

2012 年度修士論文

両手ピンチング制御における，加齢，有酸素性トレーニング
および視覚フィードバックの影響

指導教員
伊坂忠夫

立命館大学大学院
スポーツ健康科学研究科
スポーツ健康科学専攻修士課程 2 回生
6211110007-7
クリッチェリィ 香津美

要旨

6211110007-7 クリッチェリィ 香津美

「両手ピンチング制御における，加齢，有酸素性トレーニング および視覚フィードバックの影響」

キーワード：ピンチング，両側，視覚フィードバック，加齢，不活動，有酸素運動

【目的】

本研究では両手でのピンチングタスクを用い，加齢，不活動，トレーニング，視覚フィードバックがその運動制御に与える影響を多面的に検討することを目的とした。

【方法】

本実験で使用した実験装置は，拇指および示指を用いた把持運動時の指先の発揮力を計測するための把持力計測機構と，発揮力を被験者に視覚的に提示するための液晶ディスプレイによって構成された。被験者は，両手での左右それぞれの拇指と示指による最大把持力を測定した後，最大把持力の 10%の力を両手同時に 20 秒間維持するピンチング課題を行った。実験タスクは被験者の現在の発揮力が常に提示されている“視覚フィードバックあり(VF)条件”と開始 10 秒後に両側の視覚フィードバックが消失する“視覚フィードバック消失(NVF)条件”があった。把持力の時系列データは，200[Hz]のサンプリング周波数で取得し，二乗平均平方根誤差(RMSE)や変動係数(CV)，相互相関係数などを算出した。

実験 1 の被験者は右利きの若年者 38 名 (20.5±1.8, 男性 15 名, 女性 23 名) と右利き高齢者 31 名 (65.1±8.1, 男性 15 名, 女性 16 名) であった。

実験 2 の被験者は健康な右利きの大学生の男性 14 名 (20.0±1.3 歳) であった。被験者は非利き手を 3 週間ギプス固定した。ピンチング測定は固定 1 週間前 (pre)，固定期間終了直後 (post)，固定期間終了 1 週間後 (recovery) の 3 回行った。

実験 3 の被験者は健康な右利きの高齢者 28 名であり，トレーニング群 15 名 (65.3±8.0 歳, 男性 6 名, 女性 9 名)，コントロール群は 13 名 (66.8±5.8 歳, 男性 7 名, 女性 6 名) であった。トレーニング群の被験者は週に 2 もしくは 3 回の有酸素トレーニングを 8 週間実施した。ピンチング測定はトレーニング開始前 (pre) とトレーニング終了後 (post) の 2 回行った。

実験 4 の被験者は右利きの若年者 38 名 (20.45±1.81, 男性 15 名, 女性 23 名) であった。本実験では，力発揮時間を 40 秒とし，片側の視覚フィードバックが消失する (NLVF, NRVF) 条件も測定した。また，分析に関しても 5 秒ずつに分割し最初の 1 区間を

除いた 7 区間を分析した。

【結果・考察】

実験 1 では、力の正確性を示す指標である RMSE と力の安定性を示す指標である CV はともに VF 条件では若年者に対して高齢者が有意に高い値であったが NVF 条件では有意差はなかった。

実験 2 では、3 週間のギプス固定により、pre 期に対して post 期では最大把持力 MVF は約 20%低下した。しかし、RMSE や CV などは変化がなかった。

実験 3 では、RMSE と CV に関してトレーニング群とコントロール群に有意差は見られなかった。

実験 4 では、NVF 条件は他の条件よりも相互相関係数が高かった。また、これは時間の経過にかかわらず全区間で認められた。

【結論】

本研究では、視覚フィードバックを用いた両手でのピンチング制御について、加齢、不活動とトレーニング、そして視覚情報という多次的に検討することで以下の点が明らかとなった。

- (1) 高齢者のピンチング制御能力は、正確性・安定性ともに若年者に比べて有意に低い
が、視覚フィードバックの消失によりその差がなくなる。
- (2) 若年者と高齢者では、視覚フィードバックの有無にかかわらず相互相関係数に有意
差は認められなかった。
- (3) 若年男性における 3 週間のギプス固定による一側肢不活動では両手のピンチング制
御能力に変化は認められなかった。
- (4) 高齢者における 8 週間の有酸素トレーニングでは両手のピンチング制御能力の改善
は認められなかった。
- (5) 両側の視覚フィードバックが消失した場合のみ相互相関係数は高くなるが、片側ま
たは両側に視覚フィードバックがある場合は左右の力発揮は独立し、これらは時間
が経過しても変化しないことが明らかとなった。

Abstract

6211110007-7 KAZUMI Critchley

Effect of aging, aerobic training and visual feedback on bimanual pinching control

Keywords: Pinching, bimanual, visual feedback, aging, immobilization, aerobic training

Purpose: The objective of this research is to investigate the effects of aging and training on motor control with and without visual feedback, focusing on bimanual pinching task.

Method: Subjects were requested to maintain a constant force output at 10% of each subject's maximal voluntary pinch force with and without visual feedback on the computer monitor for 20 seconds. All subjects performed the task with both hands together. Root Mean Square Error (RMSE), Coefficient of Variation (CV) and Cross Correlation Coefficient were assessed during a series of finger-pinch tasks

Thirty eight right handed young adult ($20.45 \pm 1.81y$, 15 male, 23 female) and thirty one right handed older adults ($65.13 \pm 8.09y$, 15 male, 16 female) participated in experiment 1. Fourteen healthy university right handed male student ($20.0 \pm 1.81y$, 15 male, 23 female) and thirty one older adults ($65.13 \pm 8.09y$, 15 male, 16 female) participated in experiment 2. The non-dominant forearm was immobilized with plaster cast for 3 weeks. Three pinching tests were held: before immobilization (pre), after immobilization (post), and after a 1-week recovery period (recovery). Twenty eight right handed older adults ($66.8 \pm 5.8y$, 13 male, 15 female) participated in experiment 3. The aerobic exercise training group ($n=15$, $65.3 \pm 8.0y$, 6 male, 9 female) performed aerobic exercise training two or three times a week for 8 weeks. Two pinching tests were held: before training (pre) and after training (post). Thirty eight right handed young adult ($20.45 \pm 1.81y$, 15 male, 23 female) participated in experiment 4. In this experiment, force output required time extended to 40 seconds. Also, under the condition that one side with and the other without visual feedback were measured.

Results

In experiment 1, RMSE and CV were significantly higher at older adult under visual feedback condition, but no significant difference under non visual feedback condition. In experiment 2, Maximal Voluntary pinch Force decreased after 3-week of upper

limb immobilization, but no significant difference on RMSE and CV. In experiment 3, there were no significant differences on RMSE and CV between aerobic exercise training group and control group. In experiment 4, no visual feedback condition has significantly higher Cross Correlation Coefficient compared to other three visual feedback condition.

Conclusion

Pinching force control accuracy and steadiness was significantly lower in older adults compared to young adults, but it became no significant difference under non visual feedback condition. There are no significant differences in Cross Correlation Coefficient with or without visual feedback. The 3-week upper limb immobilization did not influence the bimanual finger pinch control. The 8-week aerobic exercise training did not improve bimanual finger pinch control. Cross Correlation Coefficient became higher under the no visual feedback condition, but there were independency with right and left hand force output either with one or both side visual feedback.

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
第2章 方法	3
2.1 把持力計測装置.....	3
2.2 実験タスク	5
2.3 実験手順.....	5
2.4 データ解析手法.....	5
2.4.1 Task performance.....	6
2.4.2 周波数解析.....	7
2.4.3 相互相関係数.....	7
第3章 加齢による影響.....	8
3.1 実験概要.....	8
3.2 結果.....	8
3.2.1 Task performance	10
3.2.2 周波数解析	14
3.2.3 相互相関係数.....	18
3.3 考察.....	21
第4章 不活動による影響.....	23
4.1 実験概要.....	23
4.2 結果.....	23
4.2.1 Task performance	24
4.2.2 周波数解析	28
4.3 考察.....	34
第5章 有酸素トレーニングによる効果.....	35
5.1 実験概要.....	35
5.2 結果.....	35
5.2.1 Task performance	37

5.2.2 周波数解析	44
5.2.3 相互相関係数.....	55
5.3 考察.....	56
第6章 視覚フィードバック消失時間による影響.....	58
6.1 実験概要.....	58
6.2 結果.....	59
6.2.1 Task performance	59
6.2.3 相互相関係数.....	65
6.3 考察.....	66
第7章 総括	67
7.1 加齢とピンチング制御	67
7.2 トレーニングや不活動とピンチング制御.....	68
7.3 視覚フィードバックとピンチング制御	69
7.4 結論.....	71
文献.....	72

第1章 緒言

1.1 研究背景

手は体の中でもっとも自由度が高い部位であり、コップを持つ、字を書く、服を着るなど我々は日常生活の中でよく使う。そして、手の器用さは健全な日常生活を送る上で必要不可欠で、病気や怪我などで手が使えないと、日常生活にかなり不利である。Swanson(1983)らによれば、5本の指がすべて切断されると上肢機能の90%が失われるという。それだけ手指は我々が生きていく上で重要な身体の部位である。また、手を使う際の巧妙さは年をとるにつれて失われていくと言われている。実際に、Michimata et al(2008)の研究で20代から90代で手の機能評価テストを実施したところ50代~90代のグループでは20代のグループと比べてスコアが低かった。

上羽(2010)によれば手の運動機能は運動の目的などにより5つに分類される。①圧排、②引っ掛け握り (hook grip)、③掴み (grasp, precision grasp)、④摘み (pinch)、⑤握り (grip, power grasp) である。この中で①圧排を除いたものを一般的に把持動作と呼ぶ。さらに“掴み”と“摘み”に関しては把持する対象やその目的によってさらに分類することができる。

手指の運動制御に関する研究としては片手の示指外転による力発揮を課題とした研究が多い(Laidlaw et al, 1999; Vaillancourt and Newell, 2003; Kurt et al, 2005; Tracy et al, 2005; Marmon and Enoka, 2010; Ofori et al, 2010)。これは示指外転に使われる筋が第1背側骨間筋(First Dorsal Interosseous: FDI)のみであり、筋活動との関連性を見るには最も単純なためである。しかしながら、日常生活において手指を使う際に示指外転のみを使う場面は見当たらない。それに比べて、ピンチングは日常生活の様々な場面で必要であり、特に手の器用さとはピンチにより小さな力を出すことである。また、ピンチングの際に母指と他指が向かい合う母指対向性は、旧世界猿の一部や類人猿(ゴリラ、オランウータン)とヒトにしか備わっていない。そして、類人猿は母指が短いためヒトが行うような精巧な母指対立運動(ピンチング)はできない。つまり、ピンチングはヒトの特徴的な運動の一つであるといえる。

ピンチングをタスクとした研究には、一定の力を発揮させる課題(Deutsch and Newell,

2001; Griffin et al, 2009, Marmon et al, 2011)や周期的な力発揮を要求する課題(Keogh et al,2006)がある。これらの研究により、高齢者のピンチング制御能力は若年者に比べて低いことや手の機能評価をするパーデューペグボードを用いたトレーニングによりピンチング制御能力が向上することを明らかにした。ただし、これらは全て片手でのピンチング課題である。再び日常生活について考えるが、把持動作は必ずしも片手で行われるわけではない。例えば、ボタンの留め外しや食事（フォークとナイフもしくは箸と茶碗）などである。また、把持動作に限らず、日常生活では両手を同時に使うことがしばしばある。

Serrien and Wiesendanger (2001)は、片手に重りのついた U 字の物体を摘み、反対の手で引出しのつまみを引いた際の左右のピンチング力は相互相関性があることを明らかにしている。Uttner et al (2005)の研究では、両手とも力センサのついた操作子を摘むが、片手は視覚フィードバックを頼りに周期的な力発揮をもう片方は落とさないようにだけ被験者に指示した。すると、力発揮を要求されていない側にも力変動が起こり、周期的な力発揮をしている側の力波形との類似性が認められた。この他にも、示指の外転ではあるが両手による力発揮をした際には視覚フィードバックがなくなると相互相関性が強くなるという報告がある(Hu et al, 2011a)。このように視覚情報の有無は運動制御に何かしらの影響を及ぼす。

我々は普段から身体を動かす際には感覚情報を頼りに運動制御を行っている。中でも視覚は聴覚や触覚など他の感覚に比べて情報取得率が高く、外界から受ける全感覚情報のうち 80%以上の情報量を得ていると言われている。もちろん、運動制御にも多大な影響を与えており、視覚フィードバックが消失することで一定力発揮課題において正確性が低下する(Deutsch and Newell, 2001,2002; Baweja, 2009)。

1.2 研究目的

本研究では両手でのピンチングタスクを用い、加齢、不活動、トレーニング、視覚フィードバックがその運動制御に与える影響を多面的に検討することを目的とした。

第2章 方法

2.1 把持力計測装置

本実験で使用した実験装置は、拇指および示指を用いた把持運動時の指先の発揮力を計測するための把持力計測機構と、発揮力を被験者に視覚的に提示するための液晶ディスプレイによって構成された (Fig. 1).

Fig. 2 は実験装置のうち、指先との接触部である把持力計測機構を拡大したものである。把持力計測機構における計測センサには、定格出力 200[N] の小型圧縮型ロードセル (共和電業製 LMA-A-200N) を用い、拇指と示指の指先発揮力を独立して計測できるよう左右に2つ配置した (Fig. 2a) . 両手の指先発揮力を同時に計測するために同じ機構を2つ設置したため、計4つのロードセルを固定した。これらのセンサは、被験者が前腕を矢状面に平行にした状態でアクリル製の台上におき、手首の背屈・掌屈角度を0度に近い状態で把持することができるように、内側に45度回転した向きで設置された (Fig. 2b).

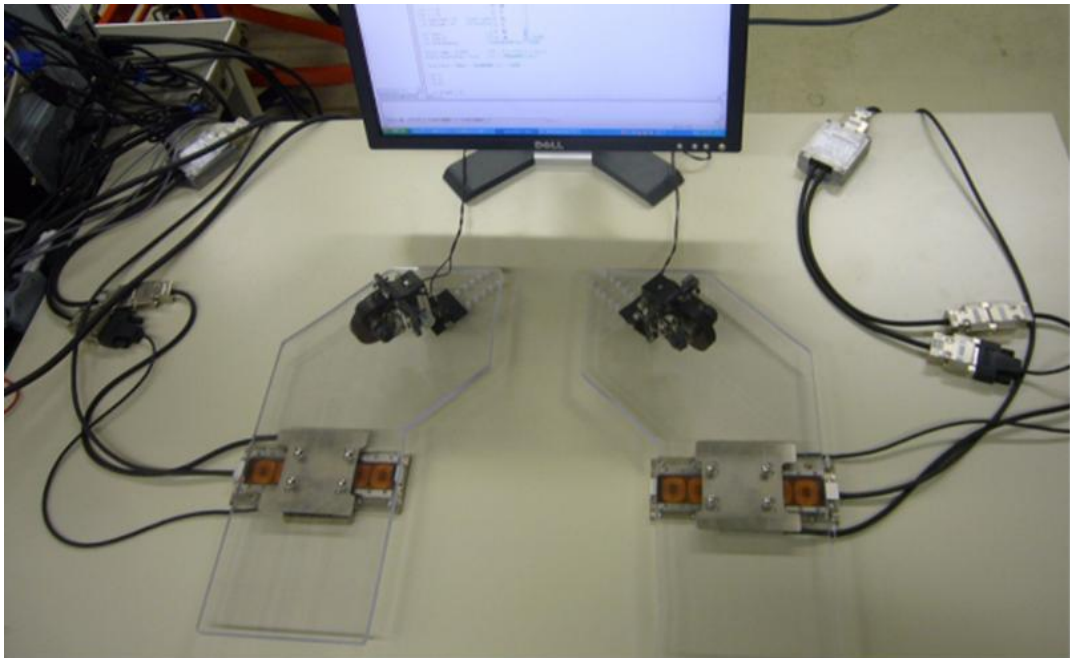


Figure 1: 実験装置

発揮力提示画面 (Fig. 3) は, 被験者の約 50cm 前に設置された液晶ディスプレイ (17 インチ) 上に表示された. 画面の一边は 235mm であり, 液晶ディスプレイの中央に表示された. 本装置は拇指および示指の発揮力を独立して計測することができ, 現在の発揮力を左右独立して提示することができる. グラフィックスには OpenGL (Silicon Graphics 社) を用いた. 両手の把持力計測機構に加えられた左右それぞれの拇指および示指の合力をカーソル (赤色の円形, 直径 8mm) として提示した. カーソルは, センサに力を加えることにより上方へと移動するように設定された. また, 把持力の目標となるターゲット視標を (白色の長方形, 21mm × 4mm) 左右指それぞれに関して提示した. ターゲット指標の中心から 98mm 下がカーソル (中点) の初期位置となる.

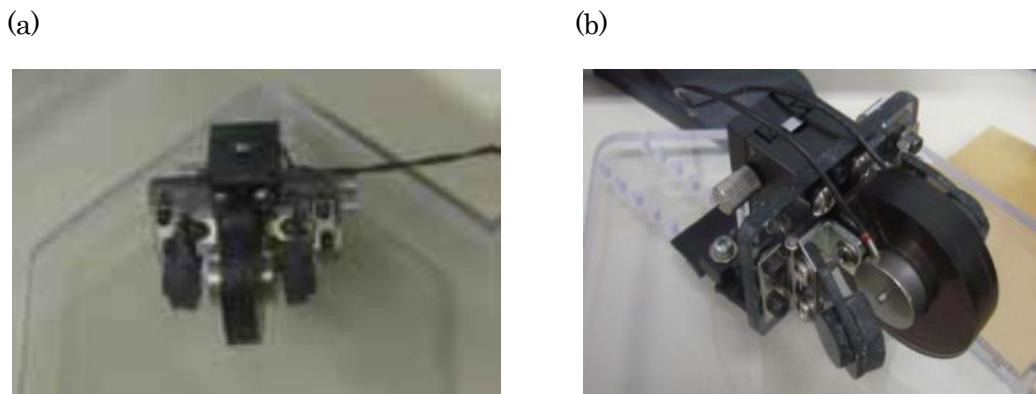


Figure 2: 把持力計測機構

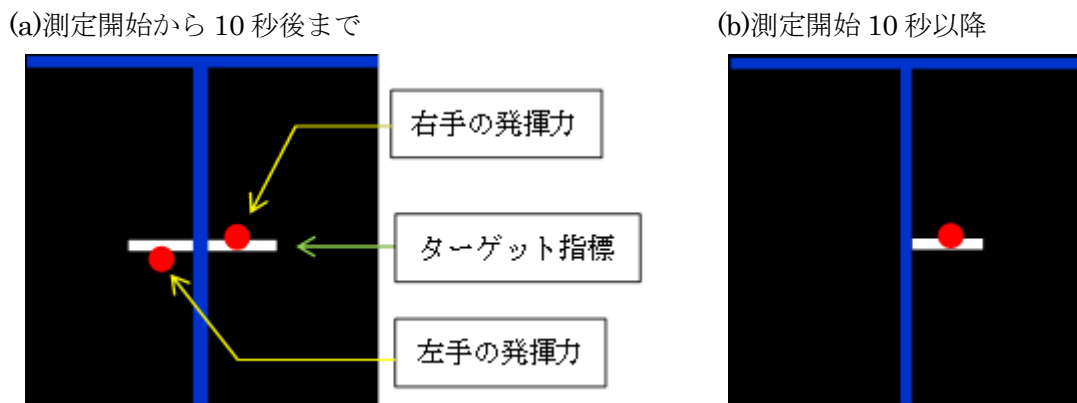


Figure 3: 発揮力提示画面 (NLVF 条件)

2.2 実験タスク

本実験では両手での拇指・示指を用いたピンチング動作を基本とした。被験者は、発揮力提示画面 (Fig. 3a) の提示を頼りに左手・右手ともに一定把持力を一定時間維持するよう教示された。

視覚フィードバックあり条件は、Visual Feedback (VF) 条件とし測定時間中間常に両側の視覚フィードバックが提示されていることを表している。視覚フィードバック消失条件においては、10 秒後に片側あるいは両側の視覚フィードバックのカーソルとターゲット視標が消失した (Fig. 3b)。被験者は、視覚フィードバックが消失した後も、最初の 10 秒で維持していた目標の発揮力を維持するように教示された。測定開始 10 秒後に左側の視覚フィードバックが消失する条件を No Left Visual Feedback (NLVF) 条件、右側の視覚フィードバックが消失する条件を No Right Visual Feedback (NRVF) 条件、両側の視覚フィードバックが消失する条件を No Visual Feedback (NVF) 条件とした。

2.3 実験手順

まず、各指のピンチング動作における最大随意収縮力 (Maximal Voluntary Force; MVF) を計測した。この測定は、左右別々に 2 回ずつ行い、それぞれの最大値を各被験者の MVF として採用した。この際、力の発揮時間は 4 秒以下となるようにした。その後、被験者ごとに、本実験課題の目標発揮力である 10[%MVF] 値を左右それぞれ算出した。

次に、VF 条件を 3 試行、視覚フィードバック消失条件 (NLVF・NRVF・NVF) をランダムに選択し 3 試行ずつを行った。よって、各被験者の合計遂行試行数は 12 試行となる。各試行終了後には 20 秒程度の休憩時間を設けた。また、計 6 試行終了後には 1 分程度の休憩時間を設けた。

2.4 データ解析手法

把持力の時系列データは、200[Hz]のサンプリング周波数で取得した。試行開始直後は目標把持力に合わせるために時間を要するため、力発揮データのうち、最初の 10 秒を除外したデータを解析対象区間とし以下の値を算出した。条件ごとに 3 試行の平均値を各被験者の値とした。

2.4.1 Task performance

- ① Root Mean Square Error (RMSE) : ある一定時間における教示された目標発揮力からのずれの大きさを示す。力発揮の正確性を示す指標である。

$$RMSE_{(\%MVF)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (F_t - F)^2}$$

- ② Constant Error (CE) : ある一定時間における教示された目標発揮力からのずれの方向(オーバーシュートまたはアンダーシュート) とその大きさを示す。発揮力が目標値よりも大きい場合(オーバーシュート)は正の値, 小さい場合(アンダーシュート)は負の値をとる。

$$CE_{(\%MVF)} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (F_t - F)$$

- ③ Standard Deviation (SD) : 発揮力の標準偏差である。

$$SD_{(\%MVF)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\bar{F} - F)^2}$$

- ④ Coefficient of variation (CV) : 発揮力の変動係数である。力発揮の安定性(変動性)を示す指標である。

$$CV = SD/\bar{F}$$

F_t : 各時刻における発揮力(10%MVF)

F : 目標発揮力(10%MVF)

\bar{F} : 発揮力の平均値(10%MVF)

n : サンプル数

2.4.2 周波数解析

まず、各試行においてパワースペクトルを算出し、平均周波数 (Mean Power Frequency ; MPF) を求める。続いて、周波数を 0~4[Hz], 4~8[Hz], 8~12[Hz] の帯域に分割し各周波数帯域のパワーと全体に占める割合を算出した(Vaillancourt and Newell, 2003; Sosnoff et al, 2006)。これにより発揮把持力データの波形自体を評価するための指標とした。なお、各周波数帯域は、感覚運動制御(0~4[Hz])、フィードフォワード制御(4~8[Hz])、生理的振戦(8~12[Hz])を表すもので(Freund and Hefter, 1993)、この筋制御における周波数の区分に基づき分割されている。

データ解析に用いる発揮把持力データは 10[s]~20[s]であるが、把持力計測機構のサンプリングレートが 200[Hz]であるため、この指標に関しては 9.76[s]~20[s]の 2048 個のサンプルを用いた。しかし、これらのデータには、特に視覚フィードバック消失条件について、把持動作に関する周波数に加え、データ全体の大きな変動が含まれる。そこで、これらのデータに対し、トレンド除去を行うことで、全体的な変動を抑える処理を行った。

2.4.3 相互相関係数

同時に発揮する左右の発揮把持力の時系列データを示す値として算出した。2 つの時系列データが類似しているほど、大きい値をとる。本実験では、時間ずれなしでの相互相関係数を算出した。

$$\text{相互相関係数} = \frac{\sum_{t=1}^n (FL_t - \overline{FL})(FR_t - \overline{FR})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (FL_t - \overline{FL})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (FR_t - \overline{FR})^2}}$$

FL_t : 各時刻における左手の発揮力(10%MVF)

FR_t : 各時刻における右手の発揮力(10%MVF)

\overline{FL} : 左手の発揮力の平均値(10%MVF)

\overline{FR} : 右手の発揮力の平均値(10%MVF)

n : サンプル数

第3章 加齢による影響

加齢による筋体積の減少(Grassi B et al, 1991)や筋力の低下(Sperling, 1980; Grassi B et al, 1991)が起こる。手の筋力に関しては、グリップ力やピンチング力の低下が報告されている(Mthiwetz et al, 1985; Su et al, 1995; Keogh et al, 2006; Angst et al, 2010)。加齢にともなう手の運動制御能力についての検討は、片手の示指外転(Vaillancourt and Newell, 2003; Sosnoff and Newell, 2011)やピンチング(Keogh et al, 2006; Francis et al, 2012)を課題として用いたものがある。両手での運動制御能力については、示指外転を課題とし、若年者と高齢者を比較したものがある(Hu and Newell, 2011b)。これらの研究で用いられた課題は、全て視覚フィードバックを頼りに力発揮をするものであった。

視覚フィードバックの有無についての検討は、若年者のみを対象としたもの(Baweja et al, 2009)や高齢者のみを対象としたもの(Marmon et al, 2011)がある。また、視覚フィードバックがある条件とない条件のそれぞれで子どもと大人を比較した研究(Deutsch and Newell, 2002)はある。しかし、加齢と視覚フィードバックの有無による影響を合わせて比較した研究はない。

そこで本章では、これまでに若年者と高齢者で比較検討されていない両手でのピンチングを課題として、視覚フィードバックの有無も考慮し加齢が精緻な力制御にどのような影響を及ぼすのかについて論ずる。

3.1 実験概要

本実験の被験者は若年者 38 名 (20.5±1.8, 男性 15 名, 女性 23 名) と高齢者 31 名 (65.1±8.1, 男性 15 名, 女性 16 名) であった。簡易的なエディンバラ利き手テスト (alleviated Edinburgh Handedness Inventory) を実施し、全員が右利きであることを確認した。

3.2 結果

VF 条件と, NVF 条件の結果を Figure 3.1~3.13 に示す。これらの結果は全被験者の平均値と標準偏差で示している。

統計処理は 2 元配置分散分析をグループ要因 (若年者・高齢者) と測定肢要因 (左手・

右手) の2 要因について行った。ただし, 相互相関係数に関しては, グループ要因 (young・old) と視覚フィードバック条件要因 (VF 条件・NVF 条件) の2 要因について行った。交互作用がみられた場合は下位検定を行った。有意水準は $p < 0.05$ とする。

MVF は分散分析の結果, グループの主効果は有意でなかった (若年者 135.7N, 高齢者 142.5N, $F(1, 67) = 0.526$, $p = 0.471$) が, 測定肢の主効果は有意であった (左手 131.2N, 右手 147.1N, $F(1, 67) = 50.934$, $p < 0.001$)。グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67) = 2.73$ $p = 0.103$)。

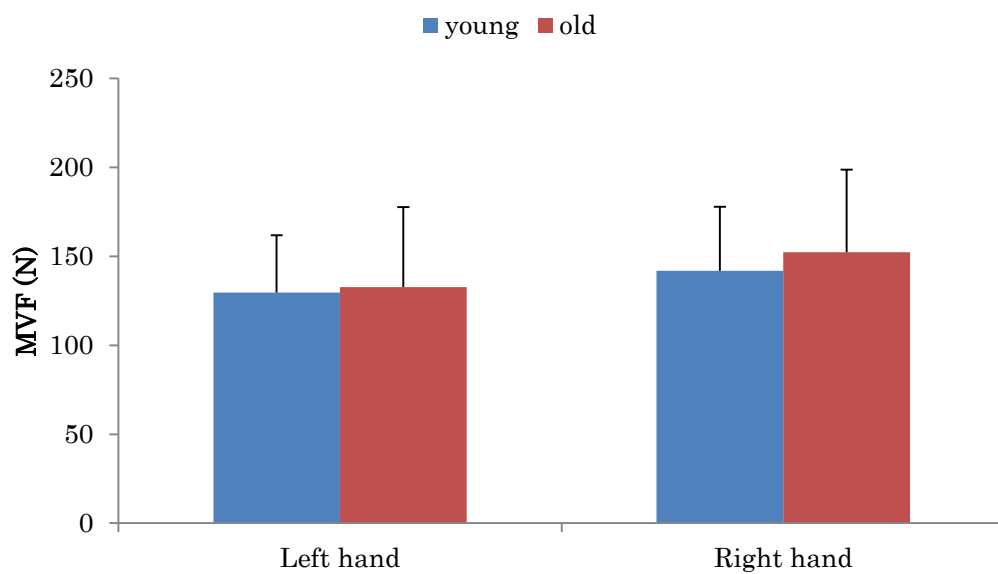


Figure 3.1: 若年者と高齢者の MVF

3.2.1 Task performance

RMSE は分散分析の結果, VF 条件ではグループの主効果は有意であった (若年者 0.18%MVF, 高齢者 0.35%MVF, $F(1, 67)=9.076$, $p<0.01$) が測定肢の主効果は有意ではなかった (左手 0.28%MVF, 右手 0.26%MVF, $F(1, 67)=1.08$, $p=0.302$). グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=0.052$ $p=0.821$). NVF 条件ではグループの主効果 (若年者 0.86%MVF, 高齢者 0.87%MVF, $F(1, 67)=0.005$, $p=0.944$) 測定肢の主効果 (左手 0.92%MVF, 右手 0.82%MVF, $F(1, 67)=3.94$, $p=0.051$) はともに有意ではなかった. また, グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=0.402$ $p=0.528$).

CE は分散分析の結果, VF 条件ではグループの主効果は有意であった (若年者 -0.08 %MVF, 高齢者 0.03%MVF, $F(1, 67)=4.074$, $p<0.05$) が測定肢の主効果は有意ではなかった (左手 -0.03 %MVF, 右手 -0.02 %MVF, $F(1, 67)=0.009$, $p=0.925$). グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=0.501$, $p=0.482$). NVF 条件ではグループの主効果は有意であった (若年者 -0.64 %MVF, 高齢者 -0.35 %MVF, $F(1, 67)=4.19$, $p<0.05$) が測定肢の主効果 (左手 -0.64 %MVF, 右手 -0.35 %MVF, $F(1, 67)=0.058$, $p=0.925$) は有意ではなかった. グループ×測定肢の交互作用があった ($F(1, 67)=4.301$, $p<0.05$). 測定肢ごとの下位検定を行った結果, 左手では若年者と高齢者に有意差 ($p<0.05$) があったが, 右手にはなかった ($p=0.319$).

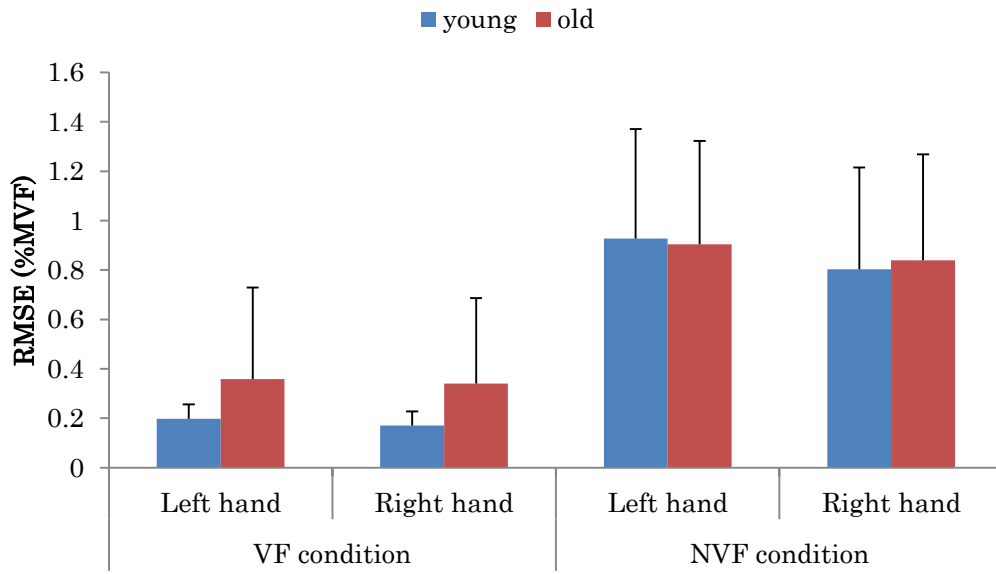


Figure 3.2: 若年者と高齢者の RMSE

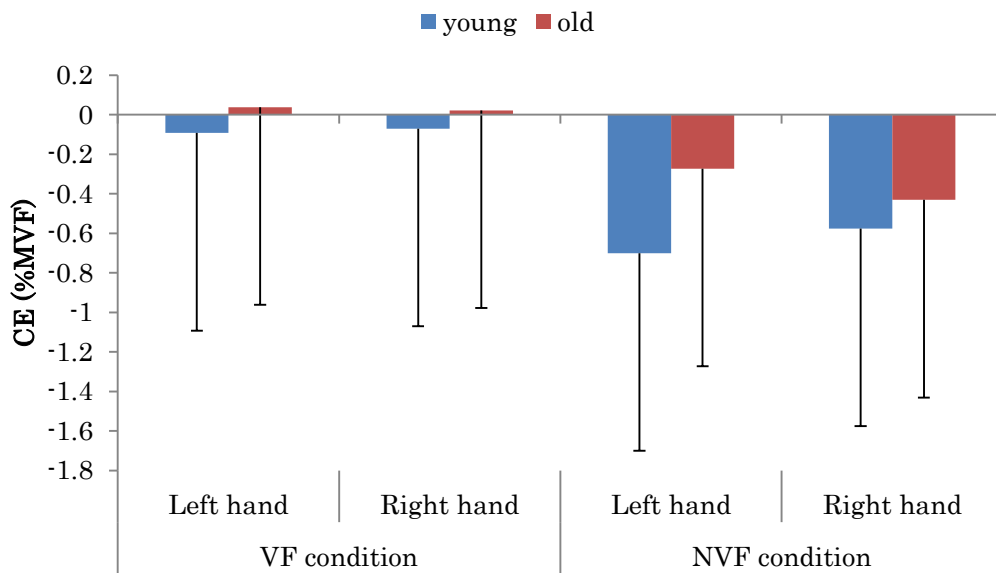


Figure 3.3: 若年者と高齢者の CE

SD は分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果（若年者 0.12%MVF, 高齢者 0.23%MVF, $F(1, 67)=11.783$, $p<0.01$) 測定肢の主効果(左手 0.195%MVF, 右手 0.159%MVF, $F(1, 67)=5.272$, $p<0.05$) はともに有意であった。グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=0.961$, $p=0.331$)。NVF 条件ではグループの主効果は有意ではなかった（若年者 0.229%MVF, 高齢者 0.225%MVF, $F(1, 67)=0.056$, $p=0.814$) が、測定肢の主効果は有意であった（左手 0.245%MVF, 右手 0.210%MVF, $F(1, 67)=15.951$, $p<0.001$)。また、グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=2.217$ $p=0.141$)。

CV は分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果（若年者 0.012, 高齢者 0.022, $F(1, 67)=12.285$, $p<0.01$) と測定肢の主効果(左手 0.019, 右手 0.015, $F(1, 67)=5.265$, $p<0.05$) はともに有意であった。グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=0.906$, $p=0.345$)。NVF 条件ではグループの主効果は有意でなかった（若年者 0.024, 高齢者 0.023, $F(1, 67)=0.463$, $p=0.499$) が、測定肢の主効果は有意であった（左手 0.0259, 右手 0.0223, $F(1, 67)=16.125$ $p<0.001$)。また、グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=1.053$, $p=0.308$)。

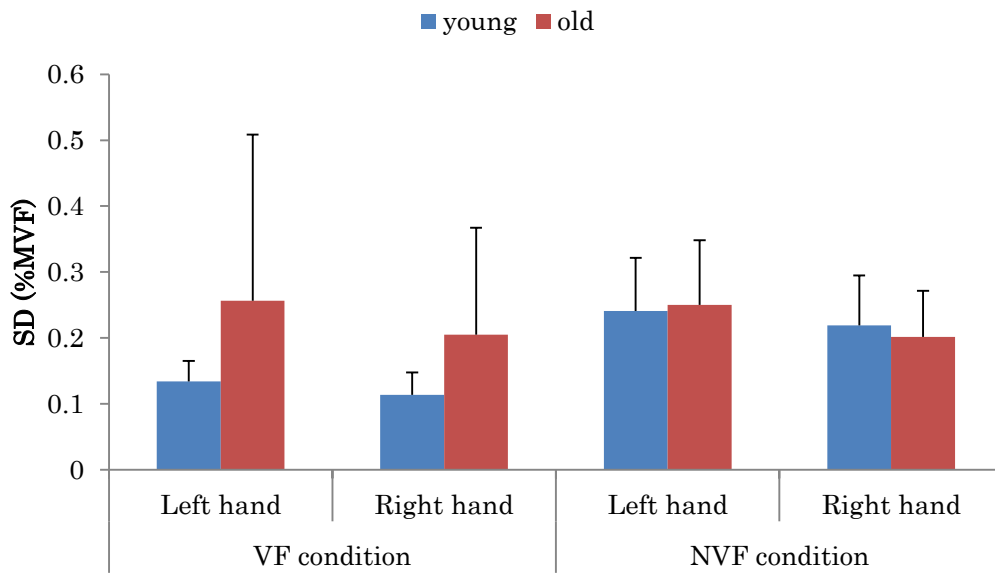


Figure 3.4: 若年者と高齢者の SD

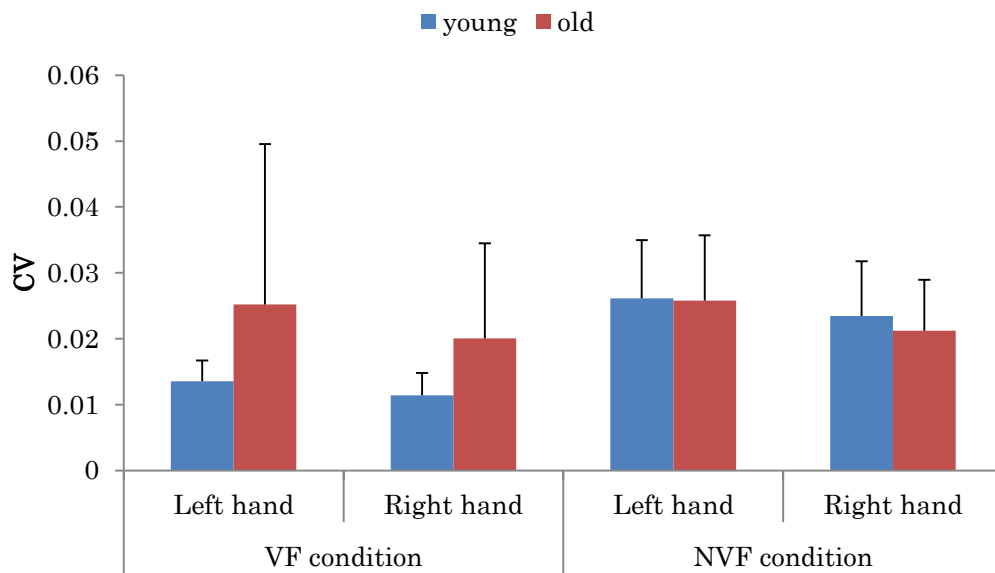


Figure 3.5: 若年者と高齢者の CV

3.2.2 周波数解析

MPF は分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果（若年者 1.35, 高齢者 1.31, $F(1, 67)=0.139$, $p=0.71$) と測定肢の主効果(左手 1.36, 右手 1.31, $F(1, 67)=0.99$, $p=0.32$) はともに有意ではなかった。グループ×測定肢の交互作用 ($F(1, 67)=3.451$, $p=0.068$) はなかった。NVF 条件も同様に, グループの主効果（若年者 0.64, 高齢者 0.71, $F(1, 67)=2.617$, $p=0.11$), 測定肢の主効果(左手 0.68, 右手 0.67, $F(1, 67)=0.148$, $p=0.70$) はともに有意でなかった。また, グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=3.574$, $p=0.063$)。

0-4Hz 周波数帯域のパワーは分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果は有意であった（若年者 6.52, 高齢者 42.03, $F(1, 67)=7.543$, $p<0.01$) が, 測定肢の主効果（左手 33.23, 右手 15.32, $F(1, 67)=2.79$, $p=0.099$) は有意ではなかった。グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=2.192$, $p=0.143$)。NVF 条件ではグループの主効果は有意でなかった（若年者 28.24, 高齢者 27.22, $F(1, 67)=0.044$, $p=0.835$) が, 測定肢の主効果は有意であった（左手 31.59, 右手 23.87, $F(1, 67)=14.544$, $p<0.001$)。また, グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67)=3.173$, $p=0.079$)。

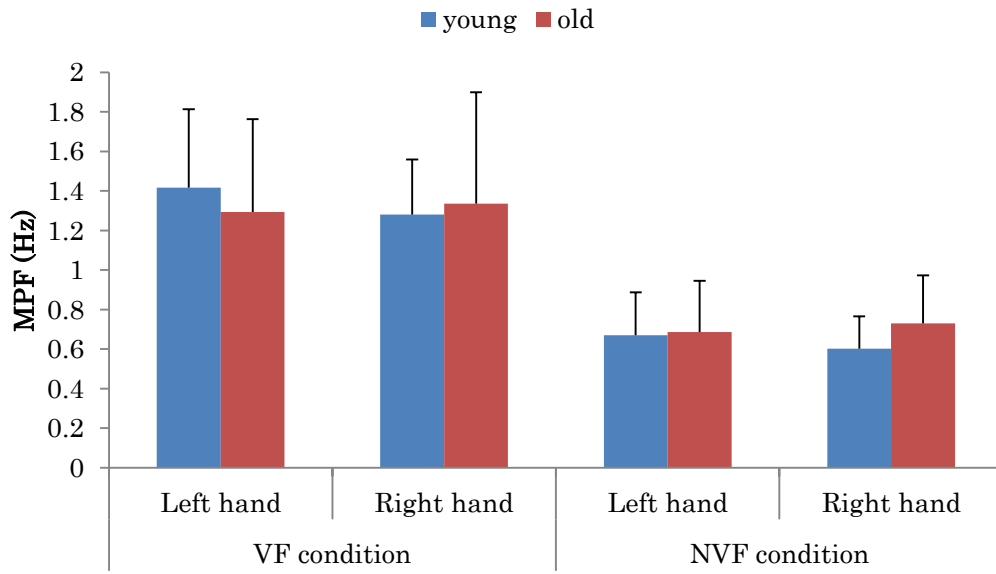


Figure 3.6: 若年者と高齢者のMPF

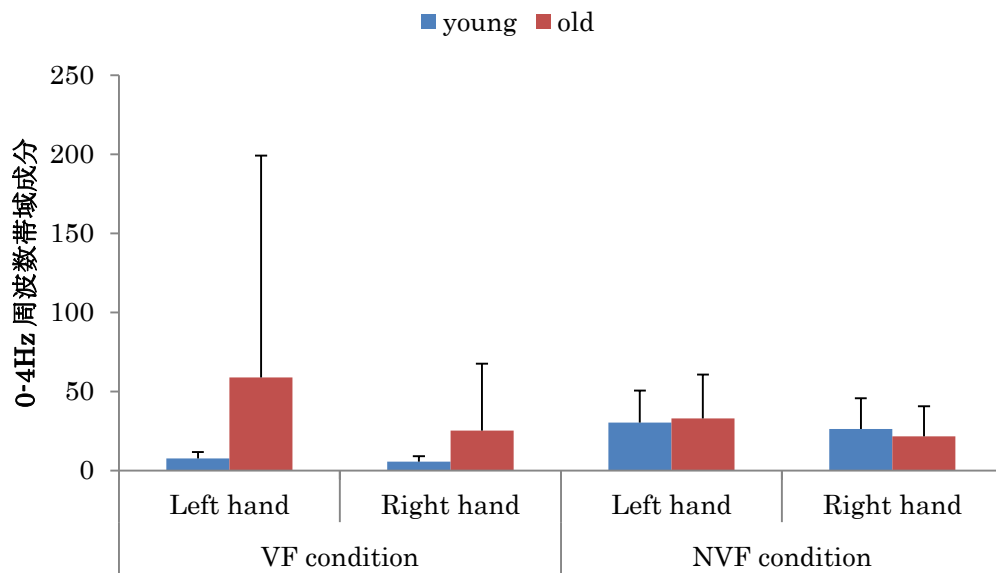


Figure 3.7: 若年者と高齢者の0-4Hz 周波数帯域成分

4-8Hz 周波数帯域のパワーは分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果（若年者 0.24, 高齢者 0.59, $F(1, 67) = 8.129, p < 0.01$) と測定肢の主効果（左手 0.49, 右手 0.35, $F(1, 67) = 4.064, p < 0.05$) はともに有意であった。グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67) = 0.081, p = 0.964$)。NVF 条件ではグループの主効果は有意でなかった（若年者 0.27, 高齢者 0.45, $F(1, 67) = 3.083, p = 0.084$) が、測定肢の主効果は有意であった（左手 0.42, 右手 0.29, $F(1, 67) = 19.198, p < 0.001$)。また、グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67) = 0.002, p = 0.964$)。

8-12Hz 周波数帯域のパワーは分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果は有意でなかった（若年者 0.12, 高齢者 0.12, $F(1, 67) = 0.014, p = 0.906$) が、測定肢の主効果（左手 0.15, 右手 0.097, $F(1, 67) = 6.418, p < 0.05$) は有意であった。グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67) = 1.477, p = 0.229$)。同様に NVF 条件ではグループの主効果は有意でなかった（若年者 0.079, 高齢者 0.12, $F(1, 67) = 3.043, p = 0.086$) が、測定肢の主効果は有意であった（左手 0.11, 右手 0.08, $F(1, 67) = 11.105, p < 0.01$)。また、グループ×測定肢の交互作用はなかった ($F(1, 67) = 0.002, p = 0.967$)。

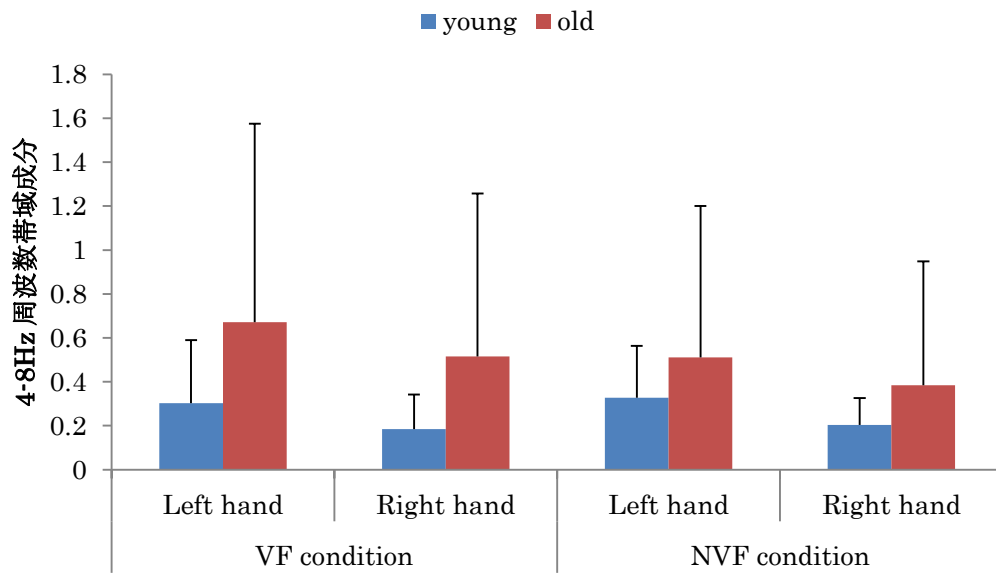


Figure 3.8: 若年者と高齢者の4-8Hz周波数帯域成分

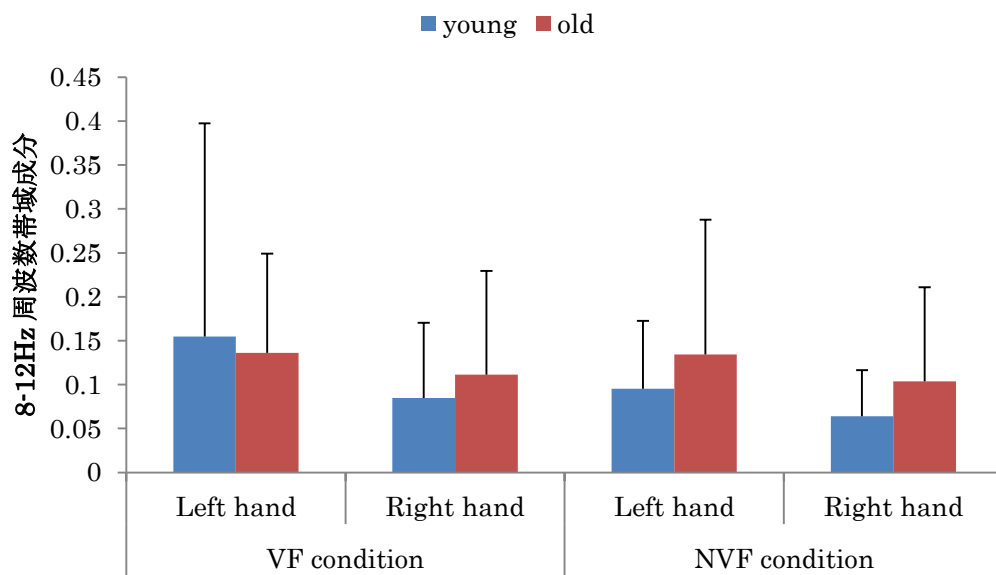


Figure 3.9: 若年者と高齢者の8-12Hz周波数帯域成分

0-4Hz 周波数帯域成分の割合は分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果（若年者 94.03%，高齢者 93.26%， $F(1, 67)=0.562$ $p=0.456$ ）と測定肢の主効果（左手 93.62%，右手 93.67%， $F(1, 67)=0.015$ $p=0.904$ ）はともに有意でなかった。グループ×測定肢の交互作用はなかった（ $F(1, 67)=2.274$ $p=0.136$ ）。NVF 条件ではグループの主効果は有意であった（若年者 97.72%，高齢者 96.81%， $F(1, 67)=5.806$ $p<0.05$ ）が、測定肢の主効果は有意でなかった（左手 97.24%，右手 97.29%， $F(1, 67)=0.036$ $p=0.849$ ）。また、グループ×測定肢の交互作用はなかった（ $F(1, 67)=2.623$ $p=0.11$ ）。

4-8Hz 周波数帯域成分の割合は分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果（若年者 3.83%，高齢者 5.09%， $F(1, 67)=2.485$ $p=0.12$ ）と測定肢の主効果（左手 4.49%，右手 4.44%， $F(1, 67)=0.036$ $p=0.851$ ）はともに有意でなかった。グループ×測定肢の交互作用はなかった（ $F(1, 67)=1.879$ $p=0.175$ ）。NVF 条件ではグループの主効果は有意であった（若年者 1.64%，高齢者 2.37%， $F(1, 67)=5.827$ $p<0.05$ ）が、測定肢の主効果は有意でなかった（左手 2.03%，右手 1.98%， $F(1, 67)=0.076$ $p=0.784$ ）。また、グループ×測定肢の交互作用はなかった（ $F(1, 67)=2.313$ $p=0.133$ ）。

8-12Hz 周波数帯域成分の割合は分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果（若年者 1.77%，高齢者 1.38%， $F(1, 67)=1.588$ $p=0.212$ ）と測定肢の主効果（左手 1.59%，右手 1.57%， $F(1, 67)=0.017$ $p=0.896$ ）はともに有意ではなかった。グループ×測定肢の交互作用はなかった（ $F(1, 67)=2.478$ $p=0.12$ ）。NVF 条件ではグループの主効果は有意であった（若年者 0.50%，高齢者 0.68%， $F(1, 67)=4.382$ $p<0.05$ ）が、測定肢の主効果は有意でなかった（左手 0.59%，右手 0.596%， $F(1, 67)=0.024$ $p=0.877$ ）。また、グループ×測定肢の交互作用はなかった（ $F(1, 67)=2.749$ $p=0.102$ ）。

3.2.3 相互相関係数

相互相関係数は分散分析の結果、グループの主効果（若年者 0.51，高齢者 0.51， $F(1, 67)=0.033$ $p=0.856$ ）と視覚フィードバック条件の主効果（VF 0.37，NVF 0.65， $F(1, 67)=60.97$ $p<0.001$ ）はともに有意であった。グループ×視覚フィードバック条件の交互作用はなかった（ $F(1, 67)=0.166$ $p=0.685$ ）。

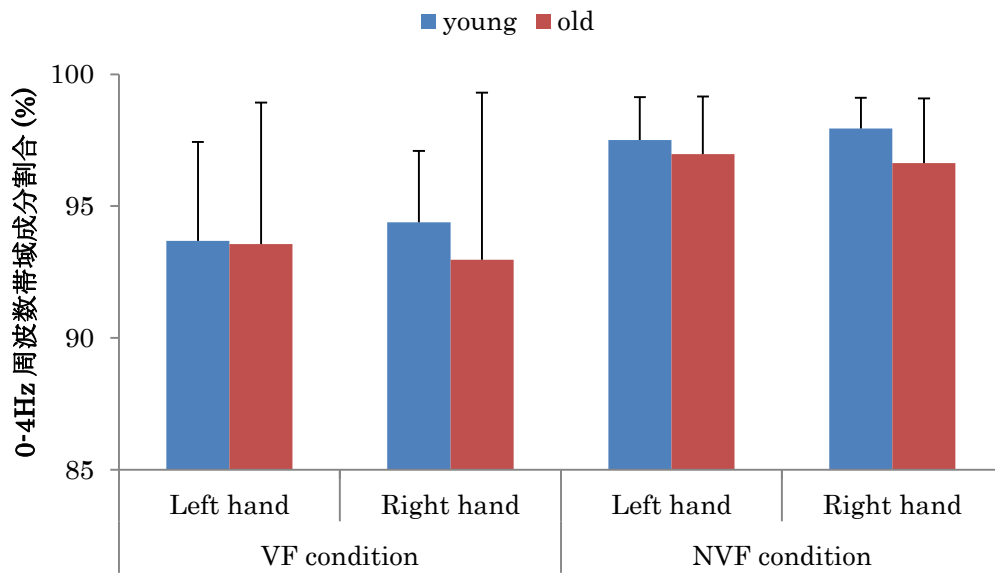


Figure 3.10: 若年者と高齢者の0-4Hz 周波数帯域成分割合

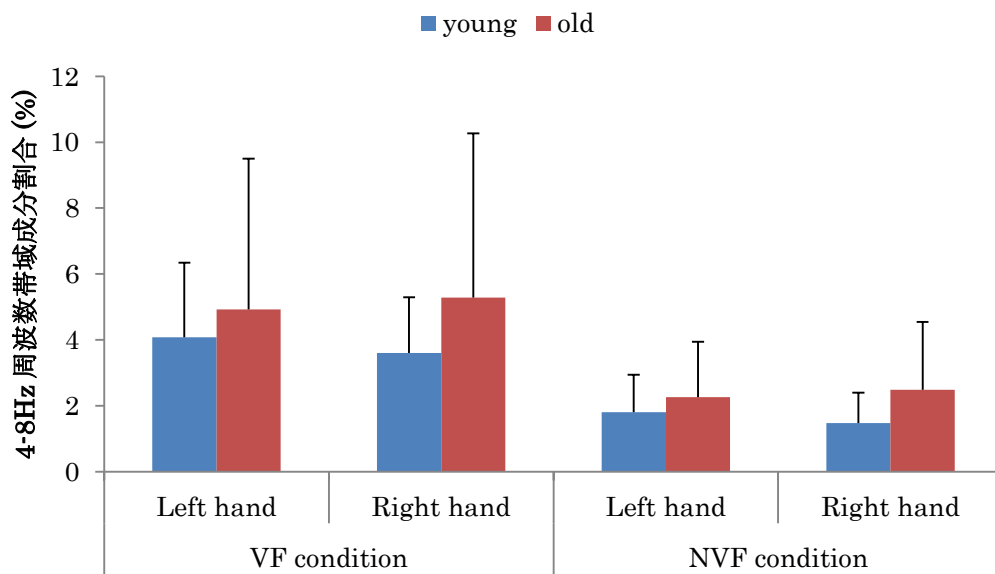


Figure 3.11: 若年者と高齢者の4-8Hz 周波数帯域成分割合

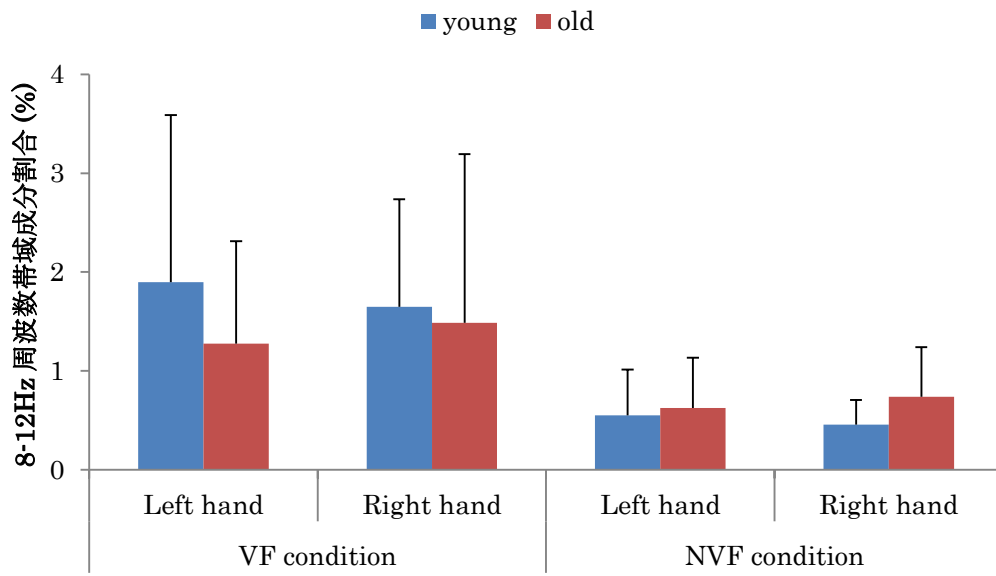


Figure 3.12: 若年者と高齢者の8-12Hz 周波数帯域成分割合

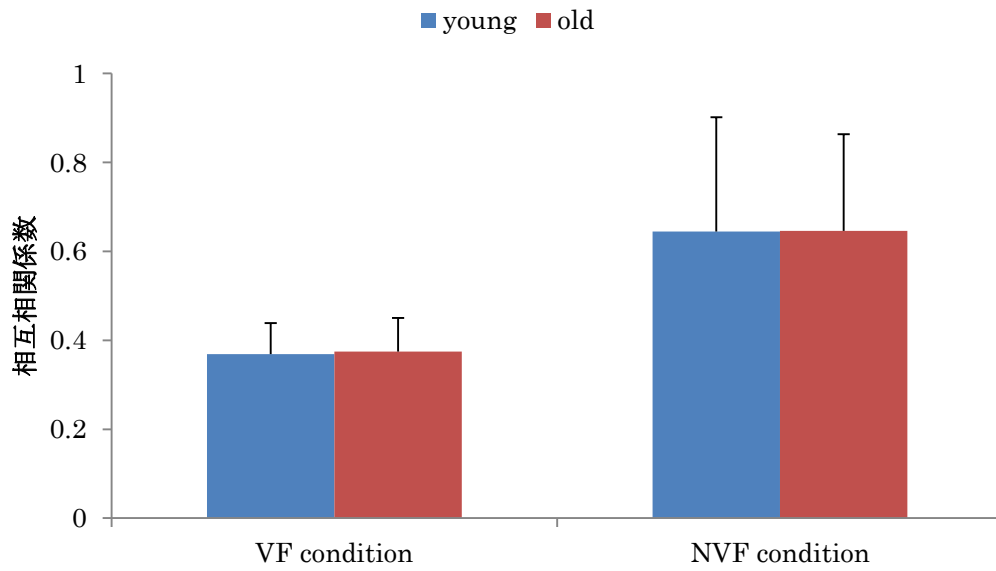


Figure 3.13: 若年者と高齢者の相互相関係数

3.3 考察

本章では、若年者と高齢者の両手把持運動を視覚フィードバックがある条件とない状態で比較した。これにより、加齢が精緻な力制御に与える影響を検討した。

3指によるピンチングを課題として用いた Keogh et al(2006)の実験では、高齢者の最大把持力は若年者よりも低いが、本研究では、最大把持力で若年者と高齢者に有意差はなかった。

本研究では、発揮力の正確性を示す指標である RMSE は、VF 条件では若年者に対して高齢者が有意に高い値であった。示指の外転(Vaillancourt and Newell, 2002; Hu and Newell, 2011b)や3指での把持(Keogh et al. 2006)を用いた先行研究の結果と一致する。また、力の安定性を示す指標である CV についても、VF 条件では若年者に対して高齢者が有意に高い値であった。こちらの結果も、(Tracy et al, 2005; Keogh et al. 2006; Griffin et al, 2009; Ofori, 2010; Hu and Newell, 2011b)と同じ結果であった。この2つの結果から、VF 条件下における高齢者の制御能力は若年者に対して低いと言える。

Vaillancourt and Newell(2002)は、各周波数帯域のパワーが若年者に対して高齢者の方が高い値をとると報告している。また、Keogh et al(2006)も、0-4Hz の周波数帯においてピークパワーは若年者に対して高齢者の方が大きいと報告している。さらに、Vaillancourt and Newell(2002)は、0-4Hz の周波数帯域成分のパワーの差が若年者と高齢者で最も大きいことから、若年者と高齢者の RMSE (force output) の差を生み出しているのはこの周波数帯域成分によるものだと示唆している。本研究では、0-4Hz および 4-8Hz の周波数帯域成分のパワーが若年者に対して高齢者は有意に高い値であった。また、先行研究同様、0-4Hz の周波数帯域成分は若年者と高齢者の差が大きかった。

一方、NVF 条件では RMSE も CV も若年者と高齢者で有意な差が認められなかった。また、周波数帯域成分のパワーについても、全ての周波数帯域成分において若年者と高齢者で有意差はなかった。つまり、視覚フィードバックの消失により、制御能力は若年者と高齢者で差がなくなる。

相互相関係数については、若年者と高齢者の間に有意差はなかった。過去に脳梗塞もしくは脳出血を起こしたことがある高齢者（ストローク群）と一般の高齢者（コントロール群）を比較した研究では、ストローク群はコントロール群に対して右手と左手の相互相関が低かったと報告されている(Hu et al, 2011b; Lodha et al, 2012)。本研究の被験者は脳梗塞など脳への障害を受けたことはない被験者であり、若年者と同等な力の出力指令を持ち

合わせていたと考えられる。また、相互相関係数は視覚フィードバックがなくなると有意に高くなる。これは(Hu et al, 2011a)の結果と一致する。このことから、視覚情報は両手での独立した運動制御に大きな影響を与えていることが示唆される。

以上より、若年者に対して高齢者は両手での精緻な制御が低くなるのは、筋力低下が原因ではなく、若年者と近似的な出力指令を持っているにもかかわらず視覚フィードバック情報を有効に利用できていないことが原因だと考えられる。

第4章 不活動による影響

加齢による筋萎縮は、60歳以降で毎年1%減少すると言われている。そして、このような老化現象を高齢者でなくても短期間で引き起こすのが、加齢変化の加速モデルとされているのが、宇宙飛行による無重力空間滞在(Edgerton et al, 1995; Akima et al, 2000; LeBlanc et al, 2000)やベッドレストによる不活動(Convertino et al, 1989; Abe et al, 1997)であり、特に歩行に重要な下腿三頭筋の萎縮について報告している。また全身の不活動ではなく、上肢のみを固定し不活動状態を作り出し、筋体積の減少や筋力の低下度合い(Kitahara et al, 2003; Motobe et al, 2003)、筋力回復までに要する期間(Yue et al, 1997)を検討した研究もある。このように、筋の形態的および機能的な変化は検討されているが、不活動にともなう上肢の精緻な運動制御能力の変化については検討されていない。

下肢の筋体積および筋力の低下は歩行能力に影響が及び、高齢者であれば転倒のリスクが高まる。このため、不活動によって加齢と同じ変化を急速に引き起こし、その予防方法などについて検討することには意義があるだろう。しかし、上肢、特に手に関しては日常生活を健全に過ごすために器用さが必要である。よって、筋体積や筋力についての検討よりも制御能力についての検討が重要であると考える。

そこで本章では基礎的な知見のひとつとして、片腕の不活動が両手での精緻な力制御にどのような影響を及ぼすのかについて論ずる。

4.1 実験概要

本実験の被験者は健康な大学生の男性14名(20.0±1.3歳)であった。エディンバラ利き手テスト(Edinburgh Handedness Inventory)を実施し、全員が右利きであることを確認した。被験者は非利き手である左腕を上腕中位から手の遠位指節間関節までを3週間ギプス固定した。ピンチング測定は固定1週間前(pre)、固定期間終了直後(post)、固定期間終了1週間後(recovery)の3回行った。

4.2 結果

VF条件と、NVF条件の結果をFigure4.1~4.13に示す。これらの結果は全被験者の平均値

と標準偏差で示している。

統計処理は2元配置分散分析を測定肢要因（左手・右手）と測定時期要因（pre・post・recovery）の2要因について行った。ただし、相互相関係数に関しては、測定時期要因（pre・post・recovery）と条件要因（VF条件・NVF条件）の2要因について行った。交互作用がみられた場合は下位検定を行った。有意水準は $p < 0.05$ とする。

MVFは分散分析の結果、測定肢の主効果（左手 129.9N, 右手 159.9N, $F(1, 13)=43.78$, $p < 0.001$ ）、測定時期の主効果（pre 154.8N, post 137.7N, recovery 142.3N, $F(2, 12)=4.726$, $p < 0.05$ ）はともに有意であった。測定肢×測定時期の交互作用があった（ $F(2, 12)=12.285$ $p < 0.001$ ）。測定肢ごとの下位検定を行った結果、左手ではpreとpostに有意差（ $p < 0.05$ ）があったが、右手にはなかった。

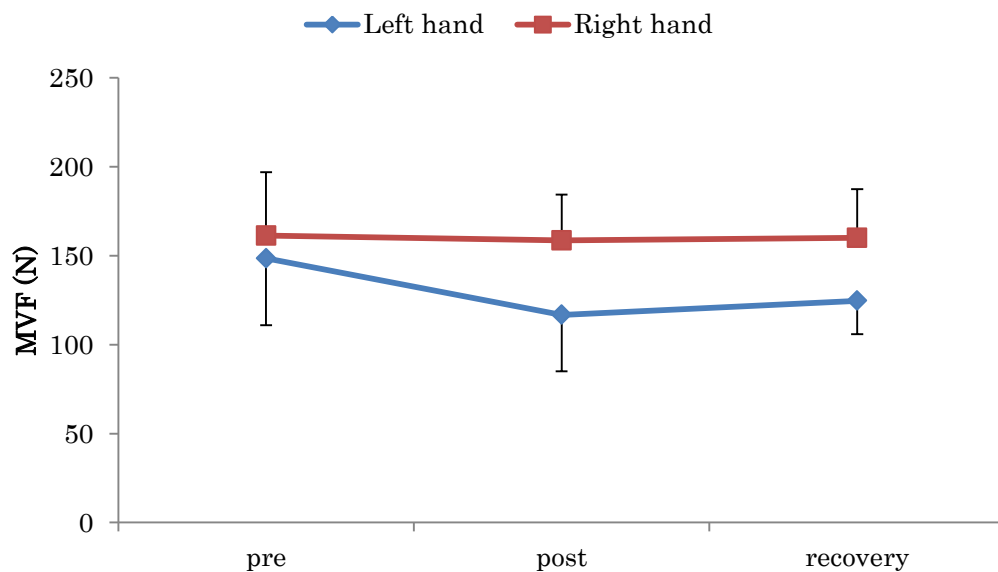


Figure 4.1: 各測定時期のMVF

4.2.1 Task performance

RMSEは分散分析の結果、VF条件では測定肢の主効果（左手 0.21%MVF, 右手 0.18%MVF, $F(1, 13)=18.002$, $p < 0.01$ ）、測定時期の主効果（pre 0.21%MVF, post 0.21%MVF, recovery 0.17%MVF, $F(2, 12)=4.096$, $p < 0.01$ ）はともに有意であった。測定肢×測定時期の交互作

用があった ($F(2, 12)=5.624$ $p<0.01$)。測定肢ごとの下位検定を行った結果、左手では pre と recovery に有意差 ($p<0.05$) があったが、右手にはなかった。NVF 条件では測定肢の主効果 (左手 $0.91\%MVF$, 右手 $0.81\%MVF$, $F(1, 13)=1.56$, $p=0.234$)、測定時期の主効果 (pre $0.94\%MVF$, post $0.94\%MVF$, recovery $0.70\%MVF$, $F(2, 12)=2.467$, $p=0.105$) はともに有意でなかった。測定肢×測定時期の交互作用があった ($F(2, 12)=4.065$ $p<0.05$)。測定肢ごとの下位検定を行った結果、左手、右手ともに有意差はなかった。

CE は分散分析の結果、VF 条件では測定肢の主効果は有意でなかった (左手 $-0.13\%MVF$, 右手 $-0.10\%MVF$, $F(1, 13)=4.159$, $p=0.062$) が、測定時期の主効果は有意であった (pre $-0.15\%MVF$, post $-0.11\%MVF$, recovery $-0.08\%MVF$, $F(2, 12)=4.81$, $p<0.05$)。測定肢×測定時期の交互作用があった ($F(2, 12)=8.787$ $p<0.01$)。測定肢ごとの下位検定を行った結果、左手では pre と recovery に有意差 ($p<0.01$) があったが、右手にはなかった。NVF 条件では測定肢の主効果 (左手 $-0.57\%MVF$, 右手 $-0.59\%MVF$, $F(1, 13)=0.679$, $p=0.425$)、測定時期の主効果 (pre $-0.73\%MVF$, post $-0.71\%MVF$, recovery $-0.45\%MVF$, $F(2, 12)=3.32$, $p=0.052$) はともに有意でなかった。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=2.536$ $p=0.099$)。

SD は分散分析の結果、VF 条件では測定肢の主効果 (左手 $0.14\%MVF$, 右手 $0.12\%MVF$, $F(1, 13)=12.657$ $p<0.01$) は有意であったが、測定時期の主効果 (pre $0.12\%MVF$, post $0.13\%MVF$, recovery $0.13\%MVF$, $F(2, 12)=1.715$, $p=0.20$) は有意でなかった。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=1.226$ $p=0.31$)。NVF 条件では測定肢の主効果 (左手 $0.30\%MVF$, 右手 $0.27\%MVF$, $F(1, 13)=1.827$, $p=0.199$)、測定時期の主効果 (pre $0.28\%MVF$, post $0.34\%MVF$, recovery $0.24\%MVF$, $F(2, 12)=0.777$, $p=0.47$) はともに有意でなかった。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=0.784$ $p=0.467$)。

CV は分散分析の結果、VF 条件では測定肢の主効果は有意であった (左手 0.014 , 右手 0.012 , $F(1, 13)=12.855$ $p<0.01$) が、測定時期の主効果は有意でなかった (pre 0.013 , post 0.014 , recovery 0.013 , $F(2, 12)=1.715$, $p=0.20$)。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=1.403$ $p=0.264$)。NVF 条件では測定肢の主効果 (左手 0.033 , 右手 0.029 , $F(1, 13)=2.236$, $p=0.159$)、測定時期の主効果 (pre 0.031 , post 0.037 , recovery 0.025 , $F(2, 12)=0.852$, $p=0.438$) はともに有意でなかった。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=1.126$ $p=0.34$)。

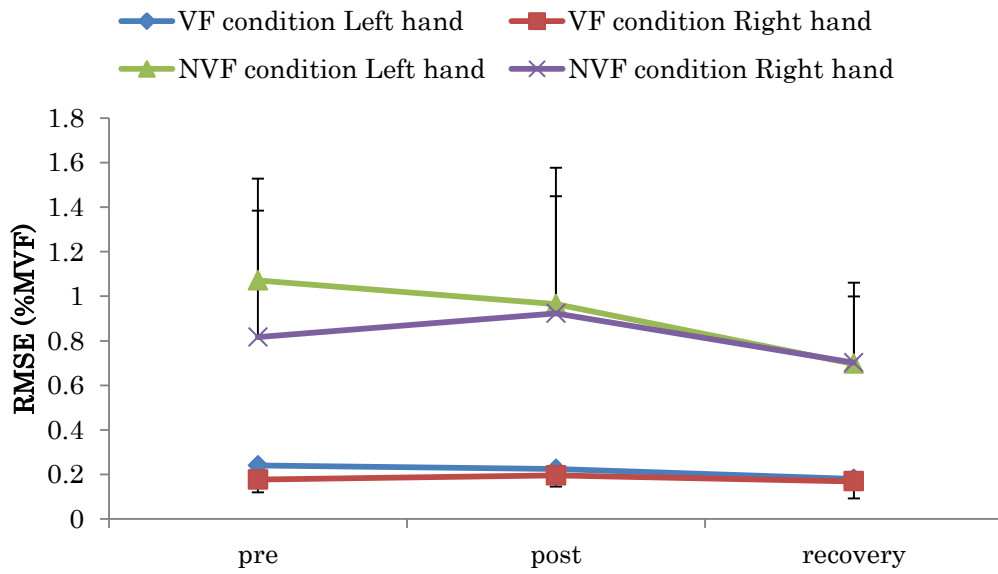


Figure 4.2: 各測定時期の RMSE

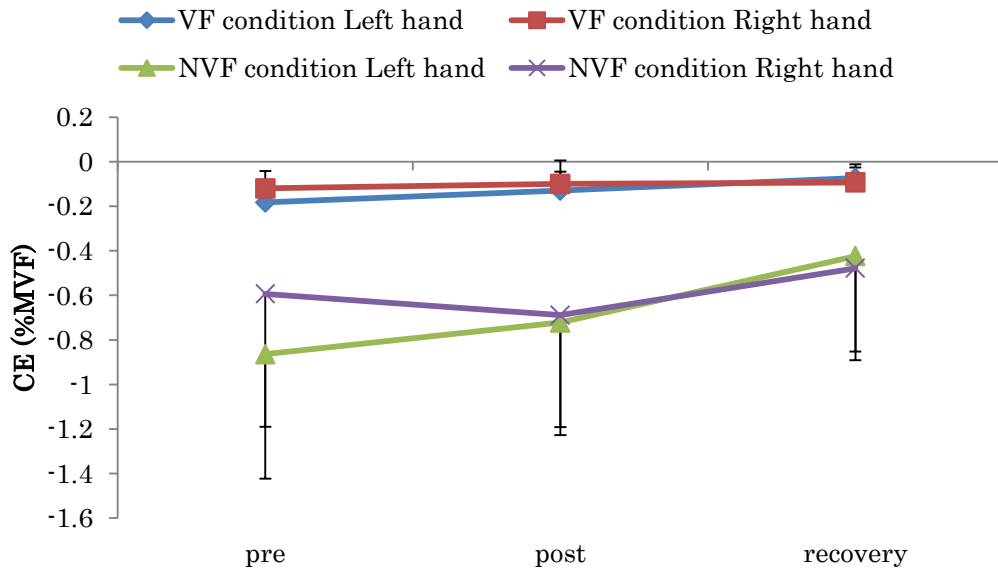


Figure 4.3: 各測定時期の CE

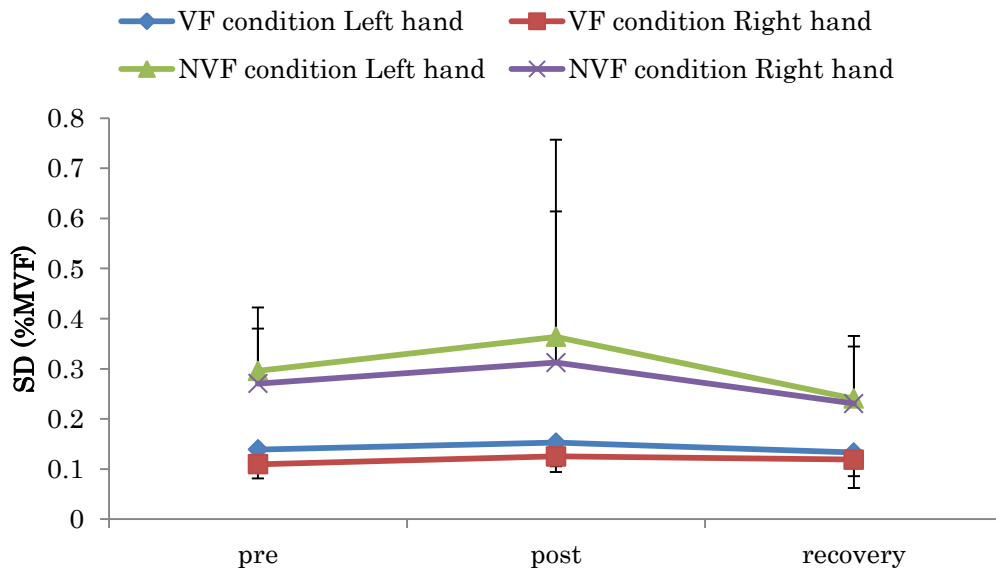


Figure 4.4: 各測定時期のSD

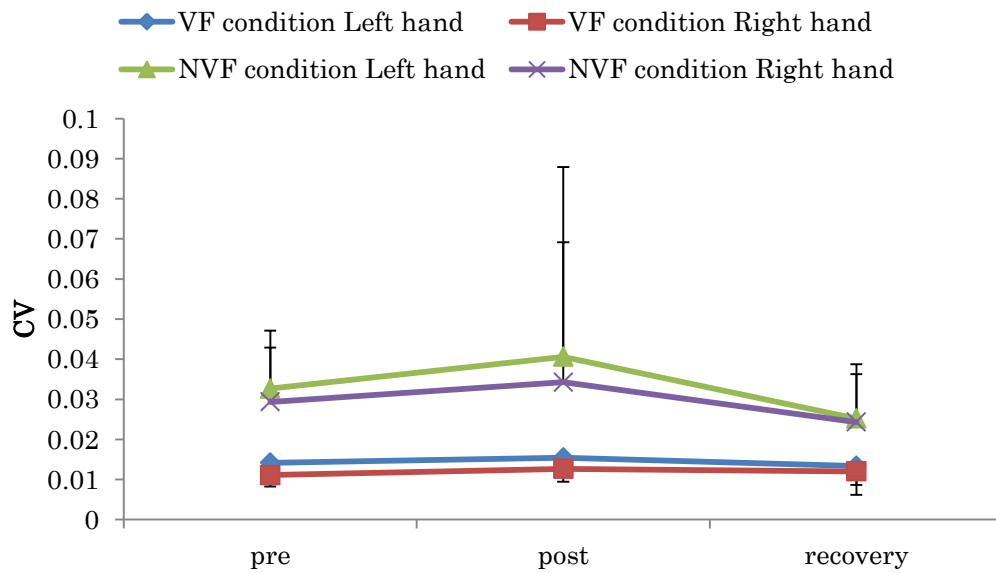


Figure 4.5: 各測定時期のCV

4.2.2 周波数解析

MPF は分散分析の結果、VF 条件では測定肢の主効果（左手 1.34, 右手 1.25, $F(1, 13)=1.49$, $p=0.24$), 測定時期の主効果（pre 1.40, post 1.24, recovery 1.24, $F(2, 12)=3.38$, $p=0.05$) はともに有意でなかった。測定肢×測定時期の交互作用があった ($F(2, 12)=8.877$ $p<0.01$)。測定肢ごとの下位検定を行った結果、左手では pre と post, recovery に有意差 ($p<0.01$, $p<0.05$) があったが、右手にはなかった。NVF 条件では測定肢の主効果が有意であった（左手 0.77, 右手 0.64, $F(1, 13)=5.405$ $p<0.05$) が、測定時期の主効果は有意でなかった（pre 0.62, post 0.73, recovery 0.77, $F(2, 12)=3.194$, $p=0.058$)。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=0.075$ $p=0.928$)。

0~4Hz 周波数帯域のパワーは分散分析の結果、VF 条件では測定肢の主効果（左手 8.31, 右手 6.63, $F(1, 13)=3.353$ $p=0.09$), 測定時期の主効果（pre 6.56, post 8.28, recovery 7.58, $F(2, 12)=0.524$, $p=0.598$) はともに有意でなかった。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=1.485$ $p=0.245$)。測. NVF 条件では測定肢の主効果（左手 87.37, 右手 66.61, $F(1, 13)=0.892$, $p=0.362$), 測定時期の主効果（pre 44.39, post 154.10, recovery 32.47, $F(2, 12)=0.913$, $p=0.414$) はともに有意でなかった。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=1.105$ $p=0.346$)。

4~8Hz 周波数帯域のパワーは分散分析の結果、VF 条件では測定肢の主効果は有意であった（左手 0.30, 右手 0.20, $F(1, 13)=5.271$ $p<0.05$) が、測定時期の主効果は有意でなかった（pre 0.22, post 0.29, recovery 0.24, $F(2, 12)=1.344$, $p=0.278$)。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=1.526$ $p=0.236$)。NVF 条件では測定肢の主効果は有意であった（左手 0.45, 右手 0.28, $F(1, 13)=8.859$ $p<0.05$) が、測定時期の主効果は有意でなかった（pre 0.31, post 0.45, recovery 0.35, $F(2, 12)=2.054$, $p=0.148$)。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=0.912$ $p=0.414$)。

8~12Hz 周波数帯域のパワーは分散分析の結果、VF 条件では測定肢の主効果は有意であった（左手 0.10, 右手 0.07, $F(1, 13)=6.646$ $p<0.05$) が、測定時期の主効果は有意でなかった（pre 0.10, post 0.08, recovery 0.07, $F(2, 12)=1.238$, $p=0.306$)。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=1.753$ $p=0.193$)。NVF 条件では測定肢の主効果は有意であった（左手 0.11, 右手 0.07, $F(1, 13)=5.134$ $p<0.05$) が、測定時期の主効果は有意でなかった（pre 0.08, post 0.10, recovery 0.08, $F(2, 12)=0.716$, $p=0.498$)。測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=1.098$ $p=0.348$)。

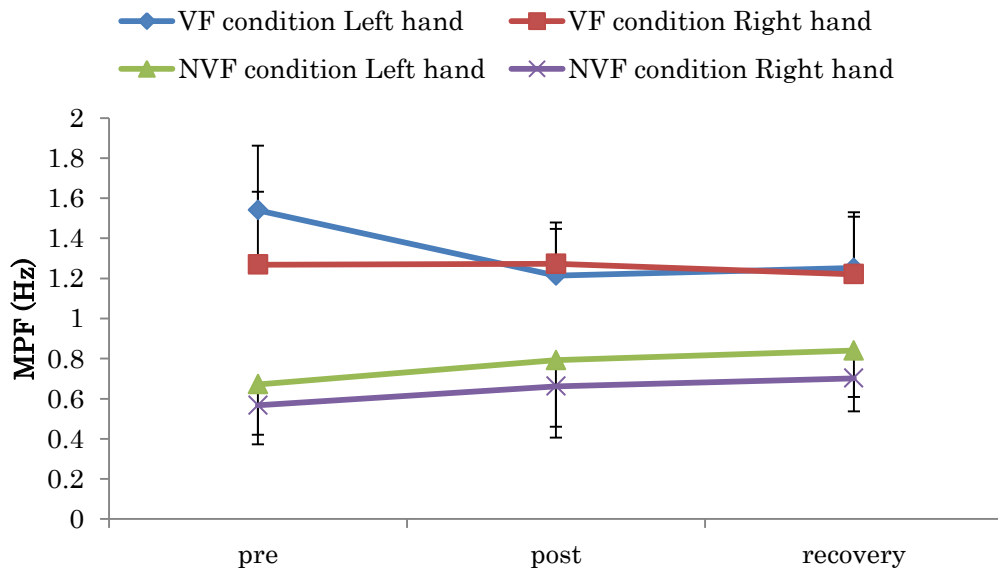


Figure 4.6: 各測定時期のMPF

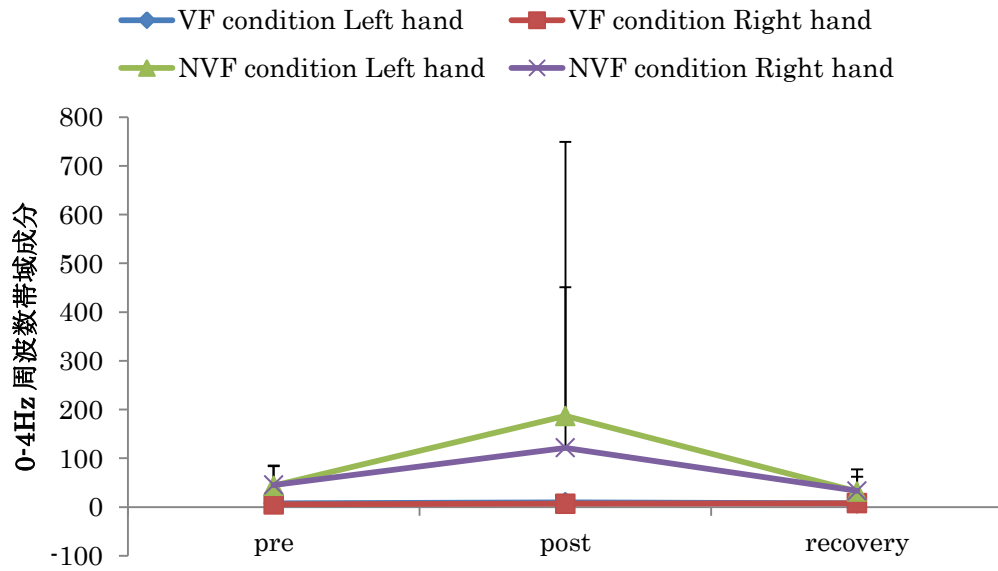


Figure 4.7: 各測定時期の0-4Hz周波数帯域成分

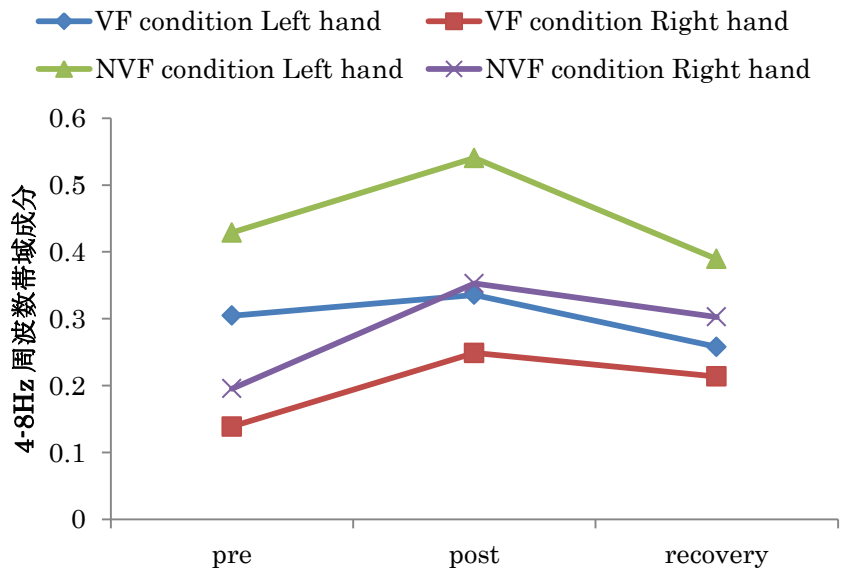


Figure 4.8: 各測定時期の4-8Hz 周波数帯域成分

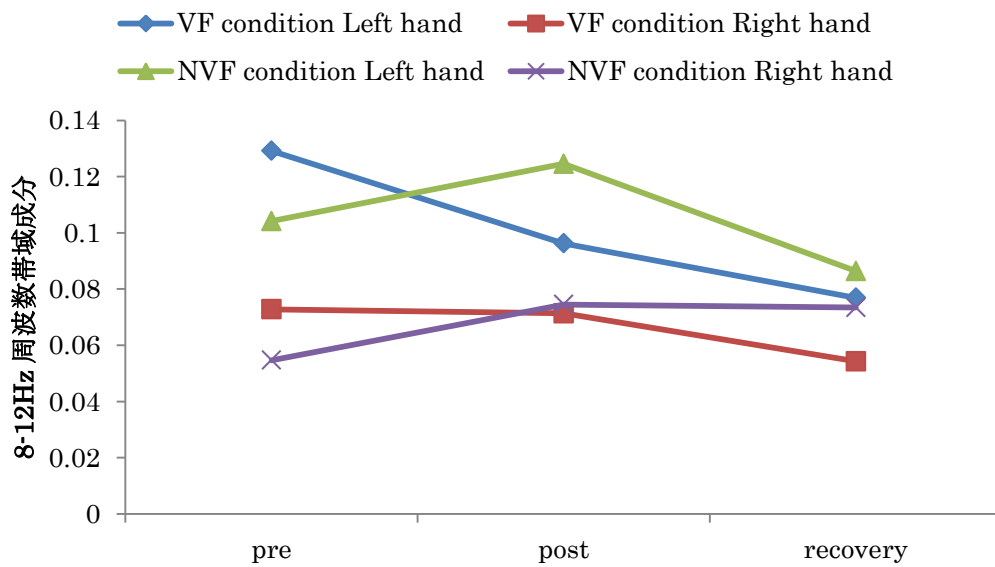


Figure 4.9: 各測定時期の8-12Hz 周波数帯域成分

0～4Hz 周波数帯域の割合は分散分析の結果, VF 条件では測定肢の主効果(左手 94.27%, 右手 97.12%, $F(1, 13)=0.233$, $p=0.645$), 測定時期の主効果(pre 93.85%, post 95.66%, recovery 94.69%, $F(2, 12)=0.671$, $p=0.52$) はともに有意でなかった. 測定肢×測定時期の交互作用があった ($F(2, 12)=4.779$ $p<0.05$). 測定肢ごとの下位検定を行った結果, 左手, 右手ともに有意差はなかった. NVF 条件では測定肢の主効果(左手 97.12%, 右手 97.96%, $F(1, 13)=4.176$, $p=0.062$), 測定時期の主効果(pre 97.92%, post 97.34%, recovery 97.36%, $F(2, 12)=1.254$, $p=0.302$) はともに有意でなかった. 測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=0.007$ $p=0.993$).

8～12Hz 周波数帯域の割合は分散分析の結果, VF 条件では測定肢の主効果(左手 1.41%, 右手 1.35%, $F(1, 13)=0.232$, $p=0.638$), 測定時期の主効果(pre 1.83%, post 1.19%, recovery 1.12%, $F(2, 12)=2.84$, $p=0.077$) はともに有意でなかった. 測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=0.779$ $p=0.469$). NVF 条件では測定肢の主効果は有意であった(左手 0.59%, 右手 0.38%, $F(1, 13)=5.705$ $p<0.05$) が, 測定時期の主効果は有意でなかった(pre 0.41%, post 0.53%, recovery 0.51%, $F(2, 12)=0.573$, $p=0.571$). 測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=0.241$ $p=0.787$).

4～12Hz 周波数帯域の割合は分散分析の結果, VF 条件では測定肢の主効果(左手 4.02%, 右手 3.82%, $F(1, 13)=0.19$, $p=0.67$), 測定時期の主効果(pre 3.98%, post 3.89%, recovery 3.89%, $F(2, 12)=0.018$, $p=0.982$) はともに有意でなかった. 測定肢×測定時期の交互作用があった ($F(2, 12)=6.494$ $p<0.01$). 測定肢ごとの下位検定を行った結果, 左手, 右手ともに有意差はなかった. NVF 条件では測定肢の主効果(左手 2.16%, 右手 1.51%, $F(1, 13)=4.031$, $p=0.066$), 測定時期の主効果(pre 1.54%, post 1.98%, recovery 1.99%, $F(2, 12)=1.589$, $p=0.223$) はともに有意であった. 測定肢×測定時期の交互作用がなかった ($F(2, 12)=0.089$ $p=0.915$).

4.2.3 相互相関係数

相互相関係数は分散分析の結果, 測定時期の主効果は有意でなかった(pre 0.36, post 0.37, recovery 0.36, $F(2, 12)=0.002$, $p=0.998$) が, 視覚フィードバック条件の主効果は有意であった(VF 0.21, NVF 0.52, $F(1, 13)=55.203$, $p<0.001$). 測定時期×視覚フィードバック条件の交互作用がなかった ($F(2, 12)=0.765$ $p=0.475$).

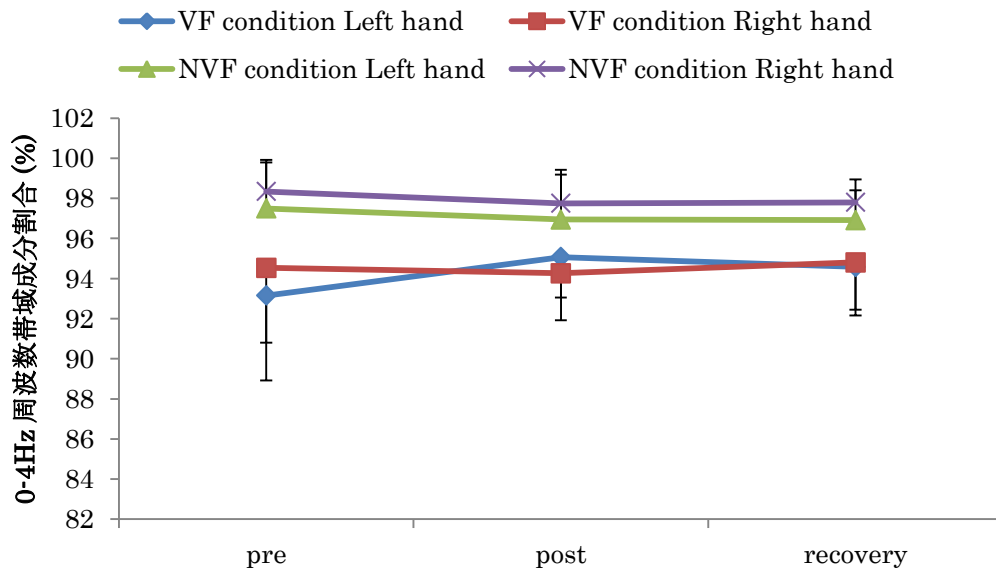


Figure 4.10: 各測定時期の0-4Hz 周波数帯域成分割合

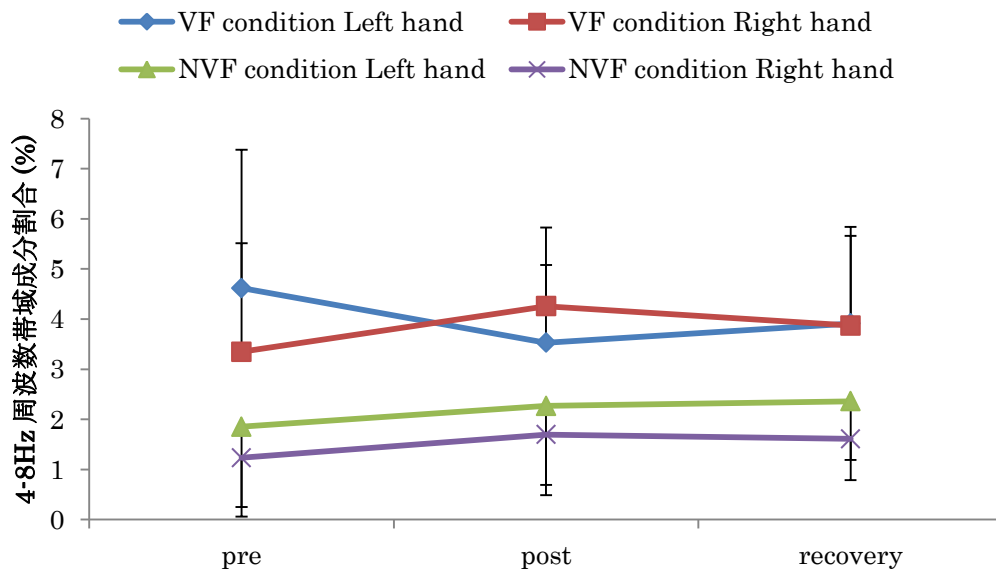


Figure 4.11: 各測定時期の4-8Hz 周波数帯域成分割合

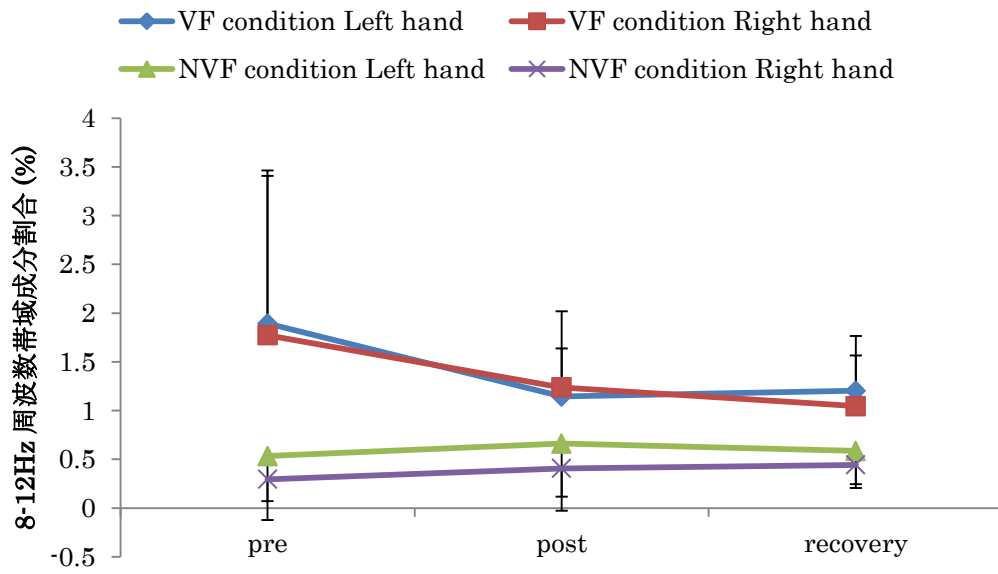


Figure 4.12: 各測定時期の8-12Hz 周波数帯域成分割合

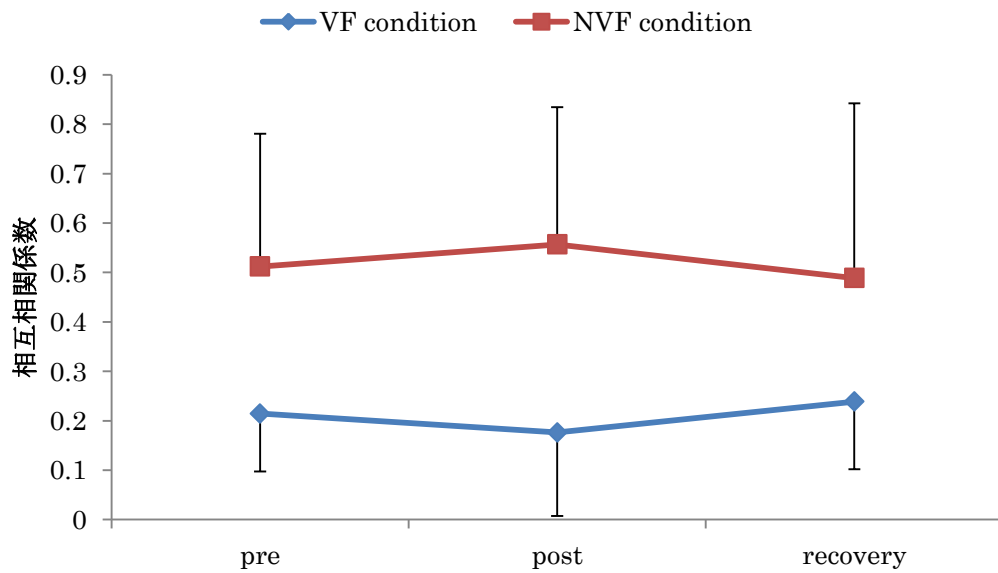


Figure 4.13: 各測定時期の相互相関係数

4.3 考察

本章では、若年者におけるギプス固定前後の両手ピンチング制御能力を視覚フィードバックがある条件とない状態で比較した。これにより、不活動が精緻な力制御に与える影響を検討した。

一側肢の不活動により、最大グリップ力の低下(Kitahara et al, 2003; Motobe et al, 2004; Matsumura et al, 2008; Ohmori et al, 2010)やグリップ持久力の低下(Kitahara et al, 2003; Motobe et al, 2004)、運動単位の発火頻度減少(Seki et al, 2007)などが起こることが報告されている。本実験においても、固定側の最大ピンチング力が post 期において約 20%有意に低下した。また、recovery 期において回復傾向を示した。これに対して、RMSE と CV については、pre 期と post 期で有意差はなかった。つまり、本実験からは精緻な運動制御能力は 3 週間の不活動では変化しないと言える。

不活動は、擬似的な老化現象であるとされている。第 3 章において、老化によりピンチング制御能力が低下することが示された。このことから、不活動によってもピンチング制御能力が低下することが予想された。しかしながら、本実験では上肢の不活動によるピンチング制御能力の低下は確認できなかった。つまり、筋力の低下があってもピンチング制御能力は低下しないといえる。

第 3 章において、加齢によるピンチング制御能力の低下は、筋力の低下が原因ではないことが示唆されたが、本研究からも、筋力の低下はピンチング制御能力に影響しないことが示唆できる。

第5章 有酸素トレーニングによる効果

高齢者における手の運動制御能力は加齢にともない低下することが、先行研究および本研究第3章より明らかとなっている。高齢者において片手のピンチング制御能力が向上するトレーニングとして、ダンベルによる上腕の筋力トレーニング(Keogh et al, 2007)やピンチング筋力トレーニング(Olafsdottir et al, 2008)が報告されている。また、筋力トレーニング意外にも、パーデューペグボード(Maron et al, 2011)やデクステリティボール(Ranganathan et al, 2001)を用いた手を使ったトレーニングでも、片手のピンチング制御能力が向上するという報告がある。しかしながら、両手のピンチング制御能力がトレーニングにより向上するかどうかという報告はない。

両手でのピンチング制御は、片手よりもさらに精緻な運動制御であり、特に視覚フィードバックを利用した場合には、より認知機能が重要となる。認知機能は、有酸素トレーニングにより向上することが報告されている(Dustman et al, 1984; Dramer et al, 1999; Hyodo et al, 2012)。

そこで、本章では、高齢者の有酸素トレーニングがピンチング制御能力にどのような影響を及ぼすのかについて論ずる。

5.1 実験概要

本実験の被験者は健康な高齢者 28 名であり、トレーニング群 15 名 (65.3±8.0 歳, 男性 6 名, 女性 9 名), コントロール群は 13 名 (66.8±5.8 歳, 男性 7 名, 女性 6 名) であった。簡易版エディンバラ利き手テスト (alleviated Edinburgh Handedness Inventory) を実施し、全員が右利きであることを確認した。トレーニング群の被験者は週に 2 もしくは 3 回の有酸素トレーニングを 8 週間実施した。ピンチング測定はトレーニング開始前 (pre) とトレーニング終了後 (post) の 2 回行った。

5.2 結果

VF 条件と NVF 条件の結果を Figure 5.1~5.13 に示す。これらの結果は全被験者の平均値と標準偏差で示している。統計処理は 2 元配置分散分析をグループ要因 (トレーニング・

コントロール) と測定時期要因 (pre・post) の2要因について行った。ただし、相互相関係数についてはグループ要因 (トレーニング・コントロール) と測定時期要因 (pre・post) の2要因について行った。有意水準は $p < 0.05$ とする。

最大把持力 (MVF) は分散分析の結果、左手ではグループの主効果 (トレーニング 127.6%MVF コントロール 130.74%MVF $F(1, 26)=0.41$ $p=0.84$), 時期の主効果 (pre 130.5%MVF post 127.84%MVF, $F(1, 26)=0.47$ $p=0.50$), 交互作用 ($F(1, 26)=0.73$ $p=0.79$) はすべて有意でなかった。同様に、右でもグループの主効果 (トレーニング 153.88%MVF コントロール 147.66%MVF, $F(1, 26)=0.13$ $p=0.72$), 時期の主効果 (pre 154.04%MVF post 147.51%MVF, $F(1, 26)=1.37$ $p=0.25$), 交互作用 ($F(1, 26)=0.01$ $p=0.92$) は有意でなかった。

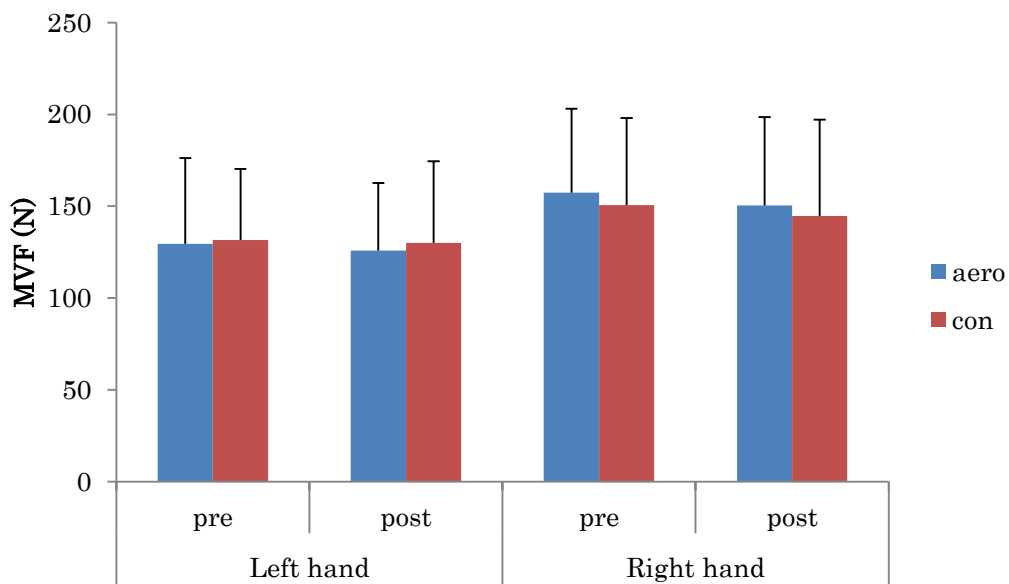


Figure 5.1: トレーニング群とコントロール群のMVf

5.2.1 Task performance

RMSE は分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果 (トレーニング 0.21%MVF コントロール 0.24%MVF, $F(1, 26)=0.77$ $p=0.39$), 時期の主効果 (pre 0.22%MVF post 0.23%MVF, $F(1, 26)=0.36$ $p=0.55$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用は有意でなかった ($F(1, 26)=1.28$ $p=0.27$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 0.24%MVF コントロール 0.25%MVF, $F(1, 26)=0.03$ $p=0.85$), 時期の主効果 (pre 0.21%MVF post 0.28%MVF, $F(1, 26)=3.85$ $p=0.06$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.14$ $p=0.71$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果は有意でなかった (トレーニング 0.72%MVF コントロール 0.78%MVF, $F(1, 26)=0.51$ $p=0.48$) が, 時期の主効果は有意であった (pre 0.66%MVF post 0.84%MVF, $F(1, 26)=4.31$ $p<0.05$). グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.62$ $p=0.22$). 右手においても, グループの主効果は有意でなかった (トレーニング 0.72%MVF コントロール 0.78%MVF, $F(1, 26)=0.01$ $p=0.93$) が, 時期の主効果は有意であった (pre 0.66%MVF post 0.84%MVF, $F(1, 26)=10.86$ $p<0.01$). グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=2.21$ $p=0.15$).

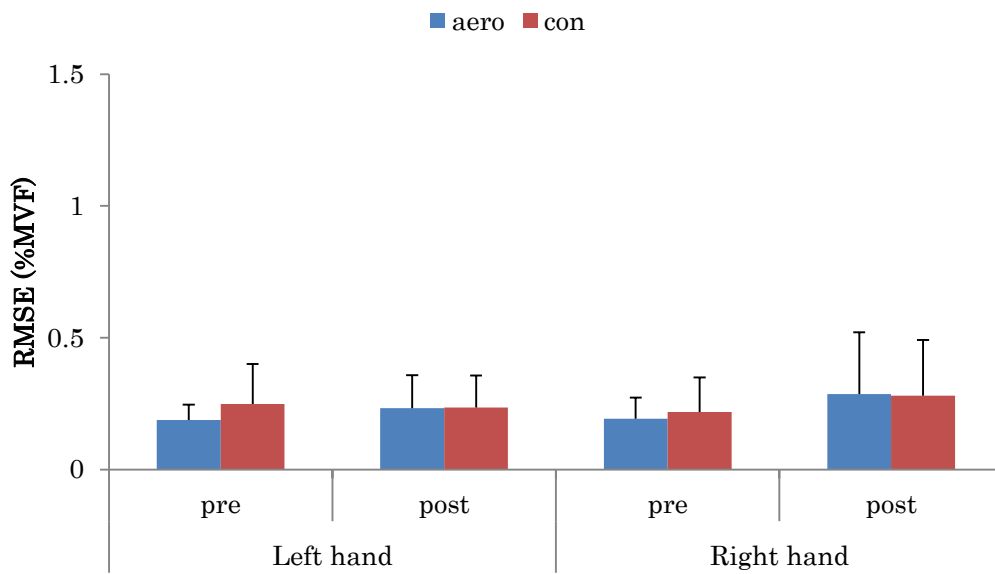


Figure 5.2a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の RMSE

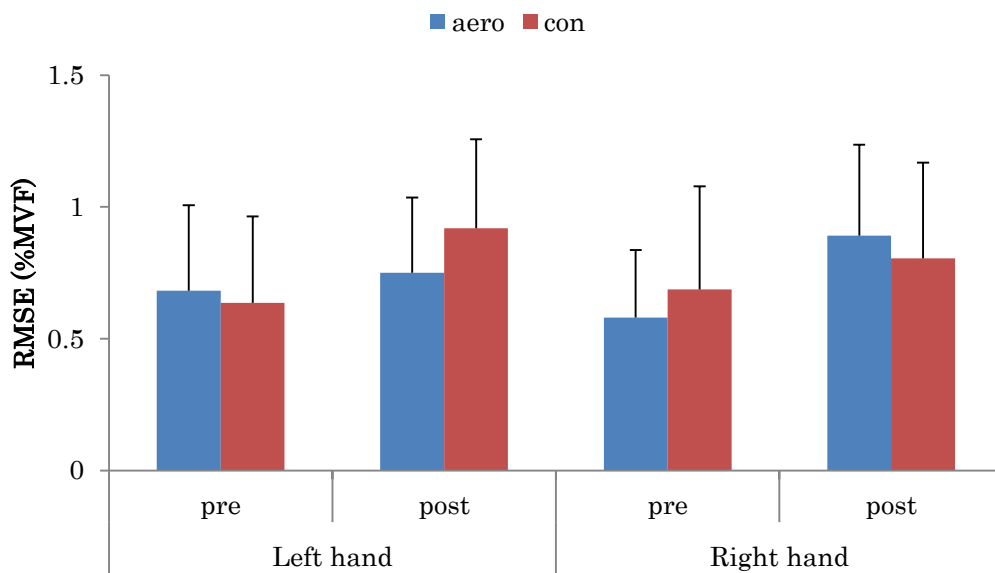


Figure 5.2b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の RMSE

CE は分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果 (トレーニング $-0.03\%MVF$ コントロール $-0.02\%MVF$, $F(1, 26)=0.13$ $p=0.72$), 時期の主効果 (pre $-0.02\%MVF$ post $-0.03\%MVF$, $F(1, 26)=0.45$ $p=0.51$) はともに有意でなかった. グループ \times 時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.000$ $p=0.99$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング $0.01\%MVF$ コントロール $0\%MVF$, $F(1, 26)=0.01$ $p=0.92$), 時期の主効果 (pre $-0.02\%MVF$ post $0.03\%MVF$, $F(1, 26)=1.30$ $p=0.26$) はともに有意でなかった. グループ \times 時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.01$ $p=0.92$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果は有意でなかった (トレーニング $0.74\%MVF$ コントロール $0.75\%MVF$, $F(1, 26)=0.14$ $p=0.71$) が, 時期の主効果は有意であった (pre $0.63\%MVF$ post $0.85\%MVF$, $F(1, 26)=7.78$ $p<0.01$). グループ \times 時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.44$ $p=0.24$). 右手においても, グループの主効果は有意でなかった (トレーニング $-0.17\%MVF$ コントロール $-0.25\%MVF$, $F(1, 26)=0.41$ $p=0.53$), 時期の主効果は有意であった (pre $-0.05\%MVF$ post $-0.37\%MVF$, $F(1, 26)=8.41$ $p<0.01$). グループ \times 時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.63$ $p=0.43$).

SD は分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果 (トレーニング $0.16\%MVF$ コントロール $0.18\%MVF$, $F(1, 26)=0.57$ $p=0.46$), 時期の主効果 (pre $0.16\%MVF$ post $0.18\%MVF$, $F(1, 26)=0.65$ $p=0.43$) はともに有意でなかった. グループ \times 時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.18$ $p=0.29$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング $0.14\%MVF$ コントロール $0.17\%MVF$, $F(1, 26)=0.95$ $p=0.34$), 時期の主効果 (pre $0.14\%MVF$ post $0.18\%MVF$, $F(1, 26)=2.63$ $p=0.12$) はともに有意でなかった. グループ \times 時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.004$ $p=0.95$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果は有意でなかった (トレーニング $-0.33\%MVF$ コントロール $-0.2\%MVF$, $F(1, 26)=2.12$ $p=0.16$) が, 時期の主効果は有意であった (pre $-0.1\%MVF$ post $-0.44\%MVF$, $F(1, 26)=4.35$ $p<0.05$). グループ \times 時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.10$ $p=0.76$). 右手においても, グループの主効果有意でなかった (トレーニング $0.21\%MVF$ コントロール $0.25\%MVF$, $F(1, 26)=3.80$ $p=0.06$) が, 時期の主効果は有意であった (pre $0.21\%MVF$ post $0.25\%MVF$, $F(1, 26)=5.37$ $p<0.05$). グループ \times 時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.69$ $p=0.21$).

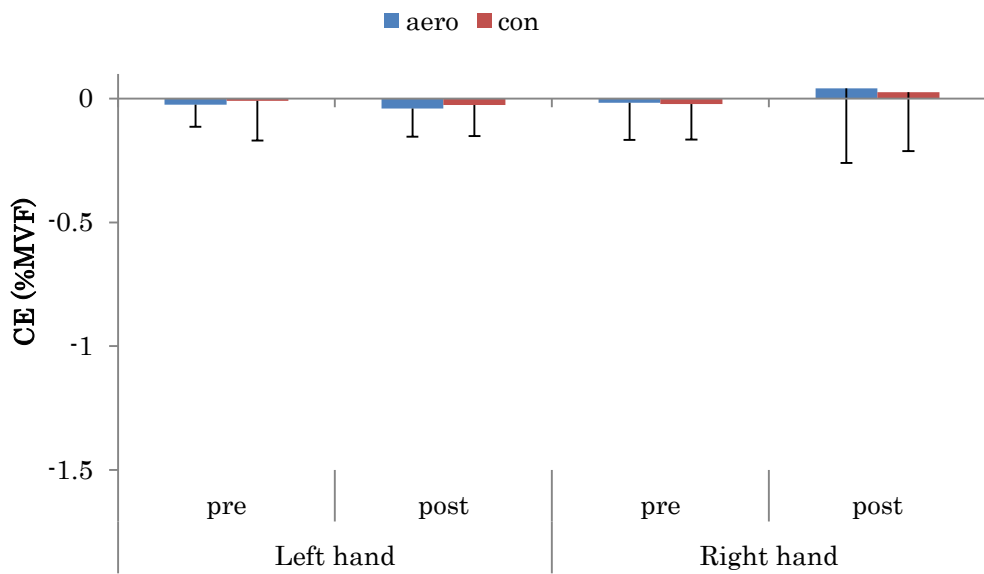


Figure 5.3a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の CE

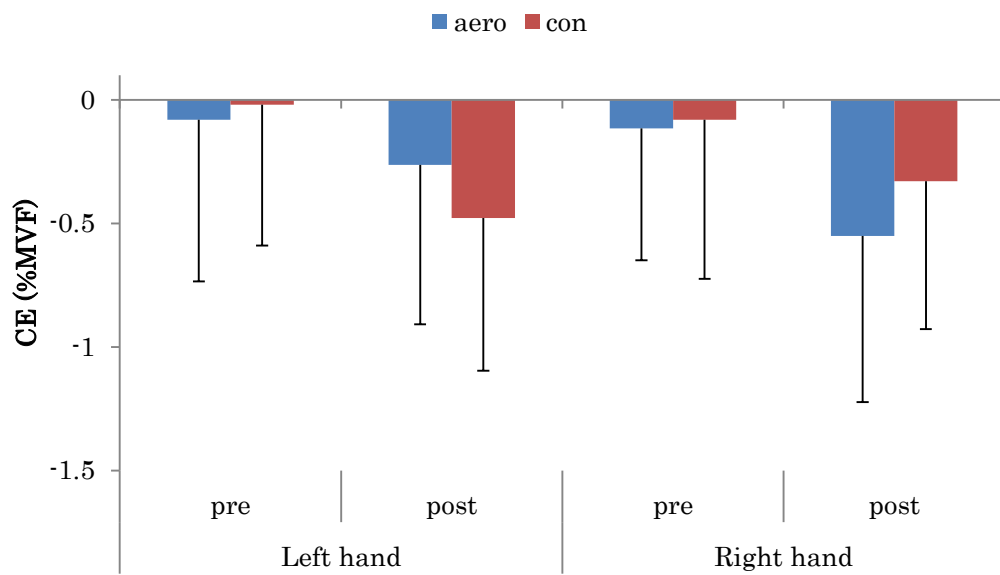


Figure 5.3b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の CE

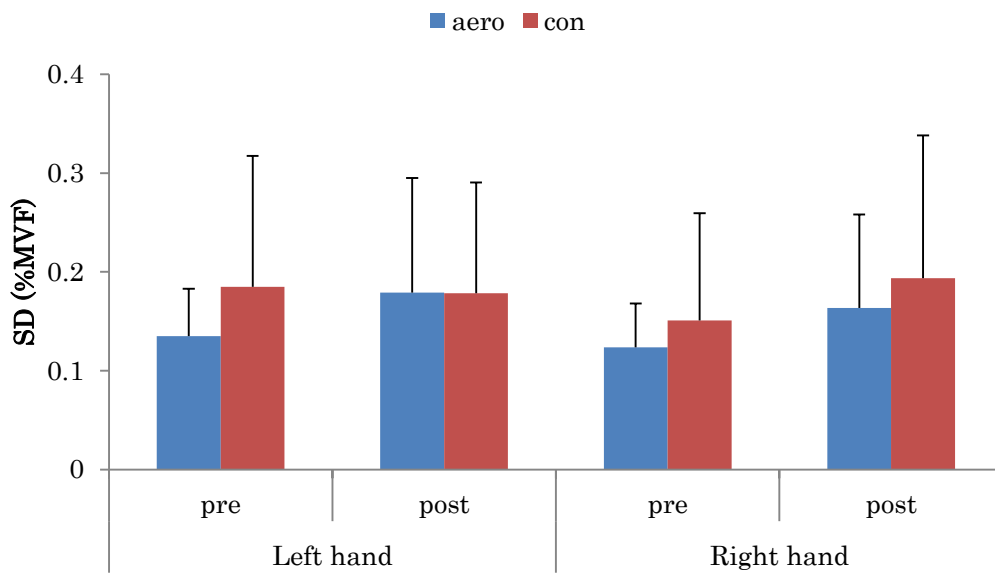


Figure 5.4a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の SD

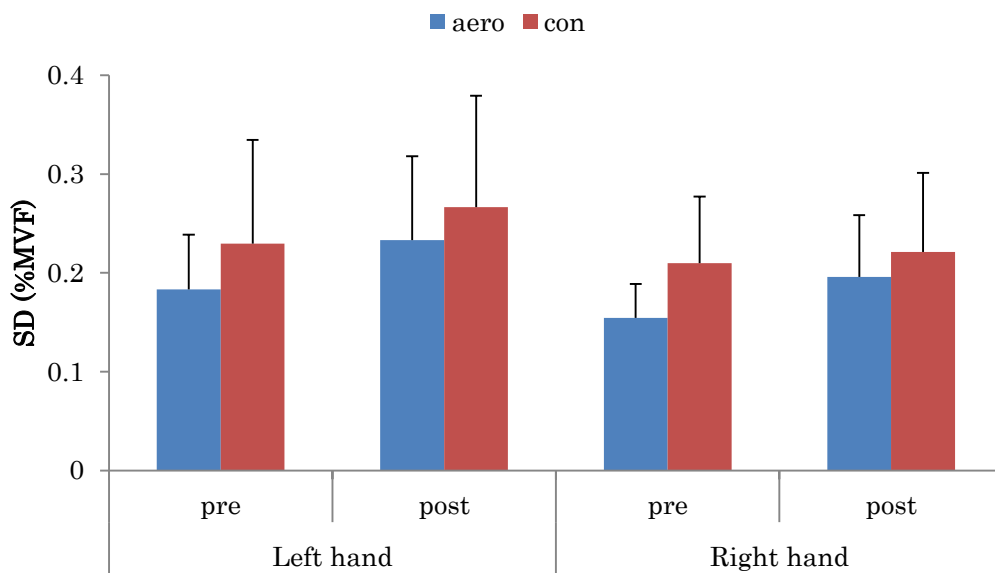


Figure 5.4b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の SD

CV は分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果 (トレーニング 0.02
コントロール 0.02, $F(1, 26)=0.58$ $p=0.45$), 時期の主効果 (pre 0.02 post 0.02,
 $F(1, 26)=0.60$ $p=0.45$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった
($F(1, 26)=1.18$ $p=0.45$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 0.01 コ
ントロール 0.02, $F(1, 26)=1.00$ $p=0.33$), 時期の主効果 (pre 0.01 post 0.02,
 $F(1, 26)=2.67$ $p=0.12$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった
($F(1, 26)=0.002$ $p=0.97$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果 (トレーニング 0.02 コントロール
0.02, $F(1, 26)=2.33$ $p=0.14$), 時期の主効果 (pre 0.02 post 0.02, $F(1, 26)=6.14$
 $p<0.05$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.000$
 $p=0.98$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 0.02%MVF コントロール
0.03%MVF, $F(1, 26)=2.95$ $p=0.10$), 時期の主効果 (pre 0.02%MVF post 0.03%MVF,
 $F(1, 26)=7.26$ $p<0.05$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった
($F(1, 26)=1.81$ $p=0.19$).

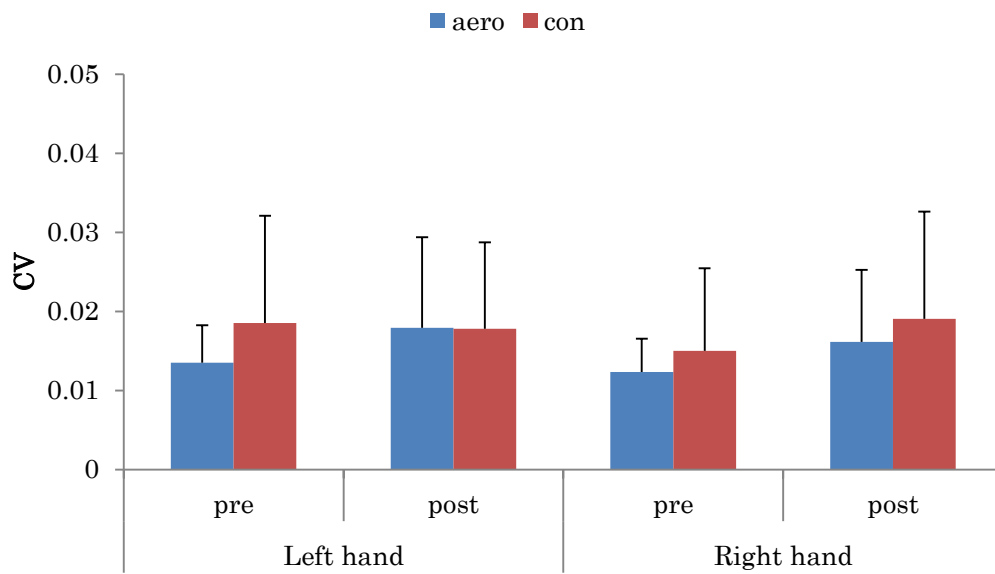


Figure 5.5a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の CV

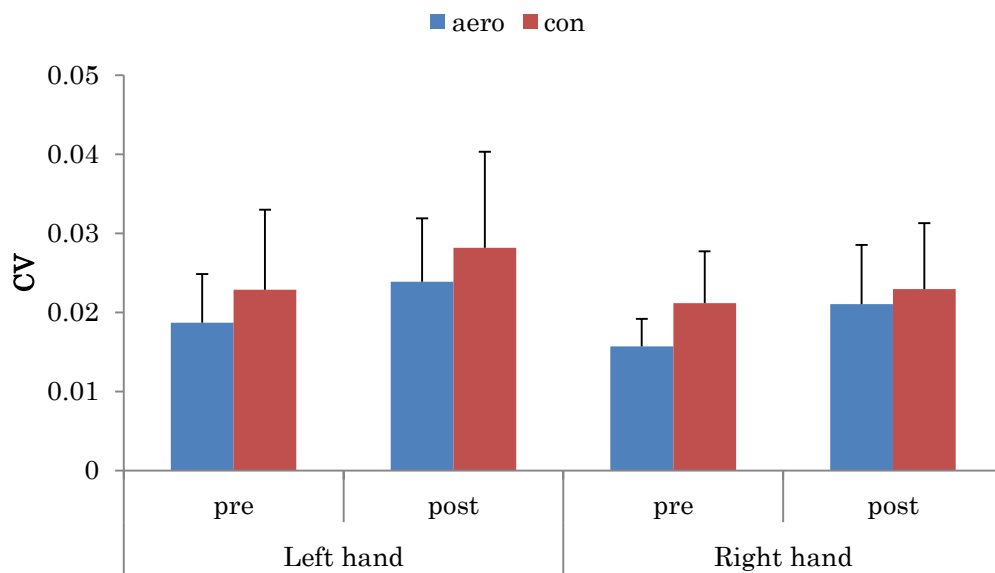


Figure 5.5b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の CV

5.2.2 周波数解析

MPF は分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果(トレーニング 1.33 コントロール 1.29, $F(1, 26)=0.09$ $p=0.77$), 時期の主効果 (pre 1.25 post 1.36, $F(1, 26)=3.26$ $p=0.83$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.17$ $p=0.29$). 右手においても, グループの主効果は有意でなかった (トレーニング 1.22 コントロール 1.4, $F(1, 26)=1.30$ $p=0.27$), 時期の主効果は有意であった (pre 1.22 post 1.41, $F(1, 26)=5.81$ $p<0.05$).

グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.16$ $p=0.29$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果 (トレーニング 0.02 コントロール 0.02, $F(1, 26)=1.90$ $p=0.18$), 時期の主効果 (pre 0.02 post 0.02, $F(1, 26)=0.09$ $p=0.77$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.91$ $p=0.35$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 0.76 コントロール 0.65, $F(1, 26)=0.02$ $p=0.89$), 時期の主効果 (pre 0.71 post 0.7, $F(1, 26)=1.13$ $p=0.30$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.27$ $p=0.61$).

0~4Hz 周波数帯域のパワーは分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果(トレーニング 11.87 コントロール 21.9, $F(1, 26)=1.75$ $p=0.20$), 時期の主効果 (pre 16.97 post 16.8, $F(1, 26)=0.001$ $p=0.98$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.81$ $p=0.38$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 10.44 コントロール 22.83, $F(1, 26)=2.52$ $p=0.13$), 時期の主効果 (pre 14.5 post 18.76, $F(1, 26)=0.28$ $p=0.60$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.02$ $p=0.88$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果 (トレーニング 0.74 コントロール 0.73, $F(1, 26)=3.77$ $p=0.06$), 時期の主効果 (pre 0.71 post 0.77, $F(1, 26)=2.54$ $p=0.12$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.01$ $p=0.93$). 右手においても, グループの主効果(トレーニング 21.6 コントロール 35.26, $F(1, 26)=4.18$ $p=0.05$), 時期の主効果 (pre 23.04 post 33.82, $F(1, 26)=2.96$ $p=0.10$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.46$ $p=0.50$).

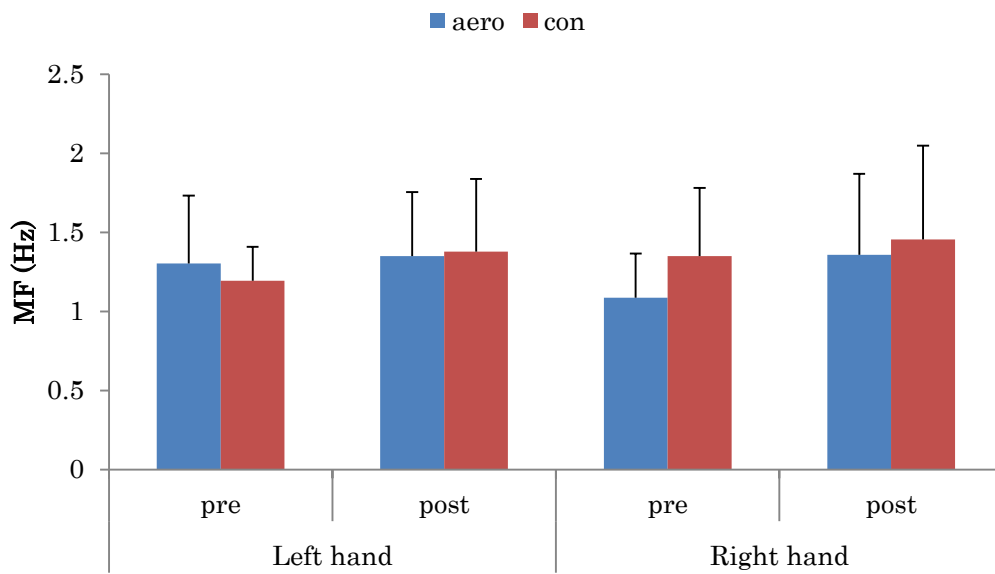


Figure 5.6a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の MPF

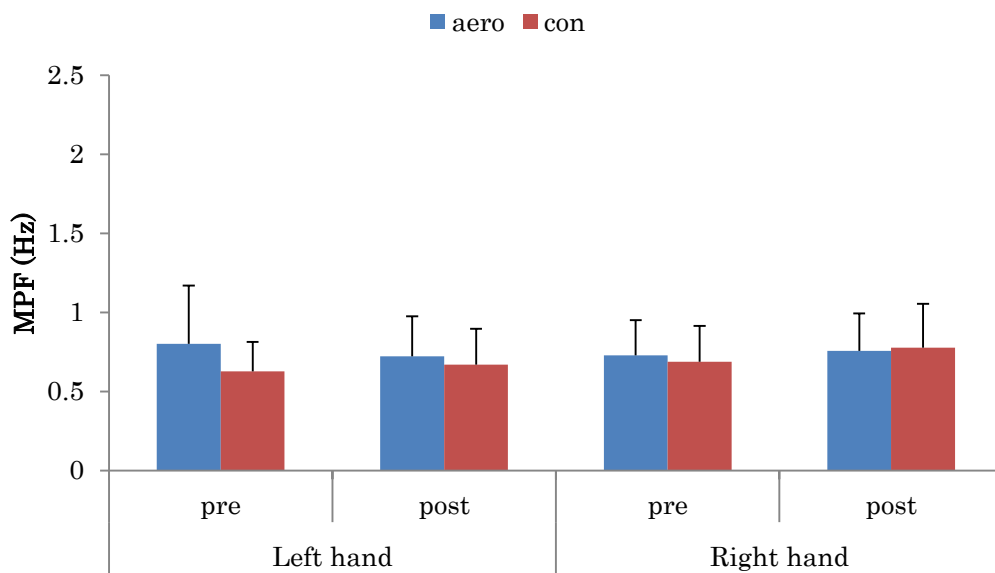


Figure 5.6b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の MPF

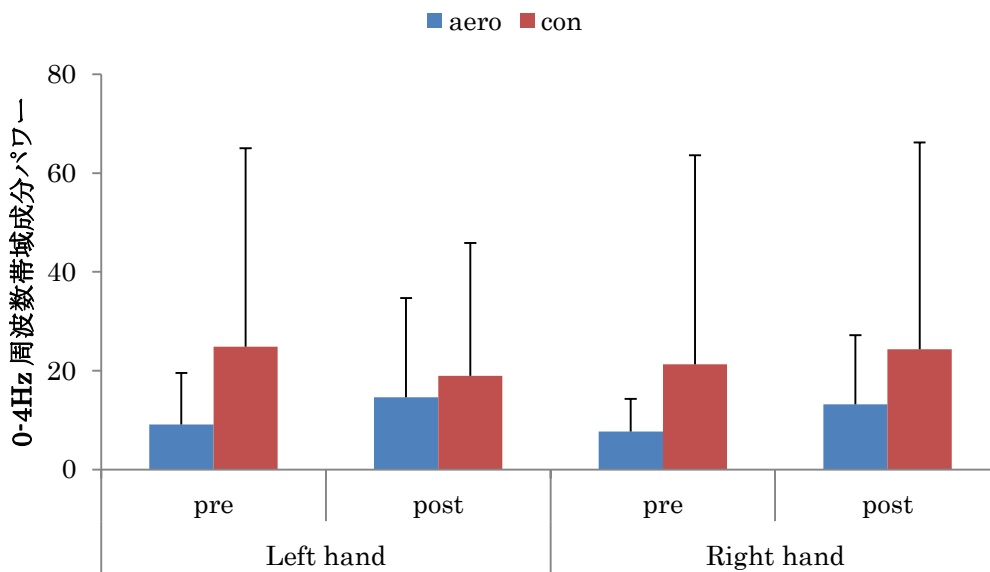


Figure 5.7a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の 0-4Hz 周波数帯域成分

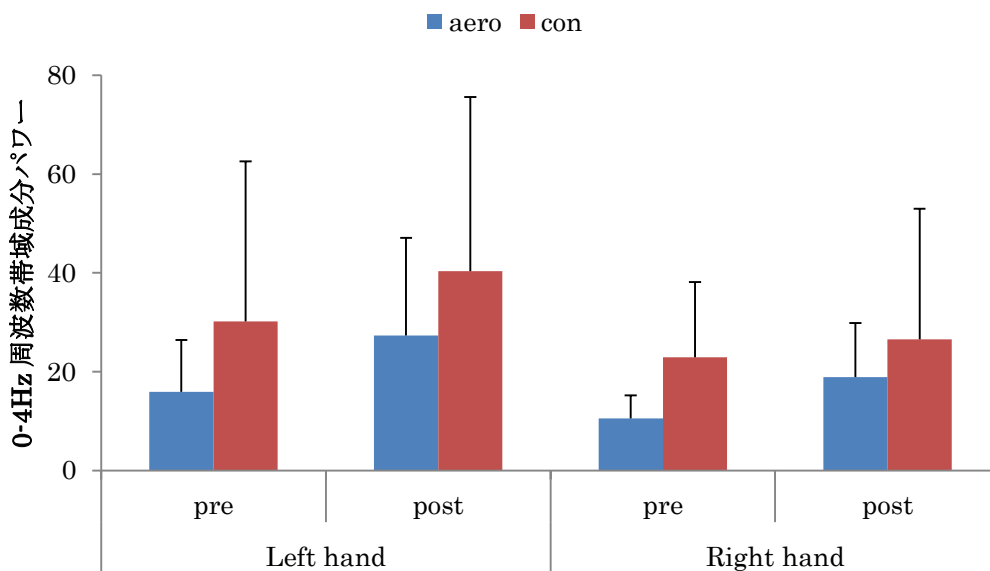


Figure 5.7b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の 0-4Hz 周波数帯域成分

4~8Hz 周波数帯域のパワーは分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果 (トレーニング 0.47 コントロール 0.63, $F(1, 26)=0.51$ $p=0.48$), 時期の主効果 (pre 0.48 post 0.62, $F(1, 26)=0.69$ $p=0.41$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.05$ $p=0.83$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 0.35 コントロール 0.62, $F(1, 26)=1.98$ $p=0.17$), 時期の主効果 (pre 0.34 post 0.64, $F(1, 26)=3.42$ $p=0.08$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.02$ $p=0.89$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果 (トレーニング 14.72 コントロール 24.74, $F(1, 26)=0.13$ $p=0.72$), 時期の主効果 (pre 16.73 post 22.74, $F(1, 26)=2.77$ $p=0.11$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=2.77$ $p=0.11$). 右手においても, グループの主効果有意でなかった (トレーニング 0.4 コントロール 0.46, $F(1, 26)=1.06$ $p=0.31$) が, 時期の主効果は有意であった (pre 0.32 post 0.54, $F(1, 26)=4.63$ $p<0.05$). グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.85$ $p=0.37$).

8~12Hz 周波数帯域のパワーは分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果 (トレーニング 0.12 コントロール 0.13, $F(1, 26)=0.03$ $p=0.86$), 時期の主効果 (pre 0.09 post 0.16, $F(1, 26)=2.47$ $p=0.13$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.77$ $p=0.39$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 0.1 コントロール 0.12, $F(1, 26)=0.32$ $p=0.58$), 時期の主効果 (pre 0.08 post 0.14, $F(1, 26)=3.48$ $p=0.07$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.36$ $p=0.55$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果 (トレーニング 0.27 コントロール 0.41, $F(1, 26)=0.39$ $p=0.54$), 時期の主効果 (pre 0.24 post 0.44, $F(1, 26)=4.01$ $p=0.06$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.03$ $p=0.86$). 右手においても, グループの主効果は有意でなかった (トレーニング 0.1 コントロール 0.12, $F(1, 26)=0.29$ $p=0.60$) が, 時期の主効果は有意であった (pre 0.08 post 0.14, $F(1, 26)=10.73$ $p<0.01$). グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.23$ $p=0.64$).

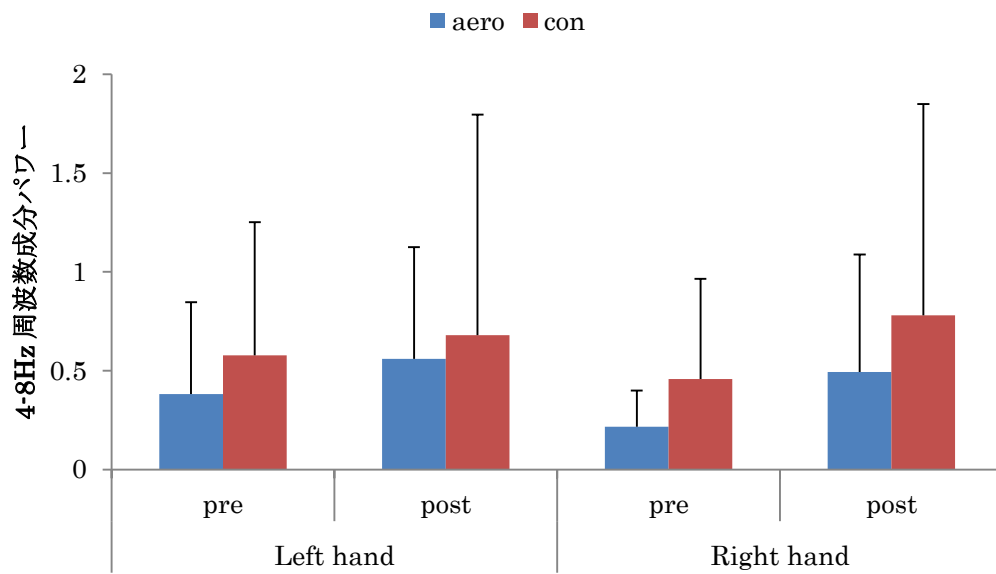


Figure 5.8a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の 4-8Hz 周波数帯域成分

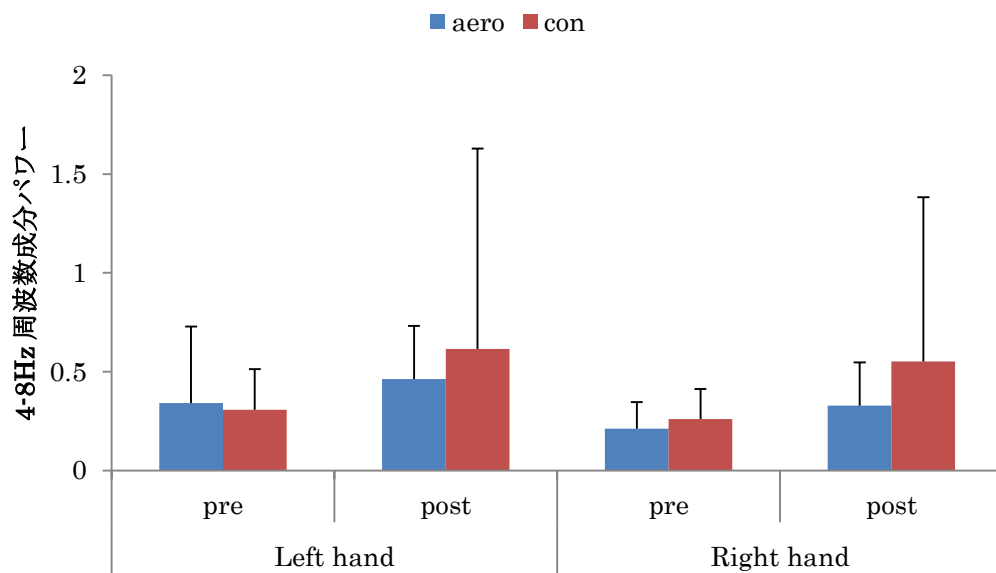


Figure 5.8b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の 4-8Hz 周波数帯域成分

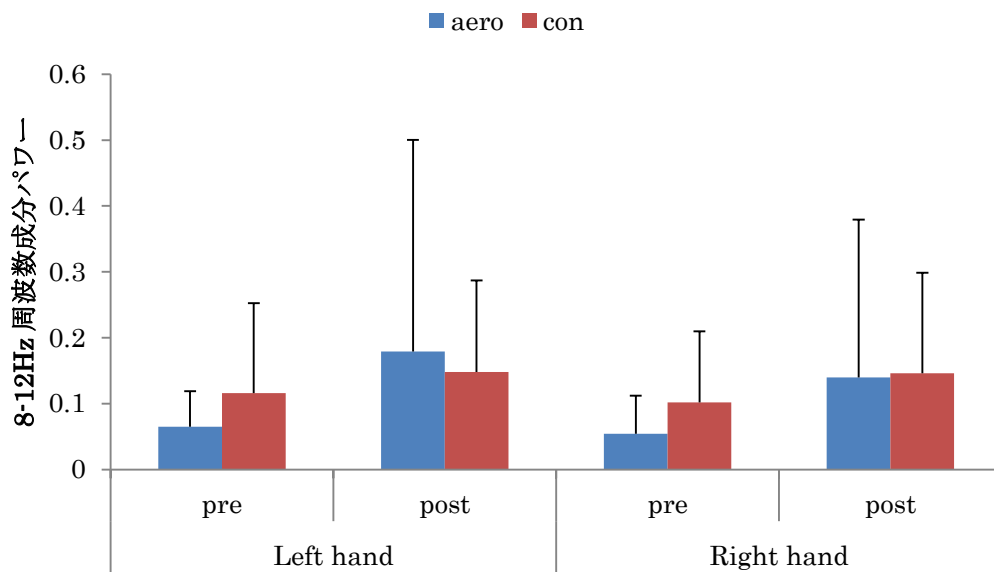


Figure 5.9a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の 8-12Hz 周波数帯域成分

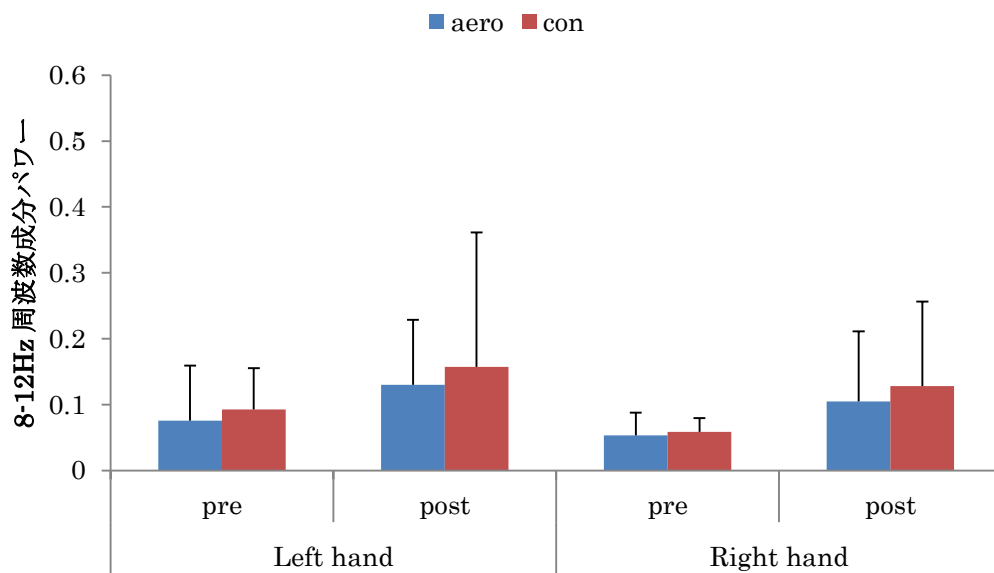


Figure 5.9b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の 8-12Hz 周波数帯域成分

0~4Hz 周波数帯域の割合は分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果 (トレーニング 93.35% コントロール 93.59%, $F(1, 26)=0.03$ $p=0.87$), 時期の主効果 (pre 94.17% post 92.77%, $F(1, 26)=2.81$ $p=0.11$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.43$ $p=0.24$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 94.16% コントロール 92.1%, $F(1, 26)=1.27$ $p=0.27$), 時期の主効果 (pre 93.84% post 92.42%, $F(1, 26)=2.07$ $p=0.16$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.26$ $p=0.61$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果 (トレーニング 0.08% コントロール 0.09%, $F(1, 26)=1.89$ $p=0.18$), 時期の主効果 (pre 0.06% post 0.12%, $F(1, 26)=0.003$ $p=0.96$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.09$ $p=0.31$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 96.25% コントロール 97.33%, $F(1, 26)=0.12$ $p=0.74$), 時期の主効果 (pre 96.81% post 96.78%, $F(1, 26)=1.82$ $p=0.19$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.85$ $p=0.36$).

4~8Hz 周波数帯域の割合は分散分析の結果, VF 条件では左手におけるグループの主効果 (トレーニング 5.18% コントロール 4.88%, $F(1, 26)=0.05$ $p=0.82$), 時期の主効果 (pre 4.49% post 5.57%, $F(1, 26)=2.19$ $p=0.15$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.26$ $p=0.27$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 4.3% コントロール 6.05%, $F(1, 26)=1.51$ $p=0.23$), 時期の主効果 (pre 4.65% post 5.7%, $F(1, 26)=1.59$ $p=0.22$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.22$ $p=0.64$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果 (トレーニング 96.32% コントロール 96.59%, $F(1, 26)=1.87$ $p=0.18$), 時期の主効果 (pre 96.82% post 96.09%, $F(1, 26)=0.002$ $p=0.96$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.47$ $p=0.24$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 2.8% コントロール 1.97%, $F(1, 26)=0.08$ $p=0.79$), 時期の主効果 (pre 2.38% post 2.39%, $F(1, 26)=1.25$ $p=0.27$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.62$ $p=0.44$).

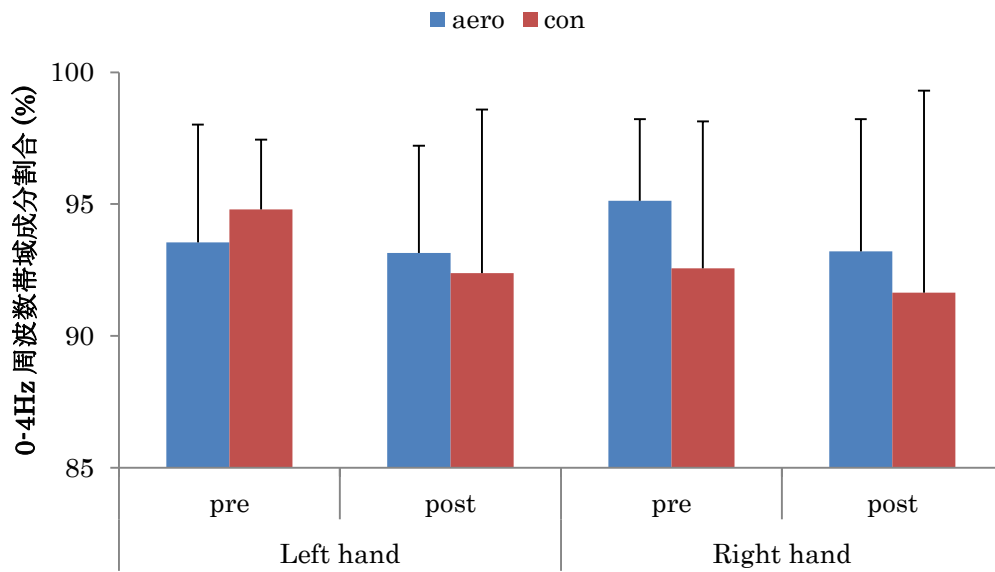


Figure 5.10a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の
0-4Hz 周波数帯域成分割合

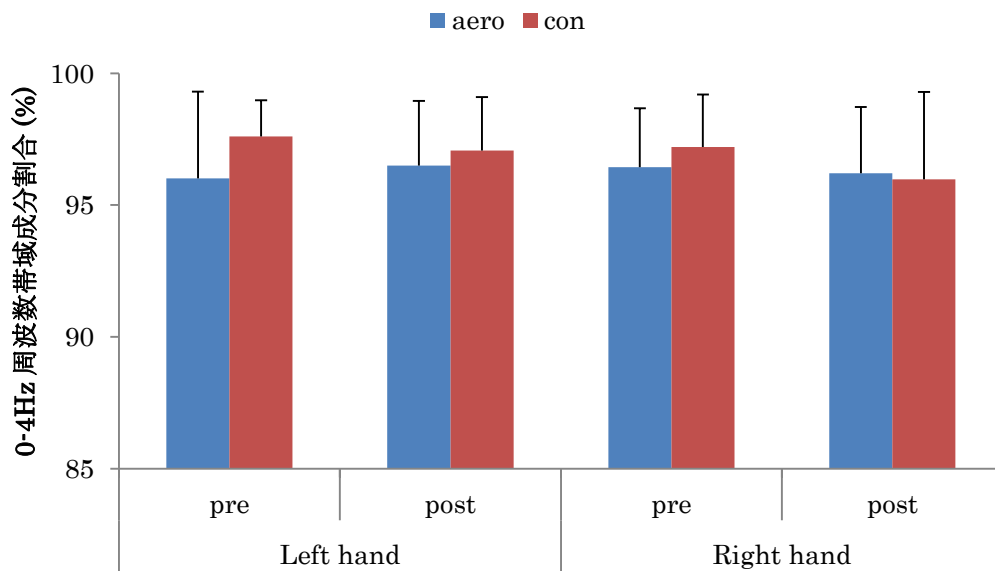


Figure 5.10b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の
0-4Hz 周波数帯域成分割合

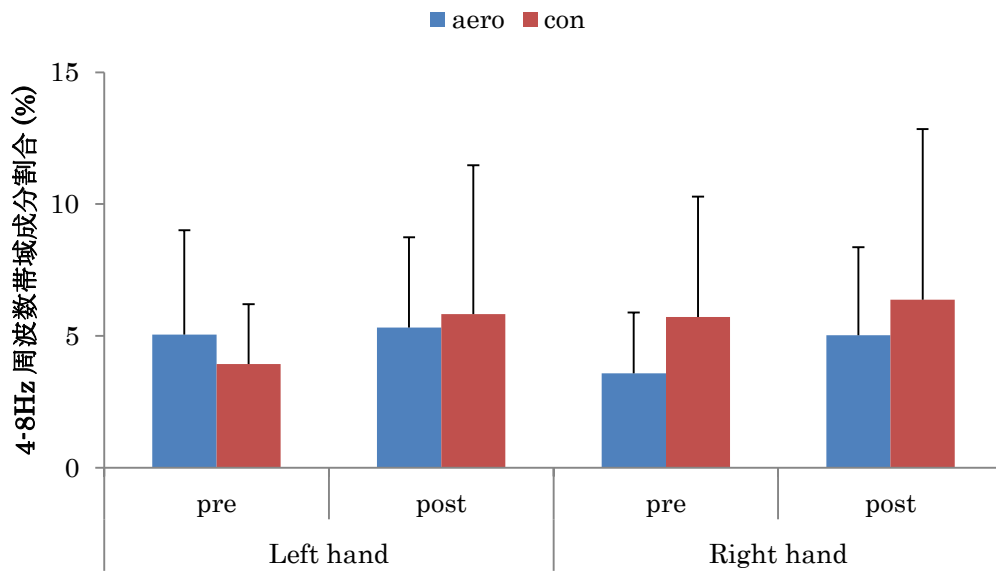


Figure 5.11a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の
4-8Hz 周波数帯域成分割合

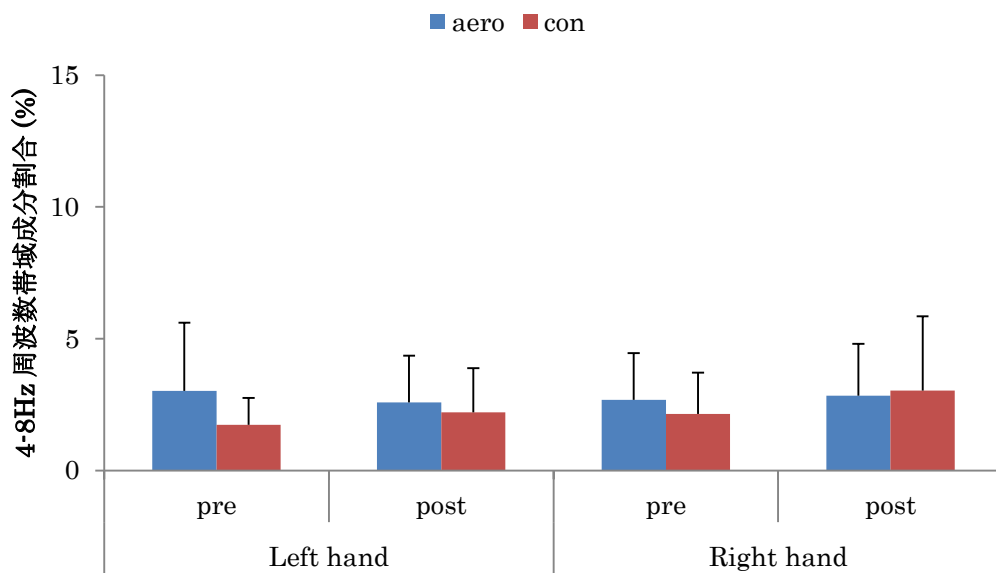


Figure 5.11b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の
4-8Hz 周波数帯域成分割合

8~12Hz 周波数帯域の割合は分散分析の結果、VF 条件では左手におけるグループの主効果は有意でなかった (トレーニング 1.18% コントロール 1.25%, $F(1, 26)=0.07$ $p=0.79$ が), 時期の主効果は有意であった (pre 1.04% post 1.39%, $F(1, 26)=5.66$ $p<0.05$). グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.70$ $p=0.41$). 右手においても, グループの主効果 (トレーニング 1.28% コントロール 1.55%, $F(1, 26)=0.29$ $p=0.59$), 時期の主効果 (pre 1.23% post 1.59%, $F(1, 26)=2.85$ $p=0.10$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.30$ $p=0.59$).

NVF 条件では, 左手におけるグループの主効果 (トレーニング 2.76% コントロール 2.58%, $F(1, 26)=0.99$ $p=0.33$), 時期の主効果 (pre 2.41% post 2.93%, $F(1, 26)=0.10$ $p=0.76$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=0.02$ $p=0.90$). 右手においても, グループの主効果有意でなかった (トレーニング 0.76% コントロール 0.58%, $F(1, 26)=0.09$ $p=0.77$) が, 時期の主効果は有意であった (pre 0.65% post 0.69%, $F(1, 26)=6.65$ $p<0.05$). グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.32$ $p=0.26$).

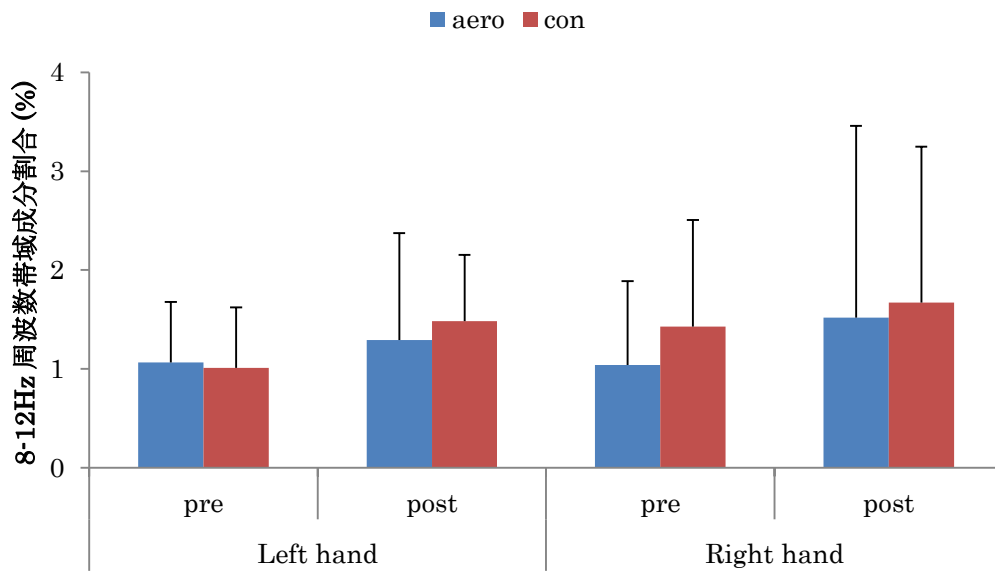


Figure 5.12a: VF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の
8-12Hz 周波数帯域成分割合

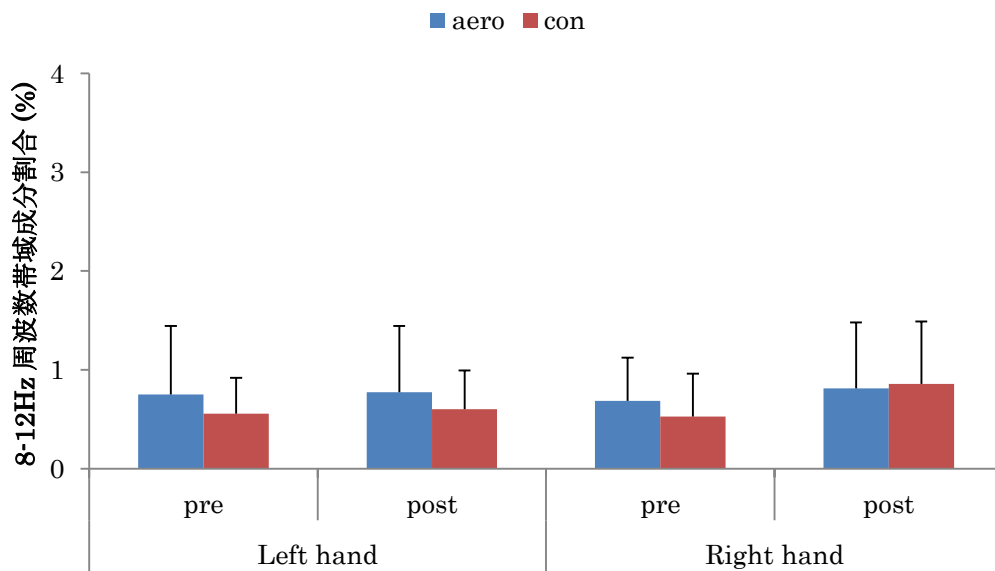


Figure 5.12b: NVF 条件におけるトレーニング群とコントロール群の
8-12Hz 周波数帯域成分割合

5.2.3 相互相関係数

分散分析の結果、VF 条件ではグループの主効果（トレーニング 0.3 コントロール 0.25, $F(1, 26)=1.94$ $p=0.18$), 時期の主効果(pre 0.3 post 0.25, $F(1, 26)=2.33$ $p=0.14$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用はなかった ($F(1, 26)=1.56$ $p=0.22$).

NVF 条件では, グループの主効果（トレーニング 0.75 コントロール 0.69, $F(1, 26)=0.98$ $p=0.33$), 時期の主効果 (pre 0.61 post 0.83, $F(1, 26)=2.59$ $p=0.12$) はともに有意でなかった. グループ×時期の交互作用があった ($F(1, 26)=4.96$ $p<0.05$). 群ごとの下位検定を行った結果, トレーニング群では pre と post に有意差はなかった ($p=0.68$) が, コントロール群 では pre と post で有意差があった ($p<0.05$).

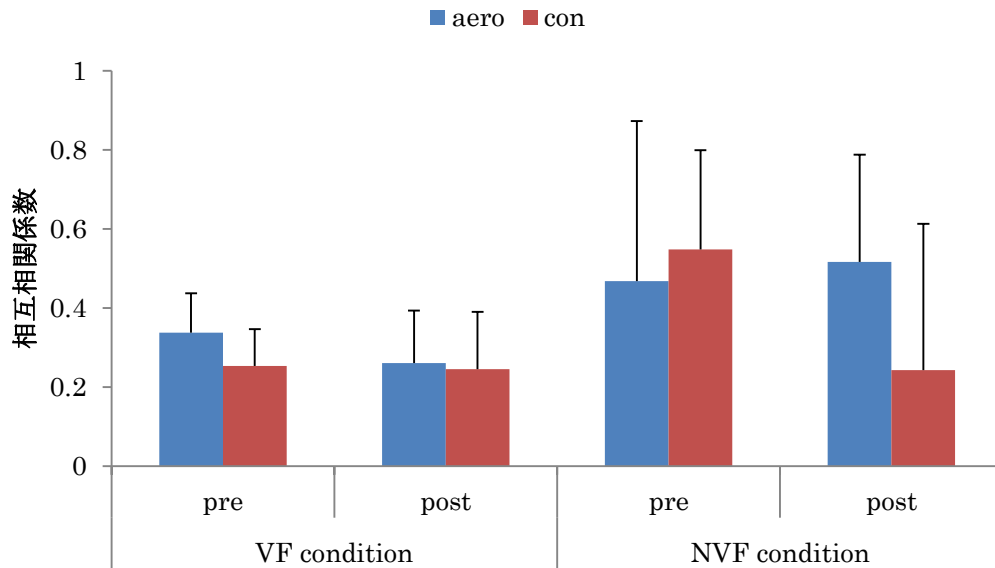


Figure 5.13: トレーニング群とコントロール群の相互相関係数

5.3 考察

4章では、若年者において不活動が精緻な運動制御能力に与える影響をみた。この結果、3週間の不活動では、ピンチング力は低下するものの制御能力には変化がないことがわかった。本章では、加齢により低下した精緻な運動制御能力が有酸素トレーニングにより改善されるかどうかを検討した。

まず、本実験では、最大ピンチング力に関して変化は認められなかった。次に、RMSEおよびCVに関してトレーニング群とコントロール群に有意差は見られなかった。つまり、本実験からは8週間の有酸素運動により精緻な運動制御は向上しなかったと言える。

Sosnoff, 2006によれば、高齢者においては、筋力の低下が力制御能力の低下に関係しているという。そして、6週間のピンチングトレーニングにより、最大把持力が増大するとともに力発揮の正確性が向上傾向にあったという報告(Olafsdottir et al, 2008)や示指外転運動トレーニングにより力発揮の安定性が向上したという報告(Laidlaw, 1999)、ダンベルトレーニングにより力発揮の正確性と安定性がともに向上したという報告(Keogh, 2007)がある。

これに対して、筋力トレーニングを行わずともパーデューペグボード(Marmon et al, 2011)やデクステリティボール(Ranganathan et al, 2001)を用いた手の機能トレーニングにより力発揮の安定性が向上したという報告もある。このことから、筋力の向上をともなわずとも運動制御能力向上が見込まれるトレーニングがあると言える。

有酸素運動は一般的に筋力増加を目的としたトレーニングではなく有酸素機能が向上する。加えて、高齢者が有酸素運動を実施することで脳体積の増加(Colcombe et al, 2006)や認知機能の向上が報告されている(Dustman et al, 1984; Kramer et al, 1999; Hyodo et al, 2012)。このように有酸素運動は脳組織および脳機能の変化をもたらすことから本研究で用いた精緻な運動制御にも何かしらの影響を与えることが考えられた。

しかしながら、本研究では運動制御能力の改善は認められなかった。この原因としては3点考えられる。まず、本実験におけるトレーニング群の被験者はpre期のRMSE、CVがともに3章の高齢者に比べて値が低く若年者と同じくらいの値であったことがあげられる。つまり、若年者なみの運動制御能力をもつ集団であったため、それ以上向上しなかったと考えられる。

次に考えられるのはトレーニング期間である。本研究のトレーニング期間は8週間であったが、脳組織に変化をもたらすと報告した Colcombe et al (2006)の研究ではトレーニン

グ期間は6ヶ月、脳機能に変化をもたらすと報告した Kramer et al (1999) と(Dustman et al, 1984)の研究ではそれぞれ6ヶ月と4ヶ月のトレーニング期間を設けていた。Hyodo et al(2012)の研究は、一過性の効果を見たもので有酸素運動前と10分の有酸素運動の15分後を比較したものである。よって、トレーニング期間を長くした場合には、もしくは有酸素運動直後の測定であれば精緻な運動制御にも変化が現れる可能性がある。

続いて考えられるのが、本研究で用いた実験タスクによる影響である。運動制御における感覚・知覚系と運動系との対応関係・相互強調関係に関わる認知機能を知覚運動協応(perceptual motor coordination)と呼び(坂口豊, 2002)、本実験で用いた実験タスクも認知機能が必要であったと考えられる。しかしながら、認知機能にも様々な種類があり、脳機能の変化をみた研究で認知機能を評価するテストとして実施したのはストループテストなどを使ったものであり実行機能をみていた。Erickson and Kramer (2008)は、有酸素運動を実施しても、実行機能を必要としない cognitive performance には大きな向上が見られないと示唆している。このことから、本実験で用いたタスクには実行機能は多く必要とされていないものであったため、運動制御能力は向上しなかったということが考えられる。

第6章 視覚フィードバック消失時間による影響

3章では加齢による精緻な運動制御能力低下は視覚フィードバックがある状態でのみ起こることを確認した。このことから視覚フィードバックは、精緻な運動制御に多大な影響を与えていると考えられる。

片手の運動制御能力に視覚フィードバックが与える影響を検討した研究には、示指外転(Marmon et al, 2011)やピンチング(Deutsch and Newell, 2001; Marmon et al, 2011)をタスクとしたものがある。また、両手の示指外転をタスクとして視覚フィードバックの有無における運動制御能力を見た研究もある(Hu et al, 2011a)。しかしながら、これは左右の合力を視覚フィードバックとして与えたものであり、片側のみ視覚フィードバックがある条件で運動制御能力について検討したものはない。

両手の示指での運動制御については、視覚フィードバックがなくなると両手間の出力波形の相関高くなること(Hu et al, 2011a)や、注視の方向が運動の正確性に影響することも明らかになっている(Kokubu et al, 2009)。これらを考慮すると、両手でのピンチング運動においても、両側もしくは片側の視覚フィードバックが消失する際の制御能力への影響について調べることにより、視覚フィードバックの有無が左右のピンチング運動指令間の相互作用や協同制御に与える影響についてより詳細に検討できると考えられる。

そこで、本章では視覚フィードバックにより注目し、両手での精緻な力制御にどのような影響を及ぼすのかについて論ずる。

6.1 実験概要

本実験の被験者は若年者 38 名 (20.45±1.81, 男性 15 名, 女性 23 名) であった。エディンバラ利き手テスト (Handedness Inventory) を実施し、全員が右利きであることを確認した。

本実験では、10%MVF の把持継続発揮時間を 40 秒とした。各試行において得られた 40 秒のデータを 5 秒ごとの 8 区間に分け、試行開始時から順に T1, T2, T, T4, T5, T6, T7, T8 とした。この時、視覚フィードバックあり条件 (VF 条件) では、全区間において視覚フィードバックが得られた。一方、視覚フィードバック消失条件 (NLVF・NRVF・NVF 条件)

では、T1 および T2 においては視覚フィードバックが得られたが、T3 以降の全区間においては片側ないし両側の視覚フィードバック条件が消失した。発揮把持力が 10% MVF に到達するまでにある程度の時間が必要であることを考慮して T1 区間は分析から除外した。

なお本実験では、RMSE, CE, CV および相互相関係数についてのみ検討した。

6.2 結果

本実験では、RMSE, CE, CV および相互相関係数について結果を述べる。各条件の結果を Figure 6.1~6.4 に示す。これらの結果は全被験者の平均値と標準偏差で示している。

統計処理は、測定肢（左手・右手）別に、解析区間（T2・T3・T4・T5・T6・T7・T8）ごとに、1 元配置分散分析を視覚フィードバック条件要因（VF・NLVF・NRVF・NVF）について行った。有意であれば、ボンフェローニによる多重比較を行った。有意水準は $p < 0.05$ とする。

6.2.1 Task performance

RMSE は分析の結果、T2 においては、左右肢ともに視覚フィードバック条件の効果は有意でなかった（左 $F(3, 148)=0.38$ $p=0.76$, 右 $F(3, 148)=0.08$ $p=0.97$ ）。T3 においては、左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった（左 $F(3, 148)=35.93$ $p < 0.001$, 右 $F(3, 148)=35.47$ $p < 0.001$ ）。多重比較の結果、視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった ($p < 0.001$)。T4 においては、左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった（左 $F(3, 148)=50.25$ $p < 0.001$, 右 $F(3, 148)=64.03$ $p < 0.001$ ）。多重比較の結果、視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった ($p < 0.001$)。また、右手については NRVF 条件と NVF 条件の間にも有意差があった ($P < 0.05$)。T5 においては、左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった（左 $F(3, 148)=52.23$ $p < 0.001$, 右 $F(3, 148)=79.77$ $p < 0.001$ ）。多重比較の結果、視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった ($p < 0.001$)。また、右手については NRVF 条件と NVF 条件の間にも有意差があった ($P < 0.01$)。T6 においては、左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった（左 $F(3, 148)=49.75$ $p < 0.001$, 右 $F(3, 148)=67.93$ $p < 0.001$ ）。多重比較の結果、視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった ($p < 0.001$)。また、右手については NRVF 条件と NVF 条件の間にも有意差があった ($P < 0.05$)。T7 においては、左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった（左

F(3, 148)=48.23 p<0.001, 右 F(3, 148)=68.01 p<0.001). 多重比較の結果, 視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった (p<0.001). また, 右手については NRVF 条件と NVF 条件の間にも有意差があった (P<0.05). T8 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった (左 F(3, 148)=54.73 p<0.001, 右 F(3, 148)=71.15 p<0.001). 多重比較の結果, 視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった (p<0.001).

CE は分析の結果, T2 においては, 左右肢ともに視覚フィードバック条件の効果は有意でなかった (左 F(3, 148)=0.55 p=0.65, 右 F(3, 148)=1.17 p=0.33). T3 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった (左 F(3, 148)=5.58 p<0.001, 右 F(3, 148)=4.22 p<0.01). 多重比較の結果, 左手では NVF 条件と VF 条件および NRVF 条件に (p<0.01), 右手では NVF 条件と VF 条件および NLVF 条件に有意差があった (p<0.05). T4 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった (左 F(3, 148)=9.87 p<0.001, 右 F(3, 148)=10.92 p<0.001). 多重比較の結果, 左手では視覚フィードバックのある条件とない条件に (p<0.01), 右手では NVF 条件と VF 条件および NLVF 条件に有意差があった (p<0.001). T5 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった (左 F(3, 148)=8.61 p<0.001, 右 F(3, 148)=12.28 p<0.01). 多重比較の結果, 視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった (p<0.05). T6 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった (左 F(3, 148)=9.01 p<0.001, 右 F(3, 148)=10.70 p<0.01). 多重比較の結果, 視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった (p<0.05). T7 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった (左 F(3, 148)=7.51 p<0.001, 右 F(3, 148)=9.77 p<0.001). 多重比較の結果, 視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった (p<0.05). T8 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった (左 F(3, 148)=6.87 p<0.001, 右 F(3, 148)=9.75 p<0.001). 多重比較の結果, 視覚フィードバックがある条件とない条件の間に有意差があった (p<0.05).

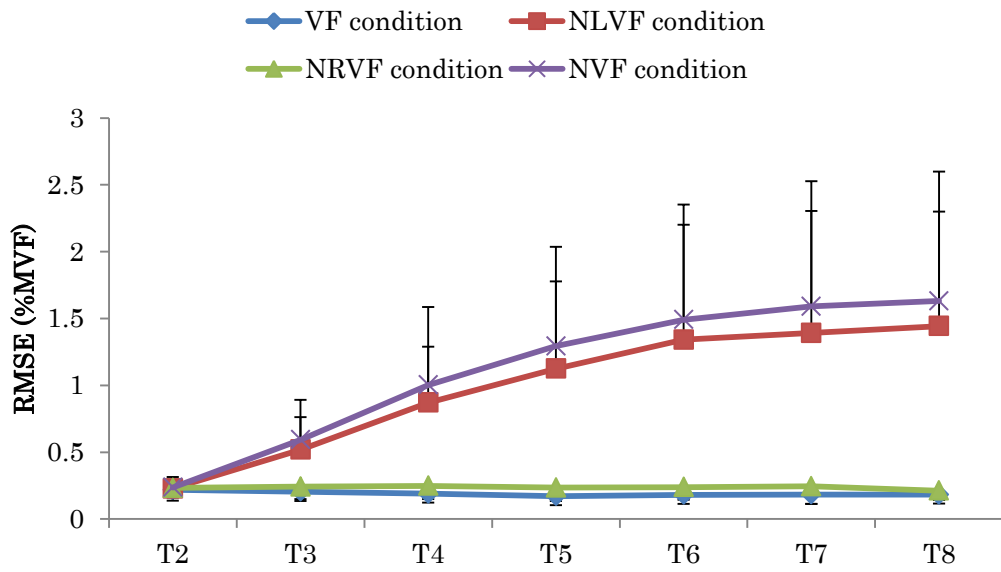


Figure 6.1a: 左手における各区間の RMSE

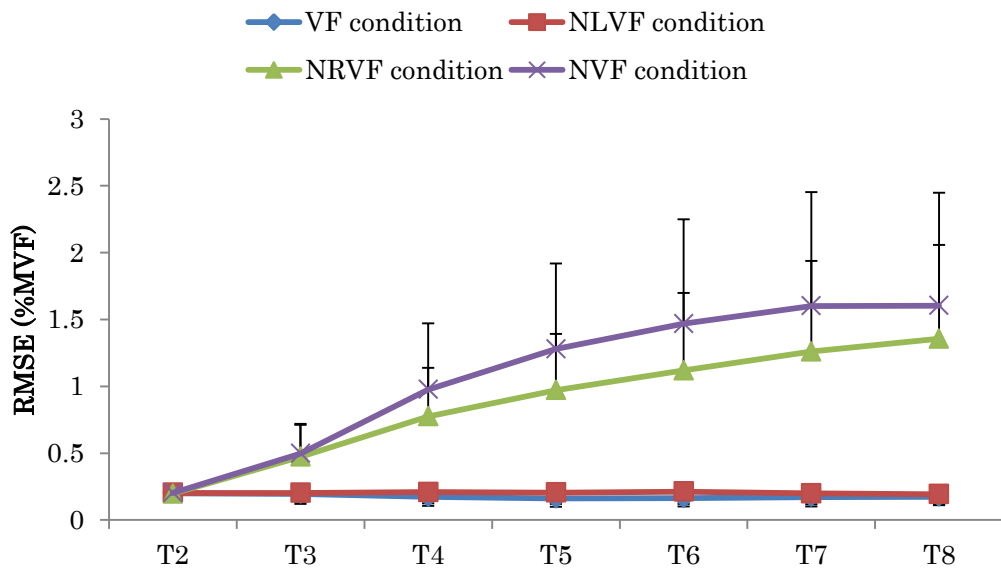


Figure 6.1b: 右手における各区間の RMSE

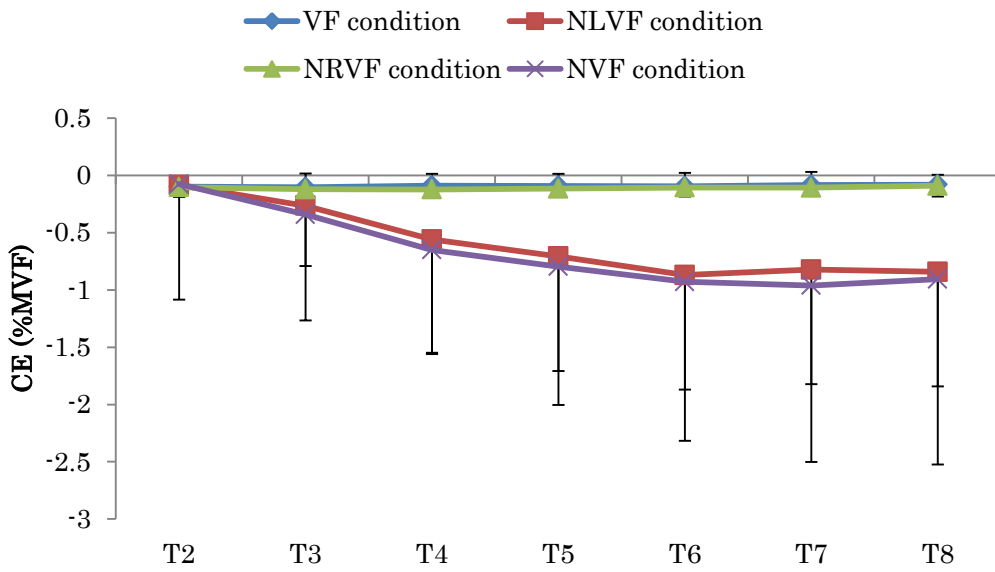


Figure 6.2a: 左手における各区間の CE

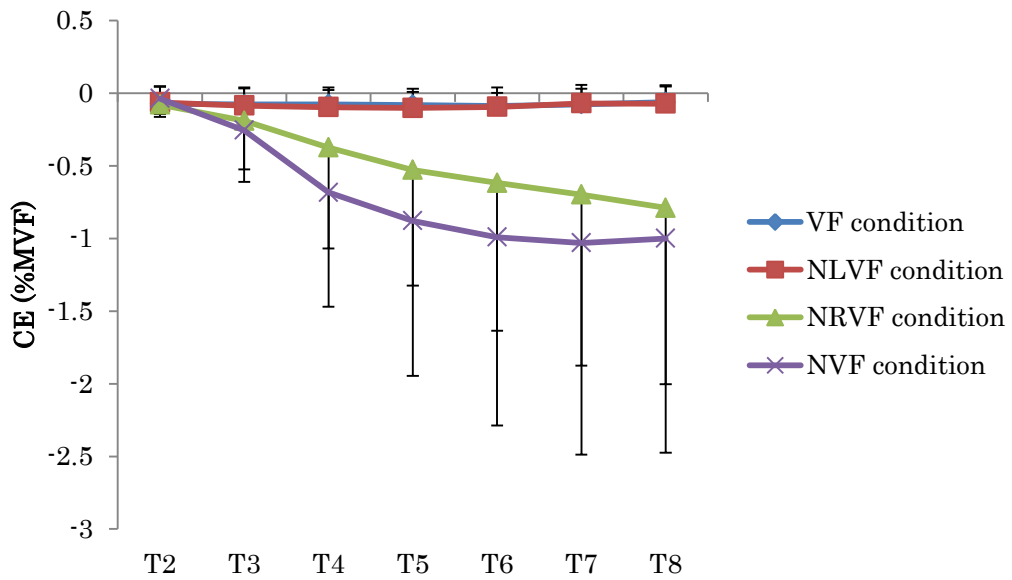


Figure 6.2b: 右手における各区間の CE

CV は分析の結果, T2 においては, 左右肢ともに視覚フィードバック条件の効果は有意でなかった(左 $F(3, 148)=0.31$ $p=0.82$, 右 $F(3, 148)=0.56$ $p=0.64$). T3 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった(左 $F(3, 148)=6.23$ $p<0.001$, 右 $F(3, 148)=6.86$ $p<0.001$). 多重比較の結果, 左手では VF 条件と NVF 条件および NLVF 条件に ($p<0.01$), 右手では NRVF 条件と VF 条件および NLVF 条件との間に有意差があった ($p<0.01$). T4 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった(左 $F(3, 148)=11.17$ $p<0.001$, 右 $F(3, 148)=7.66$ $p<0.001$). 多重比較の結果, 左手では VF 条件と NVF 条件および NLVF 条件, NVF 条件と NRVF 条件との間に, 右手では VF 条件と NVF 条件および NRVF 条件, NVF 条件と NLVF 条件との間に有意差があった ($p<0.01$). T5 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった(左 $F(3, 148)=13.04$ $p<0.001$, 右 $F(3, 148)=20.72$ $p<0.001$). 多重比較の結果, 左手では VF 条件と NVF 条件および NLVF 条件, NVF 条件と NRVF 条件との間に, 右手では視覚フィードバックのある条件とない条件との間に有意差があった ($p<0.01$). T6 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった(左 $F(3, 148)=13.88$ $p<0.001$, 右 $F(3, 148)=16.88$ $p<0.001$). 多重比較の結果, 左手では VF 条件と NVF 条件および NLVF 条件, NVF 条件と NRVF 条件との間に, 右手では VF 条件と NVF 条件および NRVF 条件, NVF 条件と NLVF 条件との間に有意差があった ($p<0.01$). T7 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった(左 $F(3, 148)=9.34$ $p<0.001$, 右 $F(3, 148)=11.59$ $p<0.001$). 多重比較の結果, 左手では VF 条件と NVF 条件および NLVF 条件, NVF 条件と NRVF 条件との間に, 右手では VF 条件と NVF 条件および NRVF 条件, NVF 条件と NLVF 条件との間に有意差があった ($p<0.01$). T8 においては, 左右肢とも視覚フィードバック条件の効果は有意であった(左 $F(3, 148)=18.99$ $p<0.001$, 右 $F(3, 148)=10.88$ $p<0.001$). 多重比較の結果, 左手では VF 条件と NVF 条件および NLVF 条件, NVF 条件と NRVF 条件との間に, 右手では VF 条件と NVF 条件および NRVF 条件, NVF 条件と NLVF 条件との間に有意差があった ($p<0.01$).

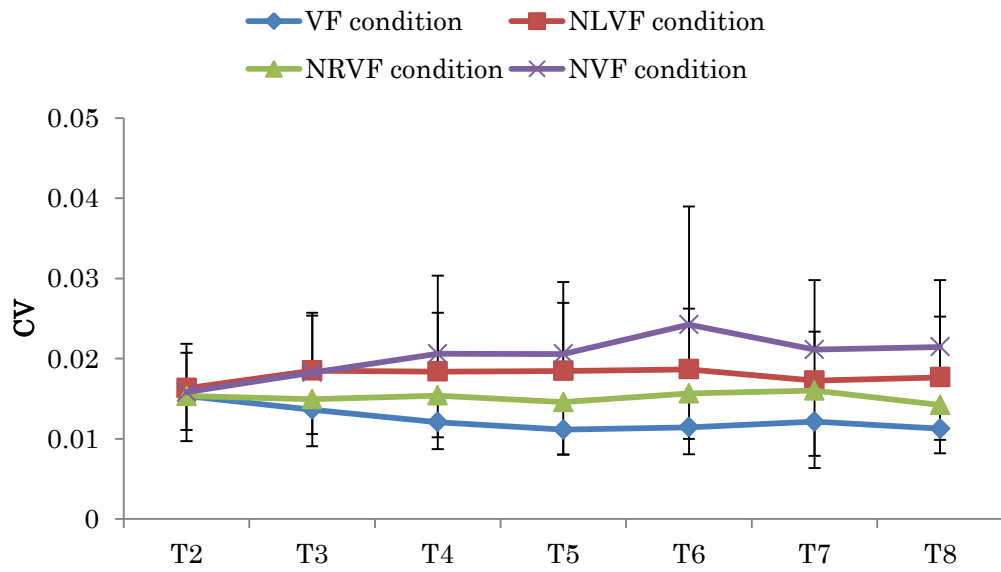


Figure 6.3a: 左手における各区間の CV

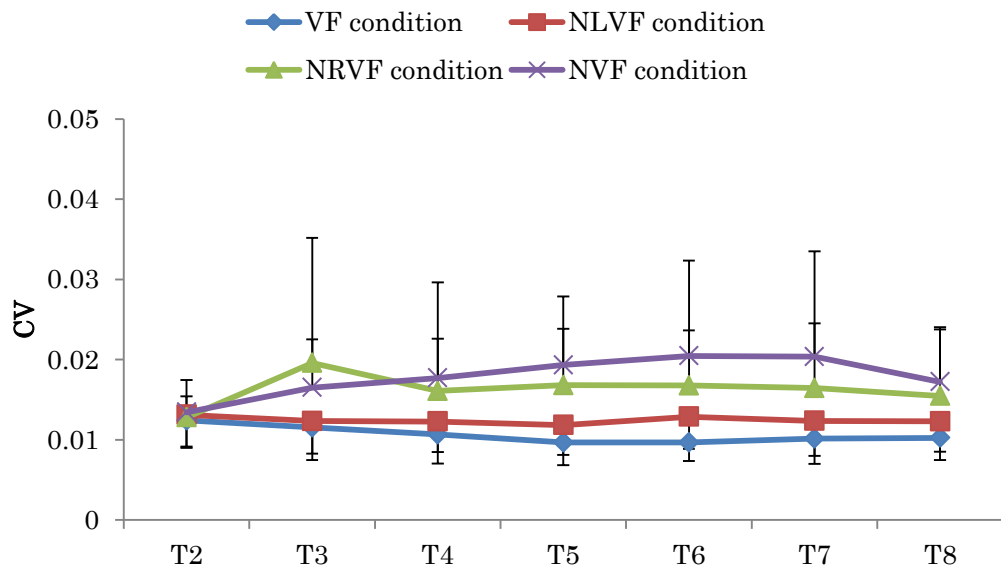


Figure 6.3b: 右手における各区間の CV

6.2.3 相互相関係数

T2においては、視覚フィードバック条件の効果は有意でなかった ($F(3, 148)=1.51$ $p=0.22$)。T3においては、視覚フィードバック条件の効果は有意であった ($F(3, 148)=15.66$ $p<0.001$)。多重比較の結果、NVF 条件と他の全ての条件との間に有意差があった ($p<0.001$)。T4においては、視覚フィードバック条件の効果は有意であった ($F(3, 148)=11.67$ $p<0.001$)。多重比較の結果、NVF 条件と他の全ての条件との間に有意差があった ($p<0.01$)。T5においては、視覚フィードバック条件の効果は有意であった ($F(3, 148)=20.01$ $p<0.001$)。多重比較の結果、NVF 条件と他の全ての条件との間に有意差があった ($p<0.001$)。T6においては、視覚フィードバック条件の効果は有意であった ($F(3, 148)=22.65$ $p<0.001$)。多重比較の結果、NVF 条件と他の全ての条件との間に有意差があった ($p<0.001$)。T7においては、視覚フィードバック条件の効果は有意であった ($F(3, 148)=6.58$ $p<0.001$)。多重比較の結果、NVF 条件と他の全ての条件との間に有意差があった ($p<0.01$)。T8においては、視覚フィードバック条件の効果は有意であった ($F(3, 148)=13.60$ $p<0.001$)。多重比較の結果、NVF 条件と他の全ての条件との間に有意差があった ($p<0.001$)。

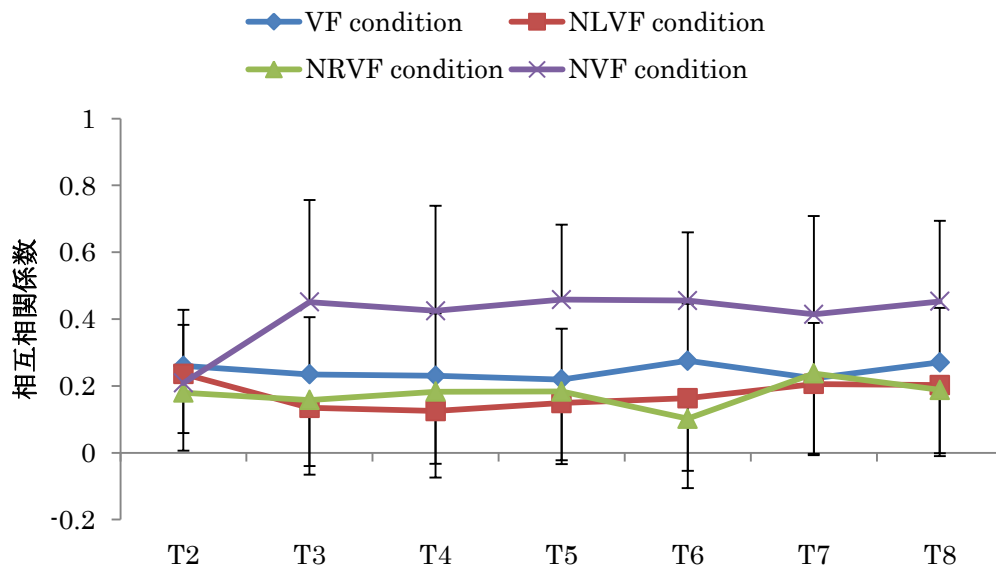


Figure 6.4: 各区間の相互相関係数

6.3 考察

RMSE は視覚フィードバックのない場合はある場合を比べて有意に値が高い。これは左右ともに視覚フィードバックの消失する T3 以降全ての区間において確認できる。ただし、左右肢における NVF 条件と左手における NLVF 条件については T6 までは徐々に RMSE が増加していくが、それ以降は増加の傾きが緩やかになり一定値に収束する傾向が見られる。これに対して右手の NRVF 条件では T3 から T8 まで直線的に RMSE が増加していく。ここで、片側の視覚フィードバックが消失した条件（左手であれば NLVF 条件、右手であれば NRVF 条件）と両側の視覚フィードバックが消失した条件を比較すると、左手は有意差がないのに対し右手は T4 から T7 で有意差が認められた。片側の視覚フィードバックがある際に、右手と左手で違いがあるのは、利き手によるものだと考えられる。

CE については、視覚フィードバックがない条件では発揮力が減少し（アンダーシュート）負の値になる。この結果は、視覚フィードバックの消失により力の発揮力は増大（オーバーシュート）したという Therrien and Balasubramaniam (2010a)とは異なる。これは、周期的なピンチング力発揮を課題としており、タスクの違いが原因だと考えられる。また、示指の外転をタスクに用いた Hu et al. (2010a)の報告では、視覚フィードバックがない状態で目標発揮力が 10%MVC の際にはオーバーシュート、40%MFV の際にはアンダーシュートした。また、足底屈による一定力発揮を課題とした Tracy (2007)も、視覚フィードバックがない状態で目標発揮力が 2.5, 5, 10%MVC の場合にはオーバーシュートし、50, 80%MVC の場合にはアンダーシュートすると報告している。この2つの研究からは視覚フィードバックがない状態の場合、低目標発揮力では力発揮が増大し、高発揮力では力発揮が減少すると言える。本研究でも目標発揮力は 10%MFV と比較的に低い目標発揮力であった。にもかかわらず力発揮が減少したのは、課題がピンチングであったことと、両手同時の力発揮を要求されていたことが影響していると考えられる。

相互相関係数については、視覚フィードバックがない条件（NVF 条件）は他の条件に比べて値が有意に高かった。そして、片側の視覚フィードバックがある条件（NLVF・NRVF 条件）は視覚フィードバックのある条件（VF 条件）と有意な差はなかった。このことから、片側の視覚フィードバックがある状態では、力の出力は左右での独立性が強くなることがわかる。また、NVF 条件における相互相関係数は時間経過に伴う変化はなく、視覚フィードバックがなければ左右の力発揮は似たものになる。

第7章 総括

7.1 加齢とピンチング制御

ヒトは加齢にともない様々な身体機能が変化または低下する。ところが、機能によって変化の開始時期や低下速度は異なる。例えば、筋量は20歳を過ぎた頃から減少していく(安部と福永, 1995)。ただし、部位により減少速度は異なり、下肢の大腿四頭筋は減少速度が速いが、上肢の前腕筋は60歳頃までほぼ同じである。この部位差は、日常生活の中で手の方が足よりも動かす頻度が高く、筋をよく使用しているためである。一方、運動制御については、眼と手の協調を要する精緻な運動制御(fine motor control)は粗大な運動制御(gross motor control)よりも早く機能低下をする(Williams, 1989)。これは、精緻な運動制御では複数の筋を協調して動かす必要があり、粗大な運動制御よりも複雑なためだと考えられる。また、視機能の一つである動体視力は15歳頃をピークに著しく低下し、80歳頃にはその能力は3分の2となる(Ishigaki and Miyao, 1994)。このように、加齢が与える影響は身体機能や部位によりまちまちである。そこで、本研究では加齢が精緻な運動制御に与える影響を横断的に検討した。

本研究で用いた、視覚フィードバックによる両手でのピンチング制御は精緻な運動制御を要するとともに眼と手の協調(eye-hand coordination)が必要なタスクであり、認知機能が必要であると考えられることができる(坂口豊, 2002)。視覚フィードバックによる片手での力発揮を課題とした先行研究では、発揮力の正確性や安定性は若年者に対して高齢者が有意に低かった(Vaillancourt and Newell, 2002; Keogh et al. 2006; Griffin et al, 2009; Ofori et al, 2010)。また、両手での力発揮を課題とした Hu and Newell (2011b)も高齢者における力発揮の正確性と安定性は若年者に対して有意に低かったと報告している。本研究においても、視覚フィードバックがある条件での両手のピンチング制御は同じ結果を得た。このように、力制御の際にフィードバックとして視覚情報が与えられた場合には高齢者の力制御能力は若年者と比べて低くなる。

次に、視覚フィードバックの有無による力発揮の制御能力の比較では、子ども、若年者、高齢者を対象とした研究があるが視覚フィードバックがない条件はある条件とくらべて有意に力発揮の正確性が低かった(Deutsch and Newell, 2001, 2002; Baweja et al, 2009)。

本研究においても同じ結果が得られた。力発揮の変動性については視覚フィードバックがある条件の方が低いという報告(Baweja et al, 2010; Hu et al, 2011a)と、高いという報告がある(Baweja et al, 2009; Marmon and Enoka, 2010)。これは、各実験における目標発揮力が違っていたことが考えられる。なお、本研究では、前者と同じ結果で視覚フィードバックがある条件の方が無い条件よりも値が低かった。このように、視覚フィードバックが運動制御に与える影響はタスクによって変化する。しかし、本研究で注目すべきは視覚フィードバックが無い条件においては、若年者と高齢者の正確性および安定性に有意差がなくなるという点である。つまり、視覚情報がない場合は若年者と高齢者で両手でのピンチング力発揮に大きな違いはない。しかし、ここに正しい力発揮が出来ているかどうかという視覚フィードバックが追加されると、若年者は大幅に正確性や安定性を改善できるが、高齢者はそれができない。

以上より、両手でのピンチング制御における加齢の特徴は視覚フィードバック情報を上手く反映できていないことだと考えられる。

7.2 トレーニングや不活動とピンチング制御

4章と5章ではピンチング制御に対するマイナス方向およびプラス方向の影響を縦断的に検討した。まず、若年者が不活動を体験することにより擬似的な老化状態を作り出し、精緻な運動制御にどのような変化があるのかをみた。

Saltin et al (1968) の報告では3週間のベッドレストで若年者の最大酸素摂取量が約30%低下した。通常、最大酸素摂取量は呼吸循環器系の機能を示し20歳頃をピークに加齢とともに毎年約1%ずつ低下する(田口ら, 1980)。よって、若年者は完全休養により呼吸循環器系の機能が短期間で30年分老化したと考えられる。そして、完全休養に限らず身体の一部を不活動状態にすることで、若年者であっても老化現象と酷似した機能低下を引き起こす可能性がある。本研究においては、3週間の一側肢ギプス固定により、固定肢側の最大把持力が約20%低下した。Ranganathan et al (2001)によれば高齢者の最大ピンチング力は若年者に比べ男性で約15%程度低下するという。このことから考えると筋力という点については、老化現象と同じような機能低下が起こったと言える。しかしながら、本研究では精緻な運動制御における機能低下は認められなかった。不活動を主軸として考えた際に精緻な運動制御能力と他の身体機能とではその影響力は異なることが明らかとなった。そして、若年者のピンチング制御能力は3週間の不活動によっては影響を受けない

ことがわかった。

次に、精緻な運動制御能力が低下してから再び向上するのかどうかトレーニング効果を見た。先行研究では、運動制御のタスクと同じ運動を用いた筋力トレーニングにより運動制御能力が向上した(Laidlaw, 1999)。また、ダンベルを用いた上腕のトレーニングによっても片手のピンチング制御能力が向上した(Keogh, 2007)。これらの研究のトレーニング期間は4週間であったが、実験タスクにおける最大発揮力も向上している。これに対して、パーデューペグボードを用いた2週間のトレーニング(Marmon, 2011)やデクステリティボールを用いた8週間のトレーニング(Ranganathan et al, 2001)によってもピンチング制御能力が向上した。こちらのトレーニングでは、最大発揮力は増加しなかったが、手を使ったトレーニングであったため手の機能が向上している。このことは、どちらの研究においても手作業に対する巧緻性を評価するパーデューペグボードテストを実施し、トレーニングにより有意に成績が向上していることから判断できる。また、これらのトレーニングは眼と手の協調も要求するものであったため、視覚フィードバックによる力の制御能力向上には効果的だったと考えられる。

ここまでのトレーニングは全て手を使ったものであり、前述したように本研究で用いたタスクは認知機能が必要だと考えることができ、この機能が向上することでピンチング制御能力の向上も期待できる。そこで、実施により認知機能の向上が報告されている有酸素運動(Dustman et al, 1984; Kramer et al, 1999; Hyodo et al, 2012)により視覚フィードバックを用いた両手のピンチング制御能力に与える影響を検討した。これらの研究は、4ヶ月以上のトレーニング期間を設けているが、本研究では、被験者のトレーニング期間は8週間と脳機能の向上を期待するには十分ではなかった可能性がある。結果的に、本研究においてはトレーニング前後でピンチング制御能力の改善はなかった。

以上より、ピンチング制御の低下および向上についての影響を検討するには、今回設定した期間よりも長くする必要がある。

7.3 視覚フィードバックとピンチング制御

若年者と高齢者との比較からもわかるように、両手でのピンチング制御には視覚情報が重要な役割を持っている。そこで6章では視覚フィードバックに注目し、両手でのピンチング制御について検討した。

手の力制御に関する先行研究には片手ではなく両手での力発揮を課題としているものも

ある(Davis, 2007; Hu and Newell, 2011a,2011b; Lodha, 2012). ただし, これらの課題では視覚フィードバックは左右の発揮力を平均もしくは合計したものである. このため, 被験者がフィードバックとして注視しなければならないのは一点のみである. これに対して, 本研究では左右で独立した視覚フィードバック情報を被験者に与えることができる. よって, 先行研究のように視覚フィードバックがあるかないかという比較だけでなく, 片側の視覚フィードバックがない状態においてどのような力制御がなされるのかについても検討できる.

発揮力についてみると, 本研究では視覚フィードバックが消失すると発揮力は減少し, アンダーシュートした状態となる. これは, もう片方の視覚フィードバックの有無にかかわらず, また, 消失時間が延長されてもアンダーシュートしたままとなる. Therrien et al (2010b) は 30 秒間の測定時間の中で最初の 10 秒間は視覚フィードバックを提示し後半は視覚フィードバックが消失した状態で力の制御を行わせた. ただし, 前半 10 秒は徐々に発揮力を増加させる(ramp up)課題と徐々に減少させる(ramp down)課題がある. すると, ramp up 課題では視覚フィードバックの消失により力発揮が増大するのに対して, ramp down 課題では力発揮が減少する. これより, 視覚フィードバックがある状態での発揮力の傾向がフィードバック消失後に力発揮がアンダーシュートするのかオーバーシュートするのかに大きな影響を与えていることがわかる. 今後は, 最初の 10 秒における力発揮のトレンドとその後の力発揮がアンダーシュートとオーバーシュートのどちらに向かうのかを検討しても良いかもしれない.

最後に, 両側の視覚フィードバックが消失した条件では両側の視覚フィードバックがある条件よりも有意に相互相関係数が高かった. この結果は, Hu et al (2011a)の報告とも一致する. これに加え, 両側の視覚フィードバックが消失した条件は片側の視覚フィードバックがある条件よりも有意に相互相関係数の値が高かった. そして, 片側であろうが両側であろうが視覚フィードバックがある条件では相互相関係数の値に有意差はなかった. この関係は, 時間経過による変化はなく全区間で同じ結果であった. 加えて, 若年者と高齢者においては条件にかかわらず相互相関係数の値に有意差はなかった.

以上より, 視覚フィードバックがない状態で両手でのピンチング力を発揮する際には, 体内にあらかじめプログラムされている力発揮モデルを利用していることが考えられる. そして, 左右肢での相互相関が高いことから, このモデルでは左右に同じような出力指令を出しているのではないだろうか. このような出力方式は, 左右で別々の指令を出すより

も効率的である。ここに、両側もしくは片側の外部フィードバックが加わることにより内部モデルと目的とする発揮力の誤差を瞬時に調節し精緻な運動制御が実行される。この視覚情報をもとにした誤差の調節が高齢者では上手くいかないために若年者よりもピンチング制御における正確性と安定性が低いと考えられる。

7.4 結論

本研究では、視覚フィードバックを用いた両手でのピンチング制御について、加齢、不活動とトレーニング、そして視覚情報という多次的に検討することで以下の点が明らかとなった。

- (1) 高齢者のピンチング制御能力は、正確性・安定性ともに若年者に比べて有意に低い。一方で、視覚フィードバックの消失によりその差がなくなる。
- (2) 若年者と高齢者では、視覚フィードバックの有無にかかわらず相互相関係数に有意差は認められなかった。
- (3) 若年男性における3週間のギプス固定による一側肢不活動では両手のピンチング制御能力に変化は認められなかった。
- (4) 高齢者における8週間の有酸素トレーニングでは両手のピンチング制御能力の改善は認められなかった。
- (5) 両側の視覚フィードバックが消失した場合のみ相互相関係数は高くなるが、片側または両側に視覚フィードバックがある場合は左右の力発揮は独立し、これらは時間が経過しても変化しないことが明らかとなった。

文献

- 阿部孝, 福永哲夫: 日本人の体脂肪と筋肉分布, 杏林書院, 1995.
- Abe, T., Y. Kawakami, Y. Suzuki, A. Gunji, and T. Fukunaga. "Effects of 20 Days Bed Rest on Muscle Morphology." *J Gravit Physiol* 4, no. 1 (Jan 1997): S10-4.
- AF., Kramer, Hahn S., E. McAuley, and et al. "Ageing, Fitness and Neurocognitive Function." (1999).
- Akima, H., Y. Kawakami, K. Kubo, C. Sekiguchi, H. Ohshima, A. Miyamoto, and T. Fukunaga. "Effect of Short-Duration Spaceflight on Thigh and Leg Muscle Volume." *Med Sci Sports Exerc* 32, no. 10 (Oct 2000): 1743-7.
- Angst, F., S. Drerup, S. Werle, D. B. Herren, B. R. Simmen, and J. Goldhahn. "Prediction of Grip and Key Pinch Strength in 978 Healthy Subjects." *BMC Musculoskelet Disord* 11 (2010): 94.
- Baweja, H. S., D. M. Kennedy, J. Vu, D. E. Vaillancourt, and E. A. Christou. "Greater Amount of Visual Feedback Decreases Force Variability by Reducing Force Oscillations from 0-1 and 3-7 Hz." *Eur J Appl Physiol* 108, no. 5 (Mar 2010): 935-43.
- Baweja, H. S., B. K. Patel, J. D. Martinkewiz, J. Vu, and E. A. Christou. "Removal of Visual Feedback Alters Muscle Activity and Reduces Force Variability During Constant Isometric Contractions." *Exp Brain Res* 197, no. 1 (Jul 2009): 35-47.
- Colcombe, S. J., K. I. Erickson, P. E. Scalf, J. S. Kim, R. Prakash, E. McAuley, S. Elavsky, et al. "Aerobic Exercise Training Increases Brain Volume in Aging Humans." *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 61, no. 11 (Nov 2006): 1166-70.
- Cole, K. J. "Grasp Force Control in Older Adults." *J Mot Behav* 23, no. 4 (Dec 1991): 251-8.
- Convertino, V. A., D. F. Doerr, K. L. Mathes, S. L. Stein, and P. Buchanan. "Changes in Volume, Muscle Compartment, and Compliance of the Lower Extremities in Man Following 30 Days of Exposure to Simulated Microgravity." *Aviat Space Environ Med* 60, no. 7 (Jul 1989): 653-8.

- Davis, N. J. "Memory and Coordination in Bimanual Isometric Finger Force Production." *Exp Brain Res* 182, no. 1 (Sep 2007): 137-42.
- Deutsch, K. M., and K. M. Newell. "Age Differences in Noise and Variability of Isometric Force Production." *J Exp Child Psychol* 80, no. 4 (Dec 2001): 392-408.
- Deutsch, K. M., and K. M. Newell. "Children's Coordination of Force Output in a Pinch Grip Task." *Dev Psychobiol* 41, no. 3 (Nov 2002): 253-64.
- Dustman, R. E., R. O. Ruhling, E. M. Russell, D. E. Shearer, H. W. Bonekat, J. W. Shigeoka, J. S. Wood, and D. C. Bradford. "Aerobic Exercise Training and Improved Neuropsychological Function of Older Individuals." *Neurobiol Aging* 5, no. 1 (Spring 1984): 35-42.
- Erickson, K. I., and A. F. Kramer. "Aerobic Exercise Effects on Cognitive and Neural Plasticity in Older Adults." *Br J Sports Med* 43, no. 1 (Jan 2009): 22-4.
- Francis, K. L., P. G. Macrae, W. W. Spirduso, and T. Eakin. "The Effects of Age on Precision Pinch Force Control across Five Days of Practice." *Curr Aging Sci* 5, no. 1 (Feb 2012): 2-12.
- Freund, H. J., and H. Hefter. "The Role of Basal Ganglia in Rhythmic Movement." *Adv Neurol* 60 (1993): 88-92.
- Grassi, B., P. Cerretelli, M. V. Narici, and C. Marconi. "Peak Anaerobic Power in Master Athletes." *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 62, no. 6 (1991): 394-9.
- Griffin, L., P. E. Painter, A. Wadhwa, and W. W. Spirduso. "Motor Unit Firing Variability and Synchronization During Short-Term Light-Load Training in Older Adults." *Exp Brain Res* 197, no. 4 (Aug 2009): 337-45.
- Halla B. Olafsdotir, Vladimir M. Zatsiorsky, and Mark L. Latash. "The Effects of Strength Training on Finger Strength and Hand Dexterity in Healthy Elderly Individuals." *J Appl Physiol* 105 (2008): 1166-78.
- Hu, X., M. Loncharich, and K. M. Newell. "Visual Information Interacts with Neuromuscular Factors in the Coordination of Bimanual Isometric Force." *Exp Brain Res* 209, no. 1 (Mar 2011a): 129-38.
- Hu, X., and K. M. Newell. "Aging, Visual Information, and Adaptation to Task Asymmetry in Bimanual Force Coordination." *J Appl Physiol* 111, no. 6 (Dec

2011b): 1671-80.

Hyodo, K., I. Dan, K. Suwabe, Y. Kyutoku, Y. Yamada, M. Akahori, K. Byun, M. Kato, and H. Soya. "Acute Moderate Exercise Enhances Compensatory Brain Activation in Older Adults." *Neurobiol Aging* 33, no. 11 (Nov 2012): 2621-32.

Ishigaki, H., and M. Miyao. "Implications for Dynamic Visual Acuity with Changes in Aged and Sex." *Percept Mot Skills* 78, no. 2 (Apr 1994): 363-9.

Kamen,Carolynn Patten and Gray. "Adaptation in Motor Unit Discharge Activity with Force Control Training in Young and Older Human Adults." (2000).

柄澤昭秀：老化と寿命。知的機能の廊下と痴呆，遺伝別冊，7号，43-50，1995

Keogh, J., S. Morrison, and R. Barrett. "Age-Related Differences in Inter-Digit Coupling During Finger Pinching." *Eur J Appl Physiol* 97, no. 1 (May 2006): 76-88.

Keogh, J. W., S. Morrison, and R. Barrett. "Strength Training Improves the Tri-Digit Finger-Pinch Force Control of Older Adults." *Arch Phys Med Rehabil* 88, no. 8 (Aug 2007): 1055-63.

Kitahara, A., T. Hamaoka, N. Murase, T. Homma, Y. Kurosawa, C. Ueda, T. Nagasawa, et al. "Deterioration of Muscle Function after 21-Day Forearm Immobilization." *Med Sci Sports Exerc* 35, no. 10 (Oct 2003): 1697-702.

Kokubu, M., S. Ando, and S. Oda. "The Order of Gaze Shifts Affects Spatial and Temporal Aspects of Discrete Bimanual Pointing Movements." *Exp Brain Res* 198, no. 4 (Oct 2009): 501-11.

Kurt W. Kornatz, Evangelos A. Christou, and Roger M. Enoka. "Practice Reduces Motor Unit Discharge Variability in a Hand Muscle and Improves Manual Dexterity in Old Adults." *J Appl Physiol* 98 (2005): 2072-80.

Laidlaw, D. H., K. W. Kornatz, D. A. Keen, S. Suzuki, and R. M. Enoka. "Strength Training Improves the Steadiness of Slow Lengthening Contractions Performed by Old Adults." *J Appl Physiol* 87, no. 5 (Nov 1999): 1786-95.

LeBlanc, A., C. Lin, L. Shackelford, V. Sinitsyn, H. Evans, O. Belichenko, B. Schenkman, et al. "Muscle Volume, Mri Relaxation Times (T2), and Body Composition after Spaceflight." *J Appl Physiol* 89, no. 6 (Dec 2000): 2158-64.

- Lodha, N., S. A. Coombes, and J. H. Cauraugh. "Bimanual Isometric Force Control: Asymmetry and Coordination Evidence Post Stroke." *Clin Neurophysiol* 123, no. 4 (Apr 2012): 787-95.
- Marmon, A. R., and R. M. Enoka. "Comparison of the Influence of Two Stressors on Steadiness During Index Finger Abduction." *Physiol Behav* 99, no. 4 (Mar 30 2010): 515-20.
- Marmon, A. R., J. R. Gould, and R. M. Enoka. "Practicing a Functional Task Improves Steadiness with Hand Muscles in Older Adults." *Med Sci Sports Exerc* 43, no. 8 (Aug 2011): 1531-7.
- Mathiowetz, V., N. Kashman, G. Volland, K. Weber, M. Dowe, and S. Rogers. "Grip and Pinch Strength: Normative Data for Adults." *Arch Phys Med Rehabil* 66, no. 2 (Feb 1985): 69-74.
- Matsumura, M., C. Ueda, K. Shiroishi, K. Esaki, F. Ohmori, K. Yamaguchi, S. Ichimura, *et al.* "Low-Volume Muscular Endurance and Strength Training During 3-Week Forearm Immobilization Was Effective in Preventing Functional Deterioration." *Dyn Med* 7 (2008): 1.
- Michimata, A., T. Kondo, Y. Suzukamo, M. Chiba, and S. Izumi. "The Manual Function Test: Norms for 20- to 90-Year-Olds and Effects of Age, Gender, and Hand Dominance on Dexterity." *Tohoku J Exp Med* 214, no. 3 (Mar 2008): 257-67.
- Motobe, M., N. Murase, T. Osada, T. Homma, C. Ueda, T. Nagasawa, A. Kitahara, *et al.* "Noninvasive Monitoring of Deterioration in Skeletal Muscle Function with Forearm Cast Immobilization and the Prevention of Deterioration." *Dyn Med* 3, no. 1 (Feb 6 2004): 2.
- Ofori, E., J. M. Samson, and J. J. Sosnoff. "Age-Related Differences in Force Variability and Visual Display." *Exp Brain Res* 203, no. 2 (Jun 2010): 299-306.
- Ohmori, F., T. Hamaoka, K. Shiroishi, T. Osada, N. Murase, Y. Kurosawa, S. Ichimura, *et al.* "Low-Volume Strength and Endurance Training Prevent the Decrease in Exercise Hyperemia Induced by Non-Dominant Forearm Immobilization." *Eur J Appl Physiol* 110, no. 4 (Nov 2010): 845-51.
- Ranganathan, V. K., V. Siemionow, V. Sahgal, J. Z. Liu, and G. H. Yue. "Skilled Finger

- Movement Exercise Improves Hand Function." *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 56, no. 8 (Aug 2001): M518-22.
- Ranganathan, V. K., V. Siemionow, V. Sahgal, and G. H. Yue. "Effects of Aging on Hand Function." *J Am Geriatr Soc* 49, no. 11 (Nov 2001): 1478-84.
- 坂口豊: 知覚・運動協応. 日本認知科学会 (編), 認知科学辞典, 共立出版, p.541 2002.
- Saltin, B., G. Blomqvist, J. H. Mitchell, R. L. Johnson, Jr., K. Wildenthal, and C. B. Chapman. "Response to Exercise after Bed Rest and after Training." *Circulation* 38, no. 5 Suppl (Nov 1968): VIII1-78.
- Seki, K., T. Kizuka, and H. Yamada. "Reduction in Maximal Firing Rate of Motoneurons after 1-Week Immobilization of Finger Muscle in Human Subjects." *J Electromyogr Kinesiol* 17, no. 2 (Apr 2007): 113-20.
- Serrien, D. J., and M. Wiesendanger. "Dissociation of Grip/Load-Force Coupling During a Bimanual Manipulative Assignment." *Exp Brain Res* 136, no. 3 (Feb 2001): 417-20.
- Sosnoff, J. J., K. Jordan, and K. M. Newell. "Information and Force Level Interact in Regulating Force Output During Two and Three Digit Grip Configurations." *Exp Brain Res* 167, no. 1 (Nov 2005): 76-85.
- Sosnoff, J. J., and K. M. Newell. "Aging and Motor Variability: A Test of the Neural Noise Hypothesis." *Exp Aging Res* 37, no. 4 (Jul 2011): 377-97.
- Sperling, L. "Evaluation of Upper Extremity Function in 70-Year-Old Men and Women." *Scand J Rehabil Med* 12, no. 4 (1980): 139-44.
- Su, C. Y., T. H. Chien, K. F. Cheng, and C. J. Su. "A Study of Pinch Strength in Normal Taiwanese Adults." *Gaoxiong Yi Xue Ke Xue Za Zhi* 11, no. 2 (Feb 1995): 69-78.
- Swanson, A. B., C. G. Hagert, and G. D. Swanson. "Evaluation of Impairment of Hand Function." *J Hand Surg Am* 8, no. 5 Pt 2 (Sep 1983): 709-22.
- 田口貞善他編著: 体力・健康・運動—その科学的基礎—, 文理閣, 1980.
- Therrien, A. S., and R. Balasubramaniam. "Timing and Visual Feedback Constraints on Repetitive Finger Force Production." *Exp Brain Res* 201, no. 4 (Apr 2010a): 673-9.
- Therrien, A. S., J. Lyons, and R. Balasubramaniam. "Repetitive Finger Force

- Production in Predictable Environments." *Neurosci Lett* 479, no. 1 (Jul 19 2010b): 69-73.
- Tracy, B. L. "Visuomotor Contribution to Force Variability in the Plantarflexor and Dorsiflexor Muscles." *Hum Mov Sci* 26, no. 6 (Dec 2007): 796-807.
- Tracy, B. L., K. S. Maluf, J. L. Stephenson, S. K. Hunter, and R. M. Enoka. "Variability of Motor Unit Discharge and Force Fluctuations across a Range of Muscle Forces in Older Adults." *Muscle Nerve* 32, no. 4 (Oct 2005): 533-40.
- 上羽康夫：手その機能と解剖，金芳堂，2010.
- Uttner, I., N. Mai, O. Esslinger, and A. Danek. "Quantitative Evaluation of Mirror Movements in Adults with Focal Brain Lesions." *Eur J Neurol* 12, no. 12 (Dec 2005): 964-75.
- Vaillancourt, D. E., and K. M. Newell. "Aging and the Time and Frequency Structure of Force Output Variability." *J Appl Physiol* 94, no. 3 (Mar 2003): 903-12.
- Williams, H. (1989). Aging and eye-hand coordination. In C. Bard, M. Fleury. & L. Hays (Eds.), *Eye-hand coordination across the life span* (pp. 327-357). Columbia: University of South Carolina Press.
- Yue, G. H., M. Bilodeau, P. A. Hardy, and R. M. Enoka. "Task-Dependent Effect of Limb Immobilization on the Fatigability of the Elbow Flexor Muscles in Humans." *Exp Physiol* 82, no. 3 (May 1997): 567-92.

謝辞

本研究及び本論文の作成にあたり、多大なご指導を頂いた伊坂忠夫教授、大阪体育大学(学術振興会)の國部雅大氏に心より感謝いたします。また、本研究に対し、多くのご助言をいただきました立命館大学スポーツ健康科学部の吉岡伸輔助教、栗原俊之助手、大塚光雄助手、さらには日々の研究活動や事務処理などのお世話にとどまらず精神的な支えとなってくださった秘書の奥村悦子氏に厚く御礼申し上げます。そして、副査をしてくださった塩澤成弘准教授、橋本健志准教授には、研究に関するアイデアなどもいただき、深く感謝いたします。最後に、ご多忙にも関わらず快く実験を引き受けてくださった被験者の皆様、ならびにスポーツ健康科学部伊坂研究室の方々に感謝の意を表します。