

# 運動学習はここまでわかった

嘉戸 直樹 伊藤 正憲

## Understanding and Clinical Application of Motor Learning

Naoki KADO, RPT, Masanori ITO, RPT

### Abstract

It is important to understand about the mechanism of motor learning. Moreover, it is necessary to guide automated behavior by intervening according to each stage of motor learning. In this paper, we summarize the neural mechanism and strategy of motor learning.

*Key words:* motor learning, cerebellum, basal ganglia

*J. Kansai Phys. Ther.* 8: 49-52, 2008

### はじめに

臨床において我々セラピストは、ハンドリングや環境設定、口頭指示などを用いて患者様の動作能力を改善することが求められる。動作能力の変化は、一時的なものではなく、比較的永続する変化に導く必要がある。したがって、運動学習のメカニズムの理解は、我々セラピストにとって必須である。

本稿では、運動学習に関する最近の文献から運動学習の神経機構についてまとめ、運動学習の方略について考えていきたい。

### 運動学習とは

運動学習とは、巧みな課題遂行の能力を比較的永続する変化に導くような実践あるいは経験に関係する一連の過程である<sup>1)</sup>。この過程は、認知段階(初期相)、連合段階(中間相)、自動化段階(最終相)に分けられる。認知段階では、何を行うかを理解し、言語的に戦略を考える。連合段階では、どのように行うか、様々な戦略が試され試行錯誤する。自動化段階では、手続きは自動化され、注意は減少し言語は不要になる。ただし、各学習段階は、連続的に向上するため明確な境界はない。

運動学習の各段階では、様々な脳領域が関連するが、本項では、前頭前野背外側部と頭頂葉、運動前野と補足運動野の機能について概説する。小脳と大脳基底核の機能については次項で詳細に述べる。前頭前野背外側部は、ワーキングメモリ機能を担い、情報の記憶の中核として、主に学習初期に機能する。運動が習熟すると、その経験は頭頂連合野に身体図式として格納される。いわゆる意識化の過程から無意識化の過程への移行である。運動前野は、感覚情報に基づいた運動学習の中核であり、なかでも視覚への依存度が高い学習過程の初期に特に働く。補足運動野は、感覚情報に依存せず、記憶学習に基づく連続運動の実行機能を有し、学習後期により働くと報告されている<sup>2)</sup>。

### 運動学習の神経機構

本項では、まず運動学習における皮質下の機能的役割について概説する。次に、自己ベース運動と外的ベース運動に関わる神経機構について述べる。最後に、我々が行っているsynchronization課題とsyncopation課題の研究について紹介する。

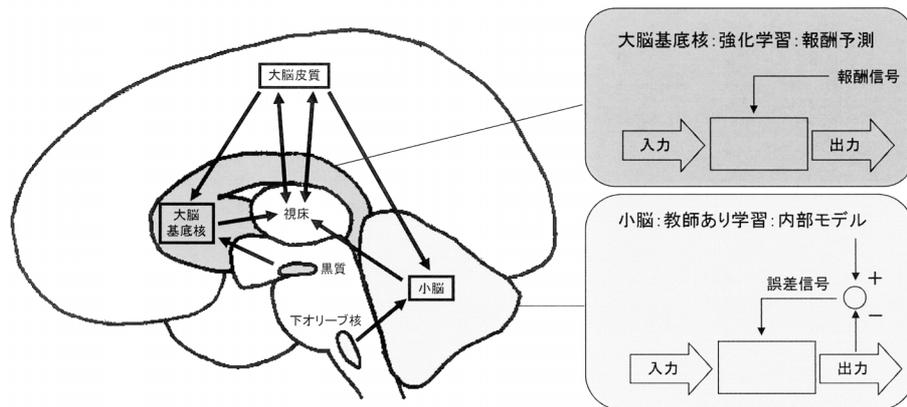


図1 運動学習における小脳・大脳基底核の機能的役割 (文献3より改変引用)

### 1. 運動学習における皮質下の機能的役割

運動学習には、2つの重要な大脳皮質 - 皮質下回路の関わりがあるとされている<sup>3)</sup>。1つは、運動皮質からの情報と運動に関する末梢からの感覚情報を統合して、運動を適正化する役割を果たす小脳回路である。もう1つは、運動を遂行する上での順序や運動の組み合わせを制御する基底核回路である(図1)。

小脳には大脳皮質からの入力と下オリーブ核からの入力がある。大脳皮質から入力される司令信号は、小脳の中で2つの経路に分かれる。1つは、直接的に小脳核を經由して出力される経路で、これはアクセルの役割を果たす。もう1つは、小脳皮質を迂回(平行線維→プルキンエ細胞→小脳核)する経路で、これはプルキンエ細胞が小脳核を抑制することでブレーキの役割を果たす。この2つの経路により、アクセルとブレーキをうまくかね合わせることで、適切な司令信号を出力している。しかし、アクセルとブレーキの関係を固定しては、うまくいくこともあるが、毎回うまくいかない可能性もある。ここで運動学習に重要な役割を果たすのが、下オリーブ核からの登上線維を介したプルキンエ細胞への経路である。この経路は、大脳皮質からの「意図した軌道」に関する運動司令に対して、「意図した軌道」と「実現した軌道」のずれ(誤差信号)を伝達する教師の役割を果たす。その結果、より適切な運動司令を形成していくのが小脳の運動学習における機能的役割である。最終的には、適切な運動司令が内部モデルとして小脳に蓄えられ、予測に基づいて運動を制御することが可能となる。

大脳基底核には、大脳皮質の広い範囲から線条体(入力部)に入力がある。これらの入力は、淡蒼球内節と黒質網様部(出力部)から視床を介して、補足運動野を中心に大脳皮質に投射され、大脳皮質基底核ループを形成する。大脳基底核の入力部と出力部を結ぶ経路には、直接

路と間接路の2つがある。直接路は脱抑制機能によりアクセルの役割を果たし、間接路は抑制強化機能によりブレーキの役割を果たす。このアクセルとブレーキの作用により、大脳皮質から出力されたさまざまな運動司令を整理し、目的とする行動に必要な運動を機能的に選択している。また、大脳皮質基底核ループにおいては体部位局在が存在することが知られている<sup>4)</sup>。運動を生じさせようとする体部位領域には脱抑制による興奮を、それ以外の領域には抑制をかけることにより、運動を円滑に遂行することができると考えられている。習熟した運動を遂行するには、必要な体部位領域にのみ有効な筋活動が生じ、それ以外の部位には余計な筋活動が生じない。これは、大脳皮質基底核ループが運動の発現や遂行のみならず、運動学習にも重要な役割を果たしていることを示している。

### 2. 自己ベース運動と外的ベース運動に関わる神経機構

谷脇ら<sup>5,6)</sup>による機能的MRIにおけるネットワーク解析によると、自己ベース運動では、補足運動野 - 被殻 - 視床 - 1次感覚運動野に強い機能連関が認められている。また、外的ベース運動では、小脳前葉 - 歯状核 - 視床 - 運動前野 - 1次感覚運動野に強い機能連関が認められている。

運動療法において、自発的な運動開始や順序動作の習得が困難なパーキンソン病患者に対して、そのタイミングを視覚的あるいは聴覚的な手がかりを与える方法が用いられることがあるが、これは基底核系の障害に対して小脳系の賦活による代償を利用していることになると言える。

### 3. synchronization課題とsyncopation課題の研究紹介

synchronizeとは、同時性を持つ、一致させるという意

味がある。synchronization課題は同期タッピングや一致タイミング課題により、予測に基づく時間的、空間的、強度的な非同期量を変数とした検討がなされている。syncopateとは、音を節分するという意味がある。われわれは、周期的な聴覚刺激を2分割する運動として、synchronization課題と対比させて検討している。

本研究は、周期的な聴覚刺激の誘導のもとに運動を行う際に、刺激に同期した運動と刺激を分割する運動のどちらが運動の適応や自動化に効率的であるかを検討することを目的とした。

対象は、本研究の趣旨を理解し、参加に同意の得られた右利きの健常者6名、平均年齢 $25.8 \pm 5.6$ 歳とした。対象者を周期的な聴覚刺激に同期してタッピングする群(synchronization tapping: 以下ST)と周期的な聴覚刺激に対して刺激と刺激の中間でタッピングする群(division tapping: 以下DT)に振り分けた。聴覚刺激の入力にはViking Quest(NICOLET)タッピングの記録にはスイッチセンサー(KISSEI COMTEC)を用いた。被検者は椅子座位とし、右示指をスイッチセンサーに位置させた。聴覚刺激の刺激条件は、刺激頻度1 Hz、刺激強度70 dB、刺激周波数1 KHzとし、刺激の入力にはヘッドホンを用いた。60回のタッピングを1試行とし、各被験者に5試行実施した。ST群は入力された聴覚刺激とタッピングのずれを同期誤差として算出し、DT群は刺激と刺激の中間である目標値とタッピングのずれを同期誤差として算出した。得られたデータより両群の同期誤差の誤差変動を算出した。最初の1試行を除く合計4試行を検討の対象とし、4試行の平均値をもって個人の代表値とした。検討項目は、両群におけるタッピングの誤差変動の差とした。統計処理には対応のないt-検定を用いた。

結果は、ST群とDT群の誤差変動に有意な差は認められなかったが、DT群はST群と比較して誤差変動が小さくなる傾向を示した。

両課題とも、入力される聴覚刺激は同じであり、また要求している運動(動作や頻度)も同じである。周期的に入力される聴覚刺激に基づいて刺激の時間間隔を認識するという点では共通しているが、入力される聴覚刺激と運動の時間的誤差を自覚的に認識することが可能かどうかという点で相違がある。刺激と運動の誤差の認識に基づいた運動の出力は、運動の適応や自動化を阻害する可能性があると考えられる。刺激の時間間隔を認識している状況下では、外的な刺激により運動を修正するより、内部刺激に基づく自己ペースな運動の方が、運動の適応や自動化にとっては有益であることが推察される。

以上、synchronization課題とsyncopation課題の研究について紹介した。今回紹介した研究は対象者6名を2群に分けて検討を行ったが、tappingはその技能に個人差もあると考えられるため、今後は対象者を増やしてさらに検

討する必要がある。

## 運動学習の方略

運動課題の練習に理学療法士が介入する際には、運動学習の各段階に対応した運動学習の方略を検討する必要がある。

認知段階では、課題を明確にし、理想的なパフォーマンスを提示し、視覚を中心とした感覚の手がかりによるパフォーマンスの強化を伴った練習を行う<sup>7)</sup>。近年、イメージトレーニングが運動学習を促す手法として期待されている。ただし、イメージトレーニングの有効性については、多くの報告が実際の運動との併用が有効と結論づけている<sup>8)</sup>。連合段階では、適切なフィードバックを選択してフォームやタイミングの修正を行う。ハンドリングにより、視覚的フィードバックへの依存を減らし、固有感覚フィードバックを促すことが重要である。自動化段階では、運動への注意を減少させ自動化を促すよう練習を行う。さらに、環境や課題のバリエーションを変化させても、一貫したパフォーマンスが行われるよう練習を行う<sup>9)</sup>。

結果の知識(knowledge of result: KR)やパフォーマンスの知識(knowledge of performance: KP)などの付加的フィードバックは、その頻度を減らすと運動効果が高くなると報告されている。過剰な付加的フィードバックは、固有感覚などの内在フィードバック利用による誤差検出の処理をおろそかにさせ、結果的に学習を阻害する。段階の進行とともにフィードバックを徐々に減らし、連合段階においては、患者による自己評価を促すことが効果的な学習につながる<sup>9)</sup>。

また、運動学習の向上には、睡眠が大きな役割を担うことが報告されている。多様な動作スキルが睡眠中にさらに上達し、睡眠を剥奪すると上達が妨げられる。このメカニズムとしては、睡眠中に覚醒時に記憶した手続きの研鑽過程が行われると考えられている<sup>10)</sup>。睡眠の確保は、休息のためだけでなく記憶の向上も重要である。

## おわりに

運動学習に関わる神経機構と運動学習の方略について概説した。臨床においては、運動学習のメカニズムと各段階について理解し、段階に応じた介入をすることで、自動化を促していくことが望まれる。実践的に介入をする際に、本トピックスの内容が介入の一助になれば幸いである。

## 文献

- 1) 中村隆一・他:基礎運動学第6版, pp447-478, 医歯薬出版,

- 2005.
- 2) 森岡 周・他:ニューロリハビリテーションとしての理学療法. 理学療法 24:1532-1540, 2007.
  - 3) 長谷公隆:運動学習の神経機構とその障害. 理学療法 22:966-974, 2005.
  - 4) 蔵田 潔:運動制御の神経機構とその障害. 理学療法 22:960-965, 2005.
  - 5) 谷脇考恭, 飛松省三:小脳の機能. 分子精神医学 7:37-44, 2007.
  - 6) 谷脇考恭, 飛松省三:臨床神経生理学 3. システムを究める. 臨床脳波 48:638-645, 2006.
  - 7) 谷 浩明:運動学習に効果的な練習方法とは何か. 理学療法 22:982-988, 2005.
  - 8) 平岡浩一:脳卒中患者の運動学習におけるイメージトレーニングの活用. 理学療法 24:1564-1569, 2007.
  - 9) 谷 浩明:運動学習理論の臨床応用. 理学療法 24:299-304, 2007.
  - 10) 栗山健一:ヒトの運動学習の向上と睡眠. *Cognition and Dementia* 6:22-30, 2007.