

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K12023

研究課題名(和文) 時間予測による報酬刺激処理の調節メカニズム - 脳機能計測と計算論的手法による検討 -

研究課題名(英文) The mechanisms underlying the effects of temporal prediction on reward processing: Investigations using brain measures and computational modeling.

研究代表者

木村 健太 (Kimura, Kenta)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究グループ長

研究者番号：40589272

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、脳機能計測と計算論的手法を組み合わせた包括的な研究アプローチにより、時間予測が報酬刺激処理を調節する認知神経科学的メカニズムを明らかにすることを目的とした。一連の研究により、1) 報酬刺激処理は行動-結果間の遅延時間の分布に基づき形成される時間予測により調節されること、2) 手がかりによる時間予測の向上が報酬刺激処理の減衰を復調すること、3) 時間予測による報酬刺激処理の変調が学習パラメータに影響することが分かった。これらの研究結果から、経験により形成される時間予測が報酬刺激処理とそれに基づく学習行動の基盤となることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時間予測が報酬刺激処理とそれに基づく学習行動の基盤となることを示した本研究の成果は、基礎から応用に広がる意義をもつ。はじめに、基礎的な観点から、学習行動における時間的近接性のみを重視する従来の考えに対して、本研究は行動-結果間の時間情報がより積極的に利用されていることを示し、学習行動における新たな心理学的モデルを提案した。次に、本研究で明らかにした時間予測と学習の関連性の知見は、インタフェースデザインなどに応用展開することで、学習を促進する情報提示方法・デバイスの開発等につなげることができる。応用展開のための基礎的知見とモデルを提案したことは、社会的貢献につながる本研究成果である。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to elucidate the cognitive and neurophysiological mechanisms by which temporal prediction modulates reward processing through a comprehensive research approach combining brain measurement and computational methods. In a series of studies, we found that 1) reward processing is modulated by temporal prediction, which is formed based on the distribution of delay times between actions and outcomes, 2) cue-induced enhancement of temporal prediction restores the decay of reward processing, and 3) the modulation of reward processing by temporal prediction affects learning parameters in reinforcement learning model. These results suggest that temporal predictions is essential for reward processing and reward learning behavior.

研究分野：感情心理学

キーワード：報酬 学習 時間予測 脳 行動モデリング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトを含む生物は、自らの行動に伴う外環境からの結果の良し悪しを評価し、良いと評価された行動を続けて悪いと評価された行動は止める。ここで、行動と結果を隔てる“時間”は行動結果の処理に影響する。事象関連脳電位の中で報酬刺激の処理を反映する報酬陽性電位 (Reward Positivity, RewP) は、ギャンブル課題における金銭結果呈示の遅延に伴い振幅が減衰する (Peterburs et al., 2016)。これらは、行動と結果を隔てる時間が短いほど報酬刺激処理は促進するという近接性の原理を表す。

近年、報酬刺激が行動の直後に与えられる場合であっても、報酬刺激の呈示される時間が予測できないときには RewP が減衰することが報告されている (Kimura et al., 2016)。これは、遅延時間の履歴に基づき形成される時間予測が報酬刺激の処理を調節することを示す。このことは、近接性の原理で考えられてきた以上に、行動 - 結果間の時間情報が報酬刺激の処理に積極的に利用されていることを示唆する。では、行動 - 結果間の時間情報は報酬刺激処理にどのように利用されているのだろうか？本研究は、これを主要な問いとして研究課題を提案した。

### 2. 研究の目的

このような研究背景に基づき、本研究は、脳機能計測と計算論的手法を組み合わせた包括的な研究アプローチにより、時間予測が報酬刺激の処理を調節する認知神経科学的メカニズムを明らかにすることを目的とした。また、研究成果をもとに以下を目指すことを目的とした。

(1) 新しい行動変容メカニズムの提案：即時強化に代表されるように、行動と報酬は時間的に近接すればするほど後の行動変容が生じやすいと考えられてきた。本研究は時間的近接性のみを重視する従来の考えに対して、行動 - 結果間の時間情報は積極的に利用されて行動と報酬の結びつきを調節するという新しい行動変容メカニズムを提案することを目指す。

(2) 脳機能計測から計算論的モデルまで包括的な研究アプローチを利用する：本研究では、脳波 (EEG)・事象関連脳電位 (ERP)、機能的 MRI (fMRI) などの脳機能計測に加え、計算論的モデルによる行動のモデルベース解析を用いる。本研究の包括的な研究アプローチは、報酬刺激の処理過程から価値の計算過程までさまざまな段階のメカニズムの検討を可能にし、行動変容の背後にある認知神経科学的メカニズムを研究する新しい手法の提案を目指す。

(3) 研究成果のさまざまな分野への展開：本研究では、報酬刺激処理や行動変容についての基礎的な知見を提案することを目指す。報酬刺激の処理は、生物の行動変容を生じる根源的機能である。このため、本研究の知見は動物の学習研究、臨床研究、インタフェースデザイン、発達研究等、幅広い分野へ応用することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、報酬学習課題を行っている際の行動データ、生体計測データを取得・解析する研究方法を基盤とした。時間予測は、行動 - 結果間の遅延時間の履歴に基づき形成されることが分かっている。しかし、どのような遅延時間の履歴がどのように報酬刺激処理を調節するのかは明らかではない。そこで、報酬学習課題において行動 - 結果間の遅延時間の分布を実験的に操作し、遅延時間の履歴がどのように報酬刺激処理を調節するのかを明らかにする実験操作手法を用いた。これにより、報酬刺激の時間予測が報酬刺激処理と選択行動に及ぼす影響を明らかにする。

### 4. 研究成果

本研究の研究成果は以下のとおりである。

#### (1) 報酬刺激処理は行動 - 結果間の遅延時間の分布に基づき調節される

行動 - 結果間の遅延時間の分布が報酬刺激の処理に及ぼす影響を検討した。具体的には、金銭結果の遅延時間の起点と頻度を操作した 2 つの実験を実施し、両実験において報酬刺激の処理を反映する事象関連脳電位である RewP を計測した。遅延時間の起点を操作した実験では、行動から金銭結果呈示の時間分布の起点が早い場合 (図 1 Early Mixed 条件: 0 ms, 500ms, 1000 ms) と遅い場合 (図 1 Late Mixed 条件: 500 ms, 1000 ms, 1500 ms) を比較した。その結果、両条件において、時間分布の中で最も短い遅延時間のときに RewP は減衰した (図 1)。このことは、遅延時間を経験することで形成される時間予測は、履歴の分布に依存した形で条件付き確率として発達し、報酬刺激処理に影響することを示唆する。一方、遅延時間の頻度を操作した実験では、行動から金銭結果呈示の時間間隔が早い場合 (0 ms) と遅い場合 (1000 ms) を設定し、早い場合が全試行の 80 %、遅い場合が全試行の 20 % の条件と頻度が反対の条件を比較した。その結果、時間間隔の分布に応じて RewP の振幅値は変化した。このことから、報酬刺激の処理が遅延時間の頻度に基づき柔軟に調節されていることを示すことができた。

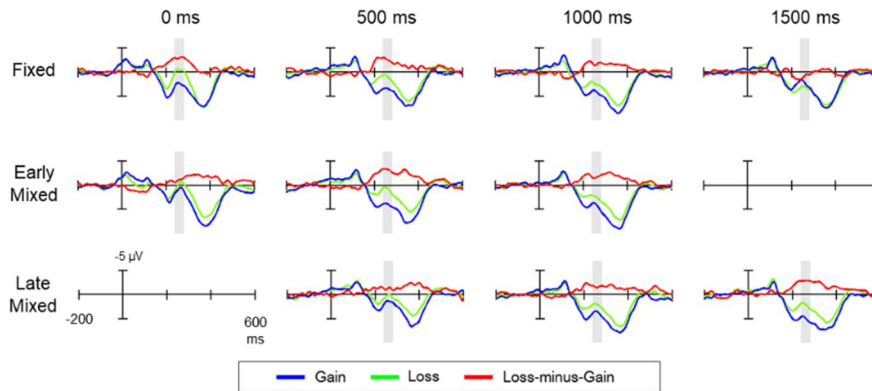


図1 RewP (灰色塗部分) の遅延時間分布による変調

(2) 手がかりによる時間予測の向上は報酬刺激処理の減衰を復調する

(1)の研究により、時間予測の欠如が報酬刺激処理を減衰することが明らかになった。これに対して、時間情報を手がかりとして時間予測を向上することが報酬刺激処理の減衰を復調するか否かを検討した。このため、選択行動が視覚的な金銭結果(報酬、罰)を生起する報酬学習課題において、選択行動と金銭結果の間の遅延時間を6秒に設定した時間予測不能条件、遅延時間は6秒だが1秒ごとに音刺激が提示される時間予測可能条件を設定し、時間予測の有無がRewPに及ぼす影響を検討した。その結果、時間予測可能条件では、時間予測不能条件に比べて、金銭結果提示時のRewP振幅が大きく、視覚情報処理を反映する初期成分は条件間に差がなかった。このことは、外部の手がかり情報による時間予測の向上は報酬刺激処理の減衰を復調することを示すとともに、時間予測は報酬刺激に対する情報処理の入力段階というよりは、よし悪しの評価処理段階に影響を及ぼすことが分かった。

(3) 時間予測による報酬刺激処理の変調が学習パラメータに影響する可能性の発見

時間予測による報酬刺激処理の変調が報酬学習行動に及ぼす影響を検討することを目的とした。このため、報酬学習課題において遅延時間中に時間予測を高める手がかり刺激を提示することで、報酬刺激の処理を促進する操作を行い、その際の行動データを解析した。その結果、手がかり刺激の提示により時間予測は向上するものの、学習行動は影響を受けなかった。このことは、時間情報が報酬刺激処理へ及ぼす作用と学習行動に及ぼす影響には異なる認知・感情的メカニズムが関与している可能性を示唆する。一方、学習行動そのものには影響しないものの、時間予測が強化学習モデル等で表現されるモデルパラメータに対して影響を及ぼす可能性がある。この可能性を検討するため、報酬学習中の選択行動の時系列データをシミュレーションにより生成し、出力データに対して強化学習によるモデルベース解析を用いることで、各種モデルを定量的に比較する計算論的手法を構築した。この手法を報酬学習における行動データに適用したところ、時間予測を取り入れたモデルの説明率が高いことを確認した。これらのことから、時間予測による報酬刺激処理の変調が学習パラメータに影響を及ぼす可能性を示すことができた。

(4) 時間予測と心臓の周期的活動の相互作用についての探索的検討

時間予測は脳活動だけではなく心拍数の低下をもたらすなど、身体の内部状態に影響を及ぼす。近年、心臓の周期的活動が感情処理に影響を及ぼすことが報告されている。このことは、報酬刺激処理が心臓の周期的活動の影響を受ける可能性を示唆する。そこで、本研究で取得したデータを再解析することで、RewPと心臓の周期的活動の関連性について探索的に検討した。その結果、心臓の収縮期に報酬が提示されたときには、拡張期に提示されたときよりもRewP振幅が増幅していることが分かった。このことは、報酬学習中に自然なゆらぎを生じる心臓の活動が時間予測と交互作用することで学習に影響を及ぼしていることを示す。この探索的検討により、時間予測が報酬刺激処理に及ぼす影響の理解には、脳だけではなく身体を含めた理解が必要であることが分かった。

<引用文献>

Peterburs, J., Kobza, S., & Bellebaum, C. (2016). Feedback delay gradually affects amplitude and valence specificity of the feedback related negativity (FRN). *Psychophysiology*, 53(2), 209-215.

Kimura, K., Kimura, M., & Iwaki, S. (2016). Temporal prediction modulates the evaluative processing of "good" action feedback: An electrophysiological study. *Psychophysiology*, 53(10), 1552-1559.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 Kenta Kimura	4. 巻 711
2. 論文標題 Cardiac Cycle Modulates Reward Feedback Processing: An ERP Study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Neuroscience letters	6. 最初と最後の頁 134473
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neulet.2019.134473	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木村健太
2. 発表標題 The association between the biological responses to psychological stress and decision-making in humans
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村健太、木村元洋
2. 発表標題 時間文脈に基づく予測は行動結果の評価的処理を調節する -事象関連脳電位を用いた検討-
3. 学会等名 第36回 日本生理心理学会大会
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------