

新奇的製品を観察時の脳波から見る ユーザの認知的気づきの神経メカニズム Neural Mechanisms of Cognitive Awareness During Observation of Novel Products: An EEG Study

山田 和佳[†], 上田 一貴[†], 長藤 圭介[†]
Nodoka Yamada, Kazutaka Ueda, Keisuke Nagato

[†] 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
yamada.n@hnl.t.u-tokyo.ac.jp

概要

新奇的製品に対する理解に至るユーザの情報獲得時の認知プロセスを明らかにするため、製品観察中の認知的気づきに伴う脳波を計測した。脳波のマイクロステート解析により、視覚/言語処理、注意、内省、感情の4つの認知プロセスが特定された。これらの認知プロセスは、獲得した気づきの種類によって異なる傾向を持つことが明らかになった。この知見は新奇的製品に対する気づきが多層的な認知プロセスであることを示している。

キーワード：新奇的製品, 認知的気づき, 脳波 (EEG), マイクロステート解析, 瞳孔径

1. はじめに

技術革新により、ユーザが新奇的製品に接する機会が増加している現代において、製品受容における認知的メカニズムの解明は重要な課題である。従来の Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, 1986) は、製品特性とユーザ属性が受容の成否を決定するという静的な説明にとどまり、受容に至るユーザの理解の時間的変化といった動的側面については十分に解明されていない。

著者らのグループでは、新奇的製品に対してユーザが知識を持たない状態から、製品に対する理解を成立させるに至るまでの、情報の獲得プロセスを「気づきプロセス」と命名し、そのモデリングに取り組んでいる。これまでに、獲得される「気づき」の分類モデルを提案し (山田 他, 2023)、インタラクションの進行に伴う気づき獲得の変化についての実験的分析を実施した (山田 他, 2024)。本研究では、気づきプロセスの神経基盤を探索的に明らかにするため、脳波 (EEG) と瞳孔径の同時計測による予備的分析を行った。

2. 実験方法

2.1 参加者

機縁法により募集した20代の男性6名 (平均年齢 24.2 ± 2.2 歳) が参加した。全参加者に対してインフォームドコンセントを実施し、署名による同意を得た。なお、本研究は新奇的製品観察時の認知的気づきに関する神経メカニズムの探索的検討を目的とした予備の実験として設計されており、限定的なサンプルサイズによる詳細な事例分析を通じて今後の大規模研究の方向性を検討することを意図している。

2.2 観察対象製品

事前調査で見たことがない・使用経験がないことを確認した新奇的製品を使用した。製品は手のひらサイズで、透明な筐体により内部構造が観察可能であった。また工具等を使わずに分解・組み立てが可能であった。製品名から使用方法等を予測できないように、実験者からの説明等においては「製品A」と呼称した。

2.3 実験環境と手続き

実験は仕切られた静寂な室内で、参加者1人ずつに対して実施された。参加者の座席正面の机には製品観察用の傾斜台が置かれ、脳波計測装置 (BrainAmp DC・BrainCap, Brain Products 社) と瞳孔径計測装置 (EMR-10, ナックイメーজテクノロジー社) を装着した状態で観察を行った。

参加者から多様な種類の気づきを網羅的に獲得するため、製品観察は以下の4段階で実施された。

1. 静的観察：製品に触れず視覚的観察のみ
2. 動的観察：自由な操作・分解が可能な観察
3. ヒントあり動的観察：用途情報 (「キッチンで使用する」) 提供後の観察
4. 教示あり動的観察：機能情報 (「ペッパーミルである」および使用方法) 説明後の観察

各段階の観察時間は5分を経過後、気づきを思い浮かぶまで観察を継続した。各参加者とも8分以内に各段階が終了した。

参加者には製品に対する気づきを得た際に、iPad と Apple Pencil を用いた筆記記録により報告するよう指示した。

2.4 生理計測と前処理

脳波は、国際 10-20 法に従い全頭をカバーする 32 部位を計測した。サンプリング周波数は 1000 Hz であった。前処理として、1–45 Hz のバンドパスフィルタ、電源ノイズ (50 Hz , 100 Hz) の除去、Artifact Subspace Reconstruction (ASR) 法によるアーティファクト除去 (閾値 15)、独立成分分析 (ICA) と ICLabel アルゴリズムによる非脳波成分の除去を実施した。各参加者について、平均 13.8 ± 1.8 個の脳波関連成分が分析対象として残された。

瞳孔径はサンプリング周波数 60 Hz で記録した。環境光の影響を除去するため、視野の輝度変化を 30 Hz で同時記録し、情感解析プログラム (KIKURA 社) により「注目度」として標準化した。信号の品質向上のため、5 次のメジアンフィルタと 10 Hz のローパスフィルタを順に適用した。

2.5 データ解析

まず、気づきの筆記記録の画面収録データから各気づきの記述時刻を抽出した。各気づきの内容は、FBS モデル (Gero, 1990; Umeda et al., 1990) や価値成長デザインモデル (佐藤・松岡, 2012) を参考に構築した五階層モデルにより、下記の 5 階層に分類した。

- 暮らし：製品使用に対する主観的評価や体験的側面 (価値判断、生活様式への影響認識など)
- 用途：製品機能の社会的・文脈的意味づけ (使用場面、使用者、使用対象など)
- 機能：製品の構造・挙動から直接生じる効果や作用能力
- 挙動：製品の動的特性 (操作に対する反応、状態変化、動作パターンなど)
- 構造：製品の物理的特性 (形状、材質、外観、部品構成など)

次に、瞳孔径データから MATLAB の findpeaks 関数を用いて急激な拡張を示すピークを抽出した。洞察的問題解決において気づき時に瞳孔径の拡大が観察されるとする、Salvi et al. (2020) の知見を参考に、各気づきの記述開始時刻から遡って 10 秒前～1 秒前の時間帯に検出されたピークのうち、最もプロミネンスの大きいピークを、その気づきの認知的気づき獲得時刻と推定した。

推定された気づき獲得時刻を起点として、その 5 秒前から獲得時刻までの脳波データに対してマイクロステート解析を行なった。解析には MATLAB ベースの

EEGLAB プラグインを用いた。k-means 法により、全参加者が獲得したすべての気づきに対応する脳波データを統合して、微小時間における脳波の電位マップをクラスタリングした。同定されたクラス (以下、微小状態クラス) を基に、各階層の気づき獲得時における脳活動パターンを比較した。

3. 結果

3.1 マイクロステート解析による認知プロセスの特定

全参加者の気づき獲得に先立つ 5 秒間の脳活動において共通する 4 つの微小状態クラスが同定された (図 1)。

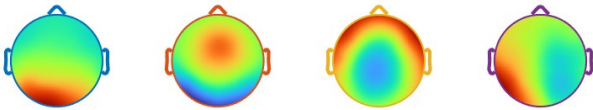


図 1 同定された微小状態クラス (左から A , B , C , D)

先行研究 Tarailis et al. (2024) の知見に基づき、下記のように認知機能が特定された。

- クラス A 内省に関連する頭皮上分布
- クラス B 注意に関連する頭皮上分布
- クラス C 感情に関連する頭皮上分布
- クラス D 視覚情報・言語情報処理に関連する頭皮上分布

3.2 階層別の認知処理特性

微小状態クラスの発生頻度、持続時間、時間占有率の分析をおこなったところ、いずれも微小状態クラスの主効果 ($p < .01$) と気づき階層との交互作用 ($p < .05$) が有意であった。全体的傾向として、すべての指標において 4 つの微小状態クラス間に有意な順序関係が確認された (表 1)。

表 1 気づき獲得時における 4 つの微小状態クラス間の有意差関係

発生頻度	視覚/言語	注意	>	内省	>	感情
持続時間	視覚/言語	>	内省	注意	>	感情
占有率	視覚/言語	>	注意	内省	>	感情

交互作用が有意であったため下位検定を実施した。微小状態クラスごとの下位検定では、内省のクラスの発生頻度においてのみ、気づき分類の単純主効果がみられた ($p < .05$)。多重比較を行なったところ、構造の気づき獲得時において、用途の気づき獲得時より有意に高い活動を示した。

気づき分類ごとの下位検定では、すべての階層において、発生頻度・持続時間・占有率のいずれも、微小状態クラスの単純主効果が確認された ($p < .05$)。特に暮らしの気づき獲得時は全体の傾向と異なり、視覚/言語処理の優位性がみられなかった。暮らしの気づき獲得時の持続時間と時間占有率における多重比較では、内省が感情処理に対して有意に長く・多く活動しており、他のクラス間に有意差が認められなかった。

4. 考察

4.1 階層的気づき獲得の認知的基盤

マイクロステート解析により同定された4つの認知プロセスは、新奇な製品理解が単一の認知事象ではなく、複数の神経基盤を持つ多層的なプロセスである可能性を示唆している。ただし、本研究は6名による探索的検討であるため、以下の解釈は予備的知見として位置づけられる。

全体的に視覚/言語処理が最も活発であった傾向は、製品観察という課題の性質を反映していると考えられる。製品の物理的特性の視覚的知覚とその言語的カテゴリ化が気づきプロセスの中核を担っており、情報獲得から気づき生成、表象への統合までの情報処理において持続的かつ支配的に機能している可能性が示唆された。

構造の気づき獲得時における内省処理の相対的優位性は、新奇な製品理解における「スキーマ活性化」のメカニズムを反映している可能性がある。Bartlett (1932) のスキーマ理論によれば、新しい情報は既存の知識構造との関連づけを通じて理解される。構造の気づきにおける内省の活動は、参加者が過去の製品経験から形成されたスキーマを検索し、現在の製品特性と照合するプロセスを示唆している可能性がある。

4.2 暮らし階層における認知的転換

興味深い発見として、暮らしの気づき獲得時の認知パターンが挙げられる。この階層では視覚/言語処理の優位性が消失し、相対的に内省と感情処理の活動が重要な役割を果たすという特異なパターンを示す可能性が観察された。

この認知的転換は、Damasio (1994) のソマティック・マーカー仮説の中核的概念である「感情的評価が意思決定に先行する」という知見と関連づけて理解できる可能性がある。ソマティック・マーカー仮説によれば、複雑な価値判断において、論理的分析に先立って過去の経験から形成された身体的・感情的反応が「良い」「悪い」の直感的判断を提供する。本研究における暮らしの気づき獲得時の認知パターン 視覚/言

語処理の優位性の消失と内省・感情処理の相対的重要性は、この仮説の予測と一致している。すなわち、製品の生活価値を評価する際には、物理的特徴の論理的分析（視覚/言語処理）よりも、過去的生活経験との照合による感情的評価と自己参照的な内省が優位になると考えられる。これは、「この製品は自分の生活を豊かにするか」という価値判断が、意識的な特徴分析ではなく、身体的な「感じ」や直感的な評価プロセスに依存することを示唆している。

4.3 予測-検証サイクルの生理学的基盤

瞳孔径と脳波の統合的分析から示唆された知見として、気づき獲得が予測-検証-更新の動的サイクルとして展開される可能性が挙げられる。視覚/言語処理の持続的な優位性は製品の視覚的情報を言語的カテゴリに変換し既存スキーマとの照合を行なう予測生成プロセスを、内省処理の関与は既存知識との関連性を探索する検証プロセスを、それぞれ反映している可能性がある。

ただし、これらの解釈は限定的なサンプルサイズに基づく探索的知見であり、より大規模な検証研究による確認が必要である。

5. まとめ

本研究では、新奇な製品観察時の脳波と瞳孔径の同時計測による探索的検討を通じて、認知的気づきの神経基盤に関する予備的知見を得た。6名の参加者による詳細な事例分析により、マイクロステート解析で視覚/言語処理、注意、内省、感情の4つの認知プロセスが特定され、各階層の気づき獲得には異なる認知処理が関与する可能性が示唆された。

特に重要な探索的発見として、構造の気づき獲得時の内省処理の相対的優位性は既存スキーマとの照合プロセスを、暮らしの気づき獲得時の認知パターンの質的転換は自己参照的で感情的な評価プロセスの重要性を、それぞれ示唆するものである。

本研究の限界として、限定的なサンプルサイズによる探索的検討であることが挙げられる。今後、より大規模な参加者群による検証研究、多様な製品特性や参加者属性における検討が必要である。また、長期的な製品受容プロセスにおける認知メカニズムの解明も重要な課題となる。

それでも、これらの予備的知見は、製品デザインにおいて物理的手がかりから意味的理解へと効果的に誘導する設計原理の導出につながる可能性を示しており、特に高齢者や技術に不慣れなユーザ層の製品受容を促進する応用的価値を持つと考えられる。また認知

科学的には、洞察問題解決や意味的学習の研究に、より日常的かつ生態学的妥当性の高い新たな実験パラダイムを提供する可能性がある。

文 献

- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A Study in Experimental and Social Psychology*. Cambridge University Press.
- Damasio, A. R. (1994). *Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain*. G. P. Putnam's Sons.
- Davis, F. D. (1986). *A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: Theory and results* (Doctoral dissertation). Massachusetts Institute of Technology.
- Gero, J. S. (1990). Design prototypes: A knowledge representation schema for design. *AI Magazine*, 11(4), 26–36.
- Norman, D. A. (2004). *Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things*. Basic Books.
- Salvi, C. & Simoncini, C. & Grafman, J. & Beeman, M. (2020). Oculometric signature of switch into awareness? Pupil size predicts sudden insight whereas microsaccades predict problem-solving via analysis. *NeuroImage*, 217, 116933.
- 佐藤 浩一郎, 松岡 由幸 (2012). タイムアクシス・デザインの具現化に向けた価値成長デザインモデルの提案. 横幹, 6(1), 21–26.
- Tarailis, P. & Koenig, T. & Michel, C. M. & Griškova-Bulanova, I. (2024). The functional aspects of resting EEG microstates: A systematic review. *Brain Topography*, 37(2), 181–217.
- Umeda, Y. & Takeda, H. & Tomiyama, T. & Yoshikawa, H. (1990). Function, behaviour, and structure. *Applications of Artificial Intelligence in Engineering V*, 1, 177–194.
- Verbeek, P.-P. (2006). Materializing Morality: Design Ethics and Technological Mediation. *Science, Technology, & Human Values*, 31(3), 361–380.
- 山田 和佳, 上田 一貴, 杉上 雄紀, 長藤 圭介, 中尾 政之 (2023). 革新的製品の機能の理解に至るユーザの思考プロセスの認知モデリング. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2023 論文集, 187–192.
- 山田 和佳, 上田 一貴, 杉上 雄紀, 長藤 圭介, 中尾 政之 (2024). 新奇な製品に対するユーザの表象構築過程における気づき獲得プロセスの評価. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2024 論文集, 371–378.