

## 学位論文の要旨

### 論文題目

Acquisition of coordinated finger movements through motor skill learning

和訳：運動スキル学習を通じた協調的な手指動作の獲得

広島大学大学院総合科学研究科

総合科学専攻

学籍番号 D153535

氏名 平野 雅人

### 論文の要旨

#### Chapter 1: General Introduction

ヒトの手は 27 の骨で構成され、約 20 の関節を持つ。この複雑な手の構造は多様な動作を可能とする一方、その自由度の高さから脳・神経系の制御負荷が大きく、脳神経系がどのように手の運動を制御しているのか未だ議論が続いている（ベルンシュタイン問題；Bernstein, 1967）。この問題を解決する 1 つの仮説として、“運動モジュール制御仮説”が提唱されている。この仮説では、多関節運動は、脳・神経系に存在する運動モジュールを介して制御されると考えられている。運動モジュールとは、複数の関節をまとめて制御するためコントローラであり、複数の関節間の協調構造といえる。関節の数よりも少数の運動モジュール活動を組み合わせることで、多様な運動が実現可能とされる。実際、日常的に実施する 50 の手指運動を 15 個の手指関節から記録したところ、2~3 個の運動モジュール活動の組み合わせがあれば、そのほとんどを記述できることが報告されている（Santello et al. 1998）。近年では、サル的一次運動野（primary motor cortex: M1）を電気刺激して誘発された運動を記述する運動モジュール構造が、サルが自発的に行った運動を記述する運動モジュール構造と類似していたことが報告された（Overduin et al. 2010）。同じような報告はヒトを用いた実験でも報告されている（Gentner et al. 2006）。これらの結果は、運動モジュール制御仮説を強く支持し、運動モジュールが皮質脊髄系に存在することを示唆する。しかし、これまでの研究は、手指運動を運動モジュール活動で記述できるということや、運動モジュールが脳・神経系のどこにコードされているかという点に焦点が当てられ、運動モジュールがどのように獲得され、変化していくのかは明らかにされていない。先行研究では、音楽家の運動モジュールは音楽演奏に最適化されていることや、運動モジュールが脳卒中や局所性ジストニアなどの運動障害によって影響を受けることが報告されている。したがって、運動モジュールの獲得・再組織化のメカニズムを明らかにすることは、ヒトの運動制御原理だけでなく、運動スキル学習やリハビリテーションに対しても重要なテーマといえる。運動スキル学習は大別して、系列運動学習と新規動作学習

の2つに分けることができる。そこで本研究では、上述した2つの運動スキル学習に着目し、学習に伴う運動モジュールの獲得・再組織化機序に関して、経頭蓋磁気刺激法 (TMS) ・運動解析・多変量解析手法を用いて検討した。序論では、本研究の背景に関して、手指運動の特徴、運動モジュール制御仮説、実験で使用した主な手法の整理及び解説を行った。

## **Chapter 2: The acquisition of skilled sequential finger movements is accompanied by the reorganization of the corticospinal system**

神経系は多自由度である手の運動を、複数の関節や筋をセットとして活動させる運動モジュールを組み合わせて制御しているとする仮説が提唱されている。本研究では、ピアノ演奏のような手指系列運動の学習を通じて、運動モジュール構造がどのように再組織化されるか検討した。

広島大学総合科学研究科研究倫理委員会の承認を得て、実験は cross-over design で行った。学習課題は右手5指で行う系列反応時間課題を用いた。系列反応時間課題は5選択の反応課題に存在する規則性 (シークエンス) を学習する課題である。シークエンスに関する明示的知識を獲得させる条件 (Explicit 条件) と、暗黙的知識を獲得させる条件 (Implicit 条件) を設定した。学習前後において、課題中の手指運動と、TMS で大脳皮質運動野を刺激し誘発された運動を手指の10個の関節からデータグローブを用いて記録した。運動モジュールは、手指関節運動に対し主成分分析を適用して得られた主成分とした。主成分構造の変化を定量的に評価するために、学習前後のデータセットから抽出した主成分ベクトルに関して、コサイン類似度の算出、再構成解析を行った。また、学習によって生じる運動モジュールの課題特異的な変化を評価するため、誘発運動から抽出した運動モジュールを用いて、課題中の動作を最小二乗法により再構成した。

両学習条件ともに、シークエンス時の反応時間が短縮された。一方、課題中の手指運動やTMS誘発運動から抽出した主成分構造は、Implicit 条件でのみ変化した。また、学習後における課題中の動作を学習前後で得られた運動モジュールを用いて再構成したところ、Implicit 条件では、学習後の運動モジュールを用いたときと比較して、学習前の運動モジュールを用いた際には、動作の再現性が低かった。この結果は、学習後の動作に特有の指関節の協調関係を学習前の運動モジュールは表現しておらず、学習後の運動モジュールは保持していることを示唆する。このような学習前後の運動表現の変化は、explicit 条件では見られなかった。以上の結果から、系列運動の暗黙的知識の獲得に伴い、運動モジュールが再組織化されることが明らかになった。

## **Chapter 3: Reorganization of finger coordination through acquisition of novel finger movements**

手指は様々な運動が実行可能であり、さらにギター演奏やピアノ演奏など、トレーニングを繰り返すことでそのバリエーションを増やすことができる。このようなバリエーショ

ン豊かな手指の運動は、少数の運動モジュール（手指関節間の共変動パターン）の加重線形和として記述でき、運動モジュールは皮質脊髄路に表現されていることが報告されている。しかし、新しい手指動作を獲得する際に運動モジュールがどのように変化するか明らかにした研究はない。本研究では、新規手指動作の獲得が皮質脊髄路に表現される運動モジュールへ及ぼす影響について、経頭蓋磁気刺激法（TMS）を用いて調査した。

実験は広島大学総合科学研究科研究倫理委員会の承認を得て行われた。被験者は、新規動作（日常動作と無関係な動作）を繰り返し練習する新規動作群（ $n=10$ ）と、既存動作（日常動作と類似した動作）を練習する既存動作群（ $n=9$ ）に分けられた。自作のデータグローブを用いて10の手指関節から運動を記録した。被験者は、安静時の手姿勢からモニタ上に表示された手姿勢へできるだけ早く手指を動かすことを求められた。課題前後で、TMSを用いて一次運動野を刺激し誘発される手指関節の角度変化を記録した。運動モジュールは主成分分析（PCA）を用いて算出した。

100試行の練習によって、新規動作（既存動作）を生成する時間が減少した。次に、学習による運動モジュールの変化を定量化するため、TMS誘発運動から抽出した主成分の加重線形和で課題中の動作を再構成し、データグローブで記録したデータとの一致度（再構成精度）を求めた。新規動作群では、課題前のTMS誘発運動から抽出した主成分は課題前半の手指動作を高い精度で再構成した一方、課題後半の手指動作の再構成精度は低かった。一方、課題後のTMS誘発運動から抽出した主成分は、課題前半の手指動作も課題後半の手指動作も高い再構成精度を示した。この結果は、学習後半に学習前の運動モジュールでは説明できない新規動作が含まれること、学習後の運動モジュールは新規動作と学習前半の既存動作の両方を説明できることを示す。これらの結果から、新規手指動作の獲得に伴い、皮質脊髄路に表現される運動モジュールが新規動作を記述できるように再組織化されることが示唆された。

#### **Chapter 4: General discussion**

本章ではChapter2とChapter3で得られた知見の総合考察を論じた。本研究から新たに得られた知見は、1) 系列手指運動の暗黙的学習によって運動モジュールが再組織化される。2) 新規手指動作の獲得に伴い、皮質脊髄路に表現される運動モジュールが再組織化される。3) 再組織化された運動モジュールは、日常的な運動と新規動作の両方を記述できるものであった。

本研究はヒトの手指運動に関して運動モジュール制御仮説に基づき、新規手指動作の獲得メカニズムを明らかにしたものである。その成果は、神経科学分野だけでなく、新規手指運動スキルの獲得効率の促進や、ヒトの手指のように多様な運動を生成可能なロボットハンド・義手の開発、神経系の障害によって生じる手指運動機能の麻痺に対する新たなリハビリテーション法の確立など、様々な分野に応用可能であると考えられる。