



Action-rule-based cognitive control enables efficient execution of stimulus-response conflict tasks: a model validation of Simon task performance

大谷, 啓尊

(Degree)

博士 (保健学)

(Date of Degree)

2024-03-25

(Date of Publication)

2025-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8901号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490126>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(様式3)

論文内容の要旨

専攻領域 リハビリテーション科学領域

専攻分野 健康情報科学

氏 名 大谷 啓尊

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を () を付して併記すること。)

Action-rule-based cognitive control enables efficient execution of stimulus-response conflict tasks: a model validation of Simon task performance (行動ルールに基づく認知制御は刺激反応競合課題の効率的な実行を可能にする: サイモン課題のパフォーマンスによるモデル検証)

論文内容の要旨 (1,000字～2,000字でまとめること。)

人間の脳は、認知負荷を最小限に抑えてタスクパフォーマンスを最適化するために行動ルールを柔軟に変更できる。この柔軟性を示すために、本研究では Action-rule-based cognitive control model (ARC モデル) を構築した。本研究で使用する刺激競合課題のうちサイモン課題は、文字情報(「L」/「R」)と空間情報(左側/右側)の2つ属性(4通りの情報)をもち、文字で提示された側の反応表出を要求される刺激競合課題である。文字と空間情報が整合する場合は反応が定まるが、不整合の場合は競合が発生する。従来モデルでは、空間情報に従って不可避な自動応答が出現し、文字と空間情報の競合を解消しなければならず、認知負荷が高いという問題があった。

提案する ARC モデルは、文字と空間情報の整合/不整合という2通りの情報に集約することで、整合した刺激のときは空間情報に従いそのまま応答する、不整合では左右反転させて応答するという単純なルール化に基づきタスクゴールを達成できる。タスクゴールへの自動応答を利用しているため、競合解消といった認知処理が回避でき、認知負荷も軽減される。ARC モデルは、自由エネルギー原理の能動的推論と一致する確率論的枠組みに基づいており、背側前部帯状回(dACC)によって制御される概念的脳ネットワークシステムと組み合わせている。不整合を検知した場合は応答を反転させるという能動的推論において、整合性が成立するとシャノンサプライズ項が最小になるため、dACC の意思決定のもとで適切な行動選択が可能である。本研究の目的は ARC モデルの妥当性を証明し、その有効性を明らかにすることであった。

健常若年者 17 名を対象に、ステップ動作によるサイモン課題を用いてモデル検証を行った。提示刺激は、文字情報(「左」または「右」)と空間情報(画面の左側か右側に文字を提示)を組み合わせた 4 パターンで構成された。提示刺激は、立っている被験者の前方に設置されたディスプレイに表示され、被験者は提示刺激に従い左足または右足を前方に素早く踏み出すよう指示された。理論的予測の証明のために、3 軸加速度計、脳波計、筋電図計を用いてサイモン課題における行動パフォーマンスと脳機能応答を評価した。

腰部の加速度左右成分では、文字情報と空間情報の整合・不整合の刺激種別を問わず空間情報に従って出現するステップ動作時の初期反応(APA)が観測された。下腿部の筋電図計測では、運動表出に伴う支持側とステップ側の筋電図活動を評価したところ、整合刺激ではステップ側の筋電図波形の速やかな立ち上がりを読めた。不整合刺激では刺激後 200ms まで支持側の筋電図活動が優位であったが、以降に修正された波形が観測された。脳波計測による Cz 領域の事象関連電位(ERP)では、刺激の整合性検出を反映する P200(200~350ms)と文字認識にかかわる P300(300~400ms)を評価した。整合・不整合刺激間で P200 の振幅に有意差を認め、整合・不整合の検出は P200 に反映されていた。P300 は刺激の整合・不整合に関係なく出現しており、この時点で意識的な文字認識に至っていると考えられた。さらに、事象関連深部脳活動法(ER-DBA)による意思決定に関わる背側前部帯状回のダイナミクス評価では、不整合刺激は整合刺激よりも dACC の脱賦活が大きく、認知負荷の大きさを反映していた。さらに整合・不整合刺激ともに約 300ms 付近で脱賦活の解消が観測されており、この時点で、トップダウンで意思決定していることが明らかとなった。

APA は空間的情報により誘導されるが、P200 で無意識に違和感として知覚される。この APA に反転操作を行うという脳の能動的推論に対して、P200 で知覚された違和感が解消され、意思決定に移行していた。つまり、身体反応を利用して左右を知覚するとともに刺激に対する整合性も同時に知覚し、反応自体を修正しているのである。dACC は背側系(空間情報処理)と腹側系(文字形態処理)の情報が運動前野で統合され、predictive coding としてタスクゴールと整合することで、脱賦活を解消し意思決定に至っているものと考えられた。本研究は、自由エネルギー原理における能動的推論に基づき ARC モデルを構築し、刺激反応競合課題(サイモン課題)により検証した。これにより、人間の脳は、負荷の高いトップダウンの論理的思考と身体化認知によるボトムアップの知覚を統合することで、柔軟にルールを変更し認知負荷をかけずに高速かつ正確に課題を遂行する能力があることを初めて実証した。

指導教員氏名：古和 久朋

(別紙1)

論文審査の結果の要旨

氏 名	大谷 啓尊		
論文題目	Action-rule-based cognitive control enables efficient execution of stimulus-response conflict tasks: a model validation of Simon task performance (行動ルールに基づく認知制御は刺激反応競合課題の効率的な実行を可能にする: サイモン課題のパフォーマンスによるモデル検証) (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)		
審査委員	区分	職 名	氏 名
	主 査	教授	古和 久朋
	副 査	教授	橋本 健志
	副 査	准教授	林 敦子
	副 査		印
要 旨			
<p>人間の脳は認知負荷を最小化することでタスクのパフォーマンスを最適化するために行動ルールを柔軟に変更することができる。この柔軟性を示すために申請者は行動ルールに基づく認知制御 (ARC) モデルを提案した。ARCモデルは、自由エネルギー原理の能動的推論と整合的な確率的フレームワークに基づいており、背側前帯状皮質 (dACC) によって制御される概略的な脳ネットワークシステムと組み合わせることで、ARCモデルの妥当性を実証するためのいくつかの仮説を構築した。この検証のため重要な記号情報 (「左」または「右」とラベル付けされた足のイラストで「左」は左足、「右」は右足の動きを要求する) と、無関係な空間情報 (イラストが実際に左足か右足か) の間の一致・不一致を含むステップ運動サイモン課題を開発し、健常若年者を対象に3軸加速度計、脳波計、筋電図計を用いて評価した。その結果、課題反応と事象関連深部脳活動 (ER-DBA) 測定を組み合わせることで、このプロセスにおけるdACCの重要な寄与が示され、dACCが無関係な急速な予測的姿勢適応を内部的に逆転させることで、自由エネルギー式のシャノンサプライズ項を減少させることができるという主要な予測の証拠が得られた。以上から、人間の脳は、負荷の高いトップダウンの論理的思考と身体認知によるボトムアップの知覚を統合することで柔軟にルールを変更し認知負荷をかけずに高速かつ正確に課題を遂行する能力があることを初めて実証した。よって学位申請者の大谷 啓尊氏は、博士 (保健学) の学位を得る資格があると認める。</p>			
掲載論文名・著者名・掲載 (予定) 誌名・巻 (号), 頁, 発行 (予定) 年を記入してください。 Action-rule-based cognitive control enables efficient execution of stimulus-response conflict tasks: a model validation of Simon task performance. Otani Y, Katagiri Y, Imai E, Kowa H. Front Hum Neurosci. Nov 16;17:1239207, 2023. doi: 10.3389/fnhum.2023.1239207.			