分位範囲: 0.52)、不良(中央値: 3.67, 四分位範囲: 0.49)で、不良と判定された動作で大きな値を示す傾向であったが、統計学的に有意な差はみられなかった($p=.060$)。

また、対象となった者のうち、本研究の期間中にディサービスで定期的に行われている体力測定の時期を迎えた10名(表1のID1~10)について、負荷見極めを挟んだ3か月間の運動能力の変化を把握できた。その結果、Timed-up-and-goと、5m最大歩行時間の対応のあるt検

定において、統計学的に有意な改善が認められた。運動能力の結果の一覧を表2に示す。

IV. 考 察

我々はこれまで、動作中の加速度の時系列スペクトルを正規化したものから算出するエントロピーが、動作を微調整するための高周波成分が加わる(すなわち、動作の円滑さが低下する)ほど、大きな値でその動作の性質を示すことを報告し、動作の円滑さを客観的に表現できる指標として有用であることを報告するとともに、例えばこれを、歩行動作の評価に適用する⁴⁾などしてきた。

このエントロピーによる指標は、加速度の時系列スペクトルが得られる動作であれば、どのようなものでも適用が可能であるという特徴を持っており³⁾、本研究ではこれをトレーニング動作に適用した。適応の典型例として図1を示す。これをみると、不良と判定された動作では、良好と判定された動作に比べて、低い周波領域の成分量が減少しているとともに、より高い周波数領域の成分量が增大している。その結果、不良と判定された動作において、より大きなエントロピー値が算出されていることがわかる。

筋力を中心とした運動能力が負荷の増加に追いつかない場合、動作の円滑さを低下させたり、求心相に比べて遠心相を速くするような“破綻”した動作がみられるが、この他に、その動作の範囲を小さくして、動作の円滑さを保つような代償もみられる¹⁾。今回の結果において、負荷の増加に伴い、不良であると判定された動作をしていたにもかかわらず、良好である場合よりも小さな値(すなわち、より円滑な動作である)として、エントロピーが算出されるという逆転を示していた6名については、トレーニング動作の範囲が85%以上に狭まっていたことから、このような代償を行っていたものと考えられた。運動指導員は、このトレーニング動作の範囲の減少から“不良動作”であると判断していたものと考えられる。

動作範囲の縮小による代償をしていない対象において

表2 運動能力の結果(対応のあるt検定, $n=10$)

	事前測定		事後測定	
	平均値	1SD	平均値	1SD
握力(kg)	22.1 \pm 3.5		22.6 \pm 4.0	
開眼片脚立ち(sec)	16.0 \pm 17.5		21.1 \pm 25.6	
Timed-up-and-go(sec)	12.1 \pm 3.6		10.2 \pm 3.1	※※
5m通常歩行時間(sec)	7.1 \pm 1.9		6.8 \pm 1.0	
5m最大歩行時間(sec)	5.5 \pm 1.8		4.6 \pm 1.5	※※

※※: $p<.01$

本研究における負荷見極めを挟んで、事前測定、事後(3か月後)測定とした。

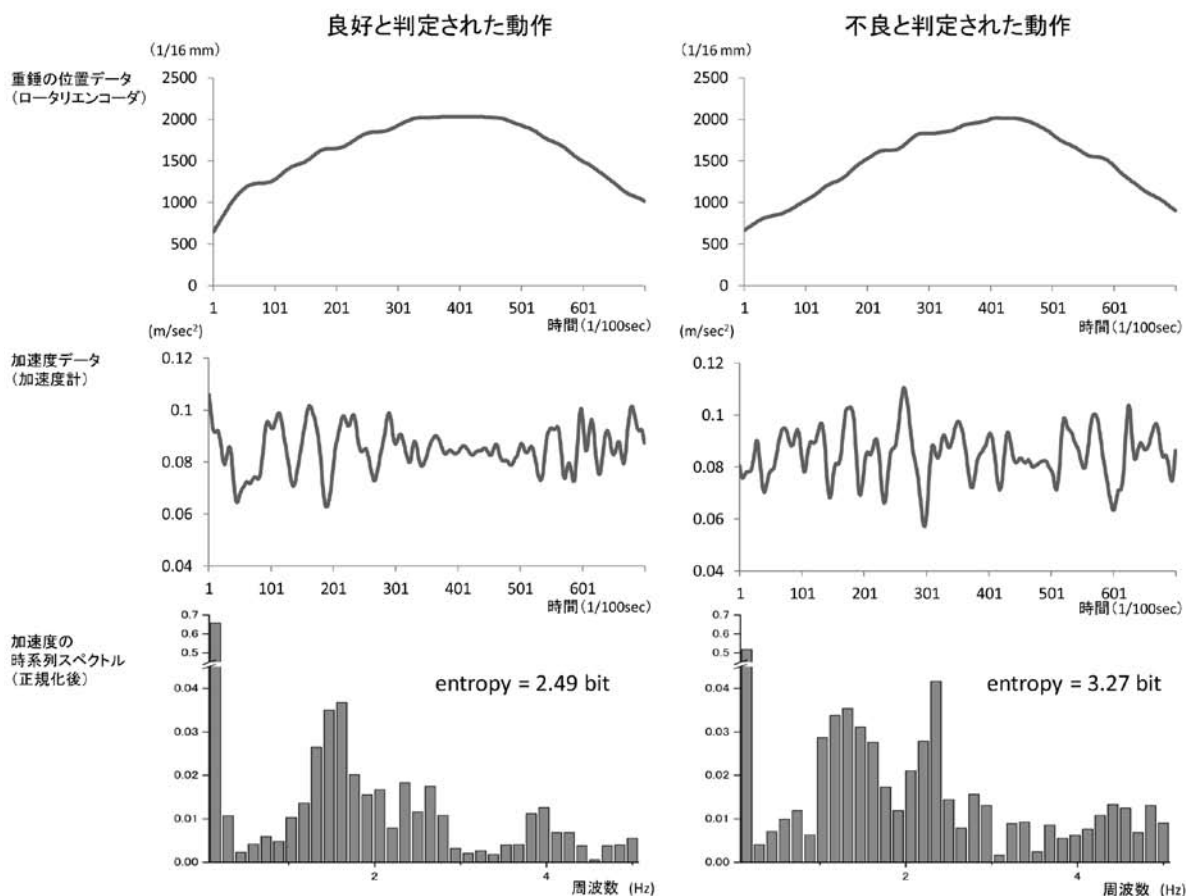


図1 典型的な例におけるエントロピー算出

ある対象者で、良好と判定された動作と不良と判定された動作のそれぞれについて、重錘の位置データ（ロータリエンコーダから得られるデータ）を示すとともに、この時のそれぞれの加速度情報（加速度計から得られるデータ）ならびに、その時系列スペクトル（5 Hz までの成分の和が1になるように正規化し、第1成分を除いたもの）を示した。

みられた、前述の様な破綻した動作については、今回の結果から、エントロピーによる指標で、その破綻した状態を表現できる可能性（95%信頼区間でみると、0.12 bit 以上の変化で表現できる可能性）が認められた。従って、運動指導者による動作範囲の減少への注意に、このエントロピー指標を組み合わせると、より定量的な負荷の見極めが可能になるものと考えられる。

これまででも、観察による動作分析には、評価者に対する訓練が必須であり、また、訓練された評価者が何を診ているかは研究によって裏付けておく必要がある⁵⁾とされている。本研究における典型例として示した図1をみても、ロータリエンコーダから得られる重錘の位置データだけでは、動作不良の明快な説明が難しく、運動指導者はこれに対象者の実際の動き（加速度や動作範囲）を併せて判断していたものと考えられるが、今回、これを数値化できた意義は大きい。

また、本研究の対象者は、ディサービスを継続的に利用する者であったが、3ヶ月間の運動能力の変化を把握した限りで見ると、一般的に紹介されている例¹⁾と比較

しても、遜色のない効果がプログラム自体にみられると考えられ、ここで実施された負荷見極めも妥当なものであったと推察できる。

ところで、負荷見極めの予測式を検討した結果では、動作維持率でのみ“良好なトレーニング動作”と、“不良なトレーニング動作”の間の閾値が示された。エントロピーにおいては、対象者毎の対応のある検討では有意な差が認められているにもかかわらず、この閾値に該当する値が示されていない。追加的に解析した、動作維持率が91%以上であった動作のエントロピーに対する検討でp値が0.06であったことから推すと、これは第一に、本研究の対象数が十分ではなく統計学的に証拠不足である可能性が考えられる。そして第二に、本研究の対象者が、筋力向上トレーニングプログラムで主たる対象として想定されている者とは少し異なり、要介護者が中心であったことが影響しているものと考えられる。要介護状態にある者は、多かれ少なかれ、脳卒中の後遺症やパーキンソン症状などを明らかに抱えていることが多く、実際に本研究の対象者も同様であった（表1）。こうした者では、

最良のトレーニング動作が既に円滑ではなく、良好・不良の判定が、対象者毎の相対的な基準に則って行われた可能性がある。従って今後は、介護予防地域支援事業における一次予防あるいは二次予防の対象者を中心に、例数を増やして検討していくことが必要である。

以上で述べたような課題はあるものの、今回の結果からは少なくとも、加速度時系列スペクトルから算出するエントロピーを用いると、個人内でのトレーニング動作の変化を相対的に捉えることができると考えられた。エントロピーは、重錘に取り付けた加速度計をパーソナルコンピュータに連結しておくことで、トレーニング動作を行ったその場で直ちに算出が可能である。また加速度計は、携帯電話など身近な機器に多く組み込まれている昨今の状況から比較的安価で入手できる。従って、この成果を臨床に活かすとすれば、トレーニング動作範囲の監視とエントロピー値の変化を組み合わせた判定基準、すなわち、動作範囲の最大時の90%以下の縮小と、エントロピーの0.12bit以上の増加を、新たな判定基準として、これまでの最適負荷見極めの手順に加えることが考えられる。これは、負荷見極めが運動指導者の経験に左右されがちであるという懸念の払しょくへ繋がるものと考えられ、延いては、超高齢社会である今日、介護予防に対するニーズに応えるために、一般健康増進施設も含めて広く採用されている、高齢者向けの包括的な筋力向上プログラムの質を保つことに貢献できるであろうと考えられた。

謝辞 本研究は、システム・インストゥルメンツ株式会社との共同研究の一環として行われた。プロダクト部の秋場猛様、西澤勉様、鶴嶋善久様をはじめとして、ご協力いただいた皆様に深謝いたします。また本研究は、平成23～25年度科学研究費補助金(No.23650363)の一部を活用した。

引用文献

- 1) 大淵修一：運動器の機能向上マニュアル（改訂版）。厚生労働省老健局 運動器の機能向上マニュアル研究班，2009。
- 2) 大淵修一，佐竹恵治：介護予防 包括的高齢者運動トレーニング。健康と良い友達社，東京，2004。
- 3) Kojima M, Obuchi S, Mizuno K, et al.: Power spectrum entropy of acceleration time-series during movement as an indicator of smoothness of movement. *J Physiol Anthropol*, 2008, 27(4): 193-200.
- 4) Kojima M, Obuchi S, Henmi O, et al.: Comparison of smoothness during gait between community dwelling elderly fallers and non-fallers using power spectrum entropy of acceleration time-series. *J Phys Ther Sci*, 2008, 20(4): 243-248.
- 5) Götz-Neumann K (月城・他 訳)：観察による歩行分析。医学書院，東京，2005。