

# 運動学習過程における報酬と罰が学習および記憶保持と脳活動に及ぼす影響

稲 岳 斗 【身体情報サイエンス研究室】

## Effects of Reward and Punishment on Learning, Retention, and Brain Activity During Motor Learning

INA, Gakuto 【Brain-Muscle Coordination Lab.】

### 1 はじめに

報酬の獲得および罰の回避は、人間の行動を方向づける主要な動機づけ要因であり、学習や意思決定の過程において重要な役割を果たす。これまでの研究により、報酬は運動記憶の保持を高め、罰は運動学習の学習率を高めることが示されてきた [1]。この知見は、同一の学習時間であっても、報酬や罰といった動機づけフィードバックの違いによって、学習過程や記憶保持に有意な差が生じる可能性を示唆している。このことから、報酬と罰は、運動学習に関与する脳領域や神経機構において異なる作用を示す可能性がある。

しかし、報酬および罰が運動学習に及ぼす影響については、これまで主として行動レベルで検討されてきており、運動学習中の脳活動にどのような違いをもたらすのかについては、十分に明らかにされていない。特に、これらのフィードバックが、運動学習および記憶保持の過程において、脳活動をどのように変化させるのかは、依然として不明である。

そこで本研究では、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いて、運動学習中に報酬または罰を与えた際の、学習過程および記憶保持に関連する脳活動への影響を検討した。

### 2 方法

#### 2.1 実験参加者

本研究には、健常者 43 名 (平均年齢 19.5 歳  $\pm$  0.22, 男性 34 名, 女性 9 名) が参加した。すべての参加者は、利き手テストにより右利きであることが確認された。参加者は無作為に報酬群と罰群の 2 群に割り当てられた。

取得されたデータのうち、不適切なデータを示した 8 名を除外し、最終的な解析対象は報酬群 16 名, 罰群 19 名となった。

#### 2.2 運動課題

参加者は、開始地点から 8cm 離れた 8 方向のいずれか 1 か所に提示される目標地点へカーソルを直線的に移動させる運動課題を実施した。参加者には、カーソルをできるだけ正確かつ迅速に移動させるよう求めた。

1 試行は、カーソルを開始地点で静止させ運動開始の

合図を待つ準備段階、カーソルをターゲットに移動させる実行段階、視覚刺激が表示されるフィードバック段階、無表示の待機段階の 4 つで構成された。

本実験は 32 試行を 1 セットとした。Baseline ブロックを 2 セット実施した。Adaptation ブロックでは視覚運動変換を導入し、カーソルの移動方向はジョイスティック操作方向に対して反時計回りに 30° 回転していた。このブロックを 6 セット実施した。No vision ブロックでは、運動中の視覚フィードバックを制限し、カーソルは開始位置にある場合のみ表示された。このブロックを 3 セット実施した。

フィードバック段階の内容は、ブロックによって異なる。Baseline ブロックおよび No vision ブロックでは文字「A」が表示され、Adaptation ブロックではインセンティブが提示された。なお、参加者には、視覚運動変換の存在について事前には知らせなかった。

#### 2.3 インセンティブルール

すべての参加者は、0 ポイントから開始した。ポイントは Adaptation ブロック全体を通して累積された。インセンティブは、各試行で生じた角度誤差に基づいて決定された。角度誤差は、カーソルが開始地点から 8cm 離れた時点における移動方向と、開始地点からターゲット方向との角度差として算出された。

この誤差に応じて、報酬群では 0 から 4 ポイントが、罰群では 0 から -4 ポイントが累積された。

インセンティブの詳細は事前には説明されず、参加者には到達精度に応じて獲得または損失金額が決まることのみが伝えられた。

#### 2.4 解析方法

##### 2.4.1 評価指標

各試行の運動成績は、ジョイスティック操作に基づく到達方向誤差によって評価した。到達方向誤差は、カーソルが開始位置から半径 8cm に到達した時点における移動方向と、開始地点からターゲット方向との差として算出した。Adaptation ブロックでは、この角度から 30° を減算し、視覚運動変換を補償したジョイスティック角度を恒常誤差として定義した。

### 2.4.2 学習フェーズ

Adaptation ブロックは学習段階に基づいて2つのフェーズに分けた。Adaptation ブロックの1セット目を学習初期、6セット目を学習後期と定義した。

### 2.4.3 脳解析

画像データの前処理、個人レベル解析、および集団レベル解析にはSPMを用いた。統計解析における有意水準は、voxel-levelで  $p < 0.0005$  (uncorrected), かつクラスターサイズ  $k \geq 10$  とした。

Adaptation ブロックおよび No vision ブロックにおいて、それぞれ実行段階、フィードバック段階の脳活動を対象に群間比較を行った。

さらに、学習段階の違いを検討するため、Adaptation ブロックの1セット目(学習初期)および6セット目(学習後期)についても、同様に実行段階、フィードバック段階の脳活動を対象に、群間比較を行った。

## 3 結果

### 3.1 運動課題

運動課題の結果を図1に示す。図中の実線および破線は8試行を平均した値を示し、周囲の半透明の帯は標準誤差を表す。

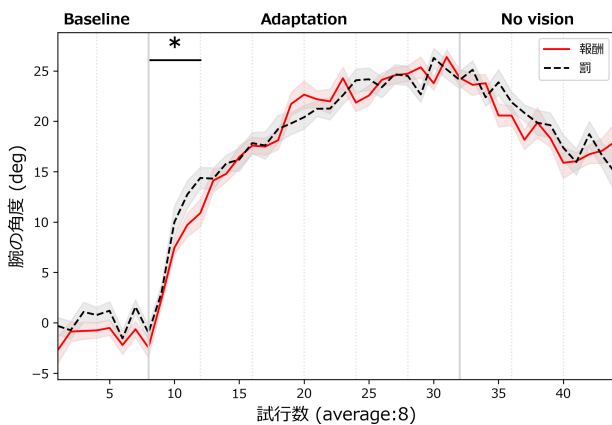


図1 運動課題の結果

$t$  検定の結果、Adaptation ブロック1セット目(学習初期)において群間に有意差が見られた ( $p = 0.02$ )。

### 3.2 脳活動

#### 3.2.1 学習時

Adaptation ブロックのフィードバック段階において、罰群は報酬群と比較して、右中帯状回、左中側頭回において有意に高い活動を示した。

#### 3.2.2 学習初期

学習初期のフィードバック段階において、罰群は報酬群と比較して、左上頭頂小葉(図2)、左中心後回、左中側頭回、右前頭弁蓋部、および右中帯状回において有意に高い活動を示した。

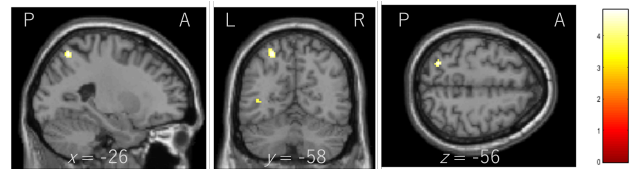


図2 学習初期のフィードバック段階における報酬群と罰群の脳活動差(報酬群 < 罰群)

#### 3.2.3 学習後期

学習後期の実行段階において、罰群は報酬群と比較して、右尾状核、右被殻において有意に高い活動を示した。また、フィードバック段階で、罰群は報酬群と比較して、左中側頭回において有意に高い活動を示した。

#### 3.2.4 記憶保持

No vision ブロックの実行段階において、報酬群は罰群と比較して、右尾状核において有意に高い活動を示した(図3)。

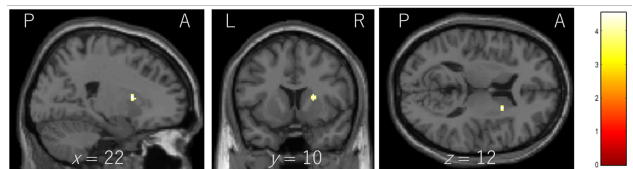


図3 No vision ブロックの実行段階における報酬群と罰群の脳活動差(報酬群 > 罰群)

## 4 考察

行動成績においては、学習初期にのみ群間差が認められた。これと対応して、学習初期のフィードバック段階では、罰群において上頭頂小葉、中心後回、中帯状回など、誤差処理や感覚制御に関与すると考えられる脳領域の活動が有意に高かった。これらの結果は、罰が学習初期における誤差への感受性を高め、行動修正を促進した可能性を示唆している。一方、記憶保持段階の実行段階においては、尾状核や被殻といった線条体領域で群間差が認められた。この所見は、線条体が運動記憶の保持過程に関与している可能性を示唆するものである。

## 5 結論

本研究は、報酬と罰が運動学習および記憶保持に及ぼす影響と、それに伴う脳活動の違いについて検討した。その結果、学習初期に罰を与えることで学習が促進されることが明らかとなった。さらに、報酬と罰では関与する脳領域および活動タイミングが異なる可能性が示唆された。

## 参考文献

- [1] Galea, J. M., et al. (2015). The dissociable effects of punishment and reward on motor learning. *Nature Neuroscience*, 18(4), 597-602.