

効果的な巧緻性スキルの獲得を目的とした  
運動プログラムに関する研究

令和3年度

徳島大学大学院総合科学教育部  
博士論文

出口 純次

## 目次

### 第1章 序論

1.1 本論文の背景 .....	1
1.2 本論文の構成 .....	3

### 第2章 課題前の有酸素性運動が筋力発揮調整能の促進および保持に及ぼす影響

2.1 緒言 .....	4
2.2 方法 .....	4
2.2.1 対象者 .....	4
2.2.2 プロトコール .....	5
2.2.3. 筋力発揮調整能の課題の方法 .....	6
2.2.4. 最大運動負荷テストのプロトコール .....	8
2.2.5. 採血 .....	8
2.2.6 統計解析 .....	9
2.3 結果 .....	9
2.3.1 課題遂行時間の変化 .....	9
2.3.2 課題成功数の変化 .....	10
2.3.3 脳由来神経栄養因子 (Brain derived neurotrophic factor: BDNF) の変化 ..	11
2.4 考察 .....	11
2.5 結語 .....	12

### 第3章 定期的な有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが筋力発揮調整能の促進におよぼす影響

3.1 緒言 .....	13
3.2 方法 .....	13
3.2.1 対象者 .....	13
3.2.2 プロトコール .....	14
3.2.3. 筋力発揮調整能の課題の方法 .....	15
3.2.4. 最大運動負荷テストのプロトコール .....	15

3.2.5.	統計解析	15
3.3	結果	16
3.3.1	トレーニング前後における課題遂行時間の変化	16
3.3.2	トレーニング前後における課題成功数の変化	16
3.4	考察	18
3.5	結語	19

#### 第4章 骨格筋電気刺激が筋力発揮調整能におよぼす影響

4.1	緒言	20
4.2	方法	21
4.2.1	対象者	21
4.2.2	プロトコール	21
4.2.3.	骨格筋電気刺激 (Electrical Muscle Stimulation: EMS)	22
4.2.4.	筋力発揮調整能の課題の方法	23
4.2.5.	統計解析	24
4.3	結果	24
4.3.1	条件前後における課題遂行時間の変化	24
4.3.2	条件前後における課題成功数の変化	25
4.4	考察	26
4.5	結語	27

#### 第5章 他者への運動スキルの教示が運動学習効果の保持に及ぼす影響

5.1	緒言	28
5.2	方法	29
5.2.1	対象者	29
5.2.2	プロトコール	30
5.2.3.	統計解析	31
5.3	結果	31
5.3.1	教示条件の他者に対する教示内容	31
5.3.1	教示条件および CON 条件の球回し回数の変化	32

5.3.2 教示条件および CON 条件の球回し改善回数の変化.....	33
5.4 考察 .....	34
5.5 結語 .....	36
第6章 結論 .....	37
引用・参考文献 .....	39
本論文の基礎となる参考論文（主論文） .....	48
本論文に関連のあるその他参考論文（副論文） .....	49
本論文に関係のないその他の論文.....	50
謝辞.....	51

## 第1章 序論

### 1.1 本論文の背景

我が国の総人口に占める高齢者の割合 (2020年9月15日現在推計) は、28.7%と過去最高となっている (厚生労働省, 2020) 高齢者は加齢に伴い、身体の各器官を構成している細胞数の減少および細胞そのものの働きが低下することで生理的老化が進行する。高齢者では若年者と比較して発揮する筋力を協調的に行う機能が加齢とともに低下することを報告している (Nagasawa et al. 2002)。また、脳卒中片麻痺患者の55~75%は上肢機能障害が残存すると報告されており (Yavuzer et al. 2008)、手指の動きが不十分なため、肢全体の不使用につながるケースもある。しかし、日常生活動作 (Activities of Daily Living 以下: ADL) ではコップを持つ、ドアノブを回す、フライパンを振るなど発揮筋力を調整して協調的に働かせる機会が多い。

このような動作は、必要に応じて筋出力量を調節する能力、すなわち筋力発揮調整能とされており、様々な人によって概念的に定義されている。Nagasawa et al. (2002) は、筋力発揮調整能を「必要な筋出力量に応じて筋力を発揮する際に、目標とする値と実際の発揮値との誤差をできる限り最小にする神経系の筋に対するコントロール能力」と定義している。把握動作を利用した筋力発揮調整能課題は、モニター上に表示される変動目標値に対して、握力発揮値を合わせる動作を利用している。神経機能および筋機能を総合的に使用し、視覚、固有受容器からの情報を得ながら筋出力量の調節を必要としている。したがって、筋力発揮調整能のパフォーマンスは、認知系のフィードフォワード制御と視覚系、固有受容器系のフィードバック制御に依存していると考えられる。このような、フィードバックされた情報から視覚および手の協調等が重要であり、これが低下していると転倒、自動車事故などの傷害の発生率も高くなることが推察されている。世界保健機関は、健康の定義を「健康とは、病気でないとか、弱っていないということではなく、肉体的にも、精神的にも、そして社会的にも、すべてが満たされた状態にあることをいう」としている (日本WHO協会)。このように、加齢、脳血管疾患、変形性膝関節症など様々な疾病により身体機能が低下することで、介護が必要となり、ADL能力の低下および生活の質 (Quality of life 以下: QOL) の低下を引き起こす。

さらに、ADLに重点をおいて、リハビリテーションを実施する場合、外来リハビリテーション、訪問リハビリテーションなどは、1回あたりのリハビリテーション提供

単位数は、1～2 単位 (20～40 分) であり、実施する時間が限られている。また、回復期リハビリテーション病棟の入院 1 日あたりのリハビリテーション提供単位数は 6 単位となっている (厚生労働省, 2017)。ADL 能力の改善および QOL を向上させるためには、限定された時間のなかで患者が残存機能に見合った最適な生活機能を獲得できるように専門的支援を行うことが期待されている。

そのために、加齢、脳血管疾患、変形性膝関節症など様々な疾患を有する者が、筋力発揮調整能を改善することは日常生活を行う上で重要な要素であることが考えられる。しかし、短時間の有酸素性運動および他動的な方法によるその後の筋力発揮調整能の向上は、十分に検討されていない。そこで、本研究では自動および他動的な方法を用いて、筋力発揮調整能の促進および保持の影響を明らかにすることを目的とした。

## 1.2 本論文の構成

本論文は、4つの研究から構成されており、第2章では、従来の有酸素性運動の時間と比較して、短時間での有酸素性運動による筋力発揮調整能の促進および保持の急性効果を検討した。第3章では、第2章で明らかにした急性効果を、トレーニング介入による筋力発揮調整能の促進に与える影響について検討した。第4章では、有酸素性運動と同様の効果を得られる可能性がある他動的な方法として骨格筋電気刺激による筋力発揮調整能課題の急性効果について検討した。第5章では、運動イメージを利用した教示による方法で、巧緻性スキルの促進に与える影響について検討した。

## 第2章 課題前の有酸素性運動が筋力発揮調整能の促進および保持に及ぼす影響

### 2.1 緒言

これまでに、ワーキングメモリーを強化するために健常成人を対象とした、10分間の軽度または中強度の有酸素性運動は、学習および認知機能が改善すると報告されている (Yamazaki et al. 2018). さらに, Loras et al. (2020) は 25 分間の中強度有酸素性運動を実施することで、ゴルフパッティングの技能が 24 時間保持され、ワーキングメモリーを向上させることを明らかにしている. Roig et al. (2012) は、20 分の高強度自転車こぎ運動を実施すると、運動前と比較して運動学習課題である視覚運動精度追跡が、24 時間後および 7 日後の保持に有意に高値を認め、有酸素性運動が運動学習に有効であることを報告している. Mang et al. (2014) は、運動学習課題である連続追跡課題を実践する前に、20 分間の高強度自転車こぎ運動を実施することで、安静条件と比較して、一層、運動学習課題を獲得することを報告している. さらに, Statton et al. (2015) は、30 分間の中強度の有酸素性運動を実施する前に運動学習課題を行うことで、運動技能および保持の獲得を報告している. このように、有酸素性運動が一次運動野、補足運動野などの運動学習に関与する中枢脳領域の興奮性を高め、皮質脊髄路の神経可塑性に影響を与える可能性がある. このように、有酸素性運動を実施することで認知機能の向上、運動学習の獲得および保持が明らかとなっている. しかし、短時間の有酸素性運動がその後の筋力発揮調整能の向上は、十分に検討されていない. したがって、従来の 20 分から 30 分の運動が困難な対象者にとって、この関係性を明らかにすることで、筋力発揮調整能の改善を目的にしたリハビリテーションなどの臨床場面における新たな運動プログラムの構築につながるのではないかと考えられる. そこで、本研究では筋力発揮調整能の課題を行う前に短時間の有酸素性運動を実施することが、その後の筋力発揮調整能に及ぼす影響について検討した.

### 2.2 方法

#### 2.2.1 対象者

対象者は、表 1 に示すとおりであり、Edinburgh 利き手テストにより右利きと確認された健康な成人 17 名であった. 対象者は、実験の 48 時間前以降の活発な身体活動、6 時間前以降のアルコール摂取、2 時間前以降の食事を控えるように指示した. 除外基

準は、精神医学的または医学的疾患、学習および中枢神経系への影響がある薬物を使用している者とし、2名が除外基準を満たしたために、測定から除外した。

なお、本研究は、徳島大学総合科学部人間科学分野における研究倫理委員会の承諾を得た (受付番号: 182)。対象者には、事前に文書および口頭にて、研究内容・趣旨、参加の拒否・撤回・中断などについて説明し、書面にて承諾を得た後に実験を開始した。

表 1. 対象者の身体的特性

	AE 群 (n = 8)	CON 群 (n = 8)
年齢 (歳)	25.0 ± 4.1	24.3 ± 3.6
性別 (男 / 女)	5 / 3	5 / 3
身長 (cm)	162.3 ± 6.6	166 ± 5.2
体重 (kg)	56.3 ± 3.2	58.0 ± 6.1
最大酸素摂取量 (ml · kg <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup> )	36.3 ± 9.3	37.8 ± 4.9

平均値 ± 標準偏差

### 2.2.2 プロトコール

全ての対象者は、60%最大酸素摂取量 (以下、 $\dot{V}O_{2\max}$ ) で10分間の自転車こぎ運動 (aerobic exercise: 以下、AE) 条件、および安静座位のコントロール (control: 以下、CON) 条件の2条件で実施した (図 1)。実施順は無作為とし、少なくとも14日以上の間隔をあげ、同一時刻に実施した。筋力発揮調整能の課題は条件前、条件終了1時間後および条件終了24時間後に行った。

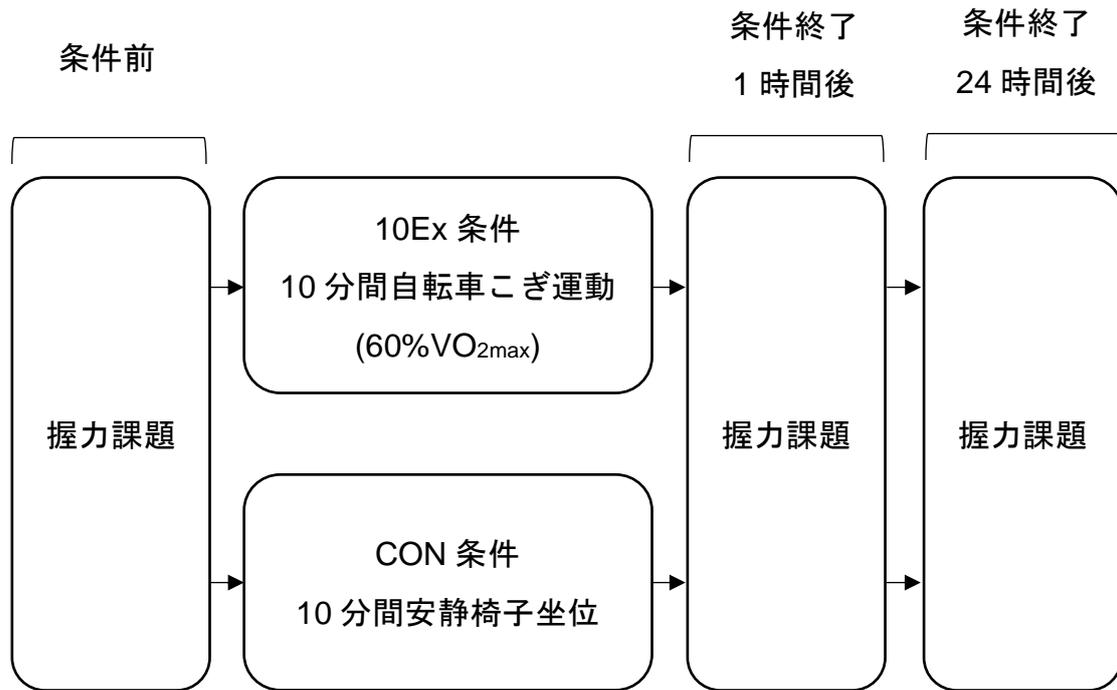


図 1. 一過性運動および運動学習課題のプロトコール

### 2. 2. 3. 筋力発揮調整能の課題の方法

筋力発揮調整能課題のシステムは、Nagasawa et al. (2002) の方法を参考にし、握力用アタッチメント (T.K.K.5710b, 竹井機器工業社製) と、生体信号を電気アナログ信号に変換するアイソメトリックダイナモメータを使用し (図 2), その後、ストレインアンプ (ストレインアンプ TSA-210, 竹井機器工業社製) によりアナログ信号をデジタル化した。目標範囲に到達する握力発揮を、視覚的に波形としてコンピュータ画面に表示し (図 3), 波形数値を 1/100 ms ごとに Excel に数字として変換して記録した。測定の際に対象者は、図 4 のようにコンピュータの前に椅子座位となり、非利き手で握力計を把持し、事前に測定された最大の等尺性収縮の  $10 \pm 5\%$ ,  $15 \pm 5\%$ ,  $20 \pm 5\%$ ,  $25 \pm 5\%$ ,  $30 \pm 5\%$ ,  $35 \pm 5\%$ , および  $40 \pm 5\%$  の 7 つの強度をそれぞれ 8 回, 計 56 回を無作為に実施した。筋力発揮調整能の指標として、目標範囲にピーク値を到達するのに要した課題遂行時間, 目標範囲内に握力を発揮させて, 目標範囲内に到達させた課題成功数の 2 つを評価とした。

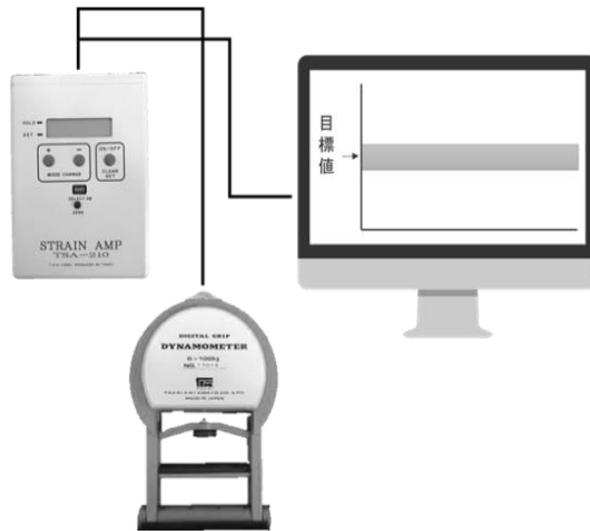


図 3. 握力発揮調整能課題のパソコン画面

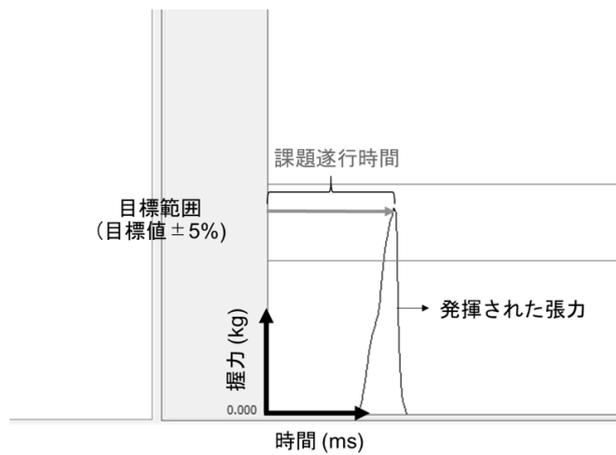


図 2. コンピュータ，握力変換機，およびハードウェアの接続方法



図 4. 握力発揮調整能課題の様子

#### 2.2.4 最大運動負荷テストのプロトコール

最大酸素摂取量は、運動時の運動強度を設定するために、自転車エルゴメータ (232C MODEL50, Combi 社製) を使用し、東大式の多段階負荷法を一部改訂して  $\dot{V}O_{2\max}$  を測定した。対象者は、3 分間の安静後に 40 Watts の負荷から開始し、1 分ごとに 20 Watts 漸増させる最大負荷テストを実施した。なお、ペダルの回転数は毎分 60 回転に規定した。 $\dot{V}O_{2\max}$  の決定には、 $\dot{V}O_2$  の leveling off, 予測最大心拍数 (220-年齢) 以上、呼吸交換率が 1.2 以上および Borg scale が 19 以上のうち、2 項目が該当することを条件とした。

#### 2.2.5 採血

脳由来神経栄養因子 (Brain derived neurotrophic factor: 以下, BDNF) の分析では、AE 条件の 1 名の対象者に対し、条件前および条件終了 1 時間後の時点で、利き手の肘正中皮静脈に真空採血管用ホルダーセーフタッチ翼状針付き (ニプロ) を用いて血液を採取した。その後、血液サンプルを室温で 30 分間保持して凝固させた後、10 分間、2000G (4°C) で遠心分離をした。血清 BDNF は、サンドイッチ酵素結合免疫吸着測定法 (Human BDNF Quantikine ELISA, DBD00, R&D Systems, ミネソタ州ミネアポリス) で分析した。

## 2.2.6 統計解析

全ての測定値については、Shapiro-Wilk 検定によってデータの正規性の検定を行い、正規分布を確認した。また、各条件間および条件内における課題前後の測定値の比較には、反復測定による二元配置分散分析を行い、交互作用および主効果の有無を検定した。交互作用および主効果が認められた場合には、Bonferroni の方法を用いた。なお、データの解析には、統計処理ソフト (SPSS 26.0, IBM 社製, 東京, 日本) を使用した。

## 2.3 結果

### 2.3.1 課題遂行時間の変化

AE 条件および CON 条件の条件前、条件終了 1 時間後、および条件終了 24 時間後の条件遂行時間の変化については図 5 に示すとおりである。AE 条件ではそれぞれ、 $57.7 \pm 20.5$  ms,  $53.1 \pm 14.5$  ms および  $54.9 \pm 12.6$  ms, CON 条件ではそれぞれ、 $63.3 \pm 23.1$  ms,  $55.6 \pm 12.4$  ms および  $56.0 \pm 14.3$  ms であり、各条件ともに有意な交互作用および主効果は認められなかった。

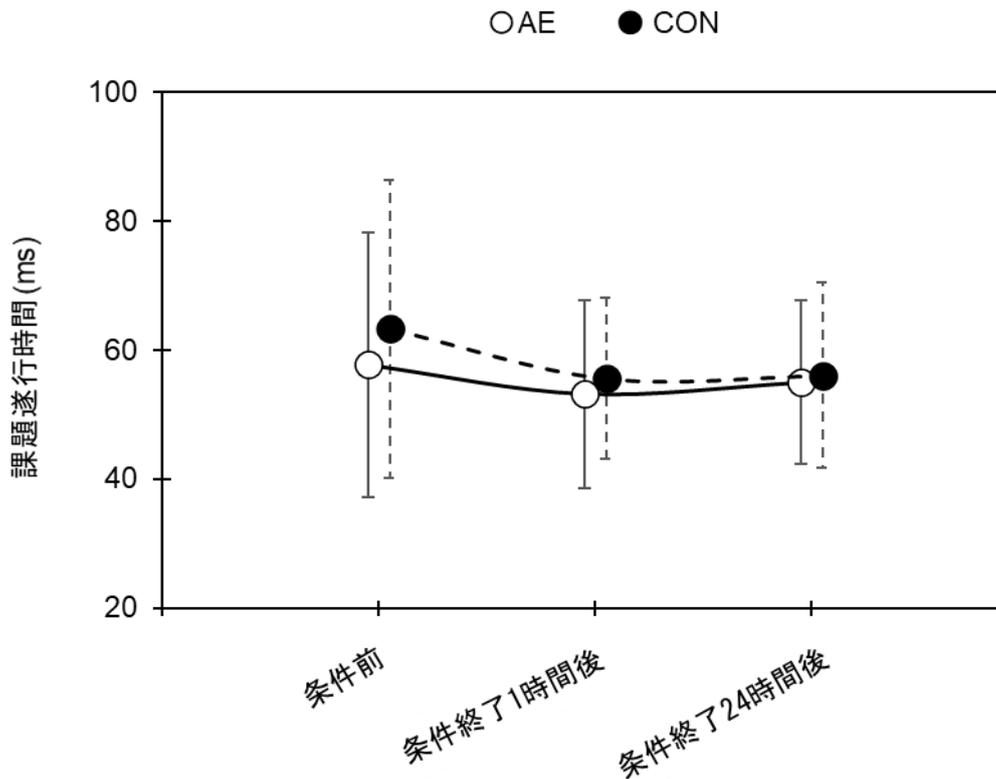


図5. 10Ex条件およびCON条件の条件前，条件終了1時間および条件終了24時間後の課題遂行時間の変化

### 2.3.2 課題成功数の変化

AE条件およびCON条件の条件前，条件終了1時間後，および条件終了24時間後の条件成功数の変化については，図6に示すとおりである．AE条件ではそれぞれ， $10.4 \pm 3.0$ 回， $14.0 \pm 3.2$ 回および $14.8 \pm 3.8$ 回，CON条件ではそれぞれ， $13.0 \pm 4.0$ 回， $14.3 \pm 4.4$ 回および $12.5 \pm 3.5$ 回であり，各条件ともに有意な主効果が認められた ( $F(2, 28) = 8.0$ )．また，各条件間で有意な差は認められなかったが，AE条件の条件終了1時間後，および条件終了24時間後の課題成功数は，条件前と比較して有意に増加した ( $p < 0.05$ ) ．

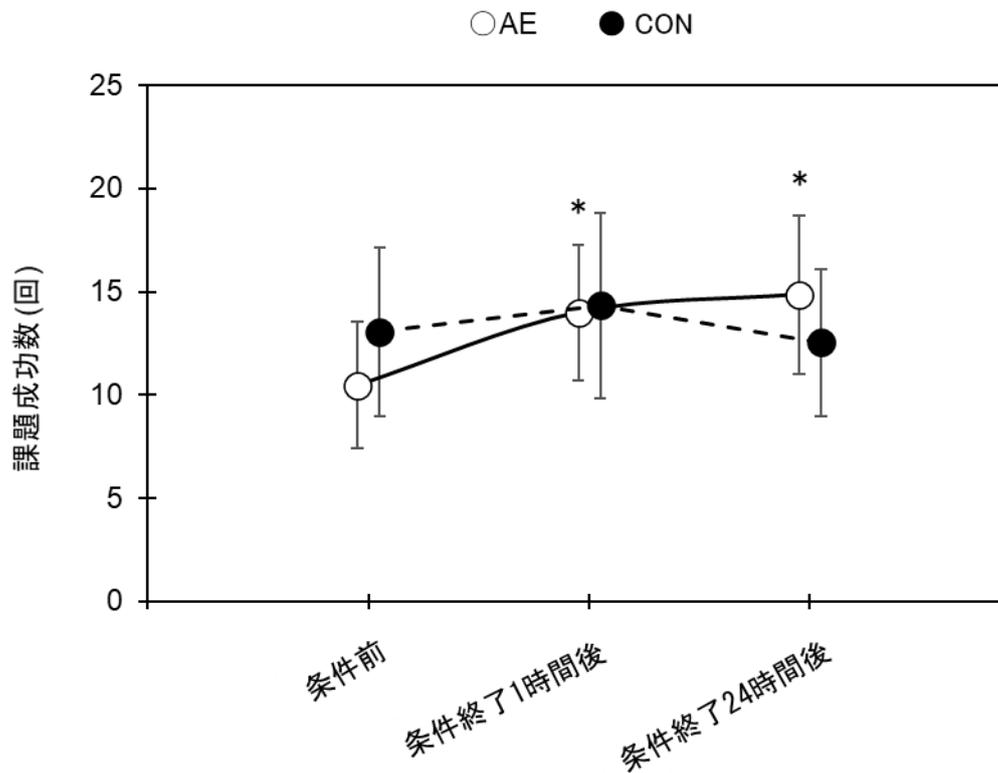


図6. AEおよびCON条件の条件前，条件終了1時間および条件終了24時間後の課題成功数の変化  
\* p<0.05: vs. 条件前

### 2.3.3 BDNF の変化

条件前および条件終了1時間後 BDNF の結果は，0.79ng / ml および 0.98 ng / ml 条件前と比較して増加傾向が認められた。

## 2.4 考察

これまでに学習課題および運動学習課題の前に 20 分から 30 分の中～高強度の有酸素性運動を行うことで，運動学習の促進および保持効果が報告されているが，短時間の有酸素性運動が筋力発揮調整能にもたらす効果については十分に検討されていない。本研究では，筋力発揮調整能を向上させる方法として，課題前の短時間の有酸素性運動が筋力発揮調整能の促進および持続効果に与える影響を検討した。その結果，筋力

発揮調整能課題の課題成功数が AE 条件では条件前と比較し、条件終了 1 時間後および 24 時間後で有意な増加を示した。したがって、本研究では課題前に 10 分間の有酸素性運動でも、筋力発揮調整能の促進および持続効果が認められた。一方、課題遂行時間において、交互作用および主効果は認められなかったが、AE 条件では、課題遂行時間が遅延せずに、成功数が増加したことが示された。

これまで、Smith et al. (2014)は、健常成人を対象とした低強度から高強度の自転車こぎ運動終了 15 分後に、運動を行っていない上肢の筋肉における短潜時皮質内抑制の減少および皮質内促進の増加を報告している。このように、自転車こぎ運動後の皮質内興奮性の調節は、運動に関与する筋肉に限定されず、上肢領域における皮質内抑制の減少および皮質内促進の増加をもたらす、運動が一次運動野の可塑性に好ましい条件を作り出したと考えられる。

本研究では、AE 条件の 1 名のみ結果ではあるが 10 分間でも BDNF の増加が認められたため、課題成功数が増加した原因の一つとして、BDNF の影響が考えられる。この BDNF は、中強度の有酸素性運動を行うことで、増加することが報告されており、本研究で設定した 10 分間の自転車こぎ運動を行うことで、BDNF などの神経化学物質が放出され、運動学習の成功数の増加に影響を与えたのではないかと考えられる。

## 2.5 結語

本研究は、課題前の有酸素性運動が筋力発揮調整能に及ぼす効果について検討した。その結果、AE 条件における筋力発揮調整能の成功数は、条件終了 1 時間後および 24 時間後に実施前と比較して有意に増加した。CON 条件では実施前と比較して有意な変化は認められなかった。課題前の有酸素性運動は筋力発揮調整能の促進および保持を向上させる可能性がある。

## 第 3 章 定期的な有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが筋力発揮調整能の促進におよぼす影響

### 3.1 緒言

これまで、認知課題の前後に 15 分間の有酸素性運動を行うことで、集中力と認知機能だけでなく、記憶力においても向上することが実証されている (Schneider et al. 2009, Winter et al. 2007). 健常成人を対象とした高強度の自転車こぎ運動の急性効果として、運動学習に関連する BDNF, 血管内皮増殖因子, インスリン様成長因子, エピネフリン, ノルエピネフリン, ドーパミン, 乳酸塩の血漿レベルの上昇などの代謝産物の増加 (Skriver et al. 2014), また, 皮質脊髄路の興奮性の増加が報告されている (Ostadan et al. 2016). さらに, 週 3 回の自転車こぎ運動を 8 週間, または 12 か月継続して行うことで, トレーニング前と比較して, 高齢者の脳血流が増加することも報告されている (Kleinloog et al. 2019, Thomas et al. 2020). さらに, 20 から 30 分間の有酸素性運動の急性効果として, 運動技能の保持に影響を認め, 運動学習に有効であることを報告している (Roig et al. 2012, Mang et al. 2014, Statton et al. 2015). また, 第 2 章では 10 分間の短時間の自転車こぎ運動であっても筋力発揮調整能が向上することが明らかにした. これらの知見は, 有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題の組み合わせが, 加齢, 脳血管疾患, 変形性膝関節症など様々な疾病のリハビリテーションへの一助となる可能性がある.

これらのことから, 有酸素性運動を実施することで認知機能の向上および運動学習の獲得あるいは保持の急性およびトレーニング効果が明らかとなっているが, 筋力発揮調整能の課題トレーニング効果については, 十分に検討されていない. 有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題トレーニング効果を明らかにすることは, ADL の維持および改善するために重要であると考えられる. そこで, 本研究では 10 分間の自転車こぎ運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが, 健常成人の筋力発揮調整能に及ぼす影響を検討した.

### 3.2 方法

#### 3.2.1 対象者

対象者は表 2 に示すとおりであり, Edinburgh 利き手テストにより右利きと確認された健康な成人男女 18 名とした. 除外基準は, 整形外科的または精神医学的疾患, 学

習および中枢神経系への影響がある薬物を使用している者とし、各群 1 名ずつがトレーニング継続困難となり測定から除外した。

なお、本研究は、徳島大学総合科学部人間科学分野における研究倫理委員会の承諾を得た (受付番号 182)。対象者には、事前に文書および口頭にて研究内容・趣旨、参加の拒否・撤回・中断などについて説明し、書面にて承諾を得た後に実験を開始した。

表 2. 対象者の身体的特性

	AE 群 (n=8)	CON 群 (n=8)
年齢 (歳)	25.0 ± 4.1	24.3 ± 3.6
性別 (男/ 女)	5 / 3	5 / 3
身長 (cm)	162.3 ± 6.6	166 ± 5.2
体重 (kg)	56.3 ± 3.2	58.0 ± 6.1
最大酸素摂取量 (ml · kg <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup> )	36.3 ± 9.3	37.8 ± 4.9

平均値 ± 標準偏差

### 3.2.2 プロトコール

全ての対象者は、60% $\dot{V}O_{2\max}$  で 10 分間の自転車こぎ運動直後に筋力発揮調整能の課題を行う (Aerobic Exercise: 以下, AE) 群および 10 分間の座位保持直後に筋力発揮調整能の課題を行う (control: 以下, CON) 群に無作為に振り分けた。AE 群の運動条件は、60% $\dot{V}O_{2\max}$  にあたる時の Watts 数を算出し、回転数は 60 回転で 10 分間の定常負荷で行った。筋力発揮調整能の課題は、1 セッションを 56 回とし、両群それぞれ週 3 回、4 週間のトレーニングを実施した。

測定項目は、握力課題の課題成功遂行時間および課題成功数とし、トレーニング開始前 (以下: トレーニング前) およびトレーニング終了 3 日後 (以下: トレーニング後) に測定した。

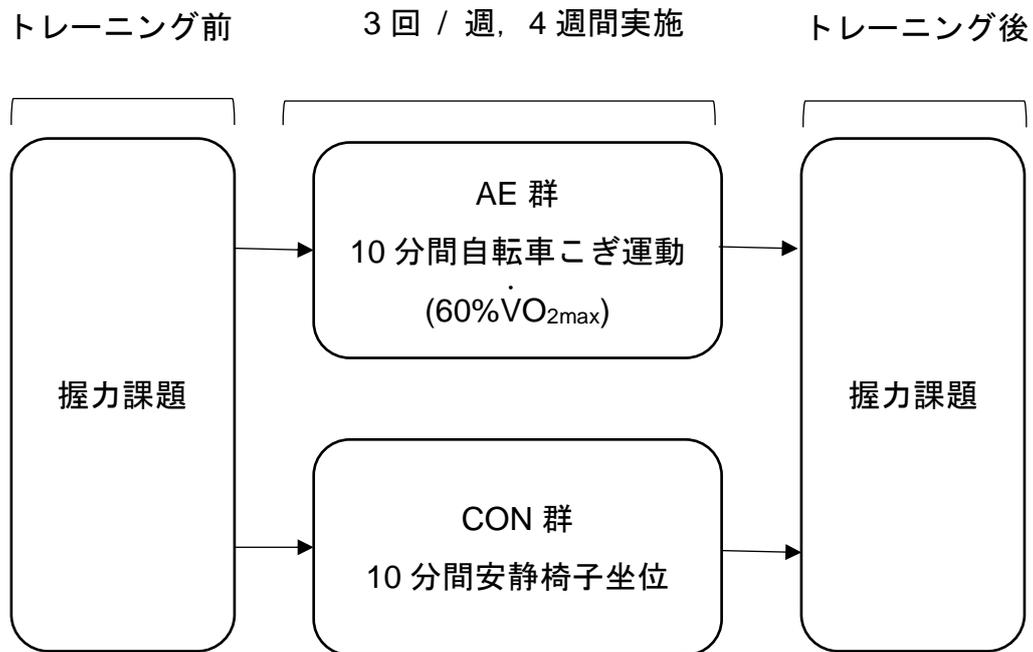


図 7. AE 群および CON 群における運動学習課題のプロトコール

### 3.2.3 筋力発揮調整能の課題の方法

筋力発揮調整能課題のシステムは、Nagasawa et al. (2002) の方法を参考にし、事前に測定された最大の等尺性収縮の  $10 \pm 5\%$ 、 $15 \pm 5\%$ 、 $20 \pm 5\%$ 、 $25 \pm 5\%$ 、 $30 \pm 5\%$ 、 $35 \pm 5\%$ 、および  $40 \pm 5\%$  の 7 つの強度をそれぞれ 8 回、計 56 回を無作為に実施した。

### 3.2.4 最大運動負荷テストのプロトコール

各運動強度の仕事率を設定するために、東大式の多段階負荷法を一部改訂して  $\dot{V}O_{2\max}$  を測定し、その時の自転車エルゴメータの負荷量を決定した。

### 3.2.5 統計解析

統計解析では、各群間における測定値の比較には、反復測定による二元配置分散分析 (群×時間) を行い交互作用および主効果の有無を検定した。二元配置の分散分析においては、Mauchly の球面性の検定を行い、球面性が仮定できなかった時には

Greenhouse-Geisser のイプシロンを用いて自由度を修正した。反復測定による二元配置の分散分析により交互作用および主効果が認められた場合には、Bonferroni の方法を用いて多重比較検定を行った。なお、データの解析には、統計処理ソフト (SPSS 27.0, IBM 社製, 東京, 日本) を使用した。

### 3.3 結果

#### 3.3.1 トレーニング前後における課題遂行時間の変化

AE 群および CON 群のトレーニング前およびトレーニング後の課題遂行時間の変化については、表 3 に示すとおりである。AE 群ではそれぞれ  $52.4 \pm 16.2\text{ms}$  および  $45.9 \pm 15.6\text{ms}$ , CON 群ではそれぞれ  $55.9 \pm 15.6\text{ms}$  および  $48.4 \pm 1.6\text{ms}$  であり、交互作用および有意な主効果は、認められなかった。

#### 3.3.2 トレーニング前後における課題成功数の変化

AE 群および CON 群のトレーニング前およびトレーニング後の課題成功数の変化については、表 3 に示すとおりである。AE 群ではそれぞれ  $9.7 \pm 4.1$  回および  $14.0 \pm 4.6$  回, CON 群ではそれぞれ  $10.0 \pm 3.1$  回および  $13.3 \pm 3.7$  回であり、交互作用は認められなかった。課題成功数においては、有意な主効果が認められ ( $F_{(1,7)} = 15.9, p < 0.05$ ), 多重比較の結果, AE 群においてトレーニング前後で有意な増加が認められた。

表 3. トレーニング前およびトレーニング後の握力発揮調整能課題の結果

	AE 群		群内 p 値	CON 群		群内 p 値	群 × 時間 p 値
	トレーニング前	トレーニング後		トレーニング前	トレーニング後		
課題遂行時間 (ms)	52.4 ± 16.2	45.9 ± 15.6	0.139	55.9 ± 15.6	48.4 ± 1.6	0.093	0.855
課題成功数 (回)	9.7 ± 4.1	14.0 ± 4.6*	0.005	10.0 ± 3.1	13.3 ± 3.7	0.053	0.634

平均値 ± 標準偏差. \* vs. トレーニング前: p<0.05.

### 3.4 考察

本研究では、10分間の自転車こぎ運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが筋力発揮調整能の向上に与える影響を検討した。その結果、筋力発揮調整能の課題成功数は、AE群のトレーニング前後で有意な増加が認められた。一方、課題遂行時間においては、交互作用および主効果は認められなかったが、AE群では、課題遂行時間が遅延せずに、成功数が増加したことが示された。AE群において、トレーニング前と比較して、トレーニング後に課題成功数が増加した要因として、定期的に自転車こぎ運動を実施したことで、運動技能に関係する代謝産物が増加したことが考えられる。BDNFおよびカテコールアミンは、運動学習を改善する仲介物質であり、BDNFは長期増強への影響を介して、運動によって誘発される学習の変化を仲介する上で重要な役割を果たしている。定期的な運動を行うことで、BDNFおよびカテコールアミンレベルの強い増加が報告されている (Winter et al. 2007)。さらに、本研究の第3章において対象者1名では、10分間の有酸素性運動でもBDNFの増加していることが示されている。トレーニングによる効果は急性効果の積み重ねであり、本研究においてもBDNFの増加が課題成功数の増加に影響を与えたと考える。

中強度の運動を行うと生理学的覚醒が高まり、学習課題中に従事できる注意、集中などの認知面での環境が最適化され (Yerkes et al. 1908)、その結果、課題の獲得が容易になる (Sanders, 1983)。Yerkes-Dodsonの法則では、過小興奮および過大興奮はより低いパフォーマンスレベルを示すが、最も顕著なパフォーマンス効果は中程度の興奮状態で期待される (Yerkes et al. 1908, Audiffren, 2009)。本研究においても自転車こぎ運動により覚醒度が増加したことで、適切な覚醒度で筋力発揮調整能の課題に取り組めたのではないかと考えられる。

さらに、課題成功数が増加した要因として、脳血流量の増加も考えられる。有酸素性運動によって誘発される脳血流の増加は、代謝産物の増加、また、代謝資源の利用可能性および老廃物の除去をもたらし、認知処理の促進を誘発し、神経応答を変化させる可能性がある (Delp et al. 2001, Pereira et al. 2007)。より多い脳血流量の増加は、認知機能の改善につながることも報告されている (Stillman et al. 2016, Stimpson et al. 2018)。成人を対象の研究では、脳血液量の増大は、最大酸素摂取量の約60%以上の中強度から高強度の間に発生することが報告されている (Rooks et al. 2010, Smith et al. 2017)。また、高齢者を対象とした研究では、有酸素性運動を行うことにより、認知機

能の改善と並行して、前頭葉の脳血流量の増加にもつながることが示されている (Chapman SB et al. 2013, Alfini et al. 2019). 本研究では、脳血流量の変化を測定していないが、 $60\% \dot{V}O_{2\max}$  の自転車こぎ運動を実施したことにより、より良い代謝産物の供給が、その後の学習によって誘発され、脳の可塑性変化の可能性に寄与したと考えられる。

これまで、非運動下の上肢の筋肉における皮質内抑制の減少および皮質内促進の増加をもたらすことが報告 (Smith et al. 2014, Singh et al. 2014) されており、運動が一次運動野の可塑性に好ましい条件を作り出したと考えられる。これらのことが、運動学習の促進をもたらす良好な皮質内の環境が作られたことが AE 群における成功数の増加の要因と考えられる。なお、トレーニングにおいてもリハビリテーション治療の長期的な成果を改善する可能性があるため、ADL の獲得の一助につながると示唆される。

### 3.5 結語

本研究では、有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが、筋力発揮調整能を促進させる可能性が示唆され、リハビリテーションの長期的な効果を促進する可能性がある。

## 第4章 骨格筋電気刺激が筋力発揮調整能におよぼす影響

### 4.1 緒言

第2章および第3章では、自動運動である自転車こぎ運動を用いた、筋力発揮調整能の急性効果およびトレーニング効果を明らかにした。しかし、我が国の介護を要する人口は増え続けており、2018年3月末の時点では641万人に達し(厚生労働省2019)、介護を要する割合では骨折・転倒および関節疾患を含めると最も割合が高い。さらに、要介護5における割合としては、脳卒中が上位を占めており、これらの疾患および加齢により自動運動が困難な対象者が多いことが明らかである。また、リハビリテーションの臨床現場でも、脳血管疾患などにより物の把持が困難などの筋力発揮調整能が低下していることが多い。したがって、脳血管疾患患者、中高齢者などにおいて筋力発揮調整能を改善することは日常生活を行う上でとても重要である。

一般的に有酸素性運動は脳血管疾患患者に対して、疾患の再発予防として心血管機能および有酸素性能力を改善するために実施されているが、有酸素性運動が心血管機能を改善させるだけでなく、脳の機能にも影響を与え(McDonnell et al. 2011)、学習、記憶の改善および神経変性のリスクを減少させることが報告されている(Cotman et al. 2007, Knaepen et al. 2010)。このように、運動学習課題実施前における20分から30分以上の中強度以上の有酸素性運動は、その後の運動学習を促進させることが明らかになっている(Statton et al. 2015, Roig et al. 2012, Mang et al. 2014)。しかし、脳血管疾患患者においては麻痺などにより、下肢を中心とした有酸素性運動を行うことが困難な場合がある。このような麻痺あるいは運動制限がある患者に対し、他動的に筋収縮を誘発させる方法の一つとして骨格筋電気刺激(Electrical Muscle Stimulation : EMS)があり、この方法は骨格筋を刺激することにより筋活動の活性化に有効であると示されている(松永ら. 2013)。

このように、ランニング、自転車こぎ運動などの有酸素性運動には運動学習促進効果があること、また、電気刺激は有酸素性運動に代用できるトレーニングであり、有酸素性運動と同様の効果を得られる可能性があることが考えられる。これらのことから、有酸素性運動と同様の効果が期待できる電気刺激にも筋力発揮調整能を促進する効果があることが推察されるが、EMSが筋力発揮調整能におよぼす影響については十分に検討されていない。そこで本研究では、EMSが筋力発揮調整能におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 4.2 方法

### 4.2.1 対象者

本研究の対象者は表 4 に示すとおりであり，喫煙経験および服薬習慣のない右利きの健常成人 9 名とした。

対象者には，事前に口頭にて研究の内容・趣旨，参加の拒否・撤回・中断などについて説明し，承諾を得た上で研究を開始した。

表 4. 対象者の身体的特性

項目	男性	女性
人数 (名)	2	7
年齢 (歳)	23.0 ± 1.0	22.0 ± 0.9
身長 (cm)	167.5 ± 0.5	159.6 ± 7.2
体重 (kg)	63.8 ± 9.8	57.8 ± 5.2
BMI (kg·m <sup>-2</sup> )	23.5 ± 3.0	22.6 ± 1.7

平均値 ± 標準偏差.

### 4.2.2 プロトコール

プロトコールは図 8 に示すとおりであり，対象者は，握力課題実施後，椅子坐位姿勢で 30 分間の電気刺激を行う (EMS) 条件，電気刺激を行わず，30 分間の椅子坐位安静を行う (control: 以下，CON) 条件を実施した。その後，握力課題を条件終了直後 (以下，条件後) に再度実施した。

なお，すべての対象者は，上記の 3 条件を無作為な順序で行い，各条件の試行には少なくとも 14 日以上の間隔をあけて実施した。

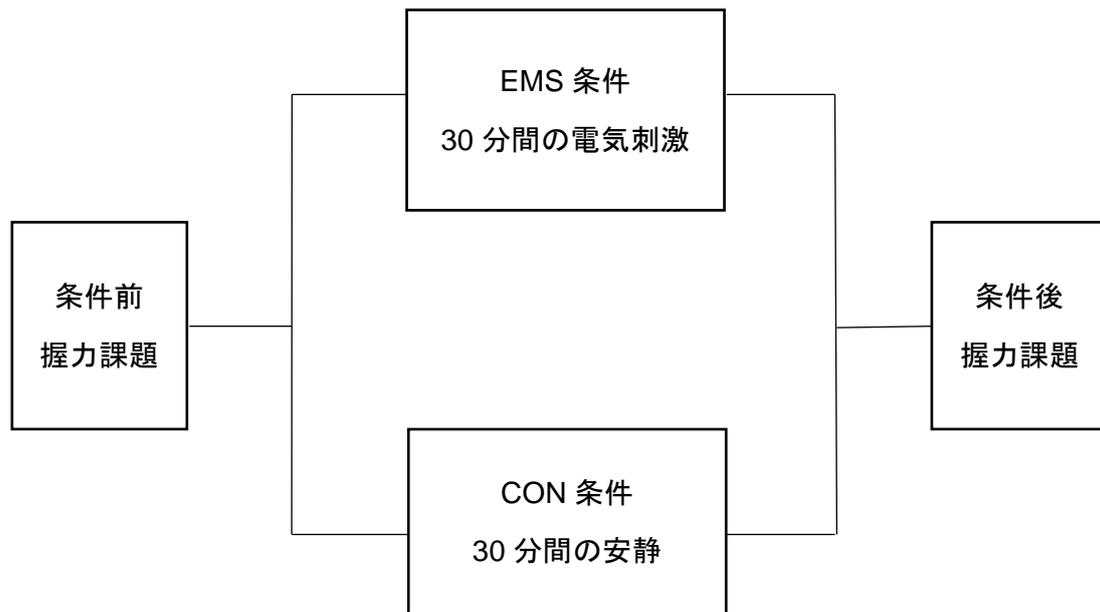


図 8. プロトコール

#### 4. 2. 3 骨格筋電気刺激 (Electrical Muscle Stimulation: EMS)

EMS 条件には，理学診療用器具低周波治療器 (G-TES: ホーマーイオン研究所社製) (図 9)を用いた．周波数 4Hz，パルス幅 250 $\mu$ s，指数関数的漸増波を用い (Watanabe et al. 2014)，30 分間または 15 分間の電気刺激を最大耐性強度 (56～68mA) で実施した．EMS は図 10 に示したとおり，ベルト電極 (腰部: 5.3 × 93.3 cm，大腿部: 5.3 × 69.6 cm，足関節部: 5.3 × 54.6 cm) に，ぬるま湯または水を十分に浸透させた電極シート (腰部: 5.5 × 37.0 cm，大腿部: 5.5 × 51.0 cm，足関節部: 5.5 × 37.0 cm) を貼り付けたものを，腰部 (臍上部)，両側大腿部 (膝関節上部 10 cm)，および両側足関節部 (足関節上部 10cm) の 5 ヶ所に装着した．両側大腿部および下腿部の刺激周期は，同期されているため，両側の下肢筋群を同時に刺激した．



図 9. G-TES (ホーマーイオン研究所社製)



図 10. 電極ベルトの装着位置

#### 4.2.4 筋力発揮調整能の課題の方法

筋力発揮調整能課題のシステムは、Nagasawa et al. (2002)の方法を参考にし、事前に測定された最大の等尺性収縮の  $10 \pm 5\%$ 、 $15 \pm 5\%$ 、 $20 \pm 5\%$ 、 $25 \pm 5\%$ 、 $30 \pm 5\%$ 、 $35 \pm 5\%$ 、および  $40 \pm 5\%$  の 7 つの強度をそれぞれ 8 回、計 56 回を無作為に実施した。筋力発揮調整能の指標として、目標範囲にピーク値を到達させるのに要した課題遂行時間および目標範囲内に握力を発揮させて、目標範囲内にピークを到達させた課題成功数の 2 つを評価した。

#### 4.2.5 統計処理

本研究の各条件間および条件内における測定値の比較には、男女合計 9 名のデータを反復測定による two-way ANOVA を行い、交互作用および主効果の有無を検定した。Two-way ANOVA により、交互作用および主効果が認められた場合には、Bonferroni の方法を用いた多重比較法または対応のある t 検定を実施した。いずれの検定も統計解析ソフト(SPSS 27.0, IBM 社製, 東京, 日本)を用い、有意水準 5%未満を統計学的有意とした。

### 4.3 結果

#### 4.3.1 条件前後における課題遂行時間

EMS 条件および CON 条件時の課題遂行に要した時間は図 11 に示すとおりである。条件前および条件後の課題遂行に要した時間は、EMS 条件で、それぞれ  $38.1 \pm 7.5\text{ms}$ ,  $41.4 \pm 7.7\text{ms}$ , CON 条件で、それぞれ  $43.1 \pm 14.6\text{ms}$ ,  $39.9 \pm 11.1\text{ms}$  となり、両条件で有意な差は認められなかった。

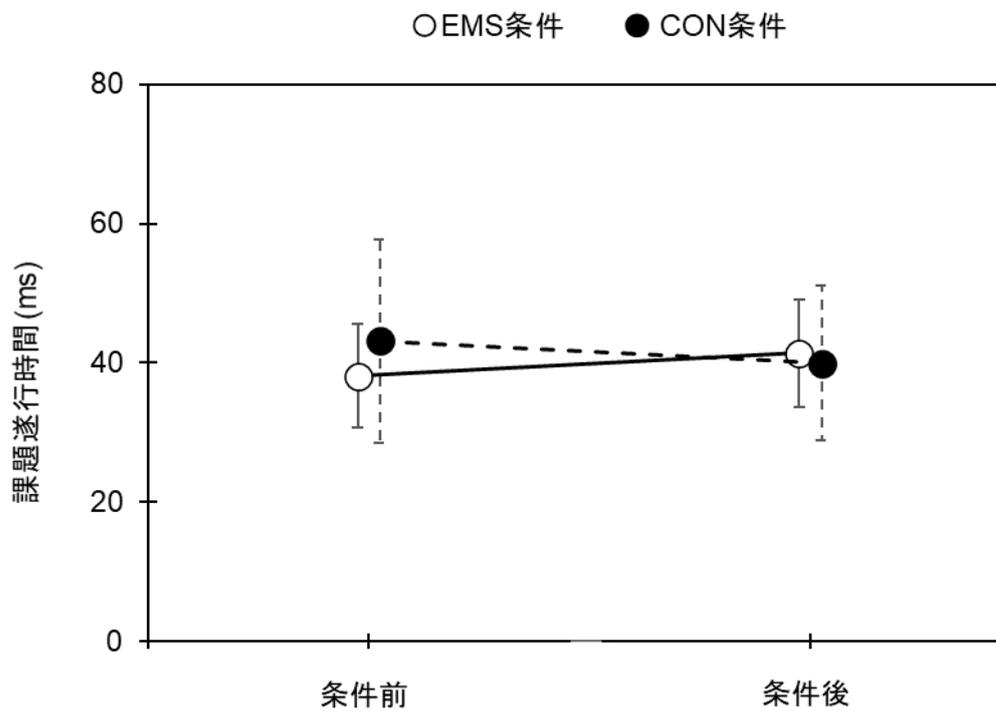


図11. EMS条件およびCON条件における課題遂行時間の変化

#### 4.3.2 条件前後における課題成功数

EMS条件およびCON条件時の課題成功数の推移は、図12に示す通りである。条件前、および条件後の課題成功数は、EMS条件で、それぞれ  $10.4 \pm 2.5$  回、 $16.4 \pm 4.2$  回、CON条件で、それぞれ  $11.6 \pm 3.7$  回、 $10.3 \pm 3.8$  回であった。CON条件では、条件前と条件終了直後との間に有意な差は認められなかった一方で、EMS条件では条件前と比較して、条件後において増加傾向を示し、条件前および条件後との間に有意な差が認められた。

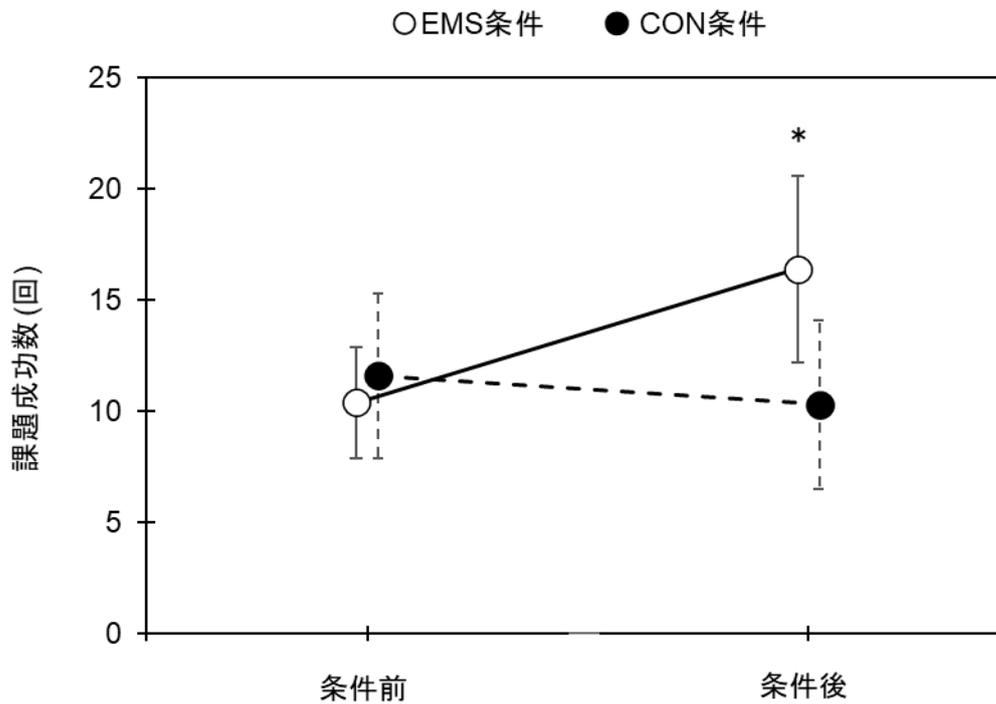


図12. EMS条件およびCON条件における課題成功数の変化

\* :  $p < 0.05$ : vs. pre

#### 4.4 考察

これまでに、EMSが筋力発揮調整能へおよぼす影響が十分に検討されていないことから、本研究ではEMSが筋力発揮調整能に及ぼす影響について検討した。その結果、課題成功数においては、CON条件では条件前と比較して条件後で有意な差が認められなかったが、EMS条件では、条件後において、条件前と比較して増加傾向を示し、条件前および条件後の間に有意な差が認められた。一方、課題遂行時間においては、各条件間に有意な差が認められなかった。

EMS条件において、条件前と比較して条件終了直後に課題成功数が有意に増加したことから、筋力発揮調整能の促進効果を有する有酸素性運動と同様に、EMSでも筋力発揮調整能の促進効果があることが明らかとなった。また、課題遂行時間において各条件間に有意な差が認められなかったことから、課題遂行時間が遅延することにより、難易度が低くなるなどといった難易度の変化が起こることなく、EMS条件の課題成功数が増加したことが示された。

本研究における EMS の刺激部位は、下部体幹筋、両側大腿四頭筋、両側大腿二頭筋、および両側足関節周囲筋とした。高周波の電気刺激では、骨格筋の強縮性収縮を誘発し、低周波の電気刺激と比較して筋疲労を起こしやすい特性があるため (Muro *et al.* 1986)、周波数 4Hz を採用した。EMS の効果としては、筋力増強、痙縮抑制、末梢循環改善、除痛などがあげられ (長坂ら, 2007)、Sophia *et al.* (2010) は、EMS は安全かつ有酸素性運動に代用可能な運動方法であると報告している。さらに、近年の研究では、ラットの筋肉内に電極を埋め込み、1 時間に 600 回の収縮を 5 日間反復して誘発した結果、BDNF の筋肉内レベルが、電気刺激を行わないものと比較して有意に増加したことが報告されている (Willand *et al.* 2016)。有酸素性運動によって BDNF、ドーパミン、セロトニン、およびノルエピネフリンなどが増加すると報告されており (Black 1999, Chowdhury *et al.* 2012)、本研究においても骨格筋電気刺激によってこれらが増加し、運動皮質の興奮性を高め、神経可塑性の調節を可能にしたことが、課題成功数が増加した原因の 1 つと考えられる。放出量が増加したと考えられる神経系物質の中でも特に BDNF は、ドーパミン作動性、GABA-エルジック性、コリン作動性およびセロトニン作動性ニューロンの適切な発生および生存に必要であり、神経可塑性のバイオマーカーとして考えられている。動物研究では、運動学習における BDNF の重要な役割があり (Ishibashi *et al.* 2002)、有酸素性運動によって誘発される中枢神経系全体の BDNF 遺伝子発現の増加が証明されており (Gomez-Pinilla *et al.* 2001)、本研究においても同様の結果が得られたと考えられる。

本研究では有酸素性運動の代用として、EMS を用いて下肢に 30 分間の電気刺激を行った結果、課題成功数が増加傾向を示し、有意な差が認められたことから、EMS に筋力発揮調整能の促進効果が認められた。

#### 4.5 結語

本研究結果により、下肢に対する EMS が筋力発揮調整能に効果的であるという結果が示され、加齢、脳血管疾患、変形性膝関節症など様々な疾患により下肢を中心とした有酸素性運動を行うことが困難な者を対象にした場合においても、筋力発揮調整能の促進効果が期待された。

## 第5章 他者への運動スキルの教示が運動学習効果の保持に及ぼす影響

### 5.1 緒言

加齢、脳血管疾患、変形性膝関節症など様々な疾患などにより、反復した運動が困難な場合がある。しかし、巧緻性を必要とするADLの回復あるいは向上には、実際の動作を反復して行うリハビリテーションが行われている。その中で、身体的負担をかけることなくリハビリテーションを実施する手法として、運動イメージの想起を用いて、運動学習を促進する介入が報告されている(川崎ら, 2017)。

通常の運動学習は、実際に動作を経験することによって獲得するものであるが、運動イメージを想起することで、頭頂葉連合野、小脳など実際に運動したときと同じ領域の神経細胞が活動することが確認されている(Rizzolatti et al. 1996, Buccino et al. 2001)。また、運動イメージをリハビリテーションに活用することで麻痺側の手指巧緻動作、歩行などの動作能力が改善することが報告されている(Cho et al. 2012)。そのために、巧緻性を必要とする食事動作、更衣動作などの日常生活動作の回復を目的としたリハビリテーションにおいて、麻痺、身体機能の低下などのために、身体的負担をかけることが困難な脳血管疾患患者、高齢者に、運動イメージの想起を用いた介入を応用することが回復の一助になることが考えられる。

しかし、それらのリハビリテーションの現場において、実際に運動イメージの想起を治療に活用している例は少なく、これが臨床で取り入れられているとは言い難い状況にある(梅野ら 2016)。その理由として、運動イメージの想起は、心的な活動であるため(Mulder T et al. 2007)、実際に運動イメージを想起しているか否かの客観的な判断が困難であること、また、脳血管疾患患者、高齢者などは、運動イメージ想起能力が低下しているために、運動イメージの想起を課題とした介入において、十分な効果が得られない可能性がある(梅野ら 2016)。服のボタンを留める、料理を作るなどといった高い巧緻性を必要とする動作の回復は、脳血管疾患患者、高齢者などが自立した生活をしていくために必要不可欠であり、それらを出来るだけ身体的負担をかけずに回復することが望ましい。したがって、身体的に負荷の少ない、運動イメージを想起させることによるリハビリテーションを確立していくために、対象者が運動イメージを想起することが出来ているかを客観的に判断する必要がある。

このような背景を踏まえて、運動イメージの想起を客観的に判断するために、自らが習得した運動スキルを言語化し、他者に教示するという代替手段を用いることによ

り, 即時的に運動学習が促進するということが近年報告されている (川崎ら 2017). しかし, 教示直後から数分の間は, 運動学習効果が促進することが示されているが, 教示による運動学習効果がどの程度残存するかについては, 十分に検討されていない. 運動学習効果が残存することで, 日常生活動作の回復が早まるため, 脳血管疾患患者あるいは高齢者が, 身体的負担をかけず, かつ短期間でリハビリテーションを実施する一助となることが期待される.

そこで, 本研究では他者への運動スキルの教示が運動学習効果の残存性に与える影響を検討することを目的とした.

## 5.2 方法

### 5.2.1 対象

対象者は, 球回し経験のない健常成人 20 名であり, 身体特性は表 5 に示すとおりである. 他者に対して教示を行う教示条件 (以下, 教示条件) および教示を行わない (control: 以下, CON) 条件の 2 条件に無作為に振り分けた. 対象者には, 事前に口頭にて研究の内容・趣旨, 参加の拒否・撤回・中断などについて説明し, 本研究は徳島大学総合科学部研究倫理審査委員会に承諾を得た上で研究を開始した (受付番号 182).

表 5. 対象者の身体特性

	教示条件 (n = 10)	CON 条件 (n = 10)
性別 (男 / 女)	6 / 4	6 / 4
年齢 (歳)	21.5 ± 0.8	21.3 ± 0.7
身長 (cm)	165.5 ± 10.8	166.6 ± 8.5
体重 (kg)	60.7 ± 11.3	59.3 ± 8.9
手の長さ (cm)	17.8 ± 1.5	17.9 ± 0.7
平均 ± 標準偏差.		

### 5.2.2 プロトコール

運動学習課題は、直径 4cm の 2 つの練習用ゴルフボールを、非利き手の掌の上で 1 分間反時計回りに回す球回し課題とした。本研究のプロトコールは、図 13 に示すとおりであり、教示条件は 3 分間球回しを練習した後、1 分間の球回し課題を行った。その後、教示条件は聞き手役に対してどのように球回しを行ったかを 2 分間教示し、一方で CON 条件は雑誌を音読して過ごした。条件終了直後および 30 分後に再度 1 分間の球回し課題を行った。なお、全ての球回し課題は椅子坐位姿勢にて、球を回す手を机の上に置いて行われた。

対象者が条件前、条件終了後、および条件終了 30 分後において、1 分間球回しを行う様子をスマートフォンでビデオ撮影し、球回し回数を計測した。なお、回転回数の測定は、球が完全に一回転場合のみを球回し回数としてカウントした。

また、教示直後および教示 30 分後における球回し回数と、教示前の球回し回数の差を改善回数として算出した。さらに、教示条件については教示内容をボイスレコーダーで録音した。

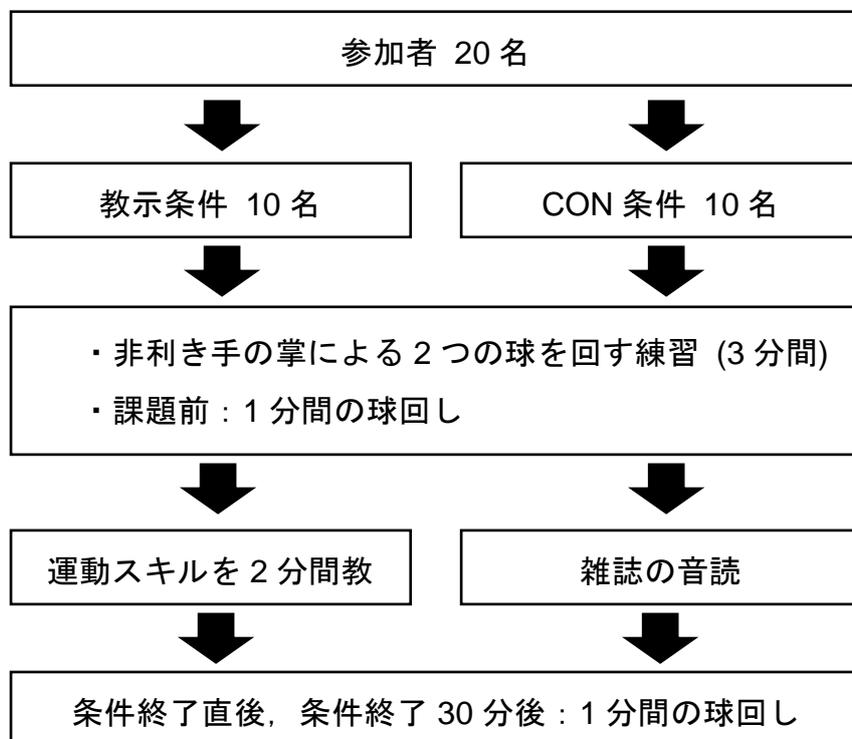


図 13. プロトコール

### 5.2.3 統計解析

統計解析は、全ての測定値について Shapiro-Wilk 検定によってデータの正規性の検定を行い、正規分布を確認した。また、各条件間および条件内における条件前後の測定値の比較には、反復測定による二元配置分散分析を行い、交互作用および主効果の有無を検定した。交互作用および主効果が認められた場合には、Bonferroni を用いた。なお、データの解析には、統計処理ソフト (SPSS 27.0, IBM 社製, 東京, 日本) を使用した。

## 5.3 結果

### 5.3.1 教示条件の他者に対する教示内容

教示条件の他者に対する教示内容として、「2 つのうち 1 つの球を人差し指と親指で挟み込むように、もう一方の球を掌と小指の付け根で挟み込むように持って回すとやりやすい。また、2 つの球を出来るだけ接触しないように回すようにする。加えて、2 つの球を同時に回すのではなく、まず片方の球を動かした後、もう片方の球を動かすようにする。」という内容であり、教示条件における主な教示内容は表 6 に示したとおりである。

表 6. 教示条件の他者に対する教示内容

対象者	教示内容
1	「2つのうち1つの球を人差し指と親指で挟み込むように、もう一方の球を掌と小指の付け根で挟み込むように持って回す」
2	「指で球を持つのではなく、指は球が転がり落ちるのを防ぐための壁として使い、あくまで掌だけで球を転がすようにする」
3	「2つの球が擦れると回しにくいので、出来るだけ接触させないように回すとよい」
4	「掌で転がすのではなく、指で2つの球をしっかりと掴み、手を握るようにして回す」
5	「2つの球を同時に回すのではなく、一方の球を回している間は、もう一方の球を指で固定しておく」
6	「掌を開きすぎると球がこぼれ落ちてしまうため、掌を少し丸めるようにすると落ちにくくてよい」
7	「球が親指側を通る際は、親指と人差し指で球を軽く掴むようにし、小指側を通る際は、掌を丸めて球が落ちるのを防ぐようにする」
8	「掌のみで転がすと回転速度は上がるが落ちやすいため、ある程度指で挟みこむようにしながら回す方がよい」
9	「指を軽く折り曲げ、折り曲がって出来た谷の部分に球を転がすように回すとよい」
10	「掌だけでなく手首も使い、角度をつけるようにしながら球を転がすようにする」

### 5.3.2 教示条件および CON 条件の球回し回数の変化

教示条件および CON 条件の球回し回数の変化は、図 14 に示すとおりである。教示条件および CON 条件の両方で、条件前および条件終了 30 分後の球回し回数が有意に増加していた ( $p < 0.05$ )。なお、両条件間では差は認められなかった。

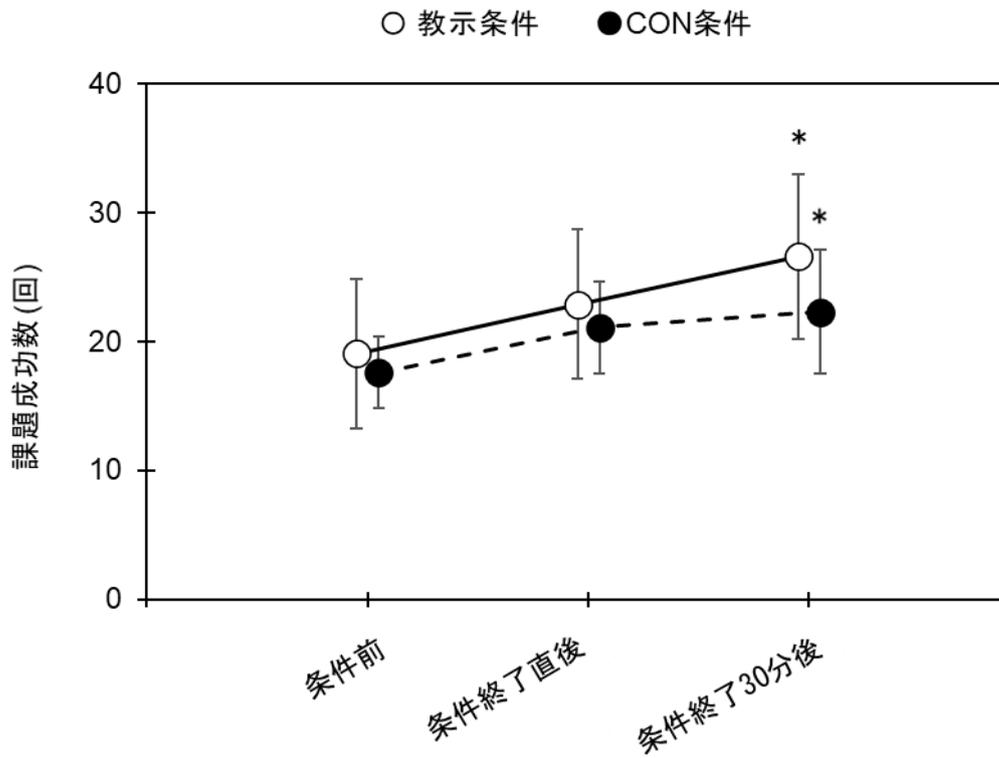


図14. 教示条件およびCON条件の球回し回数の変化  
\* $p < 0.05$  ; 課題前vs課題30分後

### 5.3.3 教示条件および CON 条件の球回し改善回数の変化

教示条件および CON 条件の条件前の球回し回数をベースラインとした際の球回し改善回数は、図 15 に示す通りである。教示条件および CON 条件で、球回し改善回数は条件終了 30 分後の間に増加していた ( $p < 0.05$ )。また、教示条件では CON 条件と比較して球回し改善回数が有意に増加した。

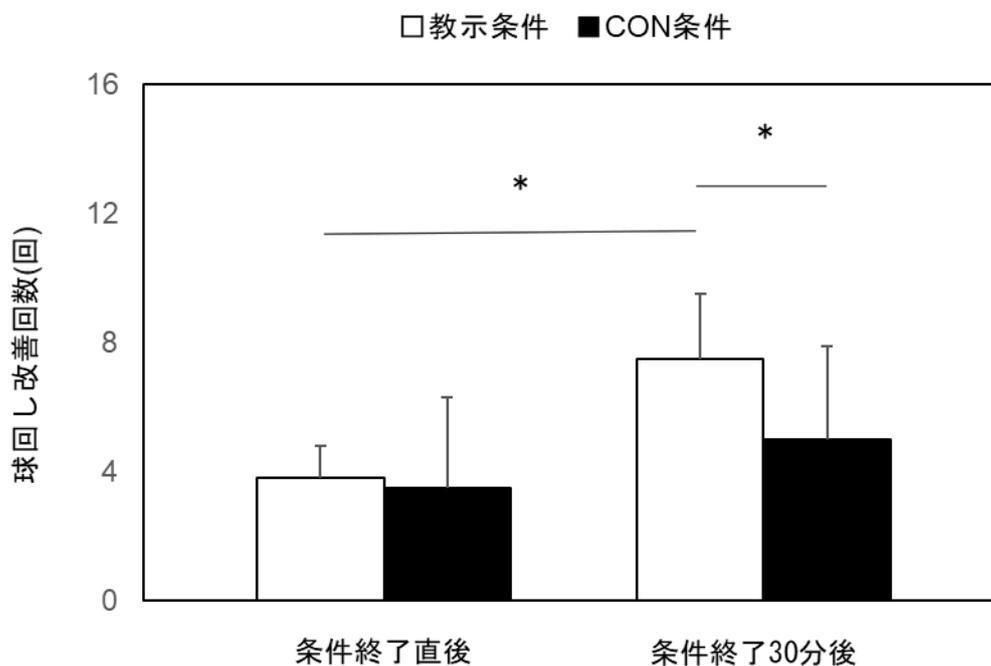


図15. 教示条件およびCON条件の球回し改善回数の変化  
\* $p < 0.05$

#### 5.4 考察

本研究では、健常成人を対象に、他者への運動スキルの教示が運動学習効果の残存性に及ぼす影響について検討した。その結果、教示条件および CON 条件で条件前と比較して条件終了 30 分後にかけて球回し回数および球回し改善回数が増加した。また、教示条件においては、CON 条件と比較し球回し改善回数がより増加する結果が得られた。このことから、他者に対して教示を行うことにより、運動学習効果が 30 分後においても残存することが示された。

本研究の最も重要な所見は、習得した運動スキルを教示することによって、条件終了後のみならず条件終了 30 分後においても運動学習効果が残存し、CON 条件よりも球回し改善回数の改善が認められた点である。条件後に運動学習効果が促進された結果は先行研究 (川崎ら 2017) と同様であり、他者に教示を行うことによって運動イメージの想起が促進されたことが考えられる。他者に運動スキルを教示するまでの過程には運動イメージの想起があり (Suwa M 2009)、運動イメージを想起することで、そ

の運動の結果がシミュレートされ (Porro CA et al. 1996), 実際に動作を行うことによって得られる運動学習効果に近い効果が得られることが報告されている (Rozzolatti G et al. 1996). したがって, 球回しのスキルを教示することにおいても, 運動イメージを想起するという過程を経たことによって, その後球回しのパフォーマンスが向上したことが示された. また, 単に運動イメージの想起を行うだけではなく, 教示という言葉を表出する行為を経たことが運動学習を促進させ, 運動学習効果の残存性に影響を与えたと考えられる. 他者に教示を行う際は, 内言語が使用されており (Suwa M 2008), ブローカ野または左下前頭回の活性化が報告されている (Morin A et al. 2012). さらに, 運動をプログラムする際にも活動する領域であることが明らかになっている (Rizzolatti et al. 1988). したがって, 運動イメージのみも言語化を行う方が, より実際に運動を行った際に得られる運動学習効果に近い効果を得る可能性がある. これらのことから, 運動スキルを教示するという手法を用いることで運動イメージの言語化が行われたことが, 条件終了 30 分後においても, 運動学習効果が残存したことが示唆された.

運動イメージの想起は, 実際の身体活動を伴わないため, 疾患あるいは身体的障害を抱えた脳血管疾患患者, 高齢者などの, 反復した運動が困難な対象者への応用が期待できる. しかし, 運動イメージを想起しているか否かについては外部から判断出来ないこと, また, 想定している対象者に対しては, 十分な効果が得られない可能性がある. そのため, 実際に巧緻性を必要とする日常生活動作の回復を目的としたリハビリテーションにおいて, 運動イメージの想起が活かされている可能性は少ない. 一方, 運動スキルの教示は, 実際に言語を表出することが求められる, 対象者が運動イメージを想起出来ているか否かを客観的に判断することが可能である. また, 運動イメージの想起が困難な対象者については, 運動スキルの教示は運動イメージの想起のように抽象的な課題ではなく, 運動スキルを言語的に表出することを求めるために課題が分かりやすいという利点がある. 例として, 本研究の教示条件では, 「2つのうち1つの球を人差し指と親指で挟み込むように, もう一方の球を掌と小指の付け根で挟み込むように持って回す」と教示していた.

本研究結果から, 他者に教示することによって, 運動学習効果が条件終了後 30 分間残存することが示されたために, 服のボタンを留めるなどといった, 巧緻性を必要とする ADL の回復の一助となる可能性がある. このことから, 運動スキルの教示は, 身

体活動を伴うことなく行える手法であり，運動イメージの想起が困難な対象者でも安全かつ簡便に行える新たな運動イメージ想起の介入方法となる可能性が示された。

## 5.5 結語

本研究では，健康な成人を対象に，他者への運動スキルの教示が運動学習効果の残存性におよぼす影響について検討した。その結果，球回し増加回数および球回し改善回数において，条件終了 30 分後の間に増加が認められ，また，条件終了 30 分後の球回し増加回数において，教示条件と CON 条件の間に有意な差が認められた。このことから，教示を行うことによる運動イメージの想起は，脳卒中患者，高齢者等の日常生活動作回復のためのリハビリテーションにおいて，新たな介入方法となる可能性が示唆された。

## 第6章 結論

本論文では、主に短時間の有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題を組み合わせることで、その後の筋力発揮調整能の促進および保持について明らかにした。さらに、介入効果および他動的な EMS を用いた方法による筋力発揮調整能の課題の促進について検討し、新しい運動プログラムの可能性を示した。

序論において、筋力発揮調整能の促進および保持の運動プログラムを検討する背景に、我が国における高齢化および麻痺などにより上肢の巧緻性の低下などがあげられた。筋力発揮調整能が低下することで、ADL の低下および QOL の低下に関連するようことが推察されている。近年、中強度の有酸素性運動を 20 分から 30 分実施することで、運動技能および認知機能の改善が報告されているが、前述したような対象者であれば、持久力低下、疼痛などによりこのような運動プログラムが実施できない場合がある。そのため、身体負荷が少ない方法が求められているが、短時間および他動的な電気刺激が筋力発揮調整能の促進および保持に影響を与えることが明らかになっていない。

第 2 章では、これまで報告されている方法より短時間である 10 分間の  $60\% \dot{V}O_{2max}$  強度の自転車こぎ運動が筋力発揮調整能の促進および保持の急性効果に影響を与えるか検討した。その結果、筋力発揮調整能が促進および保持する可能性が示された。

第 3 章では、第 2 章で実施した短時間の 10 分間の  $60\% \dot{V}O_{2max}$  強度の自転車こぎ運動および筋力発揮調整能の課題の併用したプロトコールを用いて週 3 回、4 週間の介入研究を実施した。その結果、短時間の 10 分間の  $60\% \dot{V}O_{2max}$  強度の自転車こぎ運動を併用した群においてのみ、課題成功数がトレーニング前後で有意な増加が認められた。このように、短時間の 10 分間の  $60\% \dot{V}O_{2max}$  強度の自転車こぎ運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが筋力発揮調整能の促進におよぼす可能性が示された。

第 2 章および 3 章では、自動的な運動である自転車こぎ運動を併用した方法での筋力発揮調整能の急性効果および介入効果を明らかにしたが、実際に加齢、麻痺、運動器疾患などにより身体機能の低下を呈している者においては、下肢を用いた自動的な運動が困難な対象者も多くいる。そこで、第 4 章では有酸素性運動と同様の効果が期待でき、他動的に筋収縮を誘発させる方法として EMS においても、その後の筋力発揮

調整能を促進させるか検討した。その結果、EMS および筋力発揮調整能の課題を併用した条件のみ、条件実施前と比較して課題成功数が有意な増加が認められた。

第5章では、第2から4章で明らかにした身体的負荷を伴う方法とは異なり、身体活動を伴わず身体的に負荷の少ない、運動イメージを用いた教示方法を採用した。高い巧緻性を必要とする動作の回復は、自立した生活をしていくために必要不可欠であり、それらを出来るだけ身体的負担をかけずに回復することが望ましい。これまで、運動イメージを客観的に判断するために、言語化して他者への運動スキルの教示が運動学習の促進について報告されているが(川崎ら 2017)、どの程度の効果が残存するかは明らかにされていない。そこで、他者への運動スキルの教示が運動学習効果の残存性に与える影響を検討することを目的とした。その結果、球回し増加回数および球回し改善回数において、条件前と比較して条件終了30分後の間に増加が認められ、また、課題30分後の球回し改善回数において、教示条件とCON条件との間に有意な差が認められた。このことから、教示を行うことによる運動イメージの想起は、加齢、麻痺などによるADL回復のためのリハビリテーションにおいて、新たな介入方法となる可能性が示唆された。

今後は、対象者が健常者に限られているために、介入期間、運動強度、体力レベルの状態などが異なる対象者も検討し、これらを含め、本研究で観察された行動効果の根底にあるメカニズムを調べることにより、筋力発揮調整能におよぼす影響を明らかにする必要がある。

これらのことから、本研究より構築した新たな運動プログラムは、加齢、脳血管疾患、変形性膝関節症など様々な疾患により、短時間の自動的な有酸素性運動が可能な者、または運動が困難な者を対象としたADL能力の改善、QOLの向上などにつながり、高齢者が健康であれば外出が増え、活動が活発化し関連消費も増加することが考えられる。地域の高齢者が健康で活発的であることは、人生を充実させるだけでなく、国民医療費を抑制、削減させ、国内経済を潤し内需を拡大することにもなると考えられ、医療・福祉に貢献する可能性が示唆された。

## 引用・参考文献

Alfini AJ, Weiss LR, Nielson KA, Verber MD, Smith JC. Resting cerebral blood flow after exercise training in mild cognitive impairment. *J Alzheimers Dis* 67: 671-684, 2019.

Audiffren M. Acute exercise and psychological functions: A cognitive-Energetic Approach. *Exercise and Cognitive Function*. Wiley-Blackwell, USA: pp3-39, 2009.

Black IB. Trophic regulation of synaptic plasticity. *J Neurobiol*, 41: 108-118, 1999.

Buccino G, Binkofski F, Fink G.R, Fadiga L, Gallese V, Seitz RJ, Zilles K, Rizzolatti G, Freund HJ. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: An fMRI study. *Eur J Neurosci* 13, 400-404, 2001.

Chapman SB, Aslan S, Spence JS, Defina LF, Keebler MW, Didehbani N, Lu H. Shorter term aerobic exercise improves brain, cognition, and cardiovascular fitness in aging. *Front Aging Neurosci* 75: 1-9, 2013.

Chieffi S, Messina G, Villano I, Messina A, Valenzano A, Moscatelli F, Salerno M, Sullo A, Avola R, Monda V, Cibelli G, Monda M. Neuroprotective Effects of Physical Activity: Evidence from Human and Animal Studies. *Front Neurol* 8: 1-7, 2017.

Cho HY, Kim JS, Lee GC. Effects of motor imagery training on balance and gait abilities in post-stroke patients: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil* 27: 675-680, 2012.

Chowdhury R, Guitart-Masip M, Bunzeck N, Dolan RJ, Duzel E. Dopamine modulates episodic memory persistence in old age. *J Neurosci* 32: 14193-14204, 2012.

Cotman CW, Berchtold NC, Christie LA. Exercise builds brain health: Key roles of growth factor cascades and inflammation. *Trends Neurosci* 30: 464-472, 2007.

Delp MD, Armstrong RB, Godfrey DA, Laughlin MH, Ross CD, Wilkerson MK. Exercise increases blood flow to locomotor, vestibular, cardiorespiratory and visual regions of the brain in miniature swine. *J Physiol* 533: 849-859, 2001.

道免和久. 運動学習とリハビリテーション. *バイオメカニズム学会誌* 25: 177-182, 2001.

Fritsch B, Reis J, Martinowich K, Schambra HM, Ji Y, Cohen LG, Lu B. Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: potential implications for motor learning. *Neuron* 66: 198-204, 2010.

Gold SM, Schulz KH, Hartmann S, Mladek M, Lang UE, Hellweg R, Reer R, Braumann KM, Heesen C. Basal serum levels and reactivity of nerve growth factor and brain-derived neurotrophic factor to standardized acute exercise in multiple sclerosis and controls. *J Neuroimmunol* 138: 99-105, 2003.

Gomez-Pinilla F, Ying Z, Opazo P, Roy RR, Edgerton VR. Differential regulation by exercise of BDNF and NT-3 in rat spinal cord and skeletal muscle. *Eur J Neurosci* 13: 1078-1108, 2001.

Guerra ZF, Lucchetti ALG, Lucchetti G: Motor Imagery Training After Stroke: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *J Neurol Phys Ther* 41: 205-214, 2017.

Hashemirad F, Fitzgerald BP, Zoghi M, Hashemirad M, Jaberzadeh S. The effects of inter-trial interval on implicit learning of sequential visual isometric pinch task. *J Bodyw Mov Ther* 21: 626-632, 2017.

Ishibashi H, Hihara S, Takahashi M, Heike T, Yokota T, Iriki A. Tool-use learning induces BDNF expression in a selective portion of monkey anterior parietal cortex. *Mol Brain Res* 102: 110-112, 2002.

川崎 翼, 河野 正志, 兎澤 良輔. 他者に運動技術を教授することによる即時的な運動学習効果, *理学療法学* 44: 306-310, 2017.

Kawashima R, Matsumura M, Sadato N, Naito E, Waki A, Nakamura S, Matsunami K, Fukuda H, Yonekura Y: Regional cerebral blood flow changes in human brain related to ipsilateral and contralateral complex hand movements-a PET study. *Eur J Neuroscience* 10: 2254-2260, 1998.

木村みさか, 平川和文, 奥野直, 小田慶喜, 森本武利, 木谷輝夫, 藤田大祐, 永田久紀. 体力診断バッテリーテストからみた高齢者の体力測定値の分布および年齢との関連. *体力科学* 38: 175-185, 1989.

Kleinloog JPD, Mensink RP, Ivanov D. Aerobic Exercise Training Improves Cerebral Blood Flow and Executive Function: A Randomized, Controlled Cross-Over Trial in Sedentary Older Men. *Front Aging Neurosci* 11: 333, 2019.

Knaepen K, Goekint M, Heyman E M, Meeusen R. Neuroplasticity-Exercise-induced response of peripheral brain-derived neurotrophic factor: A systematic review of experimental studies in human subjects. *Sports Med*, 40: 765-801, 2010.

公益社団法人日本 WHO 協会 <https://japan-who.or.jp/about/who-what/charter/>

厚生労働省個別事項 (その5: リハビリテーション) <https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-12404000-Hokenkyoku-Iryouka/0000182077.pdf>, 2017.

厚生労働省：平成30年度介護保険事業状況報告（年報）.  
<https://www.mhlw.go.jp/topics/kaigo/osirase/jigyo/18/index.html>, 2019.

厚生労働省:民生活基礎調査の概況, 2020 <http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/>, 2020.

Lorås H, Haga M, Sigmundsson H. Effect of a single bout of acute aerobic exercise at moderate-to-vigorous intensities on motor learning, retention and transfer. *Sports Basel* 8: 15, 2020.

Mang CS, Snow NJ, Campbell KL, Ross CJ, Boyd LA. A single bout of high-intensity aerobic exercise facilitates response to paired associative stimulation and promotes sequence-specific implicit motor learning. *J Appl Physiol* 117: 1325-1336, 2014.

松永玄, 山口智史, 大高洋平, 近藤国嗣, 宇明元. ペダリング運動と治療的電気刺激の併用が回復期脳卒中片麻痺患者の歩行能力へ及ぼす影響 -シングルケースデザインによる検討-. *理学療法学*, 40: 371-377, 2013.

McDonnell MN, Smith AE, Mackintosh SF. Aerobic exercise to improve cognitive function in adults with neurological disorders: A systematic review. *Arch Phys Med Rehabil*, 92: 1044-1052, 2011.

Meeran K, Hattersley A, Mould G, Bloom SR. Venepuncture causes rapid rise in plasma ACTH. *Br J Clin Pract* 47: 246-247, 1993.

宮口和義, 出村慎一, 宮口尚義. 高齢ゲートボール愛好者の体力特性. *体力科学* 39: 262-269, 1990.

Mulder T, Hochstenbach JB, Heuvelen MJ, Otter AR. Motor imagery: The relation between age and imagery capacity. *Hum Mov Sci* 26: 203-211, 2007.

Muro M, Nagata A, Sakuma C, Moritani T, Yona M, Sakamoto K. Observation of high and low frequency muscle fatigue by means of <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance. *Ann Physiol Anthropol* 5: 89-96, 1986.

長坂誠, 上月正博. 心血管疾患における電気刺激療法の新たな展開. *リハビリテーション医学*, 44: 402-415, 2007.

長澤吉則, 出村慎一, 山次俊介, 島田茂. 中・高年者における筋力発揮調整能と体力との関係及びその性差. *体力科学* 50: 425-435, 2001.

Nagasawa Y, Demura S. Development of an apparatus to estimate coordinated exertion of force. *Percept Mot Skills* 94: 899-913, 2002.

中村隆一, 齋藤宏, 長崎浩: 基礎運動学 第6版補訂. 医歯薬出版株式会社. pp 475, 2014.

大築立志. 力のグレーディング. *Jpn J Sports Sci* 8: 663-667, 1989.

Ostadan F, Centeno C, Dalozze JF, Frenn M, Lundbye-Jensen J, Roig M. Changes in corticospinal excitability during consolidation predict acute exercise-induced off-line gains in procedural memory. *Neurobiol Learn Mem* 136: 196-203, 2016.

Pereira EM, Santos FAP, Machado CM, Portela FA, Bittar, Machado CM, Ramalho, Roger T, Costa, Azevedo DF, Cesaret MJ. Substitution of corn grain by wheat middlings or corn gluten feed in the finishing bulls diet. *Acta Sci. Anim. Brasil, Sci* 29: 49-55, 2007.

Pillai A. Decreased expression of Sprouty2 in the dorsolateral prefrontal cortex in schizophrenia and bipolar disorder: a correlation with BDNF expression. *PLOS ONE* 3: e1784, 2008.

Porro CA, Francescato MP, Cettolo V, Diamond ME, Baraldi P, Zuiani C, Bazzocchi M, Prampero PE. Primary Motor and Sensory Cortex Activation during Motor Performance and Motor Imagery: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *J Neurosci*, 9: 7688-7698, 1996.

Price CJ: A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *NeuroImage*, 62, 816-847, 2012.

Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cogn Brain Res* 3: 131-141, 1996.

Rizzolatti G, Camarda R, Fogassi L, M Gentilucci, G Luppino, Matelli M. Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. *Exp Brain Res* 71: 491-507, 1988.

Roig M, Skriver K, Lundbye-Jensen J, Kiens B, Nielsen JB. A single bout of exercise improves motor memory. *PLoS One* 7: e44594, 2012.

Rooks CR, Thom NJ, McCully KK, Dishman RK. Effects of incremental exercise on cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy: a systematic review. *Prog Neurobiol* 92: 134-150, 2010.

Sanders A.F. Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychol* 53: 61-97, 1983.

佐藤惇史, 藤田貴昭, 小沼亮, 奥田裕, 山本優一, 潮見泰藏: 重度脳卒中患者における入院1ヵ月時の Motor Assessment Scale と退院時 FIM との関連—偏相関分析による検討—, *理学療法学* 43: 236-240, 2016.

Schneider S, Vogt T, Frysch J, Guardiera P, Strüder HKe. School sport—a neurophysiological approach. *Neurosci Biobehav Rev* 467: 131-134, 2009.

Seidler RD, Bernard JA, Burutolu TB, Fling BW, Gordon MT, Gwin JT, Kwak Y, Lipps DB. Motor Control and Aging: Links to Age-Related Brain Structural, Functional, and Biochemical Effects. *Neurosci Biobehav Rev* 34: 721-733, 2010.

Singh AM, Duncan RE, Neva JL, Staines WR. Aerobic exercise modulates intracortical inhibition and facilitation in a nonexercised upper limb muscle. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 23: 1-10, 2014.

Skriver K, Roig M, Jensen JL, Pingel J, Helge JW, Kiens B, Nielsen JB. Acute exercise improves motor memory: exploring potential biomarkers. *Neurobiol Learn Mem* 116: 46-58, 2014.

Smith AE, Goldsworthy MR, Garside T, Wood FM, Ridding MC. The influence of a single bout of aerobic exercise on short-interval intracortical excitability. *Exp Brain Res* 232: 1875-1882, 2014.

Smith JC, Paulson ES, Cook DB, Verber MD, Tian Q. Detecting changes in human cerebral blood flow after acute exercise using arterial spin labeling: implications for fMRI. *J Neurosci Methods* 191: 258-262, 2010.

Smith KJ, Ainslie PN. Regulation of cerebral blood flow and metabolism during exercise. *Exp Physiol* 102: 1356-1371, 2017.

Sophia M, Apostolos K, Vlassios P, Stamatis A. Functional electrical stimulation of lower limbs in patients with chronic heart failure. *Heart Fail Rev* 15: 563-579, 2010.

総務省統計局: 人口推計 (令和 2 年) 12 月報-, 2020. <https://www.stat.go.jp/data/jinsui/pdf/202012.pdf>, 2020.

Statton MA, Encarnacion M, Celnik P, Bastian AJ. A single bout of moderate aerobic exercise improves motor skill acquisition. *PLoS One* 10: e0141393, 2015.

Stillman CM, Cohen J, Lehman ME, Erickson KI. Mediators of physical activity on neurocognitive function: a review at multiple levels of analysis. *Front Hum Neurosci* 10: 626, 2016.

Stimpson NJ, Davison G, Javadi AH.: Towards a physiological understanding of exercise-induced cognitive benefits. *Neurosci Biobehav Rev* 88: 177-186, 2018.

Suwa M. Meta-cognition as a Tool for Storytelling and Questioning What Design Is. *Bulletin of Japan Society for the Science of Design* 16: 21-26, 2009.

Thomas BP, Tarumi T, Sheng M, Tseng B, Womack KB, Cullum CM, Rypma B, Zhang R, Lu H. Brain Perfusion Change in Patients with Mild Cognitive Impairment After 12 Months of Aerobic Exercise Training. *J Alzheimers Dis* 75: 617-631, 2020.

梅野和也, 中村浩一. 運動イメージ想起能力とパフォーマンスの変化との関係ー JMIQ-R を用いてー, *理学療法科学* 31: 221-225, 2016.

Watanabe K, taniguchi Y, moritani T. Metabolic and cardiovascular responses during voluntary pedaling exercise with electrical muscle stimulation. *Eur J Appl Physiol* 114: 1801-1807, 2014.

Willand MP, Rosa E, Michalski B, Zhang JJ, Gordon T, Fahnstock M, Borschel GH. Electrical muscle stimulation elevates intramuscular BDNF and GDNF mRNA following peripheral nerve injury and repair in rats. *Neurosci* 334: 93-104, 2016.

Winter B, Breitenstein C, Mooren FC, Voelker K, Fobker M, Lechtermann A, Krueger K, Fromme A, Korsukewitz C, Floel A, Knecht S. High impact running improves learning. *Neurobiol Learn Mem* 87: 597-609, 2007.

Yamazaki Y, Sato D, Yamashiro K, Tsubaki A, Takehara N, Uetake Y, Nakano S, Maruyama A. Inter-individual differences in working memory improvement after acute mild and moderate aerobic exercise. *PLoS One* 13: e0210053, 2018.

山地啓司: 最大酸素摂取量の科学. 杏林書院, 東京: pp3-55, 2001.

Yavuzer G, Selles R, Sezer N, Sütbeyaz S, Bussmann JB, Köseoğlu F, Atay MB, Stam HJ. Mirror therapy improves hand function in subacute stroke: a randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil* 89: 393-398 2008.

Yerkes RM, Dodson JD. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *J. Comp. Neurol. Psychol* 18: 459-482, 1908.

## 本論文の基礎となる論文 (主論文)

### 主論文 1 (第 2 章)

出口純次, 三浦哉, 田村靖明, 石川みづき, 村上亜弥子, 羅成圭. 課題前の有酸素性運動が筋力発揮調整能に及ぼす影響. 理学療法科学, 36: 453 - 456, 2021.

### 主論文 2 (第 3 章)

出口純次, 三浦哉, 田村靖明, 石川みづき. 定期的な有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが筋力発揮調整能に及ぼす影響. 理学療法科学, 37, 1, 2022. 理学療法科学, (掲載受理)

本論文に関係あるその他の論文 (副論文)

副論文 (第4章)

出口純次, 三浦哉, 高橋未玖. 骨格筋電気刺激の刺激時間の違いが筋力発揮調整能に及ぼす影響. (執筆中)

副論文 (第5章)

出口純次, 三浦哉, 石田美奈子, 田村靖明, 石川みづき, 佐野里奈. 他者への運動スキルの教示が運動学習効果の保持に及ぼす影響. 人間科学研究, (掲載受理)

本論文に関係のないその他の論文

Tamura Y, Miura H, Deguchi K, Hashimoto Y, Deguchi J, Murakami A, Ishikawa M.  
Effects of repetition exercise training on vascular endothelial function in healthy men.  
J Phys Fit Sports Med, (掲載受理).

## 謝辞

本論文を結ぶにあたり、本研究を遂行する上で御指導・御鞭撻と御支援を頂いた方々に感謝の意を表します。

博士前期・後期課程の5年間、温かい激励と御指導・御鞭撻を頂きました徳島大学大学院応用生理学研究室 教授 三浦哉先生に心より深謝申し上げます。三浦哉先生には、筆者が理学療法士を志した徳島医療福祉専門学校在学時から徳島大学大学院総合科学教育部博士前期課程・博士後期課程に至るまで長く御指導を頂きました。リハビリテーション分野においてエビデンスに基づいた医療の提供が求められている中、研究計画の立案、実験方法、学会発表、論文執筆まで多くの教授を賜りました。心より感謝申し上げます。

実験の実施にあたり、徳島大学総合科学部 三浦哉研究室卒業生の石田美奈子氏、高橋未玖氏、大学院卒業生の田村靖明氏、石川みづき氏、村上亜弥子氏、久我浩正氏、大学院在学生の佐野里奈氏、学部在学生の田窪果歩氏他、研究室の皆氏の熱心な協力を得られましたことに心より感謝申し上げます。

また、研究を遂行するにあたり、御支援、御協力を頂きながら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後に、両親、家族には長年にわたり私の研究活動を理解し、応援していただきました。この場を借りて、感謝の意を表します。