

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月27日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22300092

研究課題名（和文） 推論の複雑性に関する圏論的アプローチ

研究課題名（英文） A category theory approach to the complexity of reasoning

研究代表者

Phillips Steven (PHILLIPS STEVEN)

独立行政法人産業技術総合研究所・ヒューマンライフテクノロジー研究部門・主任研究員

研究者番号：40551700

研究成果の概要（和文）：本研究は認知課題難度の背景にある神経生理学的プロセスを特定する目的で行われた。圏論における直積あるいは直和によって定義される課題難度が神経生理学的なレベルにおける前頭－頭頂間同期性に対応しているという仮説を立て、それを検証する実験を行った。その結果、視覚探索課題における標的定義次元数（直積の引数）やカテゴリ判断課題におけるオブジェクトのパーツ数（直和の引数）が増加するに伴って、前頭－頭頂間同期性が強くなることが示された。

研究成果の概要（英文）：The aim of the present study was to investigate the neurophysiological processes underling cognitive task difficulty. We empirically tested the hypothesis that cognitive task difficulty, which could be defined as (co)product arity in the category theoretical approach, corresponds to greater frontal-parietal synchrony at the neurophysiological level. The results demonstrated that frontal-parietal synchrony increased with increasing the number of target defining dimensions in a visual search task (i.e., product arity) and the number of parts to be integrated in a categorization task (i.e. coproduct arity).

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2012年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	12,600,000	3,780,000	16,380,000

研究分野：数理科学、認知科学

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：推論、圏論、脳波、位相同期性、前頭－頭頂皮質、特徴統合

1. 研究開始当初の背景

ヒトの推論能力に関するこれまでの圏論的研究において、課題遂行に必要となる直積または直和の引数が認知課題の難度を決定する一般的要因として存在する可能性が示されていた（Phillips et al, 2009. *PLoS Computational Biology*, 6(7), e1000858）。圏

論における直積（あるいは直和）とは、複雑なオブジェクトを複数の要素に分解（あるいは複数の要素から統合）する手続きを指している。すなわち、1次元、2次元、および3次元の直積（直和）を必要とする認知課題とは、それぞれ1つ、2つ、3つの要素で構成されているオブジェクトに対する解を求め

ることを意味している。例えば、子供を対象とした推論能力の研究では、5歳以上の子どもは2次元の直積（あるいは直和）を必要とする課題を遂行することができるが、5歳以下の子どもではそれができないことが示されていた。

一般的な視覚課題においても複数の要素の統合が必要とされる。例えば、視覚探索課題において複数の特徴次元（色、空間周波数、方位など）の結合によって標的が定義されている場合、参加者はそれらの要素の直積を行う必要がある。このような視覚探索課題において、サルを対象にした研究では、ポップアウト探索条件（直積を必要としない）と比較して、結合探索条件（2次元の直積を必要とする）において前頭-頭頂間でより高い同期性が見られたと報告されていた（Buschman & Miller, 2007. *Science*, 315, 1860-1862）。また、ヒトを対象とした同様の実験においても、頭皮上脳波の前頭-頭頂間位相同期性（phase-locking value, PLV）が強くなることが示されていた（Phillips & Takeda, 2009. *International Journal of Psychophysiology*, 73, 350-354）。

2. 研究の目的

本研究の目的は、圏論における直積あるいは直和によって定義される計算論的/認知的課題難度が神経生理学的なレベルにおける前頭-頭頂間同期性に対応しているという仮説を検証することであった。

3. 研究の方法

(1) 研究1（視覚探索実験）

本実験では、圏論における直積の引数が前頭-頭頂間同期性に反映されるという仮説の検証を行った。実験参加者は特定の色、方位、空間周波数で定義された標的を探索することを求められた（図1）。仮説が正しければ、同時に提示される妨害刺激に対する標的の定義次元数（すなわち直積の引数）の増加に伴って、前頭-頭頂間同期性が增強されると考えられる。

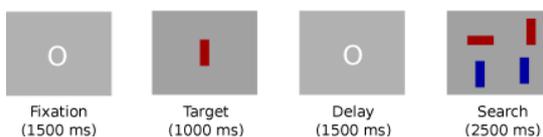


図1 視覚探索課題における1試行の刺激提示例。

実験参加者 17名の大学生および大学院生が本実験に参加した。

刺激 刺激はすべて灰色の背景上に表示された。各試行の最初に画面中央に注視点（白丸）が1500ms提示され、次に画面中央に標的刺激が提示された。その後、再び注視

点が1500ms提示された後、探索画面が2500ms提示された。探索画面は、4本の線分（1つの標的刺激と3つの妨害刺激）から構成されており、各線分は画面の左上、右上、左下、右下の位置に提示された。各試行の探索画面の標的および妨害刺激の特徴は、圏論における直積の引数（1次元、2次元、3次元）に基づいて操作された（図2）。これらのうち1次元で標的の同定が可能な場合は圏論における直積の操作を必要としないが、2次元または3次元の特徴の結合が必要な場合には、それぞれ引数2または3の直積を必要とした。各特徴次元は4つの特徴値をもっており、色次元は「赤」、「緑」、「青」、「黄」、空間周波数次元は刺激のギャップ数「0個」、「1個」、「2個」、「3個」、方位次元は「0度」、「45度」、「90度」、「135度」で構成された。標的刺激と妨害刺激の種類や標的の提示位置は、各試行でランダムに選択された。

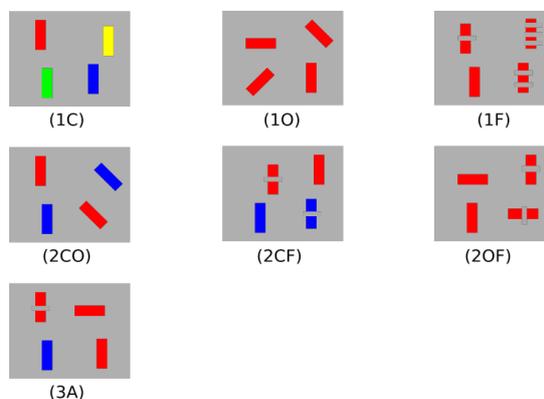


図2 標的を「赤」「垂直」「ギャップ数0」の結合とした場合の各条件の刺激例。

手続き 課題は探索画面から標的を探し出し、できるだけ早くかつ正確に標的の提示位置に対応したキーを押すことであった。本実験では、標的定義次元ごとにブロック化し、全体で540試行実施した。脳波は両耳の平均電位をリファレンスとして、国際10-20法におけるFp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2の19部位から計測した。

(2) 研究2（カテゴリ判断実験）

実験1では、視覚探索課題における直積の引数（標的を定義している特徴の次元数）を系統的に操作し、前頭-頭頂間の位相同期性が引数の増加に応じて強くなるという仮説のもとに実験を行った。そこで、本実験2では、認知課題における直積と直和の双対原理を確認するため、カテゴリ判断課題を用いて直和の引数を系統的に操作し、前頭-頭頂間PLVとの関係性を検討した。

実験参加者 26名の大学生および大学院

生が本実験に参加した。

刺激 刺激はすべて灰色の背景上に表示された。各試行の最初に画面中央に注視点（白丸）が150ms呈示され、次に画面中央にシルエット画像が2000ms提示された。シルエット画像として、128種類の乗り物画像および128種類の非乗り物画像が用いられた。シルエット画像のオブジェクトがそのまま提示される条件（unary）、空間的に2つに分割して提示される条件（binary）、および3つに分割して提示される条件（ternary）が設定された（図3）。これらのシルエット画像を一つのオブジェクトとして認識する過程を圏論に基づいて表記すると、分割された個数は直和の引数（1、2、3）とそれぞれ対応しており、2個あるいは3個に分割された刺激を判断するには画像を結合する（直和を求める）必要があった。

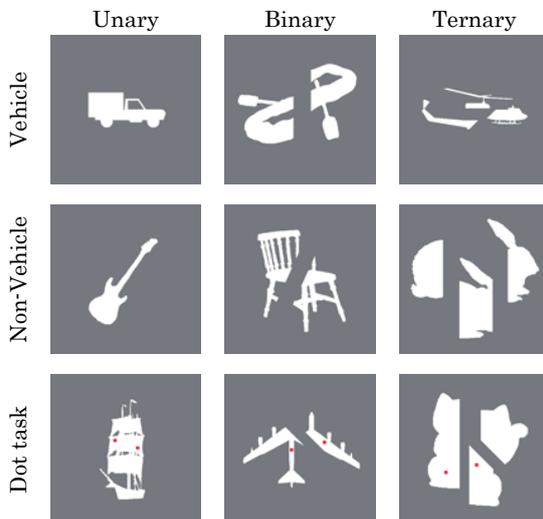


図3 カテゴリ判断課題で用いたシルエット画像の例。

手続き 課題は提示された画像が乗り物か否かを判断し、できるだけ早くかつ正確に二肢選択でキー押し反応することであった。また、統制課題として、カテゴリ判断課題と同じシルエット画像上に赤いドットを2つ提示し、左右いずれのドットが上にあるのかを選択反応する課題も行った（図3下段）。このドット課題の遂行にはシルエット画像のパーツを結合する必要がないことから、直和のプロセスは含まれないと考えられた。カテゴリ判断課題およびドット課題のそれぞれについて、256画像（乗り物128画像＋非乗り物128画像）×3分割条件の768試行を実施した。脳波は両耳の平均電位をリファレンスとして、国際10-20法におけるFp1、Fp2、F7、F3、Fz、F4、F8、T3、C3、Cz、C4、T4、T5、P3、Pz、P4、T6、O1、O2の19部位から計測した。

4. 研究成果

(1) 研究1（視覚探索実験）

視覚探索実験では、同時に提示される妨害刺激に対する標的の定義次元数（すなわち直積の引数）の増加に伴って、低 γ 帯域（30-38 Hz）の前頭-頭頂間同期性を表すPLVが探索画面提示後175-250 ms区間で増強されることが確認された（Phillips, Takeda, & Singh, 2012. PLoS ONE, 7(3), e32502）。この周波数×時間における直積の引数とPLVの相関プロットを図4に示す。

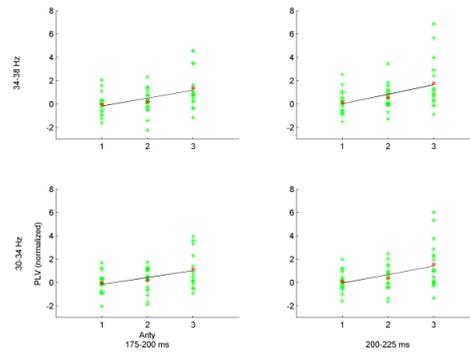


図4 直積の引数に対応したPLVの変化。

ここで認められたPLVと直積の引数との関係について、同期性が直積のプロセスそのものを反映しているのかを確かめることは本研究の目的にとって重要である。そこで、課題の遂行に要する時間など、直積プロセス以外の課題難度に関わる要因がPLVに反映されている可能性を除外するため、1次元結合（図2における1C、1O、1F）および2次元結合（2CO、2CF、2OF）のうちから3次元結合条件（3A）と正答率・反応時間ともに有意差が認められない条件のみを取り出し、そのデータセットに対して同様の分析を行った。その結果、全データセットを使った場合と同様の周波数×時間帯域で有意な関係性が認められた（図5）。このことは、前頭-頭頂間での同期性が直積プロセスそのものを反映していることを示唆している。

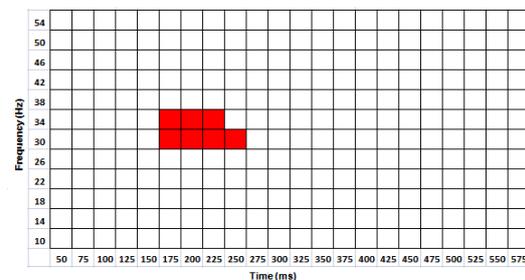


図5 直積の引数の増加に伴ってPLVが有意に増加していた時間-周波数帯域。

(2) 研究2 (カテゴリ判断実験)

カテゴリ判断実験では、シルエット画像のパーツ数(すなわち直和の引数)の増加に伴って、低 γ 帯域(30-34 Hz)の前頭-頭頂間同期性を表す PLV が画像提示後 200-400 ms 区間で増強されることが示された。この結果は課題の誤答率や遂行時間を調整した場合でも同様であったことから、情報の統合(すなわち直和)のプロセスを反映したものであり、認知処理時間や努力など全体的な課題負荷とは独立であると考えられる。また、視覚探索実験の結果と合わせると、認知課題における直積と直和の双対原理が示されたと言える。

(3) 本研究のインパクトと今後の展望

本研究の成果は、認知課題の難度、情報の分解と統合(圏論における直積と直和)、および神経生理学的な同期性の関係について明らかにした初めての証拠であり、複雑な認知についての新しい理解の道筋を示すものである。具体的には、本研究の結果は、ゴール(例えば標的刺激となるオブジェクト表象)がワーキングメモリ(前頭前皮質)に維持され、課題に関連した認知処理が頭頂で行われており、これらの部位間の同期性を分析することで情報の分解・統合のプロセスを評価できる可能性を明らかにした。

圏論における直積や直和は汎用性の高い計算論的原理を基礎としているため、情報統合を必要とする他の認知課題に対しても適用できると考えられる。また、脳領域間の位相同期性は努力や注意資源などの要因を含んでおり、他の認知課題においても利用できる可能性があると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Phillips, S., & Wilson, W. H. (2012). Categorical compositionality III: F-(co)algebras and the systematicity of recursive capacities in human cognition. *PLoS ONE*, 7(4), e35028. doi:10.1371/journal.pone.0035028. 査読有
- ② Phillips, S., Takeda, Y., & Singh, A. (2012) Visual feature integration indicated by phase-locked frontal-parietal EEG signals. *PLoS ONE*, 7(3), e32502. doi:10.1371/journal.pone.0032502. 査読有
- ③ 麻生英樹 (2012)、確率モデルからの記号の創発、人工知能学会誌、27(6)、546-554、査読無

- ④ Phillips, S., & Wilson, W. H. (2011). Categorical compositionality II: Universal constructions and a general theory of (quasi-) systematicity in human cognition. *PLoS Computational Biology*, 7(8), e1002102. doi:10.1371/journal.pcbi.1002102. 査読有
- ⑤ Singh, A. K., Asoh, H., & Phillips, S. (2011). Optimal detection of functional connectivity from high-dimensional EEG synchrony data. *Neuroimage*, 58(1), 148-156. 査読有

[学会発表] (計3件)

- ① Phillips, S., Takeda, Y., & Singh, A. (2012). Phase-locking (synchrony) of frontal-parietal EEG signals associated with visual feature integration. the 35th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (Neuro 2012). September 20, 2012. Nagoya Congress Center (Aichi).
- ② Phillips, S., & Wilson, W. H. (2012). Categorical compositionality continued (further): A category theory explanation for the systematicity of recursive cognitive capacities. the 34th Annual Conference of the Cognitive Science Society. Austin, TX: Cognitive Science Society. August 3, 2012. Sapporo Convention Center (Hokkaido).
- ③ Phillips, S., & Wilson, W. H. (2011). Categorical compositionality continued: A category theory explanation for quasi-systematicity. In L. Carlson, C. Hoelscher, & T. F. Shipley (Eds.), the 33rd Annual Conference of the Cognitive Science Society. Austin, TX: Cognitive Science Society. Boston July 21, 2011. Park Plaza Hotel (USA).

[図書] (計1件)

- ① Phillips, S., & Wilson, W. H. (in press). A category theory explanation for systematicity: universal constructions. In Calvo, P. and Symons, J. (Eds.), *Systematicity and Cognitive Architecture*. MIT Press.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

Phillips Steven (PHILLIPS STEVEN)
独立行政法人産業技術総合研究所・ヒューマンライフテクノロジー研究部門・主任研究員
研究者番号：40551700

(2)研究分担者

武田 裕司 (TAKEDA YUJI)

独立行政法人産業技術総合研究所・ヒュー
マンライフテクノロジー研究部門・主任研
究員

研究者番号：10357410

麻生 英樹 (ASOH HIDEKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能シ
ステム研究部門・上級主任研究員

研究者番号：10344194