

# 論文の内容の要旨

## **Risk-sensitive decision making in motor tasks with an asymmetric gain function**

(非対称な利得関数を持つ運動課題における  
リスク感受的な意思決定)

太田 啓示

### 【第1章：序論】

高度なスポーツパフォーマンスの実現のためには、リスクがある中で適切にプレーを選択することが不可欠になる。これまで人の意思決定に関する研究は、経済学を中心に行われ、認知的バイアスにより、人の意思決定には矛盾が生じることが示されてきた(Kahneman & Tversky, 1979)。このような研究を背景に、運動課題を用いて、人の意思決定を検討する研究が行われている(Trommershäuser et al., 2003; 2005)。先行研究では、2つの円を提示し、円の範囲内のどこにポインティングをするかという決定を要する課題を用いてきた。この課題は、円の範囲内でポインティングをした位置により利得が決まる。どこを狙えば利得の期待値が最大になるか、という最適な狙い場所は、被験者のポインティング動作の分散と提示された円の利得関数とを統合することで、推定できる。先行研究では、推定された最適な狙い場所と、被験者が実際に行った狙い場所が一致したことにより、経済的な決定に反し、運動の意思決定は合理的であることを主張した。この課題では、円の範囲内に当たれば得点、外れれば失点という、一定の利得が失点のリスクと隣接した課題であった。

しかしながら、テニスや卓球などの競技では、打ったボールがライン際に近づくほど得点の可能性は高くなり、ラインを越えるとアウトになる、という非対称な利得構造を有している。このようなより高い利得と失敗のリスクとが隣接した状況で、合理的な意思決定が実現されるかは明らかではない。そこで、本博士論文では、非対称な利得関数下における、人の運動意思決定特性を検討することを目的とした。

## 【第2章：時間課題における運動計画の最適性と利得関数形状との関係】

第2章では、対称か非対称かという利得関数の形状と、意思決定の合理性との関係を検討した。本章では時間的な運動計画を要する一致タイミング課題を用いた。この課題では、光刺激提示後の反応時間によって得られる利得が決められた。非対称な利得関数条件では、反応時間が2300 msの参照時間に近づくほど利得が高くなるが、2300 msを越えると0点(失敗)となった(図1A)。実験参加者は、100試行の期待得点を最大化するためにいつ反応するかという意思決定が求められた。得られた個人の反応分散を基に、ベイズ決定理論を用いて、期待得点が最大となる最適な平均反応時間を推定した。この最適な平均反応時間は、反応分散が大きくなるほど、参照時間から遠ざかる(図1B)。最適な反応時間と実際の平均反応時間が一致した場合、リスク中立的で最適な方略を取っていると解釈できる。一方で、実際の平均反応時間が、最適反応時間よりも参照時間の近くに位置した場合、自身の反応分散に見合わないリスク志向的な方略を取っていると解釈できる。参照時間から遠くに位置した場合は、リスク回避的な方略を取っていると解釈できる。実験の結果、参加者の平均反応時間は、参照時間の近くに位置していた(図1B)。一方で、参照時間から $\pm 400$  ms 区間内に反応できれば利得が得られる、対称な利得関数条件では、解離は見られなかった。以上の結果から、より高い利得と失敗のリスクが隣り合う利得関数下では、時間的な運動計画が最適とならないことが明らかとなった。

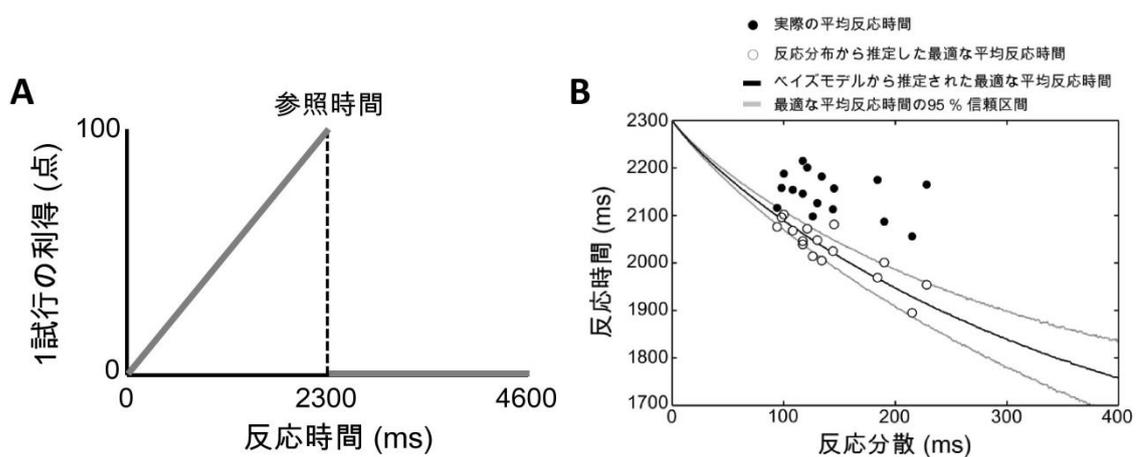


図 1. (A) 実験に用いた利得関数. (B) ベイズモデルの予測と実際の行動.

## 【第3章：空間的な課題における非対称な利得関数下での運動計画】

第3章では、第2章で確認された傾向が、時間的課題に特異的なものなのか否かを検討した。本章では空間的な運動計画を要するゴルフパッティング課題を用いた。この課題では、パットしたボールの停止位置が2mの参照ラインに近づくほど高い利得が得られた。一方で、参照ラインを越えて停止すると0点となった。実験の結果、ゴルフパッティング課題においても、参加者はリスク志向的な方略を取る傾向が見られた。すなわち、非対称な利得関数下では、時間的か空間的かという運動計画の種類に関わらず、意思決定は非合理になりうるということが明らかになった。

#### 【第4章：9日間の練習による非最適な運動計画への学習効果】

第2章と第3章で確認された傾向は、100 試行または 30 試行の課題遂行時の結果であった。しかし、繰り返し練習することにより、自身の分散に適したリスク中立的な方略は獲得される可能性がある。そこで、第4章では、9 日間・計 2250 試行の学習実験を行い、リスク感受的な方略に対する学習効果を検討した。参加者は、図 1A の利得関数の下、50 試行で構成される 1 ブロックの練習を、1 日に 5 ブロック計 9 日間実施した。実験の結果、1 日目から 4 日目にかけて、反応分散は徐々に低下する傾向が見られた。すなわち、反応が正確になるという意味での学習は確認された。一方で、1 日目にリスク志向的方略もしくはリスク回避的方略を取った参加者は、9 日目にも同じ方略を取る傾向が確認された (図 2)。よって、自身の分散に適した最適方略を獲得するという意味での学習は難しいことが明らかになった。本章では、参加者のパフォーマンスのフィードバックとして、各試行での反応時間とその利得を提示していた。本課題において最適方略を獲得するためには、各試行の反応時間を観察から自身の反応分散を推定し、推定した反応分散を基に、次の狙い場所を更新する必要がある。本結果は、このような狙い場所の学習は、各試行の運動結果のフィードバックのみでは、成立することが難しいことを示唆している。

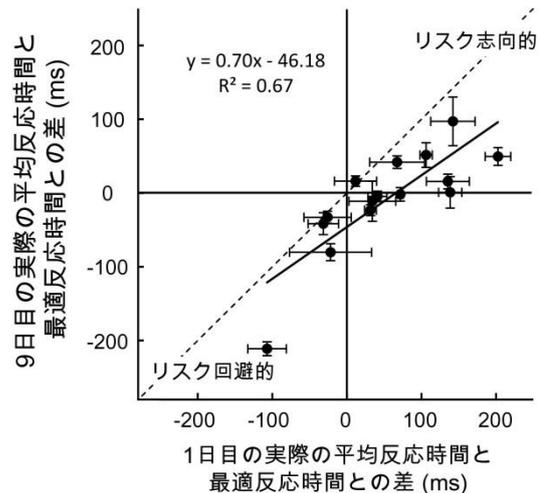


図 2. リスク感受的な方略への学習効果。

#### 【第5章：運動誤差に関する正確な知識が運動計画に及ぼす影響】

狙い場所の学習が成立することが困難な理由の1つとして、記憶容量の限界のため、各試行の運動結果を基に、自身の反応分散を正確に推定することが難しいため、という可能性が考えられる。そこで、第5章では、反応分散に関する正確な知識を持つことにより、リスク感受的な方略が改善されるかを検討した。この実現のため、本章では腕の伸展課題を用いて、各ブロックの終わりに動作の到達終点を提示した (図 3)。参加者は、この到達終点分布を視認することにより、自身の動作分散に関する正確な表象を持つことができた。実験では、図 1A と同じ非対称な利得関数を用いた。参加者は到達点分布のフィードバックがある群と、ない群に分けられた。両群とも 1 日目には、到達点分布のフィードバックがない条件で、課題を 7 ブロック (1 ブロックにつき 50 試行) 行った。2 日目にも課題を 7 ブロック行ったが、フィードバックがある群には、ブロックが終わるごとに、その全ての到達点が提示された。実験の結果、フィードバックがない群では、1 日目と 2 日目のリスク志向性は維持され、一致タイミング課題と同様の結果となった。一方で、フィードバック群においても、少数の参加者を除き、リスク志向性は維持され、到達点分布のフィードバックがあっても、リスク中立的な方略の獲得が難しいことが確認された。この結果は、運動

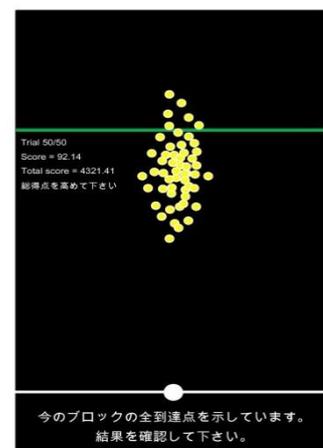


図 3. 到達点(黄色点)分布を視覚化。

分散を正確に推定するための記憶容量の限界よりも、高利得と失敗のトレードオフを考慮し、全体の期待値を最大化する狙い場所を見つけ出すための計算容量の限界が、最適な狙い場所の学習の成立を妨げていることを示唆している。

### 【第6章： 両側の背外側部前頭前皮質への経頭蓋直流刺激によるリスク感受的行動の修飾】

以上の結果から、非対称な利得関数の下での人の運動意思決定はリスク感受的になりうるということが明らかになった。しかしながら、運動意思決定におけるリスク感受性にどの脳領域が関与するかは未だ不明である。そこで、第6章では、背外側部前頭前皮質がリスク感受的な運動意思決定に関与する可能性を検討した。右側の背外側部前頭前皮質は、魅力的な選択肢を取る衝動的な行動を抑制する役割を担っている(Fecteau et al., 2007)。この部位の興奮性を経頭外直流装置の陽極刺激によって高めることで、煙草の摂取量(Fecteau et al., 2014)などが低下することが確認されている。そこで、本章では、1)右側に陽極・左側に陰極刺激、2)右側に陰極・左側に陽極刺激、3)偽刺激の条件を設け、同一参加者に3つの刺激条件のもとで一致タイミング課題を実施させた。参加者は1日に2ブロック刺激前と刺激中に、図1Aと同じ利得関数のもと課題を実施した。刺激間隔は1週間とした。実験の結果、2日目か3日目に右側陽極・左側陰極刺激を受けた参加者において、刺激前と偽刺激に比べ、右側陽極・左側陰極刺激によりリスク志向的な方略が減少する傾向が確認された(図4)。

また、実際の平均反応時間においても同様に、右側陽極・左側陰極刺激によって減少し、狙い場所をより参照時間よりも手前にする傾向が見られた。すなわち、右側と左側の背外側部前頭前皮質の興奮性水準のバランスが、リスク感受的な運動の意思決定に関与する可能性が示唆された。

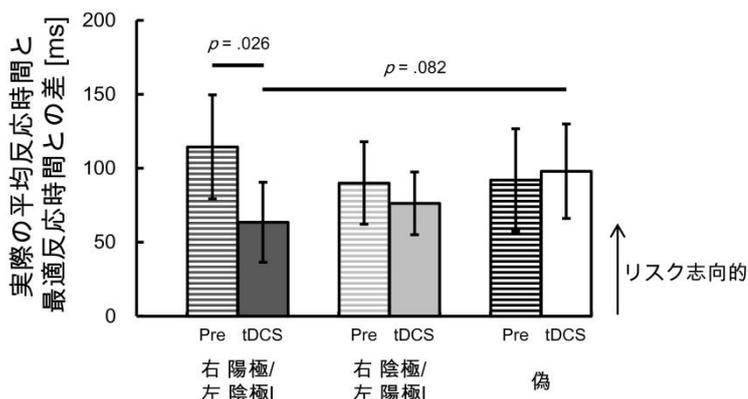


図 4. 経頭外直流刺激のリスク感受性への修飾。

### 【第7章： 総合論議】

以上の研究から、本博士論文では、より高い利得と失敗のリスクが隣接した状況では、必ずしも計算論的に合理的な運動意思決定が達成されるわけでないことを示した。また、この理由として、動作分散を正確に把握することの困難さよりも、最適な狙い場所を見つけ出すための計算過程の困難さが関与すること、衝動性の抑制を担う背外側部前頭前皮質が関与することを示した。これらの研究結果は、適切な運動目標をいかに設定するかという要因が運動スキル学習の大きな制約になっていることを明らかにしたものであり、今後はこの制約を克服する方法を検討することによりスポーツ・運動の学習時の指導方法の開発に貢献できると期待できる。