

エキセントリックトレーニングにおける動作速度維持を促す 聴覚フィードバック手法の保持効果検証

大石 琉翔¹ 中村 聰史¹

概要：筋肉が収縮した状態から伸ばして行うエキセントリックトレーニングでは、ダンベルなどの重量を3~5秒かけてゆっくり下ろすことがトレーニング効果を高めるうえで重要である。しかし実際のトレーニングでは、筋疲労によって動作が徐々に速くなり、適切な速度を維持することが難しい。そこで本研究では、我々がこれまで提案してきた速度に基づく効果音フィードバック手法の長期的な効果、さらにフィードバックがなくなった状態でもその効果が保持されるかを実験により検証した。実験参加者は1ヶ月間にわたりフィードバックシステムを用いたトレーニングを継続し、各週にはフィードバックなしでの動作測定も実施した。その結果、システムの継続使用によりフィードバックがない状態でも動作時間の延長とばらつきの減少が確認され、効果音フィードバックによって動作制御が保持されることが示された。

キーワード：エキセントリックトレーニング、筋力トレーニング、聴覚フィードバック、効果音、長期実験

1. はじめに

20代から30代を中心に筋力トレーニング（以下、筋トレ）への関心が高まり^[1,2]、実施人口も増加している^[3]。筋トレは健康や美容の維持^[4]を目的として幅広い世代に支持され、ジムや自宅など多様な環境で行われている。

筋トレの実施方法としては、トレーニング指導者による指導のもので行う形式だけでなく、自宅やジムにおいて個人で自由に行う形式も一般的である。こうしたなか、エニタイムフィットネス^{*1}やchocoZAP^{*2}といったセルフ型ジムの普及によって、ひとりで筋トレを行う機会が増加している。ここで、ひとりで筋トレを行う場合、適切なフォームや動作速度を維持することが難しく、トレーニングの効果を十分に引き出すのが容易ではない。例えば、フォームの崩れにより狙った部位以外の筋肉を使ってしまうことや、本来一定の速度を維持すべき運動で動作速度が速くなってしまうことが問題として挙げられる。特に、筋肉を伸長させながら力を発揮するエキセントリックトレーニングでは、適切な速度で動作を行うことがその効果を高めるうえで重要である。しかし、ひとりで行う場合にはその速度を一定に保つことが難しくなるため、効果的な支援が必要である。

この問題に対し、我々はこれまでの研究^[5,6]で、ダンベルカールにおけるエキセントリックトレーニングの動作速度を安定させることを目指し、効果音を用いたフィードバック手法を提案してきた。この手法は、速度に基づいてフィードバックを行うもので、具体的には動作速度が適切であればエネルギーを蓄えるような「チャージ音」を鳴らし、速い場合には速度を緩めるように促す音を鳴らす。実験により、フィードバックがない条件や腕の位置に基づいたフィードバックと比較して、適切な動作速度を維持し、安定して動作できることが明らかになった。

ここで、運動学習の分野ではフィードバックに依存しすぎると学習者が自身の感覚による調整を行わなくなり、フィードバックがない状況で動作の精度が低下することが指摘されている^[7]。これはガイダンス仮説として知られ、高頻度でフィードバックを与えると、学習効果の保持だけでなく、異なる速度や動作への応用が低下することも示されている^[8]。そのため、フィードバックによって一時的に改善された動作が、フィードバックがない状況でも維持できるかを評価することが重要である。

そこで本研究では、短期的な使用で効果が示された効果音フィードバックに対して、長期的な使用によってその動作がフィードバックなしでも保持されるのかどうかを検証する。具体的には、週2回の頻度で1ヶ月間トレーニングを実施し、その過程において動作がどのように変化し、フィードバックなしの状況でも維持されるかを評価する。

¹ 明治大学
Meiji University

^{*1} <https://www.anytimefitness.co.jp/>

^{*2} <https://chocozap.jp/>

2. 関連研究

2.1 筋力トレーニングの支援に関する研究

筋トレの支援は、従来からさまざまな観点でアプローチされてきた。まず、トレーニングフォームの改善を目的とした研究では、動作を視覚化して適切な姿勢へ導く手法が用いられている。高久ら[9]は、Kinectによって骨格を推定し、腹筋運動のフォームを視覚的に提示することで、初心者でも正しい姿勢を習得できることを明らかにした。また、Khanら[10]もスポーツ動作をリアルタイムに解析し、フォームの誤りを自動検出することで改善につながることを示している。さらに、Chenら[11]は関節推定技術と機械学習を組み合わせることで、フォームの適正度を判定し、具体的な改善点を提示する仕組みを開発した。また実験により、4種目でフォームを高精度に分類し、フォームの改善の有効性を示している。

一方、モチベーションの向上を目指すアプローチとして、トレーニングにゲーミフィケーション要素を取り入れる研究も行われている。深堀ら[12]は、自宅での筋トレにゲーム要素を導入することで継続意欲を高められることを示し、Yangら[13]は、体幹トレーニングにゲーミフィケーションを組み込むことで、筋力や持久力が向上したことを明らかにした。また、Ozdamliら[14]による系統的レビューでも、ゲーミフィケーションがフィットネス計画への意欲向上に寄与することが示されている。

このように従来の研究は、フォームの可視化や姿勢の改善、モチベーション向上といった多様な側面からトレーニングを支援してきた。一方、本研究ではエキセントリック動作において重要とされる動作速度に着目し、聴覚フィードバックを用いて適切な動作速度でのトレーニングを支援するものである。

2.2 聴覚フィードバックによる支援に関する研究

聴覚フィードバックは、スポーツ動作やトレーニング技術の改善を目的として幅広く利用されている。まず、正しい動作が行われたときに離散的な音を提示して支援する手法が用いられている。Vorbeckら[15]は、逆立ちの動作において正しい動作が取れた際に音を鳴らすことで学習が促進されることを示した。またダンス[16]やゴルフスイング[17,18]においても、正しい動作時にクリック音を与えることがパフォーマンス向上につながることが明らかになっている。これらの手法は動作の正誤を即時的に知らせる点で有効である一方で、動作の進行状況や速度変化といった連続的な情報を把握するための支援としては十分ではない。

一方、連続的な音の変化によって動作状態を提示する「ソニフィケーション」も広く研究されている。この手法は運動学習の分野でも有効であることが示されており、複雑な運動スキルの習得[19]やリハビリテーションでのパフォー

マンス向上[20]など、多様な領域で効果が報告されている。筋トレの分野でも応用が進んでおり、Murgiaら[21]はベンチプレスにおいて動作と同期した音響刺激がパワー出力を向上させる可能性を示している。また、Lorenzoniら[22]はウエイトリフティングに対して、背骨の曲がり量やバーの軌道を、音質や聞こえる方向の変化として提示する手法を提案し、デッドリフトのフォーム改善に有効であることを明らかにしている。さらに、Yangら[23]はダンベルカール動作において位置や速度を音へ変換する手法を提案し、動作の知覚支援に有効であることを示した。その後の研究でも動作ペースや動機づけを高める可能性が報告されている[24]。しかし、これらは低強度条件での検討にとどまり、実環境である高負荷の筋力トレーニングにおける効果は明らかになっていない。

本研究は高負荷のエキセントリック動作に着目し、聴覚フィードバックの有効性を検証するものである。提案手法では、単なる音提示ではなく、「チャージ音」や「パワーが抜ける音」といった意味をもつ効果音を用いることで、緩やかな動作を促す聴覚フィードバック手法の有用性を検討している。また、長期的なトレーニング実験を行うことで、フィードバック使用時の即時的なパフォーマンス向上だけでなく、フィードバックを使用しなくてもその動作が維持できるかについても検証を行っている。

3. 実験

3.1 概要

本実験では、短期的な使用で効果が示された効果音フィードバックが、長期的なトレーニングによってフィードバックがない状況でもその効果を保持するのかを検証した。実験参加者は1ヶ月間にわたり週2回の頻度でダンベルカールのエキセントリックトレーニングを実施し、動作の変化や、フィードバックがない状況でも適切な動作速度が保持されるのかを継続的に評価した。

実験で検証する仮説は以下の通りである。

- H1** 長期的にシステムを使用することで、フィードバックなしのセッションにおける動作時間が事前測定時より長くなり、週の経過に伴って段階的に増加する。また動作速度の変動は段階的に減少し、速度の一貫性が向上する。
- H2** 長期的にシステムを使用することで、フィードバックありのセッションにおいても、週を追うごとに動作時間が安定し、速度の一貫性が向上する。
- H3** チャージ音による意味を持った効果音フィードバックによって形成された、動作への意識や集中度、楽しさといった主観評価において、フィードバックなしのセッションにおいても低下せず、維持される。

3.2 実験デザイン

本研究では、日常的にトレーニングを行っている実験参加者においても有効かを確認するため、募集時には男性は日常的にトレーニングを行っている人を対象とし、女性については特に経験を問わず募集を行った。募集の結果、14名（男性7名、女性7名）が実験に参加した。なお、参加者には所要時間に応じ、謝金を支払った。

長期的な変化を評価するため、全実験参加者に同じシステムを利用する単群デザインを採用した。実験参加者は1ヶ月間にわたり週2回のトレーニングを行い、その際、フィードバックありのセッションとフィードバックなしのセッションを交互に実施した。これは、フィードバックを用いたトレーニングを重ねることで、フィードバックがない状況での動作がどのように変化し、定着していくかを評価するためである。

実験システムには、これまでの研究[5,6]で実装してきた効果音フィードバックシステムを利用した。本システムは、Apple Watch SE（第2世代）上で動作し、加速度やジャイロセンサによる動作データの取得と、リアルタイムの聴覚フィードバックを行う。実装にはAppleの統合開発環境であるXcodeを用い、言語はSwiftを使用した。

トレーニングには、最大24kgまで可変重量が設定できるダンベルを使用した。実験参加者の筋力差を考慮するため、事前にダンベルカールにおける1RM（1回だけ持ち上げられる最大重量）を測定し、エキセントリック動作に適した高負荷条件を実現するために、ダンベル重量を1RMの80~90%に設定した。10%の幅は、MRG可変式ダンベル24kg（2.5kgから24kgまで約1kg毎に設定可能）の特性上、細かい重量調整が難しかったためである。

3.3 実験手順

図2に、本実験における全体的な実験の流れを示す。本実験では、1ヶ月間のトレーニングに先立ち、事前測定を実施した。この測定は、フィードバックを提示しない状態での初期パフォーマンスを記録し、トレーニング前後の変化を比較するための基準とするものである。まずエキセントリックトレーニングの正しい実施方法について説明し動作の練習を行った後、事前測定を実施した。実験開始前に疲労が報告された実験参加者については、十分な休息時間を設け、回復が不十分な場合はトレーニングの開始日を変更した。また、参加継続が困難と判断された場合には、自由に辞退できるよう安全に配慮した。

各セッションでは、エキセントリックトレーニングを1セット10回、計3セットを実施した。なお、1セッションあたりの所要時間は約30分であった。筋疲労の影響を最小限に抑えるため、各セッションは別日程で実施し、少なくとも48時間の間隔を設けた。トレーニング前にはウォームアップを行い、3分間の休憩を挟みながら、3セットのエ



図1 エキセントリックトレーニングを実施している様子

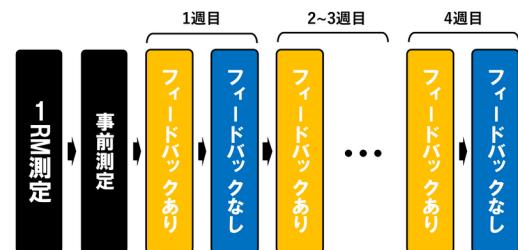


図2 長期トレーニング実験の全体的な流れ

キセントリックトレーニングを実施した。動作のコンセントリック動作（ダンベルを持ち上げる動作）では、筆頭著者が補助を行い、実験参加者がエキセントリック動作（ダンベルを下ろす動作）に集中できるようにした（図1参照）。実験参加者には、エキセントリック動作を3~5秒かけて実施するように事前に説明した。

フィードバックありのセッションでは、「チャージ音」が鳴っている状態を維持するように意識するよう指示し、フィードバックなしのセッションでは、自身の感覚に基づいて3~5秒で下ろすよう求めた。なお、いずれのセッションにおいても、動作テンポやリズムを統一するような明示的な指示は与えなかった。これは、外的な時間指示を与えない、フィードバック内容の違いが動作速度に与える影響を純粋に評価するためである。

各セッション終了後には、実験参加者に主観評価アンケートへの回答を求めた。このアンケートでは、5段階リッカート尺度を用いて、各セッションにおける動作への意識や集中度、楽しさなどの全体的なユーザ体験について評価を行った。

また、1ヶ月間のトレーニング終了後に、フィードバック音が動作時間の意識や速度制御に与えた影響について回答を求め、自由記述形式の質問を通じて、音に対する印象や違和感、およびトレーニング全体に関する感想を収集した。

4. 結果

4.1 参加者とデータ量

本実験は、2025年10月下旬から12月上旬にかけて実施した。実験には14名参加したが、事前測定で強い疲労がみられた1名は、トレーニング開始日までに十分な回復が得

られず、その後も改善が見られなかったため、安全を考慮してトレーニングには参加しなかった。そのため、最終的に13名（男性7名、女性6名）が実験を完了し、分析対象とした。13名の実験参加者は、1セッションにつき3セットのエキセントリックトレーニングを実施し、事前測定を含めて計9セッションのデータが得られた。そのため、収集したデータの総数は $3 \times 9 \times 13 = 351$ 件となった。

4.2 分析手法

本研究では、エキセントリック動作が適切に維持されているか、またその安定性がどのように変化するかを評価するため、動作時間と速度の一貫性の2つの指標を用いて分析を行った。動作時間は、1回のエキセントリック動作に要した時間を示すもので、動作速度を間接的に反映する指標である。動作が速ければ短く、遅ければ長くなるため、あらかじめ提示した「3~5秒で下ろす」という目標時間に対して、どの程度適切なペースで動作できていたかを評価することができる。速度の一貫性は、エキセントリック動作を通して速度がどれだけ均一に保たれているかを示す指標である。たとえ動作時間が目標の範囲に収まっていても、動作の前半だけ極端に遅く、後半で急激に加速するような速度の変動が大きい動作は、適切な筋刺激が得られにくい。そのため、速度の一貫性は、エキセントリック動作の質を捉えるうえで重要である。

エキセントリック動作の抽出には角速度を用い、角速度が0未満の数値が一定以上継続する区間をエキセントリック動作と定義した。なお、動作終了後の微小な角速度の変動や開始位置でのノイズにより、エキセントリック動作の区間が実際の動作時間と完全に一致しない可能性がある。このノイズは結果に大きな影響を与えないと判断しているが、解釈には注意が必要である。

また、本実験は全実験参加者がフィードバックのありとなしのセッションを交互に繰り返す単群デザインを採用した。そのため、トレーニング効果の保持を確認するためのフィードバックなしのセッションと、フィードバックを用いながら動作がどのように安定していくかを確認するためのフィードバックありのセッションそれぞれについて、時系列的な変化を分析した。

4.3 フィードバックなしセッションにおける動作の変化

まず、分析手法で定義した指標の一つである動作時間に着目し、フィードバックなしセッションにおける時系列変化を分析した。図3は、フィードバックなしセッションにおける動作時間の変化を示す箱ひげ図である。この図から、週の経過に伴って動作時間の中央値が徐々に増加していることがわかる。この上昇傾向が統計的に有意かどうかを確認するため、週を固定効果、参加者をランダム効果として、線形混合モデルによる分析を行った。その結果、週の固定効果は有

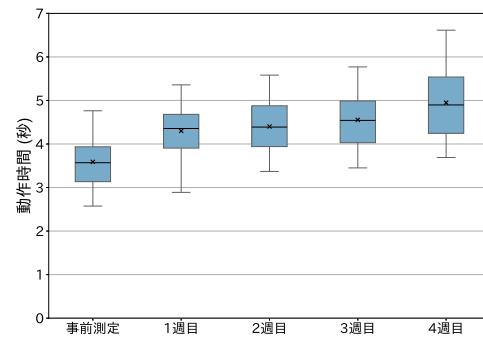


図3 フィードバックなしセッションにおける動作時間の変化

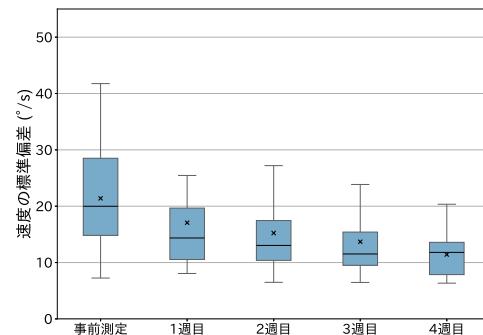


図4 フィードバックなしセッションにおける速度の標準偏差の変化

意であり ($\beta = 0.297, SE = 0.027, z = 10.89, p < 0.001$), 週の経過に伴い動作時間が増加することが示された。

次に、分析手法で定義したもう一つの指標である速度の一貫性について分析を行った。図4はフィードバックなしセッションにおける速度の標準偏差の変化を示す箱ひげ図である。この図では、週の経過とともに標準偏差の中央値が低下し、速度のばらつきが小さくなっていることが確認できる。この下降傾向が統計的に有意かどうかを調べるため、同様に線形混合モデルによる分析を行った。その結果、週の固定効果は有意に負であり ($\beta = -2.332, SE = 0.258, z = -9.04, p < 0.001$)、週が経つにつれて速度のばらつきが有意に減少することが明らかとなった。

以上の結果から、フィードバックなしセッションにおける動作時間が週の経過に伴って有意に増加し、また速度の一貫性が向上することが統計的に明らかになり、仮説1は支持された。

4.4 フィードバックありセッションにおける動作の変化

フィードバックありセッションに関しても、同様に動作時間と速度の一貫性について分析を行った。図5は、フィードバックありセッションにおける動作時間の変化を示す箱ひげ図である。フィードバックありセッションにおける動作時間の変化を確認したところ、週の経過に伴い中央値は大きく変動しないものの、わずかな増加傾向が見られた。この傾向を線形混合モデルによって検証したところ、週の固定効果は

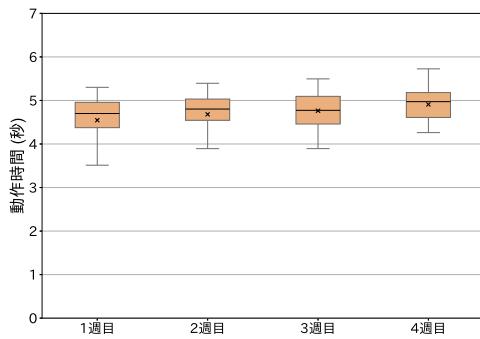


図 5 フィードバックありセッションにおける動作時間の変化

有意であり ($\beta = 0.058, SE = 0.014, z = 4.25, p < 0.001$), 週が経つにつれて動作時間は緩やかに増加することが示された。

ここで、動作時間の長さではなく、反復間における安定性に着目し、各セットにおいて 10 回の反復動作の動作時間から標準偏差を算出し、反復間における動作時間のばらつきを分析対象とした。図 6 はフィードバックありセッションにおける動作時間の標準偏差の時系列変化を表す箱ひげ図である。この図では、週の経過に伴って標準偏差の中央値が低下し、動作時間のばらつきが小さくなっていることが確認できる。この下降傾向が有意かどうかを調べるために、線形混合モデルによる分析を行った結果、週の固定効果は有意に負であった ($\beta = -0.016, SE = 0.005, z = -3.49, p < 0.001$)。つまり、週が経つにつれて 1 セット内の反復間における動作時間のばらつきが有意に減少することを示している。

次に、図 7 はフィードバックありセッションにおける速度の一貫性の変化を示す箱ひげ図である。この図でも、週の経過に伴って標準偏差の中央値が低下し、速度のばらつきが小さくなっていることが確認できる。この下降傾向が統計的に有意かどうかを調べるために、線形混合モデルによる分析を行った結果、週の固定効果は有意に負であった ($\beta = -0.929, SE = 0.193, z = -4.81, p < 0.001$)。これは、週が経つにつれてほど速度の一貫性が向上し、1 回の反復動作に生じる速度のばらつきが有意に減少することを示している。

以上の結果から、フィードバックありのセッションにおいても、週を追うごとに反復間の動作時間がより安定し、速度の一貫性が有意に向上することが明らかになった。これは、フィードバックを継続的に用いた場合においても、動作の安定性が段階的に向上するという仮説 2 を支持するものである。

4.5 主観評価の結果

フィードバックありのセッションで形成された主観評価が、フィードバックなしのセッションでも維持されるかを検討するため、フィードバックあり・なしセッションにおける主観評価の変化を比較した。なお、本アンケートの回

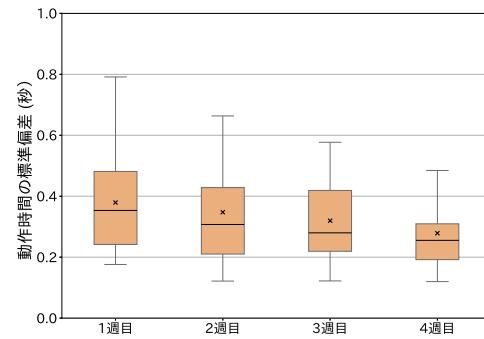


図 6 フィードバックありセッションにおける 1 セット内の動作時間のばらつきの変化

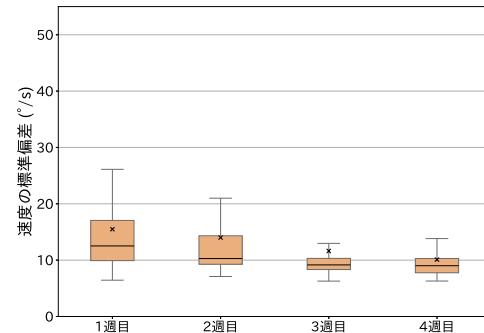


図 7 フィードバックありセッションにおける速度の標準偏差の変化
答は順序尺度であるが、週ごとの細かな変化やセッション間の差を捉えるため、本分析では平均値および標準偏差を算出した。表 1 は、各週の両セッションにおける主観評価の平均値と標準偏差 (SD) を示したものである。

まず、フィードバックありセッションに着目すると、全ての項目において 1 週目から 4 週目まで平均 4.0 以上の高い値で推移した。これは実験参加者がフィードバックを用いることで、常に高い意識と集中度を維持しつつ、トレーニングを楽しみながらできていたことを示している。一方、フィードバックなしのセッションでは、1 週目のスコアはフィードバックありのセッションと比較して明らかに低い結果となったが、週の経過に伴いフィードバックなしのスコアは段階的に上がっていく傾向がみられた。これは、フィードバックありのセッションで形成された動作への意識や集中度、楽しさといった主観評価のスコアが、フィードバックなしのセッションにおいて初めは一時的な低下がみられるものの、週の経過に伴ってその低下が次第に小さくなり、最終的には維持されるようになることを示している。この結果は、本研究で設定した仮説 3 と概ね一致する結果である。

表 2 に 1 ヶ月間のトレーニング終了後に実施したアンケート結果の一部を示す。3~5 秒という目標時間を意識し続けるうえでフィードバックが役に立つかという質問に対して、全実験参加者が最高評価を回答しており、平均値は 5.0 であった。また、音がなくても 3~5 秒で下ろせる自信があるかという主観的な自信についても、平均値が 3.85

と比較的高い評価が得られたが、音がなくなると正確な速度を維持することが難しいと感じる人も存在した。一方、フィードバック音が不快になることがあったかという質問に対しては、平均値が 1.38 と低く、ほとんどの参加者が不快感を感じていないことが明らかとなった。

自由記述回答では、フィードバックがある場合には「秒数を数える必要がなくなり動作に集中できた」「自分の感覚と実際の速度のずれに気づけた」といった意見が多く得られた。一方、フィードバックがない場合でも「頭の中でフィードバック音を思い浮かべながら動作した」「3~5秒を数えながら動作していたが、後半は数えずとも動作できた」といった意見が得られた。この結果は、フィードバックありが形成した速度感覚が、フィードバックなしセッションにおいても一定程度保持されていた可能性を示唆している。

5. 考察

5.1 フィードバックがない状況での保持に関する考察

図 3 に示すように、フィードバックなしセッションにおいても、週の経過に伴い動作時間が増加した。この増加傾向は線形混合モデルによる分析においても統計的に有意であり、フィードバックを用いたトレーニングを通じて、エキセントリック動作をゆっくりと行う速度の感覚が、フィードバックがない状況においても保持されたと考えられる。また、図 4 に示すように、週の経過とともに速度のばらつきが低下する傾向がみられ、この変化も線形混合モデルによる分析においても有意であった。これは、動作時間が延びるという変化にとどまらず、各反復動作において速度を一定に保つ能力も向上し、フィードバックなしセッションにおいても保持されたと考えられる。しかし、フィードバックなしセッションにおける時系列変化のみでは、最終的にフィードバックありセッションと同等の動作ができるのかは明らかにならない。そのため、保持を評価するにあたり、フィードバックなしの最終的な動作をフィードバックありセッションの動作と直接比較することが重要である。

図 8, 9 はそれぞれ、最終週におけるフィードバックの有無による動作時間、速度の標準偏差の比較を表す箱ひげ図である。図 8 では動作時間の中央値は近い値を示したものの、フィードバックなしセッションでは四分位範囲が広く、動作のばらつきが残っていることがわかる。図 9 でも同様に標準偏差の中央値は近い値を示したものの、四分位範囲が広く、速度がばらついていることがわかる。これらの結果から、フィードバックを通じて動作時間や速度の一貫性そのものは保持されつつも、動作の安定性を保つうえでは、フィードバックが有効であることが示された。

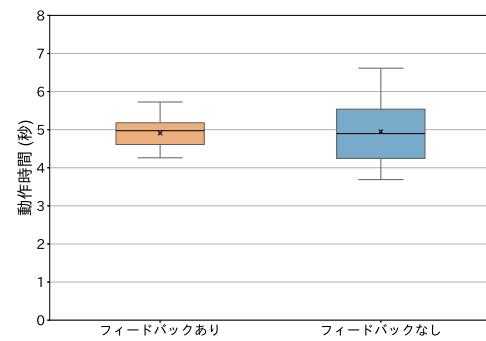


図 8 最終週におけるフィードバック有無の動作時間の比較

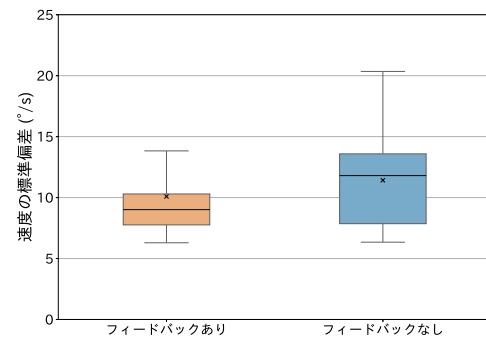


図 9 最終週におけるフィードバック有無の速度の標準偏差の比較

5.2 フィードバックありセッションにおける動作特性の考察

フィードバックありセッションにおける結果に着目すると、最初のトレーニングから動作時間は目標範囲に近づき分散も小さかった（図 5）。これは、フィードバックがエキセントリック動作の速度調整に対して即時的な効果をもたらすことを示している。一方、速度の一貫性や動作時間の安定性については、セッションを重ねるにつれて徐々に改善する傾向がみられた（図 6,7）。このことから、フィードバックは動作時間そのものを調整するうえでは即時的に機能する一方で、動作の安定性や速度制御の向上には、ある程度の練習や経験が必要である可能性が考えられる。ただし、本実験ではフィードバックありとフィードバックなしセッションを交互に実施しているため、フィードバックありセッションにおける動作の安定化が、フィードバックそのものの効果によるものか、あるいはフィードバックなしセッションを挟んだことによる学習効果の影響を受けているのかを判断することはできない。そのため、フィードバックを継続的に用いた場合においても、同様に速度の一貫性や動作時間の安定性が向上するかについては、今後検討をしていく必要がある。

5.3 トレーニング経験の有無に関する考察

トレーニング経験者は、もともと動作速度の調整にある程度習熟していると考えられるため、そのような実験参加者においてもフィードバックの有無によって差が縮小する

表 1 各週におけるフィードバックあり・なしセッションの主観評価の変化 (平均値 (SD))

質問項目	FB	1週目	2週目	3週目	4週目
自分の動作速度を意識できましたか？	あり	4.85 (0.38)	4.54 (0.66)	4.46 (0.97)	4.92 (0.28)
	なし	3.62 (0.65)	3.69 (1.18)	3.62 (1.19)	4.23 (0.93)
動作をコントロールしやすいと感じましたか？	あり	4.31 (0.85)	4.08 (0.86)	4.31 (1.32)	4.62 (0.77)
	なし	2.69 (0.85)	3.38 (0.96)	3.31 (1.25)	4.00 (1.15)
動作に集中できましたか？	あり	4.46 (0.66)	4.54 (0.66)	4.23 (1.17)	4.38 (0.65)
	なし	3.69 (0.63)	3.77 (1.24)	4.00 (1.08)	4.23 (1.01)
トレーニングが楽しいと感じましたか？	あり	4.46 (0.52)	4.23 (0.73)	4.46 (0.66)	4.62 (0.65)
	なし	3.54 (1.13)	3.77 (1.09)	3.77 (1.30)	4.15 (0.99)
トレーニングを続けたいと思いましたか？	あり	4.38 (0.65)	4.23 (0.83)	4.31 (0.95)	4.62 (0.51)
	なし	3.77 (1.01)	4.23 (0.93)	4.00 (1.08)	4.15 (0.99)

表 2 トレーニング終了後アンケートの結果 (平均値 (SD))

質問項目	平均値 (SD)
フィードバックは3~5秒を意識し続けるのに役立ちましたか？	5.00 (0.00)
音がなくても3~5秒で下ろす動作をできる自信がありますか？	3.85 (0.99)
フィードバック音が不快になることがありましたか？	1.38 (0.87)

のであれば、本システムの効果が初心者だけでなく、広く有効である可能性が示唆される。そこで、フィードバックありとなしセッションにおける差が、トレーニングの最初と最後の週でどの程度修正されたのかを確認するため、1週目および4週目における両セッションの差分に着目して探索的な分析を行った。

図10は、日常的にトレーニングを行っている男性のみを対象とした、動作時間の差分を示している。この図から、1週目に着目すると、差分の中央値は負の値を示し、四分位範囲も全体的に0より下に分布している。ここで差分が負であることは、フィードバックありのセッションと比較して、フィードバックなしのセッションでは動作時間が短くなっていることを意味する。つまり、トレーニング経験者であっても、最初の週ではフィードバックがない状況では意図したよりも動作が速くなってしまったことがわかる。一方、4週目においては、その差分の中央値が0付近に収束しており、フィードバックの有無にかかわらず、ほぼ同等の動作時間でトレーニングを行えるようになったと考えられる。この結果は、効果音によるフィードバックが、初心者に限らずトレーニング経験者においても動作速度の調整を促し、最終的にはフィードバックがない状況においてもその効果が保持されることを示唆している。

5.4 制約

本研究では、フィードバックありとフィードバックなし

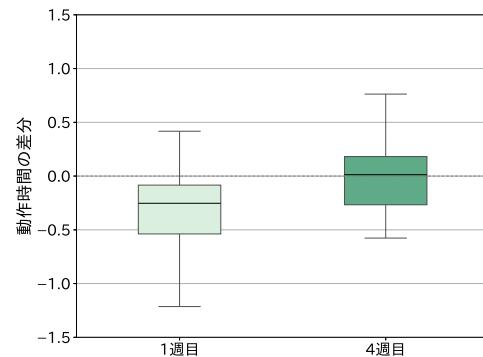


図 10 トレーニング経験者におけるフィードバック有無による動作時間の差分

のセッションを交互に実施する実験デザインを採用しており、フィードバックを全く使用しない状態での長期的なトレーニング効果については検討できていない。そのため、本研究でみられた動作時間の増加や速度の一貫性の向上が、フィードバックによって形成された速度感覚に起因するものなのか、あるいは1ヶ月間エキセントリックトレーニングを継続したこと自体による学習効果や身体的適応の結果なのかについては、本研究の実験デザインでは、これらの要因を独立して評価することができない。今後はフィードバックを一切用いない対照群を設けた長期実験を行うことで、フィードバック固有の効果を検証する必要がある。

6. まとめ

本研究では、短期的な使用で効果が示された効果音フィードバックに対して、長期的な使用によってその効果がフィードバックがない状況でも保持されるかを検証した。その結果、フィードバックがないセッションにおいても、週の経過に伴って動作時間が増加し、速度の一貫性が向上することが明らかになった。これはフィードバックを用いたトレーニングによって形成された速度感覚が、フィードバックがなくなっていてもある程度保持されたことを示している。一

方、最終週におけるフィードバックありセッションと比較すると、動作のばらつきが残る傾向がみられ、動作の安定性を高く保つうえではフィードバックの継続的な使用が有効であることが示された。また、フィードバックありセッションは、動作時間について初期段階から目標範囲に近づいており、即時に作用することが示された一方、動作の安定性についてはトレーニングを重ねることで段階的に向上することが明らかとなった。さらに、主観評価の結果からも、フィードバックありセッションで形成された動作への意識や集中度、楽しさといった評価は、フィードバックがない状況においても週の経過とともに維持されることが明らかになった。

本研究では動作特性に着目した評価を行ったが、今後は筋電図などを用いた筋活動の評価を併用することで、聴覚フィードバックが筋力向上や筋肥大といったトレーニング効果に与える影響を明らかにする予定である。また、本手法を他の筋群へ適用することで、上腕二頭筋以外を対象とした筋トレにおいても、聴覚フィードバックの有効性を検証していく。

参考文献

- [1] Recovery Science: トレーニングに関する科学的な記事 (2022). (参照日: 2024-12-04, URL: https://recovery-science.jp/date_2022_vol-2/).
- [2] 株式会社オーコローンマーケティング: 新型コロナウイルス感染症流行前後での運動・筋トレ実態調査レポート (2020). (参照日: 2024-12-04, URL: <https://prtmes.jp/main/html/rd/p/000000373.000001915.html>).
- [3] 笹川スポーツ財団: スポーツライフ・データ (スポーツライフに関する調査) (2022). (参照日: 2024-12-04, URL: https://www.ssf.or.jp/thinktank/sports_life/data/workout.html).
- [4] Nishikori, S., Yasuda, J., Murata, K., Takegaki, J., Harada, Y., Shirai, Y. and Fujita, S.: Resistance training rejuvenates aging skin by reducing circulating inflammatory factors and enhancing dermal extracellular matrices, *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, p. 10214 (2023).
- [5] 大石琉翔, 中村聰史: エキセントリックトレーニングにおける動作速度の安定性向上のための効果音フィードバック, 情報処理学会研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC), Vol. 2024-EC-71, No. 24, pp. 1–8 (2024).
- [6] 大石琉翔, 中村聰史: エキセントリックトレーニングにおける適切な動作速度を維持するための聴覚フィードバック手法の検討, 情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 2025-HCI-211, No. 7, pp. 1–8 (2025).
- [7] Salmi, A. W., Schmidt, R. A. and Walter, C. B.: Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal, *Psychological Bulletin*, Vol. 95, No. 3, pp. 355–386 (1984).
- [8] Winstein, C. J., Pohl, P. S. and Lewthwaite, R.: Effects of physical guidance and knowledge of results on motor learning: Support for the guidance hypothesis, *Research Quarterly for Exercise and Sport*, Vol. 65, No. 4, pp. 316–323 (1994).
- [9] 高久大輔, 中島克人: Kinect を用いた筋力トレーニング支援システム, 第 77 回全国大会公演論文集, Vol. 2015, No. 1, pp. 437–438 (2015).
- [10] Khan, M. U., Saeed, K. and Qadeer, S.: Weight Training Analysis of Sportsmen with Kinect Bioinformatics for Form Improvement, *arXiv*, Vol. abs/2009.09776 (2020).
- [11] Chen, S. and Yang, R. R.: Pose Trainer: Correcting Exercise Posture using Pose Estimation, *arXiv*, Vol. abs/2006.11718 (2020).
- [12] 深堀悠人, 米村俊一: ゲーミフィケーションにより行動を高める筋力トレーニング支援システムの提案, 情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 2022-HCI-199, No. 15, pp. 1–8 (2022).
- [13] Yang, D., Lu, J., Liu, X. and Tang, H.: Research on Gamified Design of Introductory Core Muscle Training, *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1833, Springer, pp. 218–223 (2023).
- [14] Ozdamli, F. and Milirich, F.: Positive and Negative Impacts of Gamification on the Fitness Industry, *European Journal of Investigation in Health, Psychology and Education*, Vol. 13, No. 8, pp. 1411–1422 (2023).
- [15] Vorbeck, B. and Bördlein, C.: Using auditory feedback in body weight training, *Journal of Applied Behavior Analysis*, Vol. 53, No. 4, pp. 2349–2359 (2020).
- [16] Quinn, M., Miltenberger, R., James, T. and Abreu, A.: An evaluation of auditory feedback for students of dance: Effects of giving and receiving feedback, *Behavioral Interventions*, Vol. 32, No. 4, pp. 370–378 (2017).
- [17] Yoo, K., Wu, X., Zhuang, W., Xia, Z. and Liu, Y.: The effects of audible feedback as a coaching strategy on golf skill learning for novice players, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, Vol. 20, No. 4, pp. 596–609 (2020).
- [18] Tanaka, Y., Nakamura, T. and Koike, H.: Posture-based Golf Swing Instruction using Multi-modal Feedback, *Journal of Information Processing*, Vol. 30, pp. 107–117 (2022).
- [19] Effenberg, A. O., Fehse, U., Schmitz, G., Krueger, B. and Mechling, H.: Movement Sonification: Effects on Motor Learning beyond Rhythmic Adjustments, *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 10, p. 219 (2016).
- [20] Matsubara, M., Kadone, H., Iguchi, M., Terasawa, H. and Suzuki, K.: The effectiveness of auditory biofeedback on a tracking task for ankle joint movements in rehabilitation, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 31, No. 4, pp. 341–348 (2013).
- [21] Murgia, M., Sors, F., Vono, R., Muroni, A. F., Delitalia, L., Di Corrado, D. et al.: Using auditory stimulation to enhance athletes' strength: An experimental study in weightlifting, *Review of Psychology*, Vol. 19, pp. 13–16 (2012).
- [22] Lorenzoni, V., Staley, J., Marchant, T., Onderdijk, K. E., Maes, P. J. and Leman, M.: The Sonic Instructor: A Music-Based Biofeedback System for Improving Weightlifting Technique, *PLOS ONE*, Vol. 14, No. 8, p. e0222059 (2019).
- [23] Yang, J. and Hunt, A.: Sonic trainer: real-time sonification of muscular activity and limb positions in general physical exercise, *Proceedings of the ISon 2013, 4th Interactive Sonification Workshop*, pp. 44–51 (2013).
- [24] Yang, J. and Hunt, A.: Real-time Sonification of Biceps Curl Exercise Using Muscular Activity and Kinematics, *International Conference on Auditory Display* (2015).