

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03188

研究課題名（和文）「順応から学習へ」：脳損傷患者を対象にした運動学習メカニズムの解明

研究課題名（英文）From Adaptation to Learning: Elucidating Motor Learning Mechanisms in Brain Injury Patients

研究代表者

福澤 一吉（Fukuzawa, Kazuyoshi）

早稲田大学・文学大学院・教授

研究者番号：00156762

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、柔軟なヒト運動制御を支える脳内の運動内部モデルについて、それを獲得する過程を明らかにすることを目的とした。

健康若年者および健康高齢者に加え、小脳損傷患者・頭頂葉損傷患者・パーキンソン病患者を対象に行動実験を実施した結果、先行研究において新規な内部モデルの獲得を間接的に示す行動指標であると考えられてきたアフターエフェクトは、運動学習の進行に伴い、経時的に減少することが明らかになった。この結果から、アフターエフェクトは内部モデルの獲得後にもなお続く運動学習の過程、すなわち複数の内部モデルの切り替えが上達していく過程をも示す指標であるということが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の知見は、順応と学習が連続的に発展していくプロセスであり、このプロセスが行動指標に経時的に反映されることを支持する。本研究は、目視することができない運動学習の内的な過程を、定量的に計測可能な運動エラーに基づいて評価することができることを改めて明らかにした。アフターエフェクトという指標を断続的に計測することで内部モデルの獲得過程のみならず内部モデル切り替え能力の獲得過程をも評価できることを示唆した本研究の知見は、臨床現場における運動障害の改善傾向を簡易かつ分かりやすい方法で定量的に評価する手法の提案につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In the present study, we aimed to clarify the process of acquiring the internal motor model in the brain that supports flexible human motor control.

We conducted behavioral experiments in healthy young and elderly subjects, as well as in patients with cerebellar damage, parietal lobe damage, and Parkinson's disease, and found that after-effects, which have been considered in previous studies to be indirect behavioral indicators of the acquisition of novel internal models, decreased over time as motor learning progressed. The after-effects were found to decrease over time as motor learning progressed. This result suggests that the after-effect is an indicator of the process of motor learning that continues even after the acquisition of internal models, i.e., the process of progress in switching between multiple internal models.

研究分野：認知神経心理学・運動計算論

キーワード：運動学習 視覚運動順応 認知神経心理学 脳損傷患者 リハビリテーション

## 1. 研究開始当初の背景

近年の運動学習研究においては、「**運動学習 = 内部モデルの獲得**」と捉えられている (Doyon, 2005; Shadmehr, 2017)。ここで言う**内部モデル**とは「**運動指令と身体運動との対応関係**」を数学的に表現したものであり、特に小脳における誤差学習が内部モデルの生成に重要であることが示唆されてきた (Hashimoto et al. 2015; Imamizu et al. 2000)。

ヒトが思い通りに身体を動かすためには、筋肉への適切な指令値を脳から出力し続けなければならない。内部モデルによって、(1)この**運動指令の値の計算**が可能になる。また、(2)身体の状態を感覚入力より早い推定や、実際の運動を伴わない運動イメージにも、内部モデルが不可欠であると考えられている (Gomi & Kawato, 1993)。

従来の研究では、新規内部モデル獲得の過程 (= 学習過程) を検討するために、**視覚的な外乱に対する順応を検討する実験**がおこなわれてきた (視覚運動順応課題)。この課題では、通常の課題成績 (エラーの減少) に加えて、**アフターエフェクト (AE) という効果を検討できる**ことが利点である。AEとは、「**新規な環境で運動を学習した後に、既知の環境へ戻して運動をおこなった場合、一時的にエラーが増大する現象**」であり、学習の程度、すなわち、**内部モデルの獲得を間接的に反映する行動指標**として用いられてきた (Bach et al. 2003; Krakauer, 2009; Mazzoni & Krakauer, 2006)。

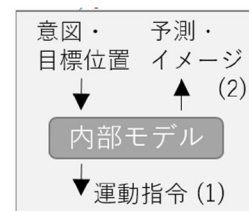
しかしながら、従来のパラダイムでは、AE が“**学習**”過程におけるどのような側面を反映するののかについての理論的な検討はおこなわれてこなかった。これは、**順応と学習の関係が十分に仮定されてこなかった**ことに起因する問題である。基本的に、学習は永続的な行動変化であると定義される一方で、順応や AE の生起は一時的なものであるため、それらは、本来は区別される必要がある。従来研究の学習メカニズムに対する理論的寄与を明確にするためにも、**AE および内部モデルの獲得と、学習の成立の関係を明らかにすることが求められてきた**。

### <引用文献>

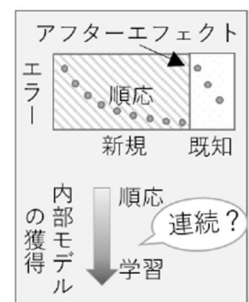
- Buch, E. R., Young, S., & Contreras-Vidal, J. L. (2003). Visuomotor adaptation in normal aging. *Learning & memory*, 10(1), 55-63.
- Doyon, J., & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Current opinion in neurobiology*, 15(2), 161-167.
- Gomi, H., & Kawato, M. (1993). Neural network control for a closed-loop system using feedback-error-learning. *Neural Networks*, 6(7), 933-946.
- Krakauer, J. W. (2009). Motor learning and consolidation: the case of visuomotor rotation. *Progress in motor control*, 405-421.
- Mazzoni, P., & Krakauer, J. W. (2006). An implicit plan overrides an explicit strategy during visuomotor adaptation. *Journal of neuroscience*, 26(14), 3642-3645.
- Shadmehr, R. (2017). Learning to predict and control the physics of our movements. *Journal of neuroscience*, 37(7), 1663-1671.

## 2. 研究の目的

本研究は、「**順応から学習**」へと移行する**運動学習メカニズム**について、**認知神経心理学的立場から解明**することを目的とした。具体的には、【1】視覚運動順応課題の学習における、**内部モデルの獲得と AE の関係を明らかにし**、【2】さらに、小脳、頭頂葉、大脳基底核に病変部位を持つ患者の課題成績をもとに、**AE 生起メカニズムに対応する脳部位を明らかに**することを目的とした。さらに、これらの結果に基づく仮説検証を通して、最終的には【3】**脳部位対応も含めた視覚運動の順応/学習の統合理論を提案**することを目指した。これらの検討を通して、視覚運動順応課題における“アフターエフェクト”がモデルの切り替え能力を反映するという仮説、および、

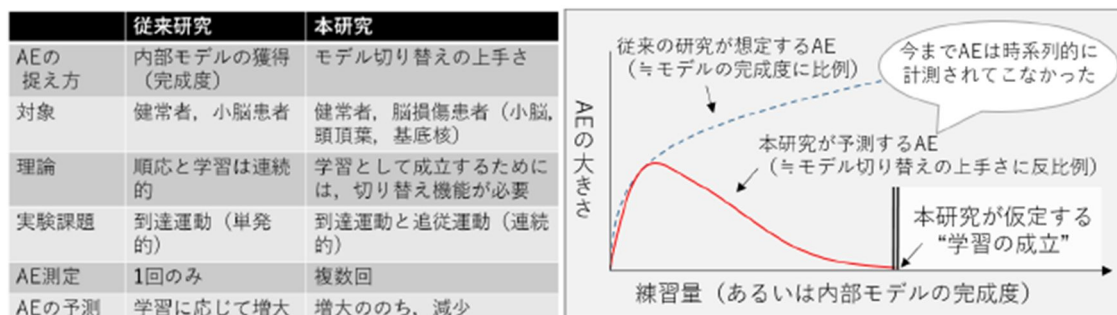


内部モデルの役割



順応と学習の関係性

小脳が「モデルの獲得と蓄積」、基底核と頭頂葉が「モデルの切り替え」を担うという仮説を検証した。



### 3. 研究の方法

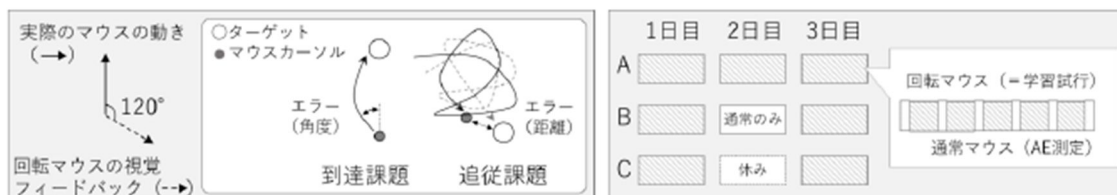
本研究では、若年・高齢健常者に加えて、小脳損傷患者、頭頂葉損傷患者を研究対象に、従来研究では実施されてこなかったAEの複数時期測定をおこなった。測定にあたって本研究では、(1)追従課題と(2)AEの持続時間解析を導入した。

【実験課題】先行研究で一般的に用いられてきた追従課題には加え、AEの持続時間を連続的に計測でき、戦略的な代償行為の影響が少ないという利点がある追従課題を実施した。前者はディスプレイ上のターゲットに対してマウスカーソルを持っていく課題、後者はランダムに動きまわるターゲットを追いかける課題であった。両課題において、マウスカーソルの視覚フィードバックが120度回転している回転マウスを学習対象とし、回転のない通常マウスによってAEを測定した。

【AEの複数回計測】仮説検証における従属変数として、回転マウス使用直後の通常マウス使用時の追従エラー(AE)の大きさおよび持続時間を複数時期において測定した。

【対象】研究全体で、40名の健常若年者、22名の健常高齢者、さらに5名の脳損傷患者を検討対象とした。患者については、卒中あるいは変性症による限局的な病巣を有し、合併する神経心理学的症状によって課題遂行が妨げられない患者を対象とした。研究遂行年度中の新型コロナウイルス感染症の流行に伴い、対人実験の実施が困難になったため、当初の研究計画から対象者数を変更し実験を実施した。

1日(短期)の学習における仮説検証に加えて、より長期的なスパンにおいても本研究の仮説が成立するかどうかを検討するため、3日連続の実験をおこなった。この実験では、2日目の実験条件を操作し、AEと学習の保持および再学習の関係を検討した。反復による学習効果の交絡を避けるため、健常者においては課題(到達/追従)と実験条件(A/B/C群)を被験者間要因とする。患者については、仮説検証および病巣感比較を優先させるため、すべての参加者について追従課題・A条件(下図)をおこなった。



### 4. 研究成果

計画初年度には本研究全体を通して使用する実験プログラムならびに解析手法を確立した。これに基づき、健常若年者および健常高齢者に加え、小脳損傷患者・頭頂葉損傷患者を対象とする行動実験を実施した結果、先行研究において新規な内部モデルの獲得を間接的に示す行動指

標であると考えられてきたアフターエフェクトは、運動学習の進行に伴い、経時的に減少することが明らかになった。この結果から、アフターエフェクトは内部モデルの獲得後もなお続く運動学習の過程、すなわち複数の内部モデルの切り替えが上達していく過程をも示す指標であるということが示唆された。本研究の知見は、順応と学習が連続的に発展していくプロセスであることを支持する。

研究期間全体を通じて、関連論文が国際学術雑誌に掲載された他、国際学会における研究成果発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Itaguchi Yoshihiro, Fukuzawa Kazuyoshi	4. 巻 237
2. 論文標題 Adaptive changes in automatic motor responses based on acquired visuomotor correspondence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Experimental Brain Research	6. 最初と最後の頁 147 ~ 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00221-018-5409-x	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Itaguchih Y. and Fukuzawa K.	4. 巻 237
2. 論文標題 Adaptive changes in automatic motor responses based on acquired visuomotor correspondence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Experimental Brain Research	6. 最初と最後の頁 147-159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00221-018-5409-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yamada C., Itaguchi Y., and Fukuzawa K.
2. 発表標題 Effects of the Amount of Practice and Time Interval between Practice Sessions on the Retention of Internal Models.
3. 学会等名 2nd International Symposium on Applied Abstraction and Integrated Design AAID2020 (国際学会)
4. 発表年 2019年 ~ 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	板口 典弘  (Itaguchi Yoshihiro)  (50706637)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・訪問研究員    (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------