

デザイン推論中の
脳前頭前野部の賦活と自律神経活性状態に関する研究
—デザイン課題の抽象度と順序および助言内容の影響に着目して—

2026年3月

京都女子大学大学院
家政学研究科 生活環境学専攻

張 紫薇

ZHANG ZIWEI

Study on Prefrontal Cortex Activation and Autonomic
Nervous System Activity During Design Reasoning:
Focusing on the Effects of Task Abstraction Level, Task
Order, and Advice Content

March 2026

Kyoto Women's University

Graduate School of Home Economics, Living Environment

Zhang Ziwei

概要

本論文は、デザイン推論における思考プロセスを、脳前頭前野の賦活および自律神経系反応という生理学的指標から多面的に捉え、その神経基盤と創造的成果との関係を包括的に明らかにすることを目的とした学際的研究である。まず、抽象的構想段階（A タスク）と具体的形態段階（C タスク）がそれぞれ異なる前頭前野領域（MPFC/DLPFC）および自律神経状態（副交感優位/交感優位）を伴うことを実験的に示し、デザイン推論が「抽象⇔具体」の往還によって成立する生理的プロセスであることを明らかにした。続いて、この二段階が DMN・FPN・SN という脳内ネットワークの協働的切替によって支えられることを示し、デザイン思考をネットワーク的視座から再定義した。さらに、外部助言（目的や利用状況の想定を主とする助言/具体的な形態操作を主とする助言）が発想者の脳活動・自律神経反応を即時的に変容させる“認知スイッチ”として作用することを明らかにし、その抽象度がアイデアの新規性・具体性に異なる影響を及ぼすことを検証した。最終的に、生理指標とアイデア評価の統合分析により、「副交感優位＝発散思考＝独創性」「交感優位＝収束思考＝妥当性」という対応関係を提示し、創造性の質的差異を生理的に説明可能な枠組みを構築した。本研究は、デザイン推論における思考モードの神経生理的特性、助言の介入効果、個人特性との相互作用を総合的に示すことで、デザイン教育・創造性支援における「適応的助言」の必要性を理論的かつ実証的に示した点に重要な意義を有する。

キーワード：

デザイン推論, 抽象的思考・具体的思考, 脳前頭前野 (PFC) 賦活
近赤外分光法 (NIRS), 心拍変動 (RRI / HRV), デフォルトモードネットワーク (DMN), フロント・パリエタル・ネットワーク (FPN), サリエンスネットワーク (SN), 助言 (フィードバック), 創造性 (TTCT), 発散思考・収束思考

Abstract

This dissertation investigates the neurophysiological mechanisms underlying design reasoning by examining prefrontal cortex activation and autonomic nervous system responses. Using fNIRS and R-R interval analysis, the study demonstrates that abstract ideation activates the medial prefrontal cortex (MPFC) and induces parasympathetic dominance, reflecting associative and meaning-generating thinking. In contrast, concrete form generation engages the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and sympathetic activation, indicating evaluative and implementation-oriented cognition. Interpreted through large-scale brain networks, the findings show that the Default Mode Network (DMN) supports abstract reasoning, the Frontoparietal Network (FPN) underlies concrete processing, and the Salience Network (SN) mediates transitions between these modes. The study further reveals that external advice acts as a rapid cognitive switch: abstract advice enhances divergent thinking, whereas concrete advice promotes convergent refinement. Integrating physiological data with creativity evaluations, the research clarifies systematic correspondences—parasympathetic dominance aligns with originality and flexibility, while sympathetic dominance relates to feasibility and precision. These results highlight the need for adaptive advice tailored to cognitive stage and individual creative profiles, offering meaningful implications for design education and creative support.

Keywords:

Design reasoning, Abstract and concrete thinking, Prefrontal cortex activation, Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), Heart rate variability (RRI / HRV), Default mode network (DMN), Frontoparietal network (FPN), Salience network (SN), External advice / feedback, Creativity (TTCT), Divergent and convergent thinking

目次

概要
キーワード

Abstract
Keywords

目次	i
1章 デザイン推論中の脳前頭前野部の賦活と自律神経活性状態に関する研究の意義	1
1.1. 研究背景	2
1.2. 問題提起	3
1.3. 研究目的	4
1.4. 本研究のアプローチ	7
1.4.1 本研究にまつわる研究領域	8
1.4.2 本研究における方法	8
1.5. 本論文の構成	10
1.6. 用語の定義	12
参考・引用文献	15
2章 先行研究	17
2.1. デザイン推論中の脳前頭前野部の賦活について先行研究	18
2.1.1. デザイン推論と前頭前野の心理・神経科学的基盤	18
2.1.2. fMRI 研究におけるデザイン思考と前頭前野活動	18
2.1.3. スケッチを伴うデザイン発想と前頭前野賦活：fNIRS 研究の展開	19
2.1.4. 抽象的／具体的思考段階と前頭前野賦活の差異	21
2.2. デザイン推論中の自律神経活性状態について先行研究	22
2.2.1. RRI（心拍 R-R 間隔）と自律神経系	22
2.2.2. 発散思考・創造的課題と RRI	23
2.2.3. デザイン推論における RRI を用いた研究	23
2.2.4. RRI によるデザイン推論研究の意義	24

2.3. デザイン課題の助言について先行研究.....	25
2.3.1. デザイン課題における助言の役割	25
2.3.2. 助言が発想プロセスに与える影響	25
2.3.3. 設計教育における助言の研究	26
2.3.4. 助言と創造性に関する心理学研究	28
2.3.5. 神経科学的観点から見た助言研究	29
参考・引用文献.....	30
3章 デザイン活動の二種類の推論段階での脳前頭前野と自律神経の活性化状態 の理解.....	32
3.1. 背景.....	33
3.2. デザイン推論時の脳活動に関する既往研究.....	34
3.3. 目的.....	36
3.4. 生理指標データの取得方法.....	37
3.4.1 脳前頭前野賦活状態の NIRS 脳計測装置による計測	37
3.4.2. 自律神経活性化状態の RRI による計測	39
3.4.3. 実験協力者のタスク遂行環境	39
3.5. 実験計画およびデータの分析における有意差判定基準.....	40
3.6. A タスク先行実験	42
3.6.1. 実験方法	42
3.6.2. データ取得方法	43
3.6.3. 分析と考察	44
3.7. C タスク先行実験	45
3.7.1. 実験方法およびデータ取得方法	45
3.7.2. 分析と考察	47
3.8. 総合考察.....	49
3.9. 結論.....	52
参考・引用文献.....	54
4章 デザイン活動における脳内ネットワークの働きに関する考察の把握..	57
4.1. 背景.....	58
4.2. 目的.....	59
4.3. 脳内ネットワーク.....	59

4.3.1. デザイン活動と脳内ネットワーク	59
4.3.2. 脳内ネットワークの働き	60
4.3.3. 脳内ネットワークと脳部位の対応関係	62
4.3.4. 脳内ネットワークの相互関係	64
4.4. 脳内ネットワークと脳部位の相互作用	66
4.4.1. 内側前頭前野(MPFC)とDMN	66
4.4.2. 背外側前頭前野(DLPFC)とFPN	67
4.4.3. 内側前頭前野(MPFC)とSN	67
4.5. 意識の生成	68
4.6. デザイン推論での脳内ネットワークの働き	70
参考・引用文献	71

5章 デザイン発想時の助言内容の違いが脳前頭前野部の賦活と自律神経状態 に与える影響	73
5.1. 背景	74
5.2. 外部助言と創造的思考に関する先行研究	74
5.3. 目的	75
5.4. 生理指標データの取得方法	76
5.4.1. 脳前頭前野賦活状態のNIRS脳計測装置による計測	76
5.4.2. RRI解析による自律神経活性状態の計測	77
5.4.3. 実験協力者のタスク遂行環境	77
5.5. 実験計画	78
5.6. 分析の前提事項	79
5.6.1. NIRSデータの標準得点化	79
5.6.2. 有意性判定	80
5.7. 実験	81
5.7.1. 実験方法	81
5.7.2. データ取得方法	82
5.7.3. 実験結果と分析	82
5.8. 考察	85
5.8.1. 脳前頭前野の賦活状態	85
5.8.2. 自律神経状態	87
5.9. 結論	88

参考・引用文献.....	91
6章 デザイン発想時の助言内容とアイデアの質との関係.....	93
6.1. 背景と目的.....	94
6.2. 先行研究との関係.....	95
6.3. 実験.....	96
6.3.1. 実験方法.....	96
6.3.2. 実験結果.....	97
6.4. アイデアの評価と分析.....	98
6.4.1. アイデアの評価.....	98
6.4.2. 分析.....	99
6.5. 考察.....	101
6.5.1. タスク間比較.....	101
6.5.2. グループ間比較.....	102
6.6. 考察.....	104
参考・引用文献.....	106
7章 総括.....	108
7.1. まとめ.....	109
7.1.1. 各章のまとめ.....	109
(1) 第1章のまとめ.....	109
(2) 第2章のまとめ.....	110
(3) 第3章のまとめ.....	111
(4) 第4章のまとめ.....	111
(5) 第5章のまとめ.....	112
(6) 第6章のまとめ.....	112
7.1.2. 本研究で得られた知見のまとめ.....	113
(1) 第3章より得られた知見のまとめ.....	113
(2) 第4章より得られた知見のまとめ.....	115
(3) 第5章より得られた知見のまとめ.....	117
(3) 第6章より得られた知見のまとめ.....	120
7.2. 本研究の今後の課題と展望.....	123
参考・引用文献.....	125

研究業績.....	126
学術論文（査読あり）.....	126
学術論文（査読中）.....	126
学術論文（査読なし）.....	126
国内口頭発表.....	126
謝辞.....	127
付録.....	128
A. 3章で用いたAタスク先行実験用紙.....	129
B. 3章でAタスク先行実験の各実験協力者の情報.....	130
C. 3章でAタスク先行実験の各実験協力者のスケッチ.....	131
D. 3章でAタスク先行実験のNIRS結果.....	136
E. 3章でAタスク先行実験のRRI結果.....	138
F. 3章で用いたCタスク先行実験用紙.....	139
G. 3章でCタスク先行実験の各実験協力者の情報.....	140
H. 3章でCタスク先行実験の各実験協力者のスケッチ.....	141
I. 3章でCタスク先行実験のNIRS結果.....	149
J. 3章でCタスク先行実験のRRI結果.....	155
K. 5章で用いた実験用紙.....	156
L. 5章で実験の各実験協力者の情報.....	157
M. 5章で実験結果のまとめ.....	158
N. 6章で各実験協力者のスケッチ.....	159
P. 6章で評価結果（TTCT応用）.....	165

1 章

デザイン推論中の脳前頭前野部の賦活と自律神経活性状態
に関する研究の意義

1.1. 研究背景

デザイン推論は、人間が既存の知識や経験を再構成しながら、新たな概念や形態を創出する高度な認知活動である。発想者は、課題に対して「何を実現するのか」を探索する抽象的な構想段階と、「どのような形で実現するのか」を検討する具体的な形状構築段階を往還しながら思考を展開する [1]。これらのプロセスは、柔軟な連想・仮説生成だけでなく、評価判断や選択操作といった実行機能を伴う複合的なものであり、脳前頭前野 (Prefrontal Cortex: PFC) が重要な役割を担う [2, 3]。

特に、背外側前頭前野 (DLPFC) はワーキングメモリを基盤とする論理的推論や課題管理、内側前頭前野 (MPFC) は意思決定や自発的思考 (mind-wandering) との関与が報告されており [4]、発散的思考と収束的思考の切り替えにも深く関係することが示唆されている。また、前頭眼窩部 (OFC) は価値判断や感情的評価に寄与し、アイデアを選択する際の心理的負荷に関連するとされる [5]。したがって、デザイン推論中の脳活動を可視化することは、創造性発揮の神経基盤を理解する上で重要な意義を持つ。

近年、非侵襲型脳計測技術の普及により、実践的な創造課題中の脳活動計測が可能になってきた。その中でも近赤外分光法 (Near-Infrared Spectroscopy: NIRS) は、酸化ヘモグロビン変化量を指標として脳血流動態を計測する技術であり、頭部拘束の少なさからスケッチ描画やデザイン制作など、身体運動を伴う課題との親和性が高い [6]。

スケッチや形状操作といったデザイン活動には、手先運動や視覚フィードバックを通じた身体性を伴う思考が不可避であり、頭部拘束を要さない脳計測が求められる。この点で、近赤外分光法 (NIRS) は、自然なデザイン行為中の脳血流動態を捉える手法として大きな利点を持つ [7]。

さらに、創造的課題は認知的負荷のみならず、ストレス状態・集中レベルといった心理状態と密接に結びつく。自律神経系の指標である心拍変動は、その反映として注目されており、特に R-R 間隔 (RRI) は交感・副交感神経のバランスを読み取る重要な評価指標である [8]。これにより、課題遂行中の「緊張」「負荷」「リラックス度」の変化を捉えることが可能になる。

しかし、従来研究の多くは、創造性を「一枚岩の能力」として扱い、推論段階の違いや外部要因による生理反応の変化を精緻に比較するものは限られてきた。デザイン活動では、外部からの助言や評価が思考プロセスを方向づけることが多く、それらの影響は心理状態および脳活動にも波及する可能性が指摘されている [9]。

特にデザイン教育現場では、指導者が抽象的な助言と具体的な助言を使い分けているが、これらが生理的負荷やアイデア質にどのような差異をもたらすのか、実験的検証は十分に行われていない。

以上を踏まえ、本研究では、デザイン推論時の助言内容の違いが、前頭前野の脳活動および自律神経活性状態に及ぼす影響を検証することを目的とする。脳科学とデザイン研究の統合的観点から、創造性支援の学術的基盤構築に寄与することを目指す。

1.2. 問題提起

デザイン推論においては、「利用価値・使用文脈の構想」に代表される抽象的思考と、「形態・構造の検討」に代表される具体的思考が相互に行き来しながら進行する [10, 11]。しかし、これらの異なる思考段階が、脳前頭前野を中心とした神経活動および自律神経活性にどのような差異をもたらすのかについては、依然として十分に解明されていない。近年、NIRS (Near-Infrared Spectroscopy) や RRI (R-R Interval) などの非侵襲的生理計測技術が発展し、デザイン活動中の脳活動・心理生理的状态を捉えることが可能となったものの [12, 13]、以下の主要な研究課題が残されている。

(1) 推論段階の違いが生理指標に及ぼす影響に関する体系的知見の不足

抽象的思考段階と具体的思考段階は、要求される認知操作が本質的に異なるにもかかわらず [14]、これらの段階差と脳活動・自律神経反応の関係を比較・検証した研究は極めて少ない。特にスケッチ描画を含むデザイン行為は身体性を伴うため [15]、自然な作業状態で計測可能な NIRS を用いた段階比較研究の蓄積が不足している。

(2) 助言内容の差異が認知過程および生理反応に及ぼす影響の未解明性

デザイン教育および実務では、利用目的や利用状況の想定を主とする助言（価値・用途・ユーザー像に関する示唆）と具体的な形態操作を主とする助言（形状・操作・構造に関する示唆）が適宜用いられている [16]。しかし、助言の種類が発想者の認知負荷、脳活動、思考の広がり、さらには自律神経活性にどのような影響を及ぼすのかは、科学的な検証がほとんど行われていない。加えて、助言が思考を促進する場合だけでなく、認知的制約として作用する可能性についても、生理学的観点からの実証は不十分である [17]。

(3) 生理指標と生成アイデアの「質」との関連性の欠如

従来の創造性研究の多くは、アイデア数や流暢性といった量的指標を重視しており[18]、生理指標の変化とアイデアの「質」(独創性, 妥当性, 具体性など)との関連については、知見が著しく不足している。デザイン実務においては質的評価が重要であるにもかかわらず、脳活動・自律神経状態とアイデア質を統合的に論じた研究は極めて乏しい[19]。

(4) デザイン研究と神経科学研究の間に存在する方法論的ギャップ

デザイン研究は文脈依存的かつ複合的な思考過程を扱う一方で[20]、神経科学研究では比較的単純化された課題が用いられる傾向がある[21]。このため、実際のデザイン活動を実験環境で適切に扱うための方法論、ならびにデザイン思考を生理指標と対応づけて説明する理論的枠組みが未整備である。

本研究が取り組むべき核心的課題は、先述の問題点を踏まえると大きく三点に整理できる。第一に、デザイン推論における抽象的思考段階と具体的思考段階において、脳前頭前野活動および自律神経活性がどのように異なるパターンを示すのかを明らかにすることであり、これはデザイン推論の生理学的基盤を明確化する上で不可欠である[22]。第二に、利用目的や利用状況の想定を主とする助言と具体的な形態操作を主とする助言という異なる助言内容が、発想者の認知負荷、脳活動、自律神経反応にいかなる影響を及ぼすのかを検証することであり、これによりデザイン教育や実務における助言方略の科学的根拠を与えることができる[23]。第三に、これら生理指標の差異が最終的に生成されるアイデアの質的特徴とどのように関連するのかを明らかにし、質的創造性を生理的観点から説明可能にすることである。以上の三点を統合的に扱う本研究は、デザイン推論、助言内容、脳前頭前野活動、自律神経活性、そしてアイデア質との関係を包括的に検討する点に独自性を有し、デザイン教育および創造性支援システムの高度化に寄与し得る重要な学術的意義を持つ。

1.3. 研究目的

本研究の目的は、デザイン推論における「思考段階の違い」と「助言内容の違い」が、発想者の脳活動や心理生理状態、さらに最終的に生成されるアイデアの質にどのような影響を与えるのかを、客観的な生理指標を用いて明らかにすることである。デザイン行為は、価値を構想する抽象的な思考と、形態を検討する具

体的な思考を往復する複雑なプロセスであり、さらに外部から与えられる助言がその思考の方向性を左右する可能性も高い。にもかかわらず、これらの要因が脳前頭前野活動や自律神経活性、そしてアイデアの質とどのように関係するのかは、十分に理解されていない。そこで本研究では、以下の三つの目的を設定し、デザイン推論の生理学的基盤を体系的に検証する。

(1) 抽象的思考段階と具体的思考段階における、生理反応（脳前頭前野活動および自律神経活性）の違いを明らかにする。

デザイン推論には、「利用目的・使用文脈を構想する段階」と、「形態・構造を検討する段階」という異なる性質の思考が含まれる。これらの思考段階は、脳が行う処理の種類が異なるため、生理的な反応にも違いが生じると考えられる。本研究では、NIRSによる前頭前野の活動データ、および心拍変動（RRI）を用いて得られる自律神経活性を比較することで、思考段階の違いが生理反応にどのように表れるかを明確化する。

(2) 助言内容（利用目的や利用状況の想定を主とする助言／具体的な形態操作を主とする助言）が、発想者の認知負荷、脳活動、自律神経反応に与える影響を検証する。

デザイン教育では、課題に取り組む学生やデザイナーに対し、助言の種類を使い分けることが一般的である。利用目的や利用状況の想定を主とする助言は発想を広げる効果が期待され、具体的な形態操作を主とする助言はすぐに形を整える際に有効であると考えられている。しかし、それらの助言が実際に脳活動や心理生理状態にどのような変化をもたらすのかは、これまで客観的に示されてこなかった。本研究では、同一のデザイン課題における助言条件の違いが、認知負荷や生理反応にどのように影響するかを検証し、効果的な助言方略についての科学的知見を得る。

(3) 脳前頭前野活動・自律神経活性の変化と、生成されたアイデアの質的特徴（流暢性、柔軟性、独創性、精緻性など）との関連を明らかにする。

これまでの創造性研究は、主に「どれだけ多くのアイデアを出せるか」という量的な評価に重点が置かれてきた。しかし、デザイン実務では、アイデアの独創性や実現性など、質的な側面が重視される。本研究では、生理指標と評価された

アイデアの質的特性を対応させ、どのような生理状態のときに質の高いアイデアが生まれやすいのかを明らかにする。これにより、創造的思考と生理反応の関係をより深く理解することができる。

以上の三つの研究目的を総合的に検証することで、本研究は、デザイン推論における思考の変化および助言の作用を、生理学的データに基づいて多面的に理解するための基盤を構築することを目指す。従来、デザイン推論や創造的思考は、観察・インタビュー・生成物分析といった質的手法を通して研究されることが多く、思考過程の深層における神経生理学的変化を体系的に把握することは困難であった。その結果、思考段階の違いや助言の影響が、脳活動や自律神経の変動としてどのように現れるのか、さらにはそれがアイデアの質にどのように反映されるのかについての理解は限定的であった。本研究が扱う NIRS ならびに RRI による生理情報は、こうした課題に対して客観的かつ定量的な観点をもたらし、デザイン推論の生理的基盤に迫るための手段として大きな可能性を有する。

特に本研究では、デザイン推論における抽象的思考と具体的思考の差異を、生理指標の変化として明確に捉えることを重視する。これら二つの思考段階は、課題への向き合い方や必要とされる認知操作が大きく異なるため、脳活動および自律神経活性に異なる反応が表れる可能性が高い。また、教育や実務の現場で頻繁に用いられる利用目的や利用状況の想定を主とする助言と具体的な形態操作を主とする助言についても、それらが発想者の思考負荷をどの程度変化させ、どのように思考の方向性に影響を及ぼすのかを生理的観点から検証することで、従来言語化が難しかった助言の作用機序をより精緻に理解することが期待される。助言が思考の促進因子として機能する場合のみならず、認知的制約として働く場合を含めて分析する点は、本研究における重要な独自性である。

さらに本研究では、脳前頭前野活動・自律神経活性といった生理指標の変化を、生成されたアイデアの質的特徴と対応づけることで、「質的創造性」を生理学的観点から説明する新たな枠組みを構築することを目指す。これまでの創造性研究は、アイデアの数（量的創造性）を中心に扱う傾向が強く、質的創造性に関する生理学的理解は大きく遅れていた。本研究は、生理指標とアイデア質を統合的に扱うことで、デザイン推論における思考の深まりや創造的成果の生成が、どのような生理状態と結びついているのかを明らかにし、創造性研究の深化に寄与する。

総じて、本研究は、デザイン推論・助言内容・脳活動・自律神経活性・アイデア質という複数の要素を総合的に扱うことにより、デザイン研究と神経科学研究を架橋する新しい学術的枠組みの創出を目指すものである。この枠組みによっ

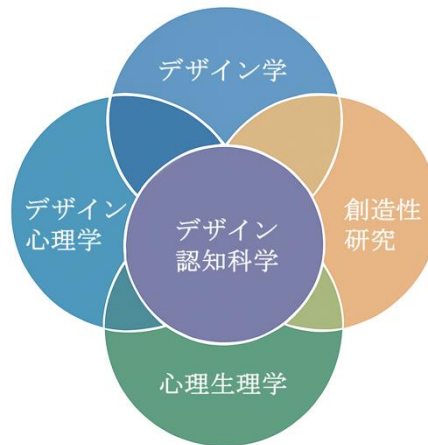


図 1-1 デザイン認知科学を構成する四つの学術領域のベン図

て、デザイン教育における助言のあり方や創造的課題の設計，さらには脳計測を活用したデザイン支援手法の開発など，多方面への実践的応用が期待される。本研究が提示する知見は，デザイン思考の理解を「観察可能な表層的プロセス」にとどめず，「脳・身体レベルまで踏み込んだ深層的プロセス」として再定義するものであり，学術的にも実務的にも高い価値を持つ。

1.4. 本研究のアプローチ

本研究は，デザイン推論における認知過程と生理的反応との関連を多面的に明らかにすることを目的とし，脳科学的計測・心理生理学的指標・デザイン研究手法を統合した学際的アプローチを採用する。従来のデザイン研究においては，発想プロセスの理解は主として観察，面接，スケッチ分析などの質的手法に依拠しており，創造的思考の背後にある心理的・生理的メカニズムを定量的に把握することは困難であった。

そこで本研究では，非侵襲的生理計測技術（NIRS：近赤外分光法およびRRI：心拍間隔変動）を導入し，思考過程における脳前頭前野の活動および自律神経系の変動を同時計測することにより，発想者の内的状態を客観的かつ動的に捉える新たな分析枠組みを構築する。これにより，デザイン推論過程における抽象的・具体的思考の遷移と，それに対応する神経生理学的変化の対応関係を明らかにし，従来の質的観察を超えた定量的・統合的理解を可能にすることを目指す。

1.4.1 本研究にまつわる研究領域

本研究は、デザイン学・認知科学・神経科学・心理生理学を横断する学際的研究領域に位置づけられる。図 1-1 にそのイメージを示す。従来のデザイン研究は、スケッチ分析やインタビューなど質的手法を中心に発想過程を理解しようとしてきたが、発想者の内的心理状態や生理的反応を客観的に捉えることは困難であった。本研究では、近赤外分光法（NIRS）による脳前頭前野活動の測定と、心拍変動（RRI）による自律神経応答の解析を統合することで、デザイン推論における抽象的思考と具体的思考の神経生理学的基盤を明らかにすることを目的とする。これにより、デザイン思考を支える前頭前野の動的活動、交感・副交感神経のバランス変動、そして助言などの社会的要因が創造的認知過程に及ぼす影響を実証的に解明する。本研究が属する領域は、デザイン認知科学（Design Cognition Science）とも呼ばれ、デザイン学の知見と認知神経科学・心理生理学の実証的手法を融合し、人間の創造的推論過程を神経・心理・行動の三層構造で捉えることを目指している。さらに、これらの成果は、デザイン教育や発想支援ツールの開発など応用的展開にも寄与しうるものであり、デザインを「心と脳の協働的創造行為」として理解するための新たな学問的枠組みを提示するものである。

1.4.2 本研究における方法

本研究では、デザイン推論時の脳前頭前野活動および自律神経活性と、助言内容やアイデアの質と量との関係を明らかにするために、以下の三つの方法を組み合わせたアプローチを採用する。

すなわち、生理計測を伴うデザイン推論実験の実施、実験協力者へのインタビューによる主観的経験の把握、量的・質的手法を用いた実験データの統合的分析である。これにより、行動・生理・主観報告の三側面からデザイン推論プロセスを多角的に検討することを目指す。

（1） 実験によるデータ生理取得

まず、デザイン推論課題を遂行中の参加者から生理指標および成果物を取得する実験であり、その目的は、抽象的思考段階と具体的思考段階の差異が脳前頭前野活動および自律神経活性にどのように表出するのかを明らかにするとともに、利用目的や利用状況の想定を主とする助言と具体的な形態操作を主とする助言の

違いが生理反応および発想プロセスに及ぼす影響を検証することである。対象はデザイン関連科目を履修する大学生・大学院生とし、インフォームド・コンセントを取得したうえで、参加者には「抽象的構想段階（利用価値・使用文脈・ユーザー像の検討）」と「具体的形態段階（形状・構造をスケッチによって具現化する段階）」の双方を含むデザイン課題に取り組みさせた。課題遂行中には一定のタイミングで「利用目的や利用状況の想定を主とする助言条件」と「具体的な形態操作を主とする助言条件」を提示し、各条件下で参加者の思考プロセスがどのように推移・変容するかを観察した。計測では、脳前頭前野の活動を近赤外分光法（NIRS）により取得し、酸化ヘモグロビン変化量を主要指標として解析する一方、自律神経活性については心拍間隔（RRI）から算出される心拍変動指標を用いて評価した。さらに、実験中に参加者が制作したスケッチやメモなどの成果物を収集し、後の質的・量的分析に資するデータとして体系的に整理した。

（２） 実験協力者へのインタビュー

実験終了後に実験協力者に対して半構造化インタビューを実施し、実験中の主観的体験や認知状態に関する情報を収集する。本手法の目的は、生理指標だけでは捉えきれない参加者自身の「どのような内容を考えていたか」「助言をどのように受け止めたか」「どの場面で難しさや負荷を感じたか」「発想が広がった／停滞した瞬間はいつか」といった内的経験を明らかにし、実験で得られた生理データ（NIRS・RRI）やアイデアの質的評価との照合を通じて、データ解釈の妥当性を高めることである。インタビューは課題終了直後に実施し、抽象的段階と具体的段階それぞれで意識していた点、助言を受けた際の思考の変化、困難を覚えた局面、創造的に「うまくいった」と感じた瞬間などを中心に質問する。得られた内容は音声記録し、逐語録を作成した上で質的分析に用いる。これらの主観的報告は、客観的な生理反応やアイデア成果に対して意味づけを行うための補助的データとして位置づけられ、量的結果の背後にある認知方略や情動的反応を明らかにすることで、単なる数値比較にとどまらない深い理解の構築に寄与する。

（３） 実験データの定量的分析

実験で取得した生理データ・成果物・インタビューデータを総合的に分析し、量的分析と質的分析を組み合わせた統合的検討を行う。本分析では、まず量的側面として NIRS データに対しアーチファクト除去やベースライン補正などの前処理を施し、抽象段階と具体段階、さらに助言条件の違いを要因とした統計解析

(分散分析や t 検定等)を実施する。また RRI からは LF・HF・LF/HF といった心拍変動指標を算出し、認知負荷や緊張状態の変化を把握する。さらに、獨創性・妥当性・具体性といったアイデアの質的評価と生理指標の関連を相関分析・回帰分析により検討し、「どのような生理状態が質の高いアイデアと結びつきやすいか」を探索する。一方、質的側面では、参加者のスケッチや記述内容をもとに、発想の方向性・抽象度・表現の変化などをカテゴリー化して思考の展開パターンを整理し、インタビューデータについては「助言に対する受け止め方」「負荷やストレスの感じ方」「アイデアが広がったと自覚する瞬間」などを軸にテーマ別コーディングを行う。これらの質的結果と生理指標の変化を照合し、客観的データが示す変化が参加者の主観経験や発想プロセスとどのように対応しているのかを多角的に検討する。最終的には、量的分析と質的分析の結果を統合し、思考段階の違いや助言内容の違い、生理指標の変化、アイデアの質的特徴、そして主観的経験の相互関係を総合的に解釈することで、デザイン推論における「脳・身体・言語・行為」がいかに関わりながら創造的成果を形成しているのかを多層的に描き出すことを目指す。

1.5. 本論文の構成

本論文は、デザイン推論時における脳前頭前野部の賦活、自律神経活性、脳内ネットワークの働き、さらに発想時の助言内容がもたらす影響を多層的に検討することを目的として構成されている。以下にその概要を述べる。

第1章では、本研究の背景、問題意識、目的を提示し、デザイン推論研究・神経科学・心理生理学・創造性研究といった本研究を支える学術領域を位置づけるとともに、本論文全体の構成と主要な用語の定義を示す。

第2章では、デザイン推論に関する脳前頭前野研究、自律神経研究、助言研究の3領域について先行研究を整理し、本研究が位置づけられる学術的文脈と研究ギャップを明確にする。

第3章では、著者らが実施してきた「二種類の推論段階（抽象的段階／具体的段階）における脳前頭前野賦活と自律神経状態」についての基礎的研究を取り上げ、その方法、解析、知見を体系的に整理する。この章は本研究の理論的基盤を形成するものであり、抽象度・課題順序・個人差が脳・生理反応に与える影響を明らかにする。

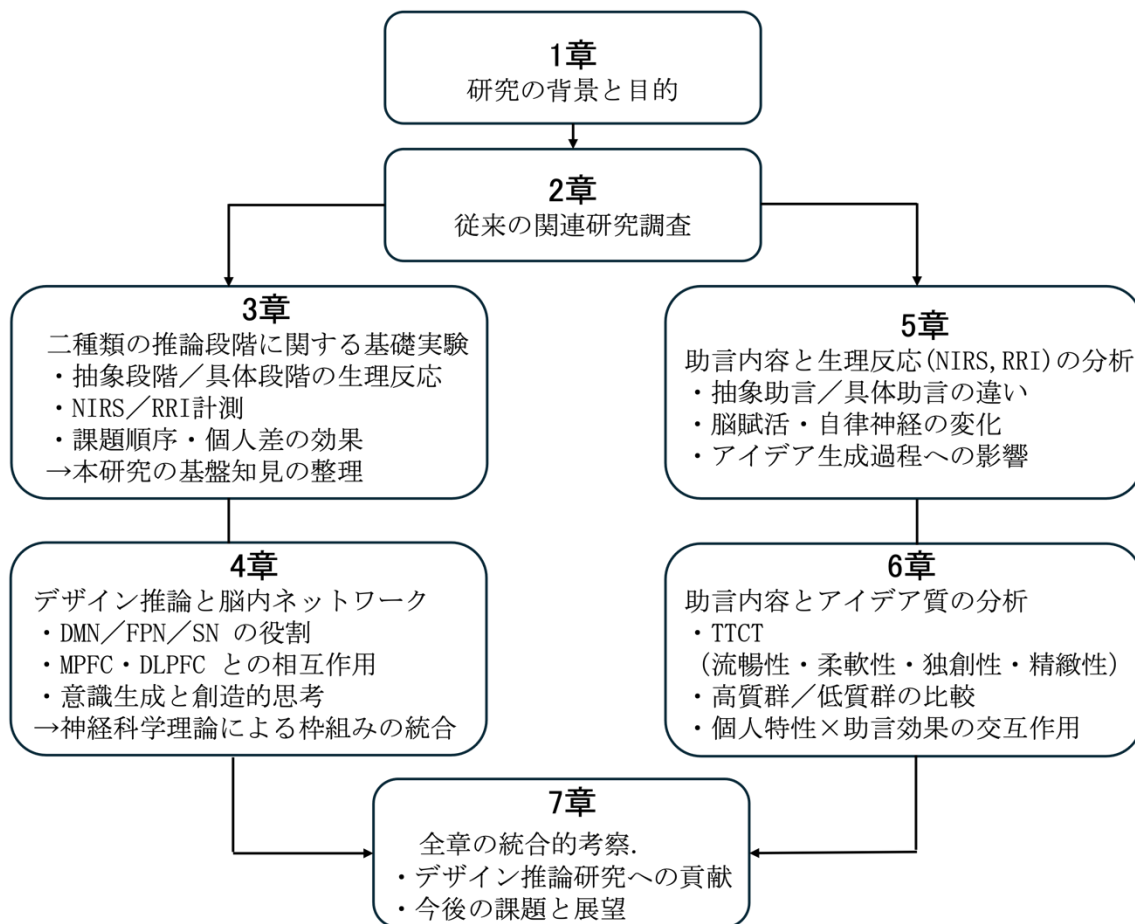


図 1-2 本論文の構成図

第4章では、デザイン推論を支える脳内ネットワーク（DMN, FPN, SN）に着目し、前頭前野諸領域との相互作用を神経科学理論に基づいて整理する。特に内側前頭前野（MPFC）、背外側前頭前野（DLPFC）が各ネットワークとどのように連携し、デザイン推論の内部メカニズムを支えているかを考察する。

第5章では、発想時に外部から与えられる助言内容（目的や利用状況の想定を主とする助言／具体的な形態操作を主とする助言）の違いが、脳前頭前野賦活および自律神経状態にどのような変化をもたらすかを実験的に検証する。NIRS および RRI を用いた生理指標の定量分析を行い、助言の認知生理的効果を明らかにする。

第6章では、助言内容の違いがアイデアの質（流暢性、柔軟性、独創性、精緻性）に与える影響を TTCT 評価を用いて検討する。また、実験協力者を発想力に基づいて群分けすることで、助言効果と個人特性の相互作用について詳細に分析

し、概念的助言と形態的助言が異なる創造性プロセスを誘発する仕組みを議論する。

第7章では、これまでの分析結果を総合的にまとめ、本論文が明らかにした知見を統合して、デザイン推論研究における神経科学的視座の意義と今後の展望を提示する。

本論文の構成は図 1-2 に示した。

1.6. 用語の定義

(1) デザイン推論 (Design Reasoning)

デザイン課題において、発想者が既存の知識・経験・価値観を再構成しながら、問題解決の方向性・利用価値・形態などを段階的に構築していく認知的プロセス。抽象的構想段階と具体的形態構築段階を往還しながら進行する [1, 10, 11, 14, 20]。

(2) 抽象的思考 (Abstract Thinking)

利用価値・使用文脈・ユーザー像など、概念的・意味的枠組みを構築する思考過程。具体的形状よりも「何を指すか」「どのような価値を生み出すか」に焦点を置く [10, 11, 14, 20]。

(3) 具体的思考 (Concrete Thinking)

形状・構造・機能配置など、視覚的・物理的特徴を検討し、スケッチ等によって具現化する思考過程 [11, 14, 15, 20]。

(4) 脳前頭前野 (Prefrontal Cortex: PFC)

意思決定、課題管理、発想、評価判断など高次認知機能を担う脳領域。デザイン推論の中心的役割を果たすとされる [2, 3, 21, 22]。

(5) 背外側前頭前野 (Dorsolateral Prefrontal Cortex: DLPFC)

ワーキングメモリ、課題管理、論理的推論など実行機能を担う領域。収束的思考、判断操作、作業負荷の増大と関連 [2, 3, 22]。

(6) 内側前頭前野 (Medial Prefrontal Cortex: MPFC)

自発的思考 (mind-wandering), 意思決定, 自己参照的处理と関連する領域。発散的思考の活性化と関連することが示されている[4, 21]。

(7) 前頭眼窩部 (Orbitofrontal Cortex: OFC)

価値判断, 感情的評価, 意思決定に関与する脳領域。アイデア選択や創造的判断の心理的負荷に関連[5]。

(8) 近赤外分光法 (Near-Infrared Spectroscopy: NIRS)

酸化ヘモグロビン量の変化を指標として脳血流動態を計測する非侵襲的脳計測技術。頭部拘束が少なく, スケッチ等の身体運動を伴う課題に適する[6, 7, 12]。

(9) 酸化ヘモグロビン

NIRS によって計測される脳血流変化の主要指標。脳活動に伴う局所酸素消費の増減を反映する[6, 12]。

(10) 自律神経系

交感神経・副交感神経からなる身体の自律的調整システム。心理的負荷, 緊張, 集中, ストレスなどを反映する[8]。

(11) R-R 間隔 (R-R Interval: RRI)

心電図の R 波の間隔。交感神経・副交感神経バランスを表す基礎指標[8]。

(12) 心拍変動 (Heart Rate Variability: HRV)

RRI 変動から算出される自律神経活性の指標[8]。

主な指標:

LF (Low Frequency): 交感・副交感の混合

HF (High Frequency): 副交感神経優位

LF/HF 比: 交感神経優位性 (ストレス・緊張) の指標

(13) 認知負荷 (Cognitive Load)

課題遂行に必要な認知的リソースの量。複雑さや思考要求度によって増減する[14, 24]。

(14) 発想プロセス (Ideation Process)

思考の探索・拡散（発散）と評価・収束（収束）を往還しながらアイデアを生成する一連の認知活動[18, 19, 20]。

(15) 発散的思考 (Divergent Thinking)

自由な連想, さまざまな可能性の探索, 多様な視点からのアイデア生成を特徴とする思考様式[18, 19]。

(16) 収束的思考 (Convergent Thinking)

評価・選択・整理・実現可能性の検討を通じて最適案に絞り込む思考様式[18, 19]。

(17) デザイン認知科学 (Design Cognition Science)

デザイン学の知見と認知科学・神経科学・心理生理学の実証的手法を統合し, 創造的推論を脳・心理・行動レベルから解明する学際領域[20, 25]。

参考・引用文献

- [1] Cross, N. (2011). *Design Thinking: Understanding How Designers Think and Work*. Oxford: Berg.
- [2] Dietrich, A. (2004). The cognitive neuroscience of creativity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(6), 1011-1026.
- [3] Benedek, M., et al. (2014). To create or to recall? Neural bases of idea generation vs recall. *NeuroImage*, 88, 125-133.
- [4] Christoff, K., et al. (2016). Mind-wandering as spontaneous thought. *Nature Reviews Neuroscience*, 17, 718-731.
- [5] Elliott, R., et al. (2000). Orbitofrontal cortex and decision making. *Cerebral Cortex*, 10(3), 308-317.
- [6] 石井寛之・外川一仁 (2014) 「前頭前野の活動計測と NIRS の基礎」『生体医工学』 52(5), 231-240.
- [7] Ayaz, H. et al. (2013). NIRS for everyday higher cognition tasks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 1-11.
- [8] 田中久実 (2012) 「心拍変動 (HRV) の基礎と応用」『生理心理学と精神生理学』 30(2), 75-88.
- [9] 奈佐原顕郎 (2015) 「デザイン教育におけるスケッチと思考支援」『デザイン学研究』 62(3), 45-54.
- [10] 松岡由幸 (2014) 『デザイン思考の科学』 講談社。
- [11] Lawson, B. (2005). *How Designers Think*. Architectural Press.
- [12] Ayaz, H., et al. (2013). NIRS in naturalistic tasks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 1-9.
- [13] 金子書房編集部 (編) (2018) 『創造性の発達と教育』 金子書房。
- [14] 吉川恒夫 (2004) 『デザインの認知科学』 共立出版。
- [15] 佐藤学 (2008) 『学びの構造とデザイン』 岩波書店。
- [16] Sarkar, P., & Chakrabarti, A. (2017). Influence of guidance on creativity. *Design Studies*, 52, 54-79.
- [17] Stokes, P. (2020). *Constraints and creativity*. Cambridge University Press.
- [18] Guilford, J. P. (1967). *The nature of human creativity*. McGraw-Hill.
- [19] Runco, M. A., & Jaeger, G. (2012). Divergent thinking and creative quality. *Creativity Research Journal*, 24(1), 92-102.

- [20] Dorst, K. (2011). The core of design thinking. *Design Studies*, 32(6), 521-532.
- [21] Beaty, R. E. et al. (2016). Default mode network and creativity. *PNAS*, 113(17), 9723-9728.
- [22] Benedek, M. et al. (2014). Neural bases of idea generation. *NeuroImage*, 88, 125-133.
- [23] Chan, J., et al. (2022). Effects of feedback on creative cognition. *Cognition*, 225, 105159.
- [24] Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving. *Cognitive Science*, 12, 257-285.
- [25] Gero, J. S. (1998). Design cognition. *Journal of Design Sciences and Technology*, 3(2), 1-15.

2 章

先行研究

2.1. デザイン推論中の脳前頭前野部の賦活について先行研究

2.1.1. デザイン推論と前頭前野の心理・神経科学的基盤

デザイン推論は、既存の知識・経験・価値観を統合しながら問題の構造を再定義し、複数の可能性を探索しつつ徐々にアイデアを生成・評価していく高次の認知活動である。こうした過程は、心理学領域で議論される「発散思考」「収束思考」、「抽象的思考」「具体的思考」と深く結びついており、脳神経科学的には前頭前野 (prefrontal cortex: PFC) を中心とするネットワークによって支えられている[1]。

前頭前野は背外側前頭前野 (DLPFC)、腹外側前頭前野 (VLPFC)、内側前頭前野 (MPFC)、前頭極 (FP) など複数のサブ領域から構成され、各領域が注意制御、作業記憶、意思決定、価値判断、自己関連的思考など異なる機能を担う。特に DLPFC は「複数の情報を同時に保持し、選択しながら推論する」能力に関係し、創造的課題や複雑な問題解決で安定して賦活することが知られている[1]。

また神経科学領域では、発想時には複数の大規模脳ネットワークが連動するとされる。例えば、

FPN (Frontoparietal Network) : 課題制御・思考の切り替え

DMN (Default Mode Network) : 内省, 心的シミュレーション, 概念統合

SN (Salience Network) : 情報の選択・切り替え

といったネットワークが、デザイン推論中に動的に結合することが報告されている[1]。脳内ネットワークに関する内容は第4章で詳しく記述する。

デザイン推論では、既存案の検討、新規の発想、価値判断の更新、制約の再解釈といった多段階の認知操作が求められるため、FPN と DMN の相互作用や、それらの切り替えを担う SN が活発に働く可能性が高い。こうした神経基盤の観点から、デザイン推論は単純な問題解決とは異なる「探索的・生成的プロセス」と位置付けられる。

2.1.2. fMRI 研究におけるデザイン思考と前頭前野活動

脳活動計測技術の中でも fMRI (機能的磁気共鳴画像法) は空間分解能が高く、創造的問題解決の神経基盤を明らかにする研究に広く用いられてきた。Alexiou ら[2]は、明確な正答をもつ「よく構造化された問題」と、制約が曖昧

で多様な解が存在する「非構造的デザイン課題」を比較し、後者において右 DLPFC や頭頂葉・側頭葉を含む広いネットワークが強く賦活することを示した。

続いて Gilbert らは[3]、デザイン推論の特徴である「曖昧性の中で探索的に解を構築する」認知プロセスに注目し、非構造的課題を実験的に操作した。その結果、右 DLPFC が特に強く賦活し、曖昧な状況下で複数の可能性を保持し、適切な方向へ思考を誘導する機能が右 DLPFC と関係することが明らかとなった。

これらの研究は、デザイン推論は通常の問題解決とは異なる神経基盤を有し、前頭前野、特に右 DLPFC が重要な役割を果たすという強固なエビデンスを提供している。また、価値判断を行う内側前頭前野 (MPFC) や意思決定に関わる腹内側前頭前野 (V-MPFC) もタスクの評価・選択局面で関与するとされ、デザイン推論が複数の前頭前野サブ領域の協調的作用により支えられていることが示唆される[1]。

2.1.3. スケッチを伴うデザイン発想と前頭前野賦活：fNIRS 研究の展開

fMRI は脳深部を含む高い空間分解能をもつが、強い身体拘束が課されるため、デザイン実践において重要な「スケッチ」という身体的行為を自然に遂行できないという制約がある。特にデザイン推論においては、手を動かしながら視覚的情報を外在化し、それを手がかりにアイデアを生成・修正していく一連の認知-身体的プロセスが本質的であり、このプロセスを制限してしまうことは研究的妥当性を損なう可能性が指摘されてきた。

そこで近年、デザイン研究の領域では fNIRS (functional Near-Infrared Spectroscopy：近赤外分光法) が急速に普及している。fNIRS は、ヘモグロビンの酸化・脱酸化状態の変化を頭皮表面から非侵襲的に計測する技術であり、被験者が机に向かって自由にスケッチを行ったり、資料を参照したりといった自然な身体動作が許容される点に大きな強みがある[1, 4]。また、装置が小型・軽量で、計測環境の制約が極めて小さいため、美術大学・デザインラボなど実際の学習・制作空間での実験も可能である。こうした高いエコロジカル・バリディティは、これまでの神経科学的研究では捉えにくかった「リアルなデザイン推論」の神経過程を明らかにする上で大きな意義をもつ。

スケッチ行為は単なる描画ではなく、デザイン推論を支える高度な認知操作の連鎖である。Goel[5]や Tversky[6]の知見によれば、スケッチは「発散的外在化」「再解釈」「形態精緻化」「評価・選択」という複数の認知操作によって段階的に構成される。発散的外在化においては、曖昧なイメージを素早く線として描き出すことで思考が外在化され、前頭前野の中でも特に DLPFC が多様な可能性

の保持と操作のために活性化する。続く再解釈の段階では、描いた図形を見直し、新たな意味を抽出するため、自己内省や意味統合に関わる DMN の関与が想定される。形態精緻化では、比例・構造・具体形状の検討が進むため、FPN の中でも作業記憶と計画の保持に関わる領域が中心的に働く。さらに評価・選択の段階では、複数案の価値判断を行うため MPFC や OFC が賦活し、選択行動を支える。このようにスケッチは複数の認知システムを往還しながら進行する複合的な思考行為であり、その中心的な司令塔として前頭前野が機能するため、fNIRS で計測する対象として極めて適している。

加藤ら[4]は、fNIRS を用いて「典型形状の想起スケッチ（記憶依存）」と「新規デザイン発想スケッチ（創造依存）」という二種類のスケッチ課題を比較し、デザイン推論における創造的行為の神経生理学的特徴を明らかにした。結果として、新規発想課題では、右 DLPFC が顕著な賦活を示し、多様な選択肢を保持しながら探索的推論を行う機能が強く働いていることが示唆された。また左 DLPFC は形態操作や論理的構造化の場面で持続的な活動を示し、発散と収束を往還する思考過程において両側 DLPFC が異なる役割を果たすことが確認された。さらに MPFC はアイデアの自己評価・意味づけに関わり、OFC は複数案を比較し選択する評価局面で最も強く賦活した。これらは「デザイン推論における創造的操作は、多段階の意味処理・価値判断・形態操作を統合する複雑な認知プロセスであり、単なる形状操作ではない」という点を神経科学的に裏づけている。特に「新規生成」条件で最大の活動が見られたことは、新しい概念構築が前頭前野に高い負荷を要する創造的操作であることを強く示している。

近年では、fNIRS を用いたデザイン研究はさらに多様な方向へ拡張している。例えば、上位概念（コンセプト）生成時に mPFC の持続活動が観測され、抽象的価値構築が前頭前野の深い自己関連的处理を伴うことが示されている。また、複数案の比較・選択時に OFC が顕著に賦活する知見は、デザイン教育や評価行為の神経基盤を理解する上で重要である。さらに熟練デザイナーと初心者の比較では、熟練者は前頭前野賦活が効率的で、より少ない認知資源で高度な判断を行うといった専門性の神経指標も示されている。手描きスケッチとデジタルスケッチの比較研究では、前者の方が外在化の自由度が高いぶん発散段階での前頭前野活動が強くなるという結果も示されている。このように fNIRS の適用範囲は広がり続けており、デザイン行動の理解だけでなく教育・評価・インターフェース設計への応用可能性も開かれている。

2.1.4. 抽象的／具体的思考段階と前頭前野賦活の差異

デザイン推論には、一般的な問題解決とは異なり「抽象的段階」と「具体的段階」という質的に異なる二つの思考様式が存在する。抽象的段階では、利用価値、目的、使用文脈、ユーザー像、実現原理など、課題の上位概念的枠組みを再構成することが中心となり、デザイナーは既存の知識体系や長期記憶に依存しつつ多様な可能性を広く探索し、解の方向性や価値基準そのものを再定義する必要がある。これに対し具体的段階では、形状、構造、寸法、配置、機能配置など、物理的・視覚的特性を扱う形態操作が中心となり、外在化されたスケッチ資料を基盤として構造的整合性や具体的成立性を検討するプロセスが求められる。

こうした二段階の認知的差異を神経生理学的に検証した研究として、第3章の内容は fNIRS (NIRS) による前頭前野賦活の計測と、RRI に基づく自律神経活動の解析を組み合わせることで、「段階ごとの脳活動の違い」を定量的に明らかにした。fNIRS は脳深部の信号が得られにくく、主に前頭前野の表層に限定される。しかし、多くのデザイン思考研究では前頭前野が主要関心領域であるため、適合性は高い[7]。

その結果、第一に抽象的段階では具体的段階と比較して DLPFC・MPFC を中心とする前頭前野の賦活が有意に高く、抽象的思考が「認知的負荷の大きいプロセス」であることが示された。これは、抽象段階では「選択肢の生成」「概念の統合」「価値の再評価」「文脈の再構築」といった高次の意味処理が必要となるため、作業記憶・注意制御・概念統合を担う前頭前野の広いネットワークが動員されるという神経心理学的理解と整合する。

第二に、実験参加者の個人差に着目した分析では、アイデアを多く生成した被験者は抽象段階において特に強い前頭前野賦活を示しており、「発想量が多い被験者ほど抽象段階での神経的活動が効率的に高まる」という発想能力の神経指標が示唆された。これは、豊富なアイデアを生み出す被験者は、抽象概念の生成や価値基準の設定により多くの認知資源を投下し、初期段階で広範な概念空間を形成する傾向を持つ可能性を示している。

第三に、抽象→具体の連続課題として実施した場合、後半のタスクでは前頭前野賦活が低減し、これは認知疲労や注意資源の減衰を反映していると考えられる。特に連続した創造的課題は DLPFC に長時間の負荷を与えることが多く、後半に賦活が低下する現象は先行研究の知見とも一致する。また本研究の中で興味

深い点は、抽象・具体が内容的に強く関連しない二つの独立課題であっても、アイデア生成量の多い参加者はやはり最初の抽象的課題で著しく高い賦活を示したことである。これは「抽象思考での前頭前野賦活の強さ」がその後の創造的振る舞いに一般化して影響する可能性を示唆し、発想能力の個人差に関連する神経指標として注目される。

さらに、自律神経指標（RRI）との関連分析では、抽象段階における LF/HF 変動が前頭前野賦活と相関を示す傾向があり、抽象的思考は単に脳前頭前野の働きが強だけでなく、生理的覚醒レベルの調整を伴う複雑な認知状態であることが示唆された。これらの知見全体から、デザイン推論における抽象段階は、「新規性・多様性を生み出す発散的創造プロセスの核」であり、その神経的基盤として前頭前野が具体段階よりも広範かつ強力に動員されることが明らかである。一方で具体段階は、概念の具象化・構造化・調整を行う収束的プロセスであり、抽象段階の結果を視覚的・物理的形式へ落とし込む際に必要な作業記憶や実行機能が働くものの、抽象段階ほどの高負荷にはならないと考えられる。以上より、抽象的段階と具体的段階は単なる連続的なフェーズではなく、認知機能・神経活動の質が明確に異なる二種類の推論プロセスであり、この認知的差異こそがデザイン推論の本質を構成する重要な要素であるといえる。

2.2. デザイン推論中の自律神経活性状態について先行研究

2.2.1. RRI（心拍 R-R 間隔）と自律神経系

心拍 R-R 間隔（R-R interval: RRI）は、心電図上の連続する R 波の時間間隔を示し、自律神経活動を最も直接的に反映する生理指標である。一般に、RRI が短くなると心拍数が増加し、交感神経優位の覚醒状態や緊張状態を示す。一方で、RRI が長い場合は、副交感神経が優位となり、安静・回復の状態にあると理解される[8]。

さらに、RRI の連続的なゆらぎは心拍変動として解析され、LF（低周波成分）・HF（高周波成分）など、交感・副交感神経の調節状態を推定することが可能である。しかし、RRI の変化そのものは、心拍変動よりも直接的に「瞬間的な覚醒レベル」を捉える指標とされる[9]。

国際的ガイドライン[8]は、RRI を「ストレス反応・課題負荷・集中度などの時間的变化を測定する基礎指標」と位置づけており、多くの心理学・人間工学研究の基盤となっている。

2.2.2. 発散思考・創造的課題と RRI

デザイン推論は創造的課題と深く関連しているため、発散思考を対象とした研究は直接的な示唆を与える。

Loudon ら[10]は、新しい名称をできるだけ多く生成する発散思考課題中の生理反応を計測し、創造性が高い被験者ほど RRI が大きく短縮する傾向を報告している。この結果は、創造的発想には集中・努力投入を伴う交感神経活性が一定程度必要である可能性を示している。

一方で Silvia ら[11]は、創造的達成が高い個人は課題要求に応じて RRI を動的に変化させる柔軟性を持つと述べている。創造的個人ほど、課題中に RRI を素早く短縮させ、収束局面で回復させるなど、状況に応じた自律神経調整能力が高いことが示されている。

これらの知見は、創造的活動における RRI の解釈が単純ではなく、「RRI の絶対値」ではなく「変化のパターン」「課題局面との対応」で捉える必要があることを示している。

2.2.3. デザイン推論における RRI を用いた研究

デザイン推論そのものを対象とし、RRI を同時計測した研究は限られている。その中でも、第4章は、デザイン推論を抽象段階と具体段階に分け、それぞれの思考局面で RRI を比較した先駆的研究として位置づけられる。

抽象的アイデア発想段階（利用文脈・価値・ユーザー像の構築）では、RRI が短縮する傾向が観察されており、これは交感神経活動の上昇、すなわち高い認知的努力や緊張水準を反映すると解釈されている。一方、具体的形態検討段階では RRI の短縮は比較的弱く、認知負荷が抽象段階に比べて低い可能性が示唆された。

さらに、アイデア生成量の多い被験者では、抽象段階において前頭前野（特に右 DLPFC）の賦活と RRI の短縮が同時に起こるといふ共変動が確認されている。この結果は、「発想のピーク局面では、脳活動と自律神経活動が協調的に高まる」といふ仮説を支持する。

2.2.4. RRI によるデザイン推論研究の意義

RRI (R-R Interval) は心臓の拍動リズムのゆらぎを示す指標であり、一般的な心拍変動の中でも最も直接的に取得できる生理データである[12]。RRI は時間分解能が高く、数秒単位の揺れを反映できるため、デザイン推論における思考の微細な変化—例えば「アイデア生成の開始」「発想が停滞する瞬間」「意思決定直前の緊張」「発見の前後」「助言の受容直後の心的負荷の増減」など—を連続的に捉えることができる点に大きな意義がある。特に抽象的思考や新規アイデア生成は、一時的な覚醒の上昇や自律神経の調整を伴うことが多く、RRI の変動はこうした心理的状态と密接に対応するとされる[13]。

さらに RRI は fNIRS と同時計測が容易であり、前頭前野の賦活（思考負荷・意味統合・注意制御）と、自律神経の状態（交感・副交感のバランス）を同一時間軸で取得できるため、「脳活動と生理状態」という二つの異なる経路を統合的に分析することが可能となる。この点は、デザイン推論のように多層的・多段階的に進行する認知活動を理解する上で極めて重要であり、特に思考の「努力投入量」や「認知負荷」、「発想プロセスの流動性」「作業中の心理的負荷の変動」を可視化できるという点で、RRI は fNIRS を補完する強力な指標となる[14]。

一方で、RRI は心理状態に敏感に反応する一方で、呼吸パターン・姿勢変化・手の動きなどの非認知的要因の影響も受けやすく、創造的課題ではスケッチ動作や身体の前傾などが頻繁に生じるため、デザイン研究で利用する際には注意が必要である。

そのため、

- (1) ベースラインを厳密に管理すること
- (2) 呼吸レートを一定に保つよう指示または計測すること
- (3) 加速度センサを用いて体動由来のノイズを除去すること

といった方法論上の工夫が欠かせない[15]。また、RRI の主要な成分である LF, HF, LF/HF 比はそれぞれ認知負荷・緊張・リラックス・交感神経活動の指標とされるが、デザイン推論におけるどの段階（抽象・具体・評価）でどのように反応するかについての体系的な研究はまだ蓄積が不十分である。

加えて、創造性の個人差—例えば「多くのアイデアを生み出す人ほど抽象段階で交感神経活性が高まるのか」「具体段階では副交感神経が安定化しやすいのか」など—との関連も未解明であり、この領域には大きな研究の余地が残されている[13]。

以上を踏まえると、RRI はデザイン推論の理解において「創造的思考の努力量」「内的緊張」「思考の切り替え」「認知負荷の変動」を捉える主要な生理指標として位置づけられるが、その反応が思考段階、助言の抽象度、発想の質、個人差などの条件とどのように結びつくかは明確でなく、本研究はまさにこのギャップを埋め、デザイン推論の認知-生理学的メカニズムを多面的に明らかにすることを目的とする。

2.3. デザイン課題の助言について先行研究

2.3.1. デザイン課題における助言の役割

デザイン課題における助言は、学習者やデザイナーが課題に取り組む際の“外部からの認知的介入”として働き、思考方向の決定、問題の枠組みの再設定、発想の広がり、アイデアの評価基準、制作方略など、多様な側面に影響を与える。従来、助言は主に誤り訂正・技術的指導・知識補足といった教育的機能から語られてきたが、近年のデザイン認知研究では、助言が「思考プロセスそのものに直接作用する」点が注目されている。Goldschmidt[16]は、助言が注意の焦点を変化させ、発想の方向を構造化する働きがあると指摘し、Dorst & Cross[17]は助言が「問題の再定義」を誘発し、デザイン推論の経路を大きく変える可能性を示した。また Schön[18]は、デザイナーは外部からの助言と自身のスケッチとの「相互作用」を通して逐次的に問題認識を変化させると述べ、助言が認知的刺激としてデザイン行為を方向づけることを示している。このように助言は単なる情報提供ではなく、デザイナーの思考を誘導・制約・拡張する“認知的枠組み操作”としての機能をもち、デザイン推論の過程そのものに深く組み込まれている。

2.3.2. 助言が発想プロセスに与える影響

助言は、生成されるアイデアの量や質に影響を与えるだけでなく、発想者がどのように問題を捉え、どのような順序で思考を展開していくかという「発想プロセスそのもの」に直接的な変化をもたらす重要な要因である。Dorst&Cross[17]は、デザイン課題の思考過程を分析し、助言がデザイナーの問題空間の再構成を促すことを示した。彼らによれば、助言は発想者に新しい視点や制約を導入することで、これまでとは異なる意味構造を立ち上げ、発散と収束のサイクルを切り替える“思考の転換点”として機能する。このことは、助言が単なる「追加情

報」ではなく、発想の方向性そのものを再設定する介入であることを示している。

一方で Schön[18]は、デザイナーが助言やフィードバックを受け取る際、「スケッチ・材料・道具との対話」を行うことで思考を更新すると論じた。デザイナーは助言をそのまま受動的に取り込むのではなく、スケッチを描き直したり、材料に働きかけたりしながら、助言の意味を自ら再解釈し、問題構造を組み替えていく。Schön によれば、この“反省的対話”のなかで生じる微細な気づきが、しばしば認知的ジャンプを生み出し、新たな発想領域への移行を可能にする。つまり助言は、デザイン推論の内部で生じる「再構成・再定義」の契機として重要な役割を果たす。

さらに Cardella[19]や Atman[20]ら工学デザイン教育の研究では、助言のタイミング・形式・抽象度が、探索行動の幅、情報収集の量、問題定義の深さに大きく影響することが報告されている。早期の助言は「問題の枠組み」を規定しやすく、探索範囲を狭める傾向がある一方、適切なタイミングの助言は探索を加速し、未発見の解の空間へと導く。また、助言が抽象的である場合、発想者は自身の内部表象をもとに広範な可能性を探索するよう促されるため、発散過程の拡大につながる。逆に具体的な形態操作を主とする助言は、技術的実現性や構造的整合性などの観点からのフィルタリングを促すため、発想を収束方向へ導き、選択・決定過程を支援する。

こうした知見を総合すると、助言は「個々のアイデアを良くする」だけではなく、発想プロセスの遷移構造を形成する“プロセス介入”として機能することがわかる。すなわち助言は、発散と収束の切り替えを誘発し、問題定義の枠組みを再構成し、情報探索の深さと広さを変化させ、さらにはデザイナーがどのようにスケッチ・材料・記憶資源を活用するかという“思考の運動性”そのものに影響を及ぼす。したがって助言は、デザイン推論の構造を外部から調整するメタレベルの要因であり、その効果は単なる成果物の向上にとどまらず、発想者の認知的方略・探索順序・評価のタイミングといった「プロセスの質」そのものを形づくる重要な要素として位置づけられる。

2.3.3. 設計教育における助言の研究

設計教育の領域では、教員から学習者への助言は、単なる指示やアドバイスではなく、学習者の思考の方向性・深さ・広がりや左右する中心的要因として扱われてきた。特にデザイン教育は答えが一つに定まらない「非構造的課題」で構成

されるため、助言の内容・タイミング・抽象度が、学習者の発想プロセスに及ぼす影響は、他の学習領域に比べて大きいと言われている。

Oxman[21]はデザイン教育を「概念化の訓練」と捉え、学生が自ら意味構造を形成しながら問題を理解し、独自の発想枠組みを構築するプロセスこそが教育の中心であると述べている。Oxman は、抽象度の高い助言が学生に新しい概念的枠組みを促し、設計対象をより上位レベルの意味体系として捉えることを可能にする点を強調する。このことは、抽象助言が単にアイデアの幅を広げるだけでなく、学生の「考え方そのもの」を変容させる効果を持つことを示している。

Goldschmidt[16]は、スケッチを伴うデザインセッションの詳細な分析を通じて、助言が思考の焦点を転換させ、発散と収束のバランスを動的に調整する作用をもつことを明らかにした。Goldschmidt の研究では、学生がスケッチを描いている最中に教員から助言を受けると、「どの部分を見るか」「どのレベルで考えるか」が切り替わり、思考の方向性が更新される様子が観察されている。これは Schön の理論とも関連しており、助言がスケッチ・材料・思考との“対話”を誘発し、学生の内部的推論プロセスを再構成する契機となることを示す。

工学設計教育の研究では、Atman[20]が助言の効果をより行動的に分析している。Atman の研究では、助言の受け方や理解のされ方によって、学生の情報探索量・問題定義の精密さ・考察の深さが大きく異なることが報告されている。特に、助言が早い段階で与えられると探索範囲が狭まりやすく、逆に適切なタイミングで与えられると探索を加速し、多様な可能性を検討する余地を広げるという結果が示されている。また、抽象助言は広範な情報収集と概念的探索を促し、具体助言は設計案の収束や具体化を支援するなど、助言の抽象度と発想過程が密接にリンクしていることも指摘されている。

さらに、教育工学や学習科学の文脈では、助言は「学習者の認知プロセスを外部から調整するメタ認知的支援」として位置づけられている。助言は学習者の思考を直接操作するのではなく、「どのように考えるか」に働きかけ、学生が自分の発想過程を自覚し、より適切な方略を選べるようにする役割を担う。この視点は、デザイン教育が単に技術や知識を教える場ではなく、「発想者としての認知構造を育てる場」であることを改めて示す。

以上の先行研究を総合すると、助言は知識伝達を目的とした従来型の指導とは異なり、学生の発想プロセスの進め方・広げ方・深め方を制御する「認知プロセスの介入」として理解されるべきである。助言は、発散／収束のタイミングを調整し、焦点を転換し、概念形成を支え、探索の広さ・深さを変化させる「プロセス操作的支援」であり、設計教育の成否を決定づける学習支援要素であると言える。

2.3.4. 助言と創造性に関する心理学研究

創造性研究において助言は、外部環境の中でも特に強力な影響因子として扱われてきた。なかでも助言の抽象度は、アイデアの流暢性（fluency：アイデアの量）、柔軟性（flexibility：発想の多様性）、独創性（originality：新規性）、精緻性（elaboration：詳細さや完成度）といった創造性指標にどのように影響するかという観点から多くの実証研究が行われている。

Runco[22]や Guilford の創造性理論では、抽象度の高い指示や助言が発散思考を刺激し、より多様で新規性の高いアイデアを生み出しやすくすることが示されている。抽象助言は、発想者の注意を具体的な形状や仕様から切り離し、より上位概念（価値・目的・意味・ユーザー経験）への思考移行を促すため、認知的探索空間が拡大しやすい。

また Ward[23]は、認知分類研究の立場から、抽象助言が既存のカテゴリー構造に依存しない常識から外れた考え方を誘発し、これまでになかった新しい概念の生成を強めることを示した。Ward の研究では、抽象的な指示を受けた参加者は、従来の物理的特徴や用途にとらわれないアイデアを生み出す傾向が高く、創造性の根幹を成す「分類からの自由度」が高まると報告されている。

一方で Smith[24]は、具体助言が「機能的固着」を誘発し、利用目的・構造・既存知識に思考が縛られるリスクを指摘している。具体助言はアイデアの精密化や実行性判断には有効であるが、同時に発散の幅を狭めたり、既成概念から抜け出しにくくしたりする可能性がある。この点は、助言の種類によって創造性の方向性が異なることを明確に示す重要な知見である。

UX デザイン研究では、Norman[25]や Hassenzahl が、ユーザーの価値観・感情・意味に焦点を当てる「高次目標」を促す助言が創造性を高めると述べている。抽象助言は「なぜそれを使うのか」「どのような価値を生み出すのか」といった意味的レベルの思考を喚起し、利用文脈から発想を再構築させる。一方、具体助言はプロトタイプの改善・詳細設計・制約の整理に効果を発揮し、収束的判断を支える。

これらを総合すると、助言は単に発想を促す「刺激」ではなく、「発散 → 収束」の方向性をコントロールする「創造性の調整」として機能していると解釈できる。特に抽象助言は意味的探索を拡張し、具体助言は実行的判断を促進するという「補完的役割」を持つことが、心理学研究によって明らかになっている。

2.3.5. 神経科学的観点から見た助言研究

助言と脳活動の関係は、デザイン分野ではまだ研究が始まったばかりであるが、近年のデザイン脳科学研究は、助言の抽象度が脳前頭前野活動に影響を与える可能性を示している。

Gilbert ら[26]は、課題の曖昧性や概念レベルが背外側前頭前野 (DLPFC) および内側前頭前野 (MPFC) の賦活に大きく影響することを示した。抽象度の高いタスクは、多数の選択肢を保持しながら概念統合を行うため、DLPFC のワーキングメモリ・制御機能が強く働き、MPFC の意味処理・自己関連的思考も活性化する。これは、抽象助言がデザイン推論における「概念統合の負荷」を増大させ、前頭前野ネットワークをより強く動員することを示唆している。

また心理生理学の研究では、抽象助言を受けた被験者は思考負荷の増大により RRI が短縮し (交感神経)、認知的努力が増える傾向が見られるという報告がある[27]。これは、抽象的課題では解の探索空間が広く、思考の方向性を自ら構築する必要があるため、前頭前野活動の増大と自律神経覚醒が同時に生じるモデルと整合する。

一方で具体助言は、「方向性が明確である」「評価基準が分かりやすい」という性質から、MPFC や眼窩前頭皮質 (OFC) の安定的な活動につながりやすく、RRI が長くなる (副交感神経) ケースが見られるとされる。これは、具体助言が発想者に安心感や構造的な道筋を与え、認知状態が整い、安定した収束判断へ移行しやすいことを示す。

こうした神経科学的知見に基づけば、助言は

抽象助言 → *DLPFC/MPFC 賦活上昇* → *RRI 短縮* → *発散的探索の増大*

具体助言 → *OFC/MPFC の安定* → *RRI 長期化* → *収束的判断の促進*

という異なる生理・神経プロファイルを引き起こす可能性がある。

これらは、助言の抽象度が発想者の「認知負荷」「覚醒レベル」「思考プロセスの遷移」に影響し、その結果としてアイデアの質・方向性が変化するというモデルを支持する。特に「助言、脳活動、自律神、発想の質量」を同時に扱う研究は未だ少ないため、この点を統合的に扱うあなたの研究は、デザイン推論の生理・認知基盤を明らかにするうえで極めて重要な位置づけにある。

参考・引用文献

- [1] Hu, L., & McCuskey Shepley, M. (2022). Design meets neuroscience: A preliminary review of design research using neuroscience tools. *Journal of Interior Design*, 47(1), 31-50.
- [2] Alexiou, K., Zamenopoulos, T., Johnson, J. H., & Gilbert, S. J. (2009). Exploring the neurological basis of design cognition using brain imaging. *Design Studies*, 30(6), 623-647.
- [3] Gilbert, S. J., Zamenopoulos, T., Alexiou, K., & Johnson, J. H. (2010). Involvement of right dorsolateral prefrontal cortex in ill-structured design cognition. *Brain Research*, 1312, 79-88.
- [4] 加藤崇光・中谷裕子・芦澤良一 (2021) 「Brain activation during sketch tasks for design idea generation measured by NIRS」『*Journal of the Science of Design*』5(1), 1-8.
- [5] Goel, V., & Pirolli, P. (1992). The structure of design problem spaces. *Cognitive Science*, 16(3), 395-429.
- [6] Tversky, B., & Suwa, M. (2009). Thinking with sketches. In *Tools for Innovation*. Oxford University Press.
- [7] Ayaz, H., Shewokis, P. A., Bunce, S., Schultheis, M. T., & Onaral, B. (2013). NIRS for everyday higher cognition tasks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 1-11.
- [8] 八重樫文・永盛祐介ほか (2024) 「デザイン研究における生理学的アプローチの動向」『*立命館大学デザイン科学研究センター紀要*』5, 107-120.
- [9] Task Force (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 93(5), 1043-1065.
- [10] Malik, M. (1996). Heart rate variability and autonomic regulation. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 1, 151-181.
- [11] Loudon, G. H., et al. (2016). Physiological response during divergent thinking. *Journal of Cognitive Enhancement*
- [12] Silvia, P. J., et al. (2014). Creative achievement and autonomic markers of effort. *Psychophysiology*, 51(2), 154-163.
- [13] Cacioppo, J. T., Tassinary, L. G., & Berntson, G. G. (2007). *Handbook of Psychophysiology*. Cambridge University Press.

- [14] Gerjets, P., Scheiter, K., & Cierniak, G. (2014). Using neuroimaging to track cognitive load. *Educational Psychology Review*, 26(1), 1-27.
- [15] Tarvainen, M. P., et al. (2014). Kubios HRV - Heart rate variability analysis software. *Computers in Biology and Medicine*, 42, 102-112.
- [16] Goldschmidt, G. (2014). *Linkography: Unfolding the Design Process*. MIT Press.
- [17] Dorst, K., & Cross, N. (2001). Creativity in the design process. *Design Studies*, 22(5), 425-437.
- [18] Schön, D. A. (1983). *The Reflective Practitioner*. Basic Books.
- [19] Cardella, M. E. (2009). Students' use of mathematics in engineering design. *Journal of Engineering Education*, 98(3), 231-244.
- [20] Atman, C. J., et al. (1999). Cognitive processes in engineering design. *Design Studies*, 20(2), 131-152.
- [21] Oxman, R. (2001). The mind in design: A conceptual framework for cognition in design. *Design Issues*, 17(1), 59-85.
- [22] Runco, M. A. (2007). *Creativity: Theories and Themes*. Academic Press.
- [23] Ward, T. B. (1994). Structured imagination: The role of category structure in exemplar generation. *Cognitive Psychology*, 27(1), 1-40.
- [24] Smith, S. M. (1995). Creative cognition and functional fixedness. In *Creative Cognition* (pp. xx-xx). MIT Press.
- [25] Norman, D. A. (2013). *The Design of Everyday Things*. Basic Books.
- [26] Gilbert, S. J., et al. (2010). Neurocognitive basis of design thinking. *Brain Research*, 1312, 79-88.
- [27] Cacioppo, J. T., et al. (2007). *Handbook of Psychophysiology*. Cambridge University Press.

3 章

デザイン活動の二種類の推論段階での脳前頭前野と
自律神経の活性状態の理解

3.1. 背景

デザイン創造のプロセスは、一般に「概念空間」と「物理空間」の二つの領域を往還しながら進行するとされる。概念空間では、対象の利用目的・価値・使用文脈といった抽象的な構想が形成され、物理空間では、それらの構想を基に具体的な形態・構造・機能が具現化される。すなわち、抽象段階で思い描かれた「概念としてのデザイン」が、物理段階で「形としてのデザイン」へと投影される過程である[1]。

この二領域の対応関係は、先行研究においてさまざまな概念構成によって説明されており、例えば「心理空間」と「物理空間」[2]、「コンセプトの構築」と「デザイン要件の固有要件化」[3]、「探索のサイクル」と「解決のサイクル」[4]などの二分法は、いずれも抽象的推論と具体的推論という二種類の思考活動を強調する点で共通している。したがって、デザイナーにとってのアイデア創出は、抽象的次元（A: Abstract）と具体的次元（C: Concrete）という二種類の推論空間を行き来する認知活動として理解できる。

ここで言う抽象的発想（A）は、「目的を達成するための原理や方法」「価値創造の方向性」「利用文脈の構造化」など、デザインの根幹に関わる意味的・概念的フレームを扱う。一方、具体的発想（C）は、Aで構築された方向性を前提に、形状・構造・操作性・素材など、視覚的・物理的特徴を具体化する検討である。したがって、両者は単なる段階の違いではなく、扱う情報の性質・思考負荷・必要とされる認知的リソースが大きく異なるプロセスである。

近年では、従来のように物理的形状の改善だけで競争力を得ることが難しくなり、むしろ「A（抽象的推論）をどれだけ深く行えるか」がデザインの質を左右する傾向が顕著になっている。これは、製品やサービスを取り巻く社会的課題の複雑化、ユーザー価値の多様化、体験志向型消費への移行など、意味・価値レベルの課題が増加しているためである。また、センシング技術やネットワーク技術、AI、材料工学などのシーズ技術の発展により、「目的達成の手段」が飛躍的に拡大したことも、抽象的発想の重要性を高めている。これにより、従来では想定し得なかった利用価値の発見や、新たな概念定義を伴うような革新的デザインの創出が可能となり、デザイナーには形状改善にとどまらない「価値の再定義」が求められる時代となっている。

しかし、このような抽象度の異なるアイデア発想の性質についての知見は、依然として十分に体系化されているとは言い難い。既存研究の多くは、観察・インタビュー・スケッチ分析・成果物評価など、外部から把握できる定性的データに基づく分析が中心である。そのため、デザイナーの思考時に生じる内的プロセス

——たとえば、「抽象的構想時にどのような脳活動が生じるのか」「具体的形態検討時にどのような自律神経反応を伴うのか」「助言や刺激がこれらの活動をどう変化させるのか」——について、定量的に明らかにされた知見は限られている。

加えて、デザイン発想はしばしば「認知負荷の変動」「集中度の変化」「ストレスレベルの揺れ」といった心理生理的要素の影響を受けやすい。しかし、こうした生理的側面をリアルタイムに計測し、思考段階の違いと関連付けて理解した研究は極めて少ない。背景には、デザイン行為が本来持つ自由度の高さや、計測機器の制約、計測環境の整備の難しさがある。

以上のような状況を踏まえると、デザイン推論の二種類の思考段階を脳前頭前野活動や自律神経反応といった生理指標から定量的に捉え、その差異を明確にする研究の必要性が非常に高いと言える。本研究はまさにその課題を扱うものであり、従来の定性的知見を補完し、デザイン認知研究に新たな科学的基盤を提供することが期待される。

3.2. デザイン推論時の脳活動に関する既往研究

これまで主に定性的分析に依拠してきたデザイン推論研究において、近年はfMRI（磁気共鳴機能画像法）やNIRS（近赤外線分光法）といった非侵襲的脳計測技術の発展により、脳活動を指標とした定量的理解が可能となりつつある。神経科学分野における研究蓄積と解析技術の高度化は、デザイン研究においても新たな知見をもたらしており、従来の観察・インタビュー・成果物評価といった外在的データに加え、思考プロセスに伴う脳内部の活動を直接的に把握する試みが徐々に進展している。

デザイン推論と脳活動との関係についての先駆的な研究として、AlexiouらおよびGuilbertらによるfMRIを用いた研究が挙げられる。彼らは、一般的な問題解決プロセスとは異なり、デザイン発想時には広範な脳領域ネットワークが動員されることを示し[5]、さらに非構造的課題を扱う際には、前帯状皮質（ACC）と脳前頭前野DLPFC（背外側前頭前野）との協調的活動が顕著であることを報告している[6,7]。Haysらも同様にfMRIによる研究を行い、プロダクトデザイン時のアイデア発想が左前帯状皮質の活性化と関連していることを明らかにし、さらに「課題に与えられる制約の有無」が脳活動パターンに影響することを示した[8]。

ただし、fMRIでは身体や頭部の動きが強く制限されるため、スケッチや模型操作などの自然なデザイン行為を伴う計測が事実上不可能である。このため、デ

デザイン思考を自然な形で計測するには限界があり、比較的「不自然な状況」での認知活動を対象とせざるを得ないという課題が残る。

そこで注目されるのが、より自然な姿勢・環境下で計測が可能な NIRS による研究である。NIRS は身体拘束が少なく、机上でのスケッチや模型製作など、実際のデザイン活動に近い行動を取りながら脳活動を計測できることから、デザイン研究との親和性が高い。永盛らは、デザイン課題における制約条件や主観評価が脳賦活と関連することを示し[9]、これはデザイン学領域における NIRS 活用の先駆例として重要である。

さらに、加藤らはスケッチ描画を含むデザイン思考と脳活動の関係を詳細に分析し、デザイン課題が前頭前野 (PFC) を広範に活性化すること[10]、また、複数アイデアの生成においては、既存アイデアのバリエーションを派生させるよりも、長期記憶を参照して新規アイデアを創出する場面で PFC 活性が高まることを報告した[11]。加えて、MPFC (内側前頭前野) および OFC (眼窩前頭前野) は、「既存のアイデア想起」よりも「新規アイデア発想」時に強く活動する傾向があることも示されている[12]。これらの知見は、デザインにおける発想活動が前頭前野を中心とした高次認知システムと密接に関連していることを裏付けるものである。

このように、先行研究では、(1) 課題条件の違いや (2) 発想のタイプといった要因と脳活動の関連を探る研究が蓄積されてきた。しかしこれらは主として「課題設定」や「操作方略の違い」を焦点としたものであり、デザイン過程の核心である 推論対象の抽象度 (A: 抽象/C: 具体) の違いに着目した研究はほとんど見られない。

デザイン推論は、抽象的構想 (目的・価値・原理) から具体的形態 (形状・構造) へと移行する二段階構造を本質とするにもかかわらず、その二段階が脳活動にどのような差異をもたらすかは依然として明確ではない。特に、抽象度の高いアイデア発想がより高度な制御機能や意味処理を必要とするのか、または具体的アイデア発想が空間認知や視覚的処理を強く要求するのかなど、認知的特徴の違いは神経生理学的視点から十分に検討されていない。

以上の点を踏まえると、デザイン推論における抽象的発想 (A) と具体的発想 (C) の脳活動状態の相違を明らかにすることは、デザイン研究の新しい理論的基盤を築くうえで極めて重要である。本研究がこの課題を扱う意義は大きく、デザイン思考の理解を定性的記述から生理学的・神経科学的水準へと拡張することにつながる。

3.3. 目的

以上の先行研究を踏まえ、本研究では、デザイン考案の際に重要となる二種類のアイデア発想——すなわち「ある目的を達成する原理や方法に関するアイデア発想（抽象的構想段階）」と「具体的な形態・構造に関するアイデア発想（具体的形態段階）」に着目し、これら二つの思考段階における脳前頭前野の賦活状態と自律神経系の働きを定量的に把握することで、デザイン推論に内在する認知プロセスの特性を明らかにすることを目的とする。

脳前頭前野は、高次の認知的情報処理、特に概念統合、課題制御、ワーキングメモリ、意思決定などに深く関与する領域であり[13]、デザイン推論の中核となる「複数の可能性を保持しながら方向性を構築する」思考に重要な役割を果たす。一方で、自律神経系は、覚醒度、ストレス反応、緊張・リラックス状態の変化を反映する生理システムであり、発想者の内的状態の変動を捉える上で不可欠な指標である。

この研究では、これら二つの指標を同時に計測し、思考の抽象と具体の違いが「脳活動」と「自律神経活動」のどのようなパターンの変化を生むのかを精密に検証する。そのために、脳前頭前野の賦活状態の計測には NIRS (Near-Infrared Spectroscopy) 脳計測装置を用い、自律神経系の活性状態の評価には RRI (R-R Interval) を指標とする。NIRS は自然なスケッチ・思考行動を妨げることなく計測可能であり、デザイン研究との親和性が高い。一方、RRI は瞬間的な覚醒レベルの変動を直ちに反映する指標であり、抽象思考と具体思考の負荷の違いを捉えるのに適している。

これら二つの生理指標の同時計測により、従来のデザイン研究では捉えきれなかった「発想プロセスの内部状態」をより多角的に解析することが可能となる。本研究は、二種類の思考段階とその順序の違いに焦点を当て、デザイン活動におけるアイデア発想の質の向上につなげる知見を得ることを意図する。

なお、この研究は京都女子大学臨床研究倫理審査委員会の許可(2021-9)を得て実施されるものであり、倫理的配慮のもとで参加者の安全とデータ取扱いの適正を確保する。

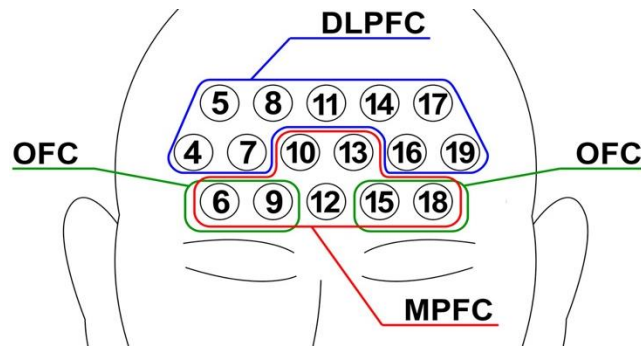


図 3-1 NIRS 脳計測装置の計測チャンネルと各脳領域との対応付け

3.4. 生理指標データの取得方法

3.4.1 脳前頭前野賦活状態の NIRS 脳計測装置による計測

(1) **原理および使用機材** NIRS 脳計測装置は人体組織を通過しヘモグロビンに吸収される近赤外光を利用している。人間の脳神経はその活動に酸素とグルコースを必要とし、脳の活動領域でヘモグロビンが増加すると近赤外線透過度は減衰する性質を利用し、近赤外光の変化量を測定して大脳皮質部分の脳賦活を可視化する。頭部に 30mm 間隔で光源と受光センサを配置し、各計測チャンネル領域での相対的な活動変化を測定できる。

使用する NIRS 脳計測装置は株式会社 NeU の WOT-220 である。前額部のみに対応した 22 の計測チャンネルを備えており、データサンプリング周期は 200msec である。なお本稿での脳賦活との表記は脳前頭前野部の賦活を指す。

(2) **計測方法** 脳の脳前頭前野部中央部分の 16 のチャンネルを計測対象とする。NIRS 脳計測装置の各計測チャンネルと脳の部位との対応付けには、脳波計測で用いられる国際 10-20 法で定義される電極位置と脳領域との対応関係を適用し、計測チャンネル 12 を Fpz に位置づけて NIRS 脳計測装置を装着する[14]。これにより各計測チャンネルと、本研究で計測対象とする DLPFC, MPFC, OFC の脳領域との位置的対応関係を推定する[15]。本研究で採用した対応付けを図 3-1 に示す。ただし NIRS 脳計測装置の原理的な制約から空間分解能は低く、また実験協力者毎に頭部の大きさは異なるため、上記の対応関係は厳密ではない。なお、汗、髪の毛、皮膚への光源及び受光センサの密着状態等の影響により信号を正常に取得できないことが計測開始前の信号状態確認で判明していたり、計測中の信号状態のモニタリングにより異常値が取得されていると判断されたりした計測チャンネルは分析対象から除外する。

計測対象である DLPFC 領域（背外側前頭前野：Dorsolateral Prefrontal Cortex）は、課題遂行のための注意保持[16]，抽象的思考など高次認知活動に関与し[17]，所与の正解が無い課題においてより活発に働くとされる[18]。MPFC 領域（内側前頭前野：Medial Prefrontal Cortex）は、遠隔記憶の検索に重要な役割を持ち[19]，意欲と意思決定に関与する[20, 21]。また所与の正解が無いデザイン問題の学習段階で DLPFC 領域と関連して働くとされる[6]。OFC 領域（眼窩前頭皮質：Orbitofrontal Cortex）は、情動の処理や脱抑制と関係しており[22]，快/不快の処理に関わるとされる[23]。

計測中は実験協力者の頭部の動きによる血流量変化の影響を抑えるため、各自の体に合わせて高さを調節した顎載せ台に顎を置き、頭部を動きにくくした状態とする。NIRS 脳計測装置を連続して装着している期間内に、複数のタスクと、データ補正のためのコントロールタスクを設けるブロック型のタスクデザインで実験する。

紙に何かを描くことは、具体的な形を発想する際だけでなく、抽象度の高いアイデア発想においても自然な行動なので、各タスクでは思考しながらアイデアを描くことを課す。アイデアを出しながら概念図やなんらかの形を描くことはデザイナーやデザインを学ぶ学生にとって自然な行為だからである。そしてコントロールタスクでは、実験協力者は何も考えず鉛筆で白紙に線を描く運動を行う。各タスク間には休息期間を設け、その間は、実験協力者は描画を含む動作や意識的な眼球運動を行わずに白紙をただ見ている状態とする。信号は実験の開始時点から終了時点まで継続して取得する。

(3) データ処理方法 脳の賦活状態を最も感度高く反映するとされる酸素化ヘモグロビンの信号を処理対象とする。0.001Hz~0.3Hz のバンドパスフィルターで心拍と体動等の影響を概ね除外し、血流動態分離法により頭皮の血流動態変化の影響を除去し[24]，各休息期間時の信号をゼロとするベースライン補正処理を各タスクの信号に対して適用する。なおタスク終了の 15 秒後以降をベースライン補正処理に用いる。

フィルター種類と設定値については、これまでの諸研究で NIRS 信号に適用されてきた処理と設定値の傾向[25] を参考に、本研究の実験内容から種類と設定値の用途を想定し、その範囲内で、後述する実験で取得された信号に対し除外する周波数域を変えた処理を複数回試行し、心拍や体動等の影響を概ね除去でき、また呼吸による影響はあまり大きくないと考えられたことから決定した。

以上のデータ処理は、血流動態分離法プラグイン[26]を適用した POTATO Ver. 3.8.60 を用いて行う。

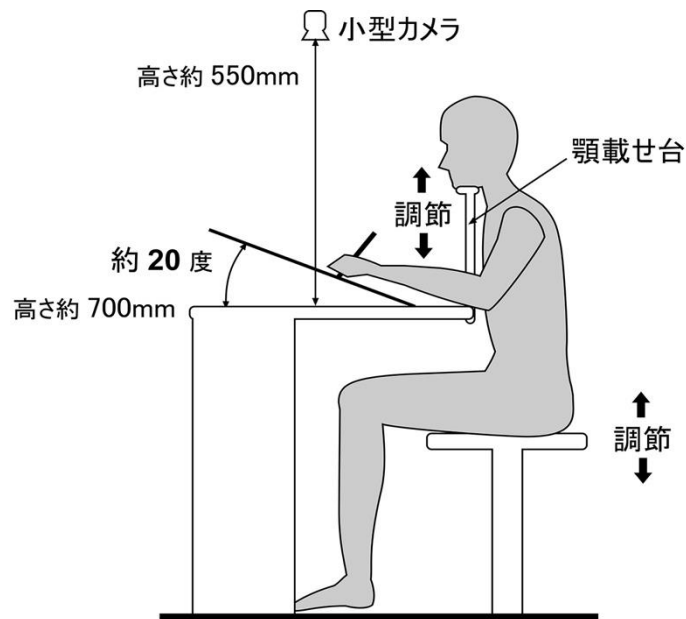


図 3-2 実験協力者のタスク遂行環境

3.4.2. 自律神経活性状態の RRI による計測

(1) **原理および使用機材** RRI (R-R Interval) は、ある期間の瞬時 R-R 間隔時系列の平均値を指す。なお R は心電図に現れる鋭いピーク (R 波) を指す。ストレスは交感神経を刺激し副交感神経を抑制するため RRI を短縮させると考えられている [27]。使用機材はユニオンツール株式会社の WHS-1 である。

(2) **計測方法** 実験協力者の胸部にセンサを付けたベルト電極を装着し、継続して信号取得する。皮膚への電極の密着状態等により異常値が取得されていることが判明した場合は、当該協力者のデータは分析対象から除外する。

(3) **データ処理方法** 信号を解析し、副交感神経の活動状態を反映するとされる HF と、交感神経の活動状態の指標となる LF/HF を求める [28]。採用した解析ソフト (ユニオンツール株式会社 RRI Analyzer 2) で LF の算出に最低限必要な 30 秒間を計算区間とし解析周期は 1 秒とする。各実験協力者の各タスクの副交感神経および交感神経の状態を表す値は、当該タスクの分析対象期間における HF の平均値および LF/HF の平均値とする。

3.4.3. 実験協力者のタスク遂行環境

実験協力者のタスク遂行環境を図 3-2 に示す。実験は各実験協力者からインフォームド・コンセントを得た後に行なう。実験協力者はひとりずつ実験室へ入

り、まず RRI センサを装着し、次に実験者が fpz の位置を計測して求め、その位置に計測チャンネル 12 が位置づけられるように NIRS 脳計測装置を装着する。その後、椅子に座り、実験者が椅子の座面と顎載せ台の高さを調節し、実験協力者が自然に描画できる姿勢をとれることを確認する。描画には濃さ HB の鉛筆を用い、芯の太さは実験協力者間でほぼ一定とする。落下や破損した際の代替を含む 3 本の鉛筆を作業机手前に配置する。室温は適温に調整する。実験前に、実験協力者は実験中に頭部をできるだけ動かさないよう指示を受け、実験中の行動は机上部 550mm の高さに設置した小型カメラにより 30fps で動画記録される。

3.5. 実験計画およびデータの分析における有意差判定基準

本研究の目的達成のために、まず二種類のアイデア発想に対応したタスクを同一の実験協力者に課し、それぞれのタスクにおける脳賦活状態および自律神経活性状態を精密に把握するための信号取得実験を計画する。本研究では、「ある目的を達成するための原理・方法に関するアイデア発想」を A タスク、「具体的な形態・構造に関するアイデア発想」を C タスクとして設定し、同一実験協力者に対して連続する実験期間内にこの二種類のタスクを実施させる。さらに、タスク順序が生理指標に与える影響を排除するため、A から C の順序で行う A タスク先行実験と、C→A の順序で行う C タスク先行実験という二種類の手続きで実験を行う。これは、デザイン推論の過程において思考段階の順序が発想者の認知状態に影響を与える可能性が指摘されているためであり、順序効果を適切に把握するためには両条件を同一参加者で行う必要があると判断したものである。また、実験協力者を同一とすることで、個人差によるバイアスを極力排除し、純粋に思考段階や順序に起因する生理反応の差異を検討することが可能となる。

各計測チャンネルの信号を、DLPFC, MPFC, OFC の各脳領域別に定量できるようにするために、A と C すなわち関心タスクの各計測チャンネルの信号データを標準得点化する。この理由は、NIRS 脳計測の原理である Lambert-Beer の法則に拠って得られる信号は相対値なので、異なる実験協力者、異なる計測チャンネルの値をそのまま比較できないためである [29]。

標準得点は次の方法で求める。各計測チャンネルにおいて、コントロールタスクで実験協力者が描画を開始して 5 秒経過時から終了までの期間の信号の平均値 (C_{av}) および標準偏差 (C_{sd}) を求め、分析対象タスクの選定期間の各計測時点の信号値 (X_n) に対し、次の式により各計測時点の標準得点 (Z_n) を算出する [30, 31]。なお、下記の式中の n は 0.2 秒毎の各計測時点を指す。

$$Z_n = (X_n - C_{av}) / C_{sd}$$

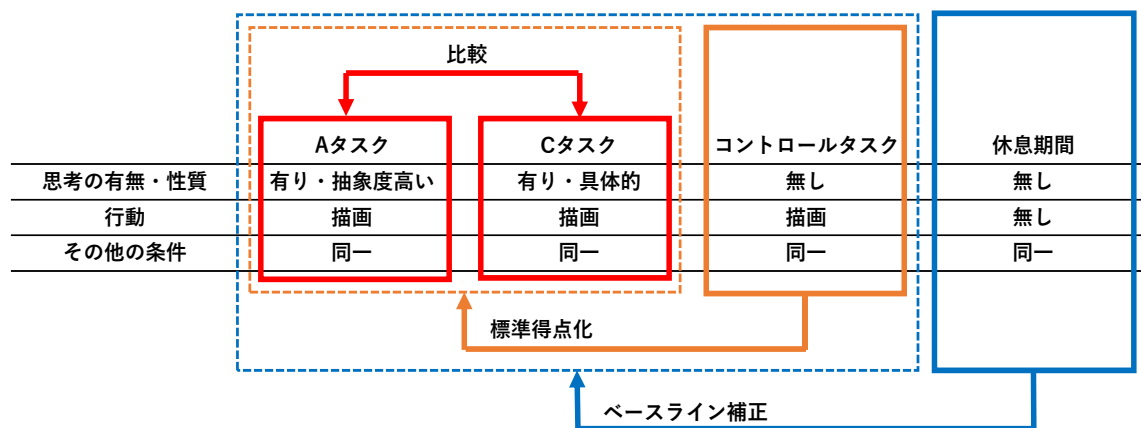


図 3-3 各タスクおよび休息期間の概要と役割

以上の方法で各実験協力者の各計測チャンネルの各計測時点の標準得点を算出し、DLPFC, MPFC, OFC の各脳領域別に分析対象期間内の得点を加算平均することにより、それぞれの領域別の賦活程度を表す値を求める。

A タスク, C タスク, コントロールタスク, 休息期間の条件の違いとそれぞれの関係と目的の概要を図 3-3 に示す。なお, A タスクでは抽象度の高い推論を課しているものの, 実際には発想者が思考を進める過程で, 曖昧ながらも程度の形態イメージを想起し, 概念図やラフスケッチを描くことが避けられない。そのため, A タスクにおける脳賦活データには, 抽象的推論に加えて具体的推論の要素がわずかに含まれる可能性がある。本研究ではこの点を前提として, A タスクを「抽象的推論が優位となる状態」として扱い, C タスクと対比することで, 抽象/具体の違いによる生理的差異を整理する。

統計的検定については, 一般的に広く採用される基準である $p < 0.05$ を有意であると判断するが, p 値が 0.05 をわずかに上回る水準 (たとえば $p < 0.08$ 前後) については「有意傾向がある」として扱う。このように判定基準を若干広げる理由は, 統計的な有意差が必ずしも科学的な有意性を完全には反映しないという指摘[32]を踏まえ, 探索的研究としての性質を保持しつつ, 潜在的な効果の可能性を柔軟に検討するためである。デザイン推論や創造性研究では個体差や発想戦略の多様性が大きく, 統計的効果が小さく見えることが多いため, こうした基準は現象理解を促進するうえで妥当である。

以上の方法により, A タスクと C タスク, さらにタスク順序の違いが脳前頭前野賦活および自律神経活動にどのような違いを生じさせるのかを総合的に明らかにし, デザイン推論に内在する認知プロセスの構造を生理学的指標に基づいて把握することを目指す。

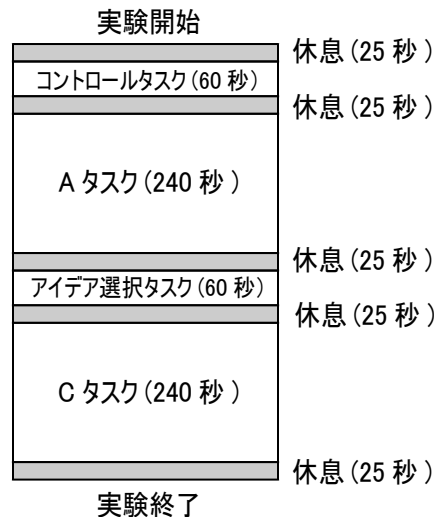


図 3-4 A タスク先行実験のタイムスケジュール

3.6. A タスク先行実験

3.6.1. 実験方法

A タスク先行実験は、実際のデザイン推論過程の自然な流れに対応させた実験手続きであり、まず「実現原理の検討を含む抽象度の高いアイデア発想タスク (A タスク)」を行い、その後に、A タスクで選択・決定した手段を前提として「具体的な形態に関するアイデア発想タスク (C タスク)」へと移行する順序で実施する。現実のデザイン活動においても、一般に目的や利用原理を構想した後に形態検討へと進むプロセスを踏むため、本研究ではこの順序を「自然な発想順序」とみなし、先に A タスクを配置した。したがって両タスクのデザインテーマには連続性があり、抽象的推論から具体的推論へと発想が流れるように設計されている。実験協力者は、デザインや建築を専門的に学ぶ 19 歳から 23 歳の女性 20 名であり、平均年齢は 20.35 歳、母標準偏差は 1.24 であった。研究対象の属性範囲をあえて絞り込むことにより、サンプルの均質性を確保し、デザイン教育に近い特定の学習者層に適用可能な精度の高い知見を得ることを意図している。また、協力者のうち 4 名は左利き、16 名は右利きであったが、本研究では脳の左右賦活の比較や利き手による描画違いを分析対象としていないため、利き手の違いによって結果が大きく影響される可能性は低いと判断し、利き手による統制は実施していない。実験に先立っては、実験の目的、手続き、取得データの利用方法、プライバシー保護について十分に説明し、全員からインフォームド・コンセントを得たうえで実施している。

実験は図 3-4 に示すタイムスケジュールに基づいて実施した。まずコントロールタスクとして簡単な描画課題を行い、続いて A タスクでは「水面を移動するさ

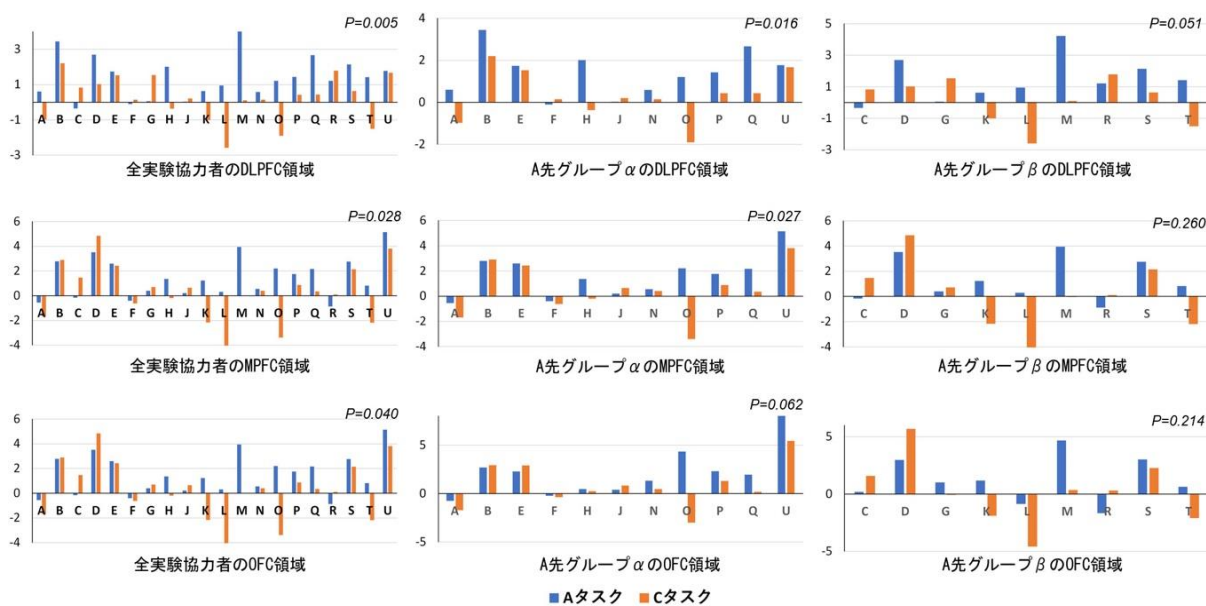


図 3-5 A タスク先行実験での実験協力者の NIRS 標準得点データ

まざまな方法・事物について、大まかなスケッチを描きながら実現原理を含むアイデアを発想する」ことを求めた。その後、A タスクで生成したアイデアの中から各自が有望と判断する案を一つ選択し、それをもとにC タスクとして「選択した手段や原理を踏まえた具体的形のアイデア発想」を行わせた。課題テーマを「水面を移動する方法（例：泳ぐ・浮く・進む・推進する）」とした理由は、実験協力者にとって身近な経験（遊泳経験，浮力に関する日常知識など）や一般的な知識（プロペラ，浮き具，推進機構など）が想起しやすく，抽象タスクでも具体タスクでも発想が行いやすいと考えられたためである。また，このテーマは抽象的な“原理の構築”と具体的な“形態の検討”の両方向に広げやすく，デザイン推論の二段階構造を再現するのに適している点も採用理由である。

3.6.2. データ取得方法

(1) 脳前頭前野の賦活状態 A タスクと C タスクの脳賦活状態を表すデータは次の方法により得た。実験中，両タスクとも実験協力者によって描き始めるまでの時間が異なることが観測されたので，スケッチ描画開始のタイミングをビデオ画像から求め，その概ね 4 秒後からの 5 秒間のスケッチ描画中の信号のみを分析対象とすることとした。描画期間の信号に限定することでコントロールタスクの信号を用いた標準得点化を適正なものとし，上述した方法により両タスクの分析対象期間中の標準得点を求め，DLPFC，MPFC，OFC の 3 領域について各実験協力者のデータを算出する（図 3-5 参照）。

(2) **自律神経の活性状態** A タスクと C タスクの自律神経の活性状態を表すデータは、各タスクの開始 30 秒後から終了時点までの期間の解析データの平均値とする。

3.6.3 分析と考察

(1) **脳前頭前野の賦活状態** まず、取得した NIRS 信号のうち、明らかに異常値を示した一部の計測チャンネルを除外したうえで、全実験協力者のデータを分析対象とした。最初の分析として、全協力者の A/C タスク間における前頭前野賦活の差異を明らかにするため、DLPFC・MPFC・OFC の 3 領域についてウィルコクソンの符号付き順位検定を実施した。その結果、いずれの領域でも A タスクは C タスクに比べて有意に高い賦活を示し ($P=0.005$, 0.028 , 0.040)、抽象度の高い推論段階である A タスクの方が、より強い認知的負荷や概念操作を伴うことが示唆された。これは、A タスクにおいて多様な可能性を比較・統合する必要があるため、前頭前野の広範なネットワークが動員されやすいという先行研究とも整合する結果である。

次に、A タスク中のアイデア発想の個人差に基づいて、賦活パターンをより詳細に理解するための分析を行った。具体的には、A タスクにおいて「3 種類以上の明確に異なるアイデア」を生成したかどうかを基準に協力者を 2 群に分けた。この基準を採用した理由は、協力者を概ね等しい人数で分けつつ、発想の“豊かさ”を反映する簡潔な指標として有効と判断したためである。3 種類以上のアイデアを生成した協力者 11 名を A 先グループ α 、3 種類未満であった 9 名を A 先グループ β とした。

まず A 先グループ α のみを対象とすると、DLPFC および MPFC の 2 領域において A タスクが C タスクよりも有意に高い賦活を示し ($P=0.016$, 0.027)、OFC においても有意傾向が認められた ($P=0.062$)。これは、抽象的思考において前頭前野の制御系 (DLPFC) と概念的処理との関わりが強まることを示す結果であり、多様なアイデアを出す被験者ほど PFC の活動が増す可能性を示唆する。一方で、A 先グループ β の協力者においては、DLPFC のみに A タスク優位の有意傾向が見られた ($P=0.051$)。これは、アイデア生成が比較的少なかった被験者においても、抽象タスクがワーキングメモリや思考操作の負荷を伴うことを示している。

さらに、A 先グループ α と β の間における賦活量の比較としてマン・ホイットニーの U 検定を行ったところ、いずれの領域においても有意差は認められなかった。この結果は、A/C タスク間の差異 (抽象/具体の違い) は存在するが、発想成績の高低に伴う絶対的な PFC 活動量の差は限定的であることを示唆

するものであり、「抽象度の違いが生理学的負荷に強く反映される一方、個人差の影響は相対的に小さい」という解釈を支持する。

(2) 自律神経の活性状態 RRI の解析では、信号品質の問題から 5 名のデータを除外し、15 名を分析対象とした。有効データが得られた協力者の内訳は、A 先グループ α が 6 名、A 先グループ β が 9 名である。まず A/C タスク間の自律神経活動の比較を行うため、HF (副交感神経指標) および LF/HF (交感神経指標) についてウィルコクソンの符号付き順位検定を実施した。その結果、全協力者および A 先グループ β では、いずれの指標でも有意差は見られなかった。一方で、A 先グループ α に限定すると LF/HF に有意差が認められ、交感神経の活動は A タスクの方が C タスクよりも有意に高いことが示された ($P=0.028$)。この結果は、「多様なアイデアを生成できる協力者 (A 先グループ α)」において、抽象的思考タスク (A タスク) がより高い覚醒状態・努力投入を引き起こす可能性を示している。抽象タスクでは概念統合や可能性の探索が求められるため、より強い交感神経活性を伴うという解釈が妥当である。一方、A 先グループ β ではタスク間の差が認められず、抽象タスクに対する生理反応が比較的弱いことが示される。

さらに、A 先グループ α と β の間の比較としてマン・ホイットニーの U 検定を行った結果、A タスクでは HF および LF/HF ともに有意差は認められなかったが、C タスクにおいて LF/HF に有意傾向が認められた ($P=0.059$)。これは、具体的な形態思考タスク (C タスク) においては、むしろ発想成績の低い協力者 (グループ β) の方が交感神経活性が高い可能性を示唆する。この結果は、形態思考が得意ではない被験者ほど C タスクに負荷を感じやすい、あるいは評価・判断による緊張が高まりやすいという解釈も可能である。

3.7. C タスク先行実験

3.7.1. 実験方法およびデータ取得方法

C タスク先行実験には、A タスク先行実験と同一の実験協力者 20 名が参加した。平均年齢は 20.8 歳、母標準偏差は 1.22 であり、対象者の属性は完全に一致している。本研究では、A タスク先行実験の学習効果が生理指標やアイデア発想プロセスに影響する可能性をできる限り排除するため、C タスク先行実験は約 3 か月の間隔をあけて実施した。そのうえで、A タスク先行実験と同様に実験前手続きとしてインフォームド・コンセントの取得と実験説明を行い、続いて同一内容のコントロールタスクを実施した後、まず C タスクとして「具体的な形態に関

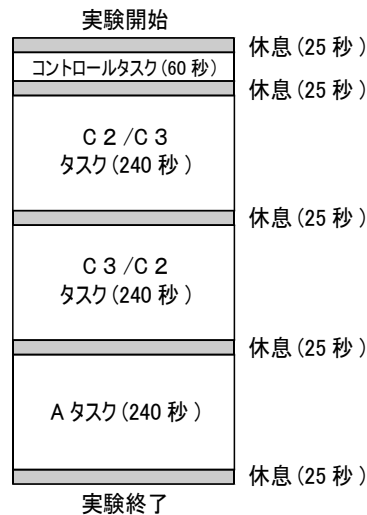


図 3-6 C タスク先行実験のタイムスケジュール

するアイデア発想」を行い、その後に A タスクとして「大まかなスケッチを描きながら実現原理を含む抽象度の高いアイデア発想」を行わせた。実験の進行は図 3-6 に示すタイムスケジュールに従って行った。

C タスク先行実験では、単純に C→A の順序による影響を評価するだけでなく、具体タスクを連続して 2 回実施した場合の順序効果を把握するためのデータ取得も行う。そのため、本実験では C タスクを 2 種類設定し、「時計の具体的なアイデア発想 (C2 タスク)」と「電気スタンドの具体的なアイデア発想 (C3 タスク)」の 2 課題を順番に実施させた。これらの課題を採用した理由は、いずれも生活環境に一般的に存在する身近な製品であり、実験協力者が具体的な形態イメージを想起しやすいこと、また両者の内容は概念構造・複雑性ともに類似しており、難易度が大きく異なることが想定されないためである。さらに、C2 と C3 の実施順序による認知負荷の偏りを抑えるため、協力者 20 名を無作為に 10 名ずつの 2 群に分け、一方の群では C2 → C3 の順序で、もう一方の群では C3 → C2 の順序で課題を実施した。

その後、両群共通で A タスクとして「暗い環境で紙の本を読むためのさまざまな方法・事物について、大まかなスケッチを描きながら実現原理を含むアイデア発想」を行わせた。この A タスクは C3 タスク（電気スタンドの具体的なアイデア発想）と関連する課題であり、光源の選択（電球、LED、炎、自然光）、光の伝達方法（鏡、プリズム、屈折、反射）、拡散方法（シェード、散光構造）など、幅広い実現原理を想起可能な構造をもつ点が採用理由である。また、本タスクは A タスク先行実験の A タスクと概念構造が類似しており、認知的負荷の大きさにも大きな差異がないと推測されることから、2 つの実験間で比較可能性が高い。

本実験で得られるデータには、前後で関連性がない具体タスク (C2→C3)、前後でテーマが関連する「具体→抽象」の組合せ (C3→A)、さらに「具体タスクを

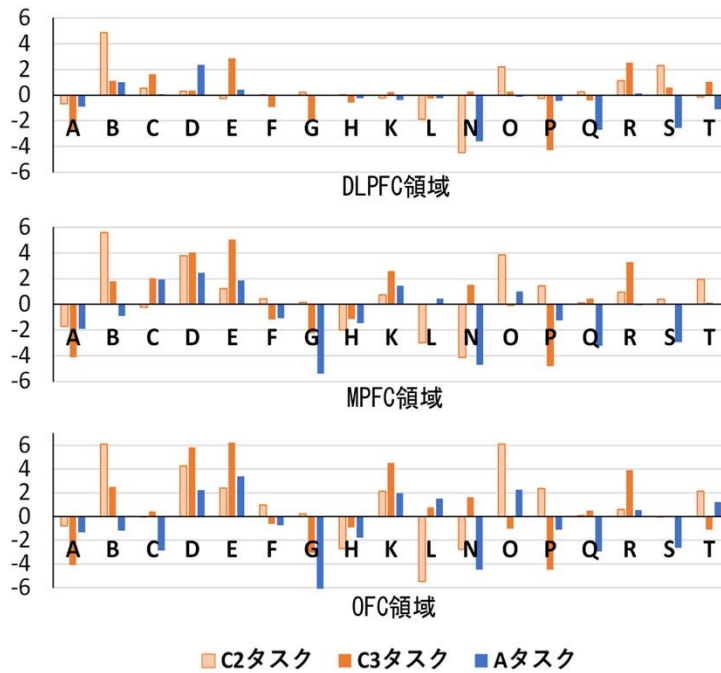


図 3-7 C タスク先行実験での実験協力者 17 人の NIRS 標準得点データ

2 度行った場合の順序効果」といった複数の比較観点を含むため、A タスク先行実験とは異なる側面からデザイン推論における抽象・具体の遷移構造を検討することが可能となる。これにより、本研究では「順序」「課題の関連性」「推論の抽象度」という複数要因が生理反応に与える影響を緻密に分析できる枠組みが構築される。なお、脳前頭前野の賦活状態および自律神経系の活性状態のデータ取得方法は A タスク先行実験と完全に同一であり、NIRS の標準得点化方法および RRI の処理手法も同じ基準を用いているため、両実験の比較が直接可能となる。

3.7.2. 分析と考察

(1) **脳前頭前野の賦活状態** C タスク先行実験の分析では、取得時の信号全体が異常であった 3 名のデータを除外し、さらに一部の計測チャンネルに異常値が含まれていた残りの 17 名について、該当チャンネルを除外したうえで分析を行った (図 3-7 参照)。本実験で得られたデータに対する主要な検定対象は三つであり、① C2/C3 タスク間の差異、② 先に実施した C タスクと後に実施した A タスクの差異、③ 前後で実施した二つの C タスクの間の差異である。①は、具体的デザインタスク (時計と電気スタンド) の難易度に差がなかったかを確認するためのものであり、②は A タスク先行実験とは逆のタスク順序を採用した場合に、A/C タスク間の脳活動がどのように変化するかを検討するためのものである。そ

して③は、同じ「具体的発想タスク」を二度行ったときに、順序が生理反応に及ぼす影響を純粹に抽出するための比較である。

17名のデータに対してウィルコクソンの符号付き順位検定を行ったところ、まず①の具体的アイデア発想タスク（C2/C3）の比較では、DLPFC、MPFC、OFCのいずれの領域でも有意差は認められなかった。したがって、本実験で扱った二種類のCタスクは、認知的負荷の大きさがほぼ同等であったと解釈できる。次に②のC→Aの順序で実施した場合の比較でも、いずれの領域でも有意差は認められなかった。この結果は、Aタスク先行実験において「Aタスクの方がCタスクよりも賦活が大きかった」という結果とは異なる傾向を示しており、タスク順序によって抽象タスク（Aタスク）が前頭前野賦活に及ぼす影響が変動する可能性を示している。すなわち、抽象タスクの賦活優位性は「抽象→具体」という順序で行った時に特に顕著となり、順序が逆転すると必ずしもその差が生じない可能性が示唆される。

③の前後二回のCタスク間の比較では、MPFCとOFCにおいて、先に実施したタスクの方が後に実施したタスクよりも有意に高い賦活を示した（ $P=0.050$, 0.025 ）。これは、具体的なアイデア発想タスクでは「最初の実施時」に認知的負荷が相対的に高まり、二度目の実施時には慣れや予測可能性の向上によって負荷が低下する可能性を示す結果である。特にMPFCやOFCは、課題への動機づけ、価値判断、感情調整と関わる領域であるため、先に行われたタスクの方が認知的努力や新奇性処理を必要とした可能性が高い。

続いて、Aタスク先行実験と同様に「Aタスクでのアイデア発想の成績」に着目し、協力者を同じ基準で二群に区分した。Aタスクで3種類以上のアイデアを生成した10名をC先グループ α 、3種類未満の7名をC先グループ β とした。まずC先グループ α のみを対象に分析すると、検定対象①および②では有意差が認められなかったが、検定対象③ではMPFCとOFCにおいて先に行ったタスクの賦活が有意に大きかった（ $P=0.037$, 0.039 ）。これは、具体タスクの連続実施における順序効果が、発想力の高い被験者（＝多様なアイデアを出す被験者）でより顕著である可能性を示している。また、②と③で結果が異なっていた理由として、両タスクの抽象度が異なるために、具体→抽象のような認知的切り替えの影響が複雑に作用した可能性も考えられる。

他方、C先グループ β （Aタスクでのアイデア数が少なかった7名）を対象にした場合、①②③のすべてで有意差は認められなかった。この結果は、発想の幅が比較的小さい協力者はタスク順序に影響されにくく、全体として脳活動の変動幅が小さい傾向があることを示している。

最後に、C先グループ α と β の間の脳賦活差についてマン・ホイットニーのU検定を行った結果、AタスクのDLPFC領域において、C先グループ β の方が有意に高い賦活を示した ($P=0.034$)。これは、Aタスクで多様なアイデアを出せなかった β グループの方が、むしろ抽象タスク遂行時に強い前頭前野活動を示したという興味深い結果であり、脳前頭前野の賦活量が発想成績の高さと必ずしも比例しないという、いわば認知的パフォーマンスと脳負荷の非線形性を示唆するものである。この現象は、抽象的思考が困難な協力者ほど認知努力が大きくなり、それが前頭前野賦活の増大として表れる可能性を示すものであり、デザイン推論研究における重要な解釈論点となる。

(2) 自律神経の活性状態 信号に異常値が含まれていた4人のデータを除外し、16人の実験協力者のデータを分析対象とした。有効なRRIデータを取得できた実験協力者のグループ別人数は、C先グループ α は8人、C先グループ β は8人であった。

16人全員のデータを対象にウィルコクソンの符号付き順位検定を行った結果、検定対象①のHFおよびLF/HFに有意差は無く、この実験の二種類のCタスク間の交感神経および副交感神経に与える影響に差は無いと考えられた。検定対象②でもHFおよびLF/HFに有意差はなかった。検定対象③では、HFにおいて、先のCタスクよりも、後のCタスクの方が大きいとの有意傾向がみられ、順序の影響が存在する可能性が示された。

次に、C先グループ α に限定すると、検定対象①、②、③のいずれにも有意差はなかった。これに対してC先グループ β では、検定対象②のHFでAタスクの方が大きいとの有意傾向があり ($P=0.069$)、検定対象③のHFで後のCタスクが大きいとの有意傾向が見られた ($P=0.067$)。HFは副交感神経の活動指標なのでリラックスあるいは休息に近い状態であることを意味しており、C先グループ β はAタスクでアイデア数が3種類未満と少ないこととの関係が示唆された。また、検定対象としたタスクのうち、いずれも後に実施したタスクの方が大きいことから、順序による影響が生じていた可能性が考えられた。なお、検定対象①では有意差はなかった。このほか、C先グループ α とC先グループ β 間の差を対象とするマン・ホイットニーのU検定において有意差はなかった。

3.8. 総合考察

Aタスク先行実験とCタスク先行実験の双方について個別に分析し、それぞれの結果を表3-1および表3-2に整理した。しかし、これらの分析結果には一見すると互いに矛盾しているように見える部分が存在する。そこで本研究では、この

表 3-1 A タスク先行実験の分析結果

生理指標	標本	差違項目	差違内容	分析結果番号
AタスクとCタスク間の比較： 思考内容の抽象度の高低による影響をみる				
脳賦活	全実験協力者	DLPFC, MPFC, OFC	Aタスク（先に実施）が大きい	#1
	A先グループ α	DLPFC, MPFC, OFC	Aタスク（先に実施）が大きい	#2
	A先グループ β	DLPFC	Aタスク（先に実施）が大きい	#3
自律神経系	A先グループ α	LF/HF	Aタスク（先に実施）が大きい	#4
A先グループαとA先グループβ間の比較： アイデア発想能力の違いによる影響をみる				
脳賦活	全タスク	全領域	有意差なし	#5
自律神経系	Cタスク（後に実施）	LF/HF	A先グループ β が大きい	#6

表 3-2 C タスク先行実験の分析結果

生理指標	標本	差違項目	差違内容	分析結果番号
① C2タスクとC3タスク間の比較： 2種類のCタスクについて、脳賦活および自律神経への影響の点で同質と見做せるかをみる				
脳賦活	全実験協力者	全領域	有意差なし	#7
	C先グループ α, β	全領域	有意差なし	#8
自律神経系	全実験協力者	全項目	有意差なし	#9
	C先グループ α, β	全項目	有意差なし	#10
② C3タスクとAタスク間の比較： 思考内容の抽象度の高低による影響をみる Aタスク先行実験とは逆の課題順序にしたことの影響をみる				
脳賦活	全実験協力者	全領域	有意差なし	#11
	C先グループ α, β	全領域	有意差なし	#12
自律神経系	C先グループ β	HF	Aタスク（後に実施）が大きい	#13
③ 先のCタスクと後のCタスク間の比較： 具体的なアイデア発想課題における順序による影響をみる				
脳賦活	全実験協力者	MPFC, OFC	先のCタスクが大きい	#14
	C先グループ α	MPFC, OFC	先のCタスクが大きい	#15
	C先グループ β	全領域	有意差なし	#16
自律神経系	C先グループ β	HF	後のCタスクが大きい	#17
C先グループαとC先グループβ間の比較： アイデア発想能力の違いによる影響をみる				
脳賦活	Aタスク（後に実施）	DLPFC	C先グループ β が大きい	#18
自律神経系	全タスク	全項目	有意差なし	#19

矛盾の背景にある要因を丁寧に検討し、両実験の結果を統合的かつ整合的に解釈するための手がかりとして、両実験で設定した実験協力者のグループ（ $\alpha \cdot \beta$ ）に着目した。というのも、両実験においてグループ間で明確な傾向の違いが確認されており、分析結果の相違を説明するには、個人差を含む群特性の影響を考慮することが不可欠と判断されたためである。また、Cタスク先行実験におけるNIRSデータ不備の3名を除外して一致率を算出したところ、両実験でのグループ判定の一致率は82.4%と比較的高く、両実験における α 群・ β 群をほぼ同じ標本群とみなす合理性があると判断された。したがって、本研究ではグループ区分を維持した上で両実験の結果を組み合わせ、総合的に考察を行うこととした。まず、Cタスク先行実験の検定対象①より、C2タスクとC3タスクは脳賦活という点で「ほぼ同じ性質を持つタスク」とみなせることを前提に考察する。また検定対象③より、具体的なアイデア発想に限れば「タスク順序が脳賦活に影響を与える」という傾向が示唆され、これに基づき分析結果#15を解釈すると、グルー

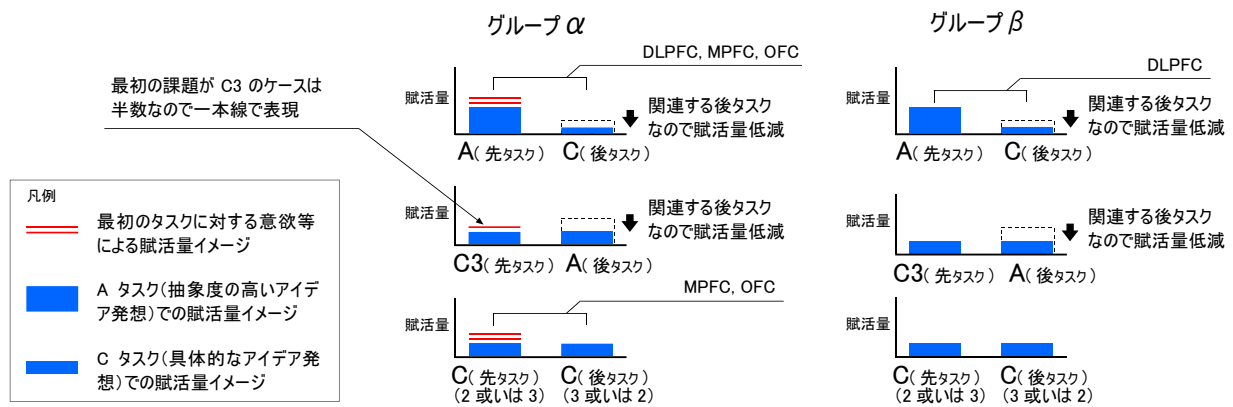


図 3-8 各タスクでの脳賦活状態を整合的に説明する考察結果の模式図

グループ α では MPFC および OFC が「後のタスク」よりも「先に行うタスク」で大きく賦活するという特性が読み取れる。MPFC は意欲・自発性・遠隔記憶の検索、OFC は情動処理や抑制制御と関係する領域であるため、「最初のタスクに強い賦活が起こる」という結果は神経科学的にも整合的である。一方で分析結果#16 から、グループ β は「前後のタスクで脳賦活の差が小さい」特性をもつことがわかる。この性質を抽象的アイデア発想との組み合わせにまで拡張すると、分析結果#2 の傾向 (β では前後差が出にくい) は自然に説明できる。

さらに分析結果#12 をみると、グループ β に有意差が生じなかった点は上述の性質に基づき説明できる一方、グループ α で有意差が確認されなかったことは、グループ α 特有の「先のタスクで賦活が大きく、後のタスクで低くなる」という順序効果が強く働いたため、結果として差が打ち消されたと解釈するのが妥当である。このことから、少なくともグループ α では「具体的アイデア発想よりも、抽象度の高いアイデア発想で脳賦活が大きくなる」傾向が導き出される。

しかし、この結論は分析結果#3 の傾向と一部矛盾しているようにも見える。これについては、「 β 群でも抽象的発想のほうが脳賦活が大きいという基本的傾向は存在するが、 β 群の場合は A タスクにおいて MPFC・OFC の賦活が十分に高まらず、結果として DLPFC のみが相対的に大きく反応した」という仮説を立てることで説明可能である。ただしこの仮説だけでは、分析結果#12、すなわち C タスク先行実験における C3/A タスク間で賦活差が見られなかった事象との整合性が確保できない。

ここで鍵となるのが「タスク順序」と「タスク間のテーマの関連性」である。C タスク先行実験における C3 タスクと A タスクは内容的に一部関連しており、先に行ったタスクで考えた内容が後のタスクでそのまま利用できる可能性がある。つまり後のタスクは「ゼロから思考する必要がない」ため、結果として脳賦

活が抑えられたと考えることができる。この順序効果は α 群・ β 群どちらにも共通して生じると解釈すると、分析結果#12を含む複数の結果が一貫して説明できる。なお、C2とC3はテーマが関連していないため、この「後のタスクで負荷が下がる」という順序効果が働かない。この前提に基づき分析結果#14・#15を確認すると、順序効果が現れたのはMPFCとOFCのみで、DLPFCには順序の影響がほとんど見られない。したがってDLPFCはタスク順序とは独立に「アイデア発想そのもの」で賦活しやすく、特に抽象度の高いアイデア発想において強く賦活する領域であると解釈できる。

以上のように、両実験で一見矛盾しているように見えた分析結果は、(1)グループごとの特性 (α ・ β)、および(2)タスク順序とタスク間のテーマ関連性、という二つの観点を導入することで整合的に説明可能となる。本研究では、これらの考察を統合した結果を模式的に示した図3-8を提示し、複雑なデザイン推論過程における脳賦活の特徴を構造として捉える試みを行った。

3.9. 結論

以上、本研究で実施した二種類の実験において、一見矛盾しているように見えた分析結果について総合的に検討し、それらを統合して説明できる解釈を導いたうえで、他の分析結果に基づく考察と合わせて最終的な結論を述べる。本章では理解しやすさを優先し、グループ α を「アイデアを多く出した群」、グループ β を「アイデアを出しにくかった群」と表記することとする。まず、テーマが関連しない二つのタスクへの取り組み(表3-3)について、分析結果#12, 15, 16を整理すると、アイデアを多く出した群では最初のタスクにおける脳賦活が後のタスクよりも顕著に大きく、逆にアイデアを出しにくかった群では前後のタスクでの脳賦活の差が比較的小さいことがわかった。特にこの違いはMPFCおよびOFCで明確であり、これらの領域が関わりとされる「課題遂行への意欲」「遠隔記憶の検索」「抑制の解除」といった働きと一致している。つまり、アイデアを多く出した群では最初の課題に取り組む際に脳が積極的に活動し、発想に向けて思考を広げようとする準備状態が強く現れていたのに対し、アイデアを出しにくかった群ではこうした働きが弱かった可能性が示唆される。次に、テーマが関連するタスク間(表3-4)について分析結果#1, 2, 3, 11, 12と#15, 16を総合すると、抽象度の高いアイデア発想のほうが具体的なアイデア発想よりも脳賦活が大きいという結論が得られた。特に分析結果#2, 3, 15からはDLPFCの賦活が顕著であり、DLPFCが抽象的推論や課題に対する注意維持、ひらめきの生成などに関係するという既存知見と整合している。また、関連するテーマを扱うタスクでは「最初のタスクで考えた内容を後のタスクで再利用できる可能性」があり、その

表 3-3 テーマが関連しない前後のタスクへの取り組みについての結論の概要

対象	内容	参照分析結果番号
アイデアを多く出した群	<ul style="list-style-type: none"> ・先の課題に対して、後の課題よりも大きな脳賦活 (MPFC, OFC) をする そのため、最初の課題に対する、意欲、遠隔記憶の検索、脱抑制等の働きが相対的に大きい (しかし前後の課題でのアイデア数は同等)	#12, 15
アイデアを出しにくかった群	<ul style="list-style-type: none"> ・前後の課題の脳賦活に変化は無い そのため、前後の課題で、課題に対する意欲、遠隔記憶の検索、脱抑制等の働きの違いは相対的に小さい (前後の課題でのアイデア数は同等)	#12, 16

表 3-4 テーマが関連する前後のタスク (抽象度の高いアイデア発想と具体的なアイデア発想) についての結論の概要

対象	内容	参照分析結果番号
全実験協力者	<ul style="list-style-type: none"> ・抽象度の高いアイデア発想の方が具体的なアイデア発想よりも脳賦活 (主にDLPFC) が大きい そのため、抽象度の高い課題では、抽象的思考、課題遂行のための注意保持、ひらめき等において、より大きな脳活動を要する	#1, 2, 3, 11, 12, 15, 16
アイデアを多く出した群	<ul style="list-style-type: none"> ・関連するテーマの課題を先に行なうと、後の課題での脳賦活は低減する (先の課題での思考内容を後の課題で使用と推測) ・<Aタスク先行実験> 先の抽象度の高い課題の方が、心身がより活発にはたらく そのため、先の抽象度の高い課題でアイデアが出やすい状態であったと考えられる	#4
アイデアを出しにくかった群	<ul style="list-style-type: none"> ・<Cタスク先行実験> 後の抽象度の高い課題の方が、心身がより休息する そのため、後の抽象度の高い課題でアイデアが出にくかった可能性がある	#5, 13, 18
	<ul style="list-style-type: none"> ・<Cタスク先行実験> 抽象度の高い課題を後に実施すると、アイデアを出しやすい群よりも、後の抽象度の高い課題での脳賦活が大きい そのため、アイデアを出しにくい群は、アイデアを出しやすい群よりも、後の抽象度の高い課題での脳賦活の低減効果が小さい可能性がある (しかし後の抽象度の高い課題でのアイデア数は相対的に少ない水準に留まる)	

ため後のタスクでは思考負荷が軽減され、脳賦活が低く抑えられることが示された。この傾向はアイデアを多く出した群だけでなく、アイデアを出しにくかった群にも生じており、グループの違いによらず共通して見られる現象であることがわかった。さらに、分析結果#4, 13からは、アイデアを多く出した群は最初の抽象度の高いアイデア発想時に心身の働きが活発であり、一方、アイデアを出しにくかった群は後の抽象度の高いアイデア発想時に心身が休息に近い状態であったことが示唆され、自律神経系の状態が発想されるアイデア数と関係する可能性が考えられた。加えて、分析結果#18からは、後の抽象度の高いアイデア発想において、アイデアを出しにくかった群のほうがアイデアを多く出した群よりも脳賦活が大きいことが示され、これは「後のタスクで脳賦活が抑制される効果」がアイデアを出しにくかった群では比較的小さかったことを示唆する。ただし分析結果#5からは、抽象度の高い発想に限定された現象である可能性もあり、この点は今後の検証が必要である。以上の総合的な検討から、アイデアを多く出した群はタスク順序の影響を強く受け、特に最初のタスクで意欲・遠隔記憶・思考の抑制解除が強く働いた結果、相対的に多数のアイデアを生み出した可能性が示唆される。一方、アイデアを出しにくかった群はタスク順序の影響を受けにくく、テーマが関連するタスクであっても最初のタスクでの思考内容を後続のタスクで十

分に活用できず、結果として発想の広がりが限定されていたと考えられる。とはいえ、以上の結論は本研究に限られた属性の実験協力者から得たデータに基づいているため、そのまま一般化することには慎重である必要がある。

参考・引用文献

- [1] 吉川弘之 (1979) 「一般設計学序説」『精密機械』45(8), 20-26.
- [2] 日本デザイン学会編 (2019) 『デザイン科学事典』丸善出版, 36-45.
- [3] 広川美津雄 (2004) 「2章 デザインコンセプト」『デザインと感性』海文堂, 19-48.
- [4] 前川正実 (2021) 「デザイン活動のプロトタイピングにおける推論過程 — パースの探求の理論に基づくデザイン推論のダブルサイクルモデル」『デザイン学研究』68(1), 21-28.
- [5] Alexiou, K., Zamenopoulos, T., Johnson, J. H., & Gilbert, S. J. (2009). Exploring the neurological basis of design cognition using brain imaging. *Design Studies*, 30(6), 623-647.
- [6] Alexiou, K. et al. (2011). Imaging the designing brain: A neurocognitive exploration of design thinking. *Design Computing and Cognition* '10, 489-504.
- [7] Gilbert, S. J. et al. (2010). Involvement of right dorsolateral prefrontal cortex in ill-structured design cognition: An fMRI study. *Brain Research*, 1312, 79-88.
- [8] Hay, L. et al. (2019). The neural correlates of ideation in product design engineering practitioners. *Design Science*, 5, e29.
- [9] 永盛祐介・他 (2009) 「ブロックによる椅子模型制作時の脳活動の分析」『日本感性工学会論文誌』9(1), 51-60.
- [10] Kato, T. et al. (2017). Brain activities of idea generation using sketches. *The 4th International Conference on Design Engineering and Science*, Aachen.
- [11] Kato, T. et al. (2018). Measurement of brain activities of idea generation (sketch). *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, 2027-2034.
- [12] Kato, T., Nakaya, H., & Ashizawa, Y. (2021). Brain activation during sketch task for design idea generation measured by NIRS. *Journal of the Science of Design*, 5(1), 1-8.

- [13] 澤口俊之 (2005) 「前頭葉の認知的情報処理 —前頭前皮質の『脳間・脳内操作系』仮説」『神経研究の進歩』49(4), 512-526.
- [14] Okamoto, M. et al. (2004). Three-dimensional anatomical cranio-cerebral correlation via the 10-20 system. *NeuroImage*, 21, 99-111.
- [15] Koessler, L. et al. (2009). Automated cortical projection of EEG sensors via the 10-10 system. *NeuroImage*, 46(1), 64-72.
- [16] MacDonald, A. W. et al. (2000). Dissociating the role of the DLPFC and ACC in cognitive control. *Science*, 288(5472), 1835-1838.
- [17] Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167-202.
- [18] Gilbert, S. J. et al. (2010). Involvement of right dorsolateral prefrontal cortex in ill-structured design cognition. *Brain Research*, 1312, 79-88.
- [19] Euston, D. R. et al. (2012). The role of medial prefrontal cortex in memory and decision making. *Neuron*, 76(6), 1057-1070.
- [20] Phillips, A. G. et al. (2008). Dopamine, motivation and memory: A top-down perspective. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 90(2), 236-249.
- [21] Rolls, E. T. et al. (2023). The human orbitofrontal cortex and vmPFC connectome. *Cerebral Cortex*, 33(2), 330-356.
- [22] Ray, R. D., & Zald, D. H. (2012). Interaction of emotion and cognition in the PFC. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36, 479-501.
- [23] Kringelbach, M. L., & Rolls, E. T. (2004). The functional neuroanatomy of the human orbitofrontal cortex. *Progress in Neurobiology*, 72(5), 341-372.
- [24] Yamada, T. et al. (2015). Real-time system for extracting cerebral functional component during fNIRS. *Biophotonics Japan 2015*.
- [25] Pinti, P. et al. (2019). Issues in preprocessing fNIRS neuroimaging data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 505.
- [26] Yamada, T. et al. (2012). Separation of fNIRS signals into functional and systemic components. *PLOS ONE*, 7(11), e50271.

- [27] Takatsu, H. et al. (2000). Quantitative relationship between subjective stress and HRV. IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 120(1), 104-110.
- [28] 林博史 (1999) 『心拍変動の臨床応用』医学書院.
- [29] 江田英雄 (2009) 「NIRS の問題点と今後の展開」『システム／制御／情報』53(4), 155-161.
- [30] 鳥山悟・他 (2020) 「近赤外分光法を用いた顔肌への自己接触時の脳活動計測」『日本感性工学会論文誌』19(3), 255-261.
- [31] 利根川洋一・綿貫啓一 (2013) 「近赤外分光法を用いた音情報に対する脳賦活反応解析」『日本機械学会論文集 C 編』79(798), 442-449.
- [32] Wasserstein, R. L. et al. (2019). Moving to a world beyond “ $p < 0.05$ ”. The American Statistician, 73(sup1), 1-19.

4 章

デザイン活動における
脳内ネットワークの働きに関する考察の把握

4.1. 背景

「デザイン」とは、問題解決や価値創造を目的として具体的な形態・体験・サービスを生み出す活動であり、その根底には意識的な思考プロセスが存在する。デザイナーは、自らの認知資源を用いてユーザーのニーズ、社会的背景、利用文脈、環境条件を理解し、それをデザインの構想や提案へと結び付ける。これは、デザイナーの意図や判断といった意識的なプロセスが形態や体験として具現化し、最終的に製品・サービスとして社会に現れることを意味する。

しかし、デザインプロセスは純粹に論理的・意識的な思考だけで構築されるものではない。実際のアイデア発想においては、突然のひらめき、直感的判断、一見無関連に見える記憶の結び付きなど、無意識の働きが重要な役割を担う。潜在意識には日常の経験、学習、文化的影響が蓄積され、それらは意識化されていなくても創造的発想の源泉として作用する。デザイナーは意識と無意識の両方の働きを統合しながら発想過程を進めており、両者の相互作用こそが創造性を形成する重要な構成要素である。

加えて、デザイン活動はデザイナー自身の意識変容をもたらす。ユーザーリサーチやプロトタイプ制作を繰り返す中で、当初の思い込みや先入観が修正され、新しい視点や洞察が得られる。これは、意識的な振り返り（反省的思考）と無意識的な気づきが循環的に働くことで達成されるプロセスであり、デザインを通じた自己認識の変容といえる。

とりわけデザイン思考で重視される「共感」は、ユーザーの視点・経験・感情に意識的に寄り添う行為であり、デザイナーの意識が他者の経験へと拡張される重要なメカニズムである。共感とは、自分以外の価値観や背景を理解する能力を促進し、より多様で社会的価値の高いデザインを生み出す基盤となる。

一方で、「意識」そのものは哲学・心理学・神経科学における長年の研究テーマであり、その仕組みや本質には未解明の部分が多い。意識とは「自分が何かを知覚し、経験している」という主観的体験であり、日常生活の基盤であるにもかかわらず、その成立メカニズムは依然謎に満ちている。意識はどのように脳から生じるのか、主観的体験はどのように生成されるのかという問いは、近年の脳科学の発展にもかかわらず未だ決定的な答えを得ていない。

これまでの研究により、意識状態と脳活動には強い相関があることが示されており[1]、fMRIなどの神経画像技術を通じて、特定の意識状態が特定の脳部位の活動パターンと結び付くことが明らかにされている[2]。意識は単一の脳領域ではなく、前頭前皮質・頭頂葉・側頭葉・後頭葉など複数領域の協調によって生じると考えられ、特に前頭前野は意思決定、注意制御、課題切り替え、計画などの

高次認知機能に関与する中心的領域である。これらの知見は意識の理解のみならず、創造的思考やデザインプロセスの神経的基盤を理解する上でも重要な理論的基盤となる。

以上の背景から、デザイン活動における意識的・無意識的プロセスの解明、そしてそれを支える脳活動の理解は、デザイン研究における主要課題の一つであるといえる。

4.2. 目的

デザインの発想過程における二種類の思考——すなわち、①目的や価値・使用文脈・意味的枠組みを構築する「抽象的アイデア発想」、②形態・構造・機能などを検討する「具体的アイデア発想」——において、脳前頭前野がどのように賦活し、自律神経系がどのように反応するかを定量的に明らかにすることである。さらに、これら二つの思考段階がどのような順序で行われるか（抽象→具体 or 具体→抽象）が、脳活動および自律神経活動にどのような影響を与えるのかを検証することも目的とする。

この研究では、NIRS（近赤外線分光法）による前頭前野の賦活測定および RRI（心拍間隔）の解析による自律神経評価を組み合わせることで、デザイン推論における認知的・生理的プロセスを自然な作業環境下で捉える。これにより、従来の観察・インタビュー・成果物分析といった定性的手法では捉えきれなかった「抽象度の違いによる思考の負荷」「順序効果」「発想の質との関連」などを科学的に解明することを目指す。本研究は、デザイン思考における意識の役割と脳活動の関係を体系的に理解し、創造的発想の支援方法やデザイン教育への応用可能性を拓く基礎的知見を提供するものである。

4.3. 脳内ネットワーク

4.3.1. デザイン活動と脳内ネットワーク

デザイン活動は、無意識的な情報探索と意識的な思考が巧みに組み合わさった高度な情報処理活動であり、その基盤には特定の脳領域の働きだけでなく、複数の脳領域が協調して動作する脳内ネットワークの関与が重要である。脳内ネットワークとは、意識状態の変化や課題要求に応じて脳内で動的に活動する神経回路群を指し、その代表的なものとしてデフォルトモード・ネットワーク（DMN）、前頭頭頂ネットワーク（FPN）、サリエンス・ネットワーク（SN）が挙げられる。これら三つのネットワークは、デザイン活動においてそれぞれ異なる役割を担いな

が相互に連携し、創造性・発想・集中・柔軟な思考切り替えといったデザイン特有の認知過程を支えている。たとえば DMN は内省、想像、思考の自由な結合など、デザイン初期の抽象的思考を促す心的状態に大きく寄与する。一方、FPN は作業記憶、論理的検討、目標に基づく意思決定など、デザイン案を実際の形へと落とし込むために必要な制御的・遂行的機能を担う。また SN は、環境からの刺激やタスクの重要性を評価し、DMN と FPN のどちらを優先して働かせるかを切り替えるハブとして機能し、適切な瞬間に抽象的思考と具体的思考を行き来させる役割を果たす。これらの脳内ネットワークが統合的に働くことで、デザインにおける創造性と実行力が生み出されるため、デザイン推論の理解には単一領域ではなくネットワークレベルでの脳活動を捉える視点が不可欠である。

4.3.2. 脳内ネットワークの働き

デフォルトモード・ネットワーク (DMN) は、内省、自己認識、過去の回想、想像といった内的志向の認知活動に関与し、安静時に優位に活動するネットワークである。主に内側前頭前野、後部帯状回、楔前部、側頭葉などが含まれ、これらの領域は思考の自由な結びつきや自己関連的处理に関与するとされる。一方、前頭頭頂ネットワーク (FPN) は、注意制御、意思決定、問題解決といった目標志向的な実行機能を担い、タスク遂行時に活性化する。主要な構成領域は背外側前頭前野 (DLPFC) および後部頭頂皮質であり、これらの領域が連携することで複雑な認知処理、課題切替、作業記憶の保持と操作などが可能になる。サリエンス・ネットワーク (SN) は、環境からの重要な刺激、感情的に意味のある情報、身体内部からの信号などの“重要度”を検出する役割を持ち、注意の方向づけや反応の準備を支えるネットワークである。主要な構成領域である前帯状皮質 (ACC) と前部島 (AI) は、外的刺激や内的状態の中から重要な情報を選び出し、必要に応じて DMN と FPN の活動を切り替える“ハブ”として機能する。これにより、状況に応じた迅速な注意配分、情動処理、社会的認知、危機場面における反応調整といった柔軟な情報処理が可能になる。

これまでの研究では、意識と脳活動の間には強い関連性が存在することが示されてきた。機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) や脳波計測 (EEG) といった神経画像・神経生理学的技法を用いた研究では、意識状態の変化と特定の脳領域、あるいは脳ネットワークの活動パターンの変動が密接に関係していることが報告されている。たとえば、睡眠と覚醒の研究では、意識レベルの変化が脳波の周波数帯や各脳領域の活動量の変化と相関し、覚醒時には高周波成分の増大や広範な皮質活動が見られるのに対し、睡眠時にはこれらが大きく低下することが指摘されて

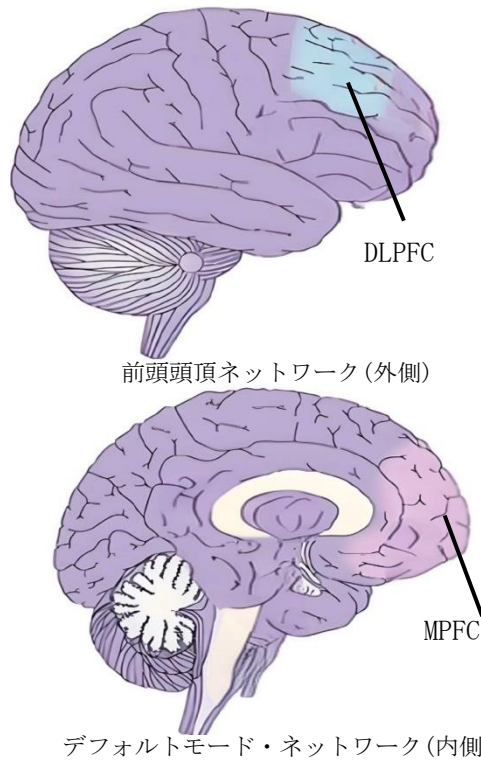


図 4-1 脳内ネットワークと脳部位の対応関係

いる。こうした研究は、意識が脳ネットワークの活動状態を反映する現象であることを支持するものである。

さらに、意識研究の主要理論として知られるグローバル・ワークスペース理論 (GWT) や統合情報理論 (IIT) などは、脳内の広範なネットワーク間の統合的活動が意識の発生に深く関与することを示しており、脳活動と意識の関係を理解するための重要な基盤を提供している[3]。これらの理論や神経科学的知見は、意識障害や神経疾患の解明、治療法の開発にも寄与しており、脳ネットワークレベルでの理解が実用的・臨床的価値を持つことを示している[4]。現在では、社会性や対人認知を支える「社会脳 (social brain)」の主要なハブネットワークとしても、DMN, FPN, SN の三者が位置づけられており、脳内の大規模ネットワークの連携が社会的認知だけでなく創造的思考や意思決定にも深く関わることが明らかになりつつある。

4.3.3. 脳内ネットワークと脳部位の対応関係

(1) デフォルトモード・ネットワーク (DMN)

デフォルトモード・ネットワーク (DMN) は、私たちが外的な課題に取り組んでいないとき、またはリラックスしているときに活発になる脳の大規模ネットワークである。DMN を構成する主な領域は、脳の中心部に位置する内側前頭前野 (MPFC) (図 4-1 参照)、後部帯状回 (PCC)、楔前部、後部頭頂小葉 (IPL) などであり、これらの領域は空間的に離れていながら相互に強い機能的結合を持つことが知られている [5]。1990 年代の神経画像研究により、外的課題を遂行している最中よりも、むしろ安静状態においてこれらの領域の活動が高まることが明らかとなり [6]、これらの脳領域が一体となって共通のネットワークとして作動することが示唆された。この発見が契機となり、DMN は「安静時ネットワーク」の代表例として多くの研究で取り上げられるようになった。

DMN は主に内省的・自己関連的な思考に関わるとされ、個人が自分自身の状態を振り返るとき、過去の出来事を思い出すとき、将来を計画するとき、あるいは他者との関係性を省察するときに活性化される。例えば「過去の経験を思い出す」「将来の目標を思い描く」といった心的状態が典型である。また興味深いことに、DMN は睡眠中や意識レベルが低下している状態においても一定の活動を維持していることが報告されており、意識や記憶の基盤に深く関与する可能性が指摘されている。

さらに DMN は、注意制御や自己認識、他者理解など高次認知機能とも密接に関連している。たとえば DMN は「心の理論 (Theory of Mind)」、すなわち他者の感情や意図を推測する能力にも関与しているとされ、自己と他者を区別しつつ理解する認知基盤として重要な役割を担う [7]。このことは、DMN が単なる“休息中の脳活動”ではなく、社会的認知や意識の形成に不可欠なネットワークであることを示している。

加えて、DMN の異常な活動パターンは精神疾患や神経疾患とも関連することが指摘されており、統合失調症、うつ病、ADHD、アルツハイマー病など多様な疾患において DMN の機能変化が観察されている [8]。こうした研究は、DMN が意識、記憶、社会的認知、情動調整など多領域に影響を与える基盤的ネットワークであることを裏付けるものである。

総じて、DMN は「自分自身を振り返る」「心の中で未来を思い描く」「他者の気持ちを理解する」といった内面的で自発的な認知活動を支える中核的ネットワークであり、人間の意識および自己理解に深く関わる重要な脳機能システムである。

(2) 前頭頭頂ネットワーク (FPN)

前頭頭頂ネットワーク (FPN) は、脳科学および認知神経科学の分野で広く注目されている大規模神経ネットワークのひとつであり、主に背外側前頭前皮質 (DLPFC) や外側頭頂葉皮質 (LPC) を中心とする複数の脳領域から構成される (図 4-1 参照)。FPN は、認知制御 (cognitive control) および意思決定といった高次認知機能を支える中核的ネットワークであり、日常的な意思決定から複雑な問題解決まで、目的志向的な行動を実現するための基盤として重要な役割を担っている。前頭前皮質は計画、判断、抑制、方略選択などの機能を統括し、目標達成のための行動計画や状況に応じた判断の調整を行う。一方、頭頂葉は空間認識、注意の配分、感覚情報の統合に関与しており、外界からの情報を整理しながら行動選択に必要な認知資源を適切に配分する働きを担当する [9]。FPN はこれらの領域がネットワークとして協調することで、外的課題に応じた柔軟な認知調整を可能にしている。

FPN の活動は、特定のタスクを遂行する際に顕著に増大し、状況に応じて必要な認知資源を動的に割り当てながら意思決定をサポートする。認知制御とは、目的に応じて思考や行動を選択・抑制・切り替える能力を指すが、FPN はこの制御機能を司る中心的なネットワークである。例えば、複数の選択肢の中から最適な行動を選ぶ場面、突発的な出来事が生じて方針変更が必要となる場面などで、FPN は情報を統合し、適切な行動選択を導く役割を果たす。

さらに FPN は、ワーキングメモリー (短期間の情報保持と操作) を支える主要ネットワークとしても知られ、複数の情報を同時に保持し、それらを組み合わせて課題を解決する認知操作を担っている [10]。たとえば、数値計算を頭の中で行う、複雑な問題を順序立てて整理する、あるいは複数の条件を同時に考慮して意思決定する、といった場面では FPN が情報保持と操作を統合的に支援している。また FPN は、デフォルトモード・ネットワーク (DMN) との密接な協調関係を持つことでも知られている。DMN は休息時や内省的思考、自己参照的な思考に関わるネットワークである。FPN は、外界からの刺激に基づいたタスク処理を司るネットワークとして、DMN の活動と競合する関係にあるが、SN (サリエンス・ネットワーク) などのハブネットワークの働きによって両者の活動が必要に応じて切り替えられる。これにより、FPN は「内面の思考 (DMN)」と「外界への対応 (FPN)」の適切なバランスを保ち、状況に応じて最適な注意・判断を行うことを可能にしている。したがって FPN は、課題遂行、意思決定、状況適応、問題解決などの実行機能の中心として働くと同時に、他の脳ネットワークと連携しながら人間の柔軟で複雑な認知活動を支える不可欠なネットワークである。

(3) サリエンス・ネットワーク (SN)

サリエンス・ネットワーク (SN) は、前帯状皮質 (ACC) および前部島皮質 (AI) を中心とする大規模神経ネットワークであり、外部刺激や内部状態の中から「重要性 (saliency)」の高い情報を検出し、それに対して迅速に注意を向けさせる役割を担っている。SNは刺激や情報の顕著性を判断することで、優先的に処理すべき対象を選択し、情報処理の効率化と行動の適応に寄与する。これは、日常生活における状況判断や意思決定に極めて重要であり、SNが適切に機能することで、私たちは環境の変化を素早く認識し、それに応じた行動をとることが可能となる。たとえば、大きな物音や突然の動きといった外部刺激、あるいは急激な心拍数の上昇や痛みなど内部からの生理的変化をSNが検出し、それらへの注意を即座に向けることで適切な反応を引き出すことができる[11]。

さらにSNは、デフォルトモード・ネットワーク (DMN) および前頭頭頂ネットワーク (FPN) との間で重要な「切り替え機能 (switching function)」を担うネットワークとしても知られている。DMNは内省や自己関連的思考に関与し、FPNは目標指向的な認知制御やタスク処理を担うが、これら二つを適切なタイミングで切り替える必要がある場面は、日常的な判断や複雑な課題において頻繁に生じる。SNは顕著な刺激の検出を契機として、DMNとFPNの動的な切り替えを促進する役割を果たしており、これにより私たちは「内的思考 (DMN)」と「外界に対する注意やタスク遂行 (FPN)」を柔軟に行き来することが可能となる。この連携によって、生じた状況に応じた適切な注意配分、意思決定、行動選択が実現される。

以上のように、SNは単に刺激を検出するだけでなく、脳内ネットワーク全体の調整役として、認知的・行動的適応を支える中心的役割を果たしており、デザイン推論を含む高次認知活動においても、状況に応じた思考切り替えや注意制御の基盤として機能することが示唆される。

4.3.4. 脳内ネットワークの相互関係

脳内ネットワークは、それぞれ異なる認知機能を担いながら、状況やタスクの要求に応じて動的に切り替わることで人間の思考や行動を支えている。デフォルトモード・ネットワーク (DMN) は、内省、自己参照的思考、創造的思考、過去の記憶の再生、将来の出来事のシミュレーションといった、内面的で自発的な認知プロセスを担うネットワークである。一方、前頭頭頂ネットワーク (FPN) は、注意制御、論理的分析、計画、問題解決など、外的課題へ集中して取り組む場面で活動し、目標志向的な認知制御を支える機能を持つ。またサリエンス・ネットワーク (SN) は、外界からの刺激や身体内部の変化の中から「重要度の高い

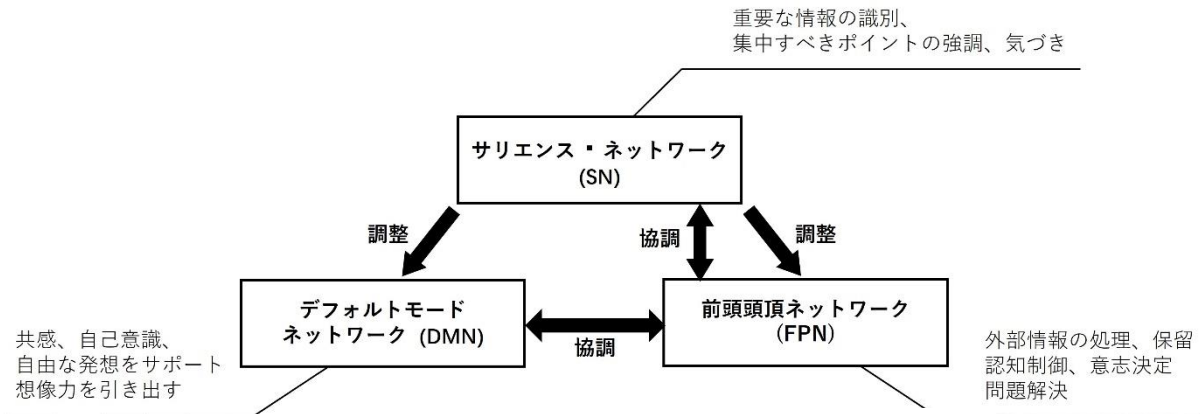


図 4-2 脳内ネットワークの相互関係

情報」を選択し、その情報に注意を向けるべきか、あるいは現在の認知状態を切り替えるべきかを判断する役割を果たしている。

特に SN は、DMN と FPN の切り替えを仲介する“スイッチ機構”として位置づけられ、状況に応じてどのネットワークを優先的に働かせるかを制御する。内省や発想を要する場面では DMN の活動を促進し、論理的検討や計画が求められる場面では FPN を優先させるように調整する。この切り替え機能が適切に働くことで、創造性と分析性という異なる性質の認知プロセスを柔軟に行き来することが可能となり、デザインプロセスにおける多面的な思考が実現される。

DMN と FPN が適切に協働することで、たとえばデザイン初期段階では DMN を基盤として幅広い概念的アイデアを発想し、次に FPN の働きによってそのアイデアを論理的に精査し、具体的な形態や構造へと落とし込むという一連の流れが可能になる。SN はこの両者の切り替えを円滑にし、デザイン課題に応じた効率的かつ適応的な認知プロセスの実行を支援する。こうした脳内ネットワークの協働により、デザイン活動における創造性 (DMN) と論理性 (FPN) のバランスが確保され、ユーザー視点を踏まえつつ実用性と機能性を兼ね備えたデザインの創出が促進される。

図 4-2 に示す脳内ネットワークの相互関係は、デザインプロセスを神経科学的に理解するための有効な概念的枠組みとなる。DMN・FPN・SN がそれぞれ固有の役割を果たしつつ、タスクの要求に応じて連携・切り替えを行うことで、デザインに必要な「発散的思考」と「収束的思考」が統合され、柔軟で質の高いデザイン推論が可能になると考えられる。

4.4. 脳内ネットワークと脳部位の相互作用

特定の脳領域単独の働きではなく、複数の脳領域および大規模脳内ネットワークの協調的な活動によって意識が生じると考えられている。従来の脳研究では、意識は個別の部位に局在するのではなく、脳全体に広がるネットワークの相互作用によって支えられていることが繰り返し示唆されており[12]、この視点は近年の神経科学における主要な枠組みとなっている。

4.4.1. 内側前頭前野 (MPFC) と DMN

内側前頭前野 (MPFC) は、デフォルトモード・ネットワーク (DMN) の主要な構成要素であり、自己関連的思考、内省、他者の意図や感情の推測といった高次の社会的認知機能に深く関与する領域である。MPFCは自己認識、価値判断、将来予測、感情調整など、個人の内的状態に基づく幅広い認知機能を担うことが知られており、DMN内において中心的な役割を果たしている[13]。

大脳皮質の内側部に位置するMPFCは、情動処理、社会的行動、意欲の調整、自己関連情報のモニタリングなど、情動・社会的認知・意思決定を統合するハブとして機能する。具体的には、自分自身の感情や考えを振り返る場面、他者の行動や言語の背後にある意図を推測する場面、あるいは将来の出来事を想像するときにMPFCは顕著に活動する。また、MPFCは扁桃核、島皮質、海馬などの他の領域とも強い機能的連結を持ち、感情制御や記憶検索、行動選択にも影響を及ぼす。

MPFCを中心とするDMNは、休息時や自発的思考が優位な状態、過去の記憶想起、将来のシミュレーション、他者視点取得などの際に活性化する。他方で、外部タスクへの集中が必要とされる状況、すなわち注意制御や課題遂行を担う前頭頭頂ネットワーク (FPN) が優位になる場面では、DMNおよびMPFCの活動は抑制される。これは、脳が内的思考 (DMN) と外的課題処理 (FPN) という相反認知状態を効率的に切り替えることで、状況に応じた適応的な行動を可能にしていることを示している。

このように、MPFCは自己認識や社会的関係性の形成、自身の感情や価値観に基づく意思決定を支える中核的役割を担っている。同時に、MPFCとDMNの適切な協調は、内的思考と外的集中のバランスを調整し、柔軟な認知機能を維持するために不可欠である。近年の研究では、このバランスが破綻すると、うつ病や不安障害、社会的認知の障害など、精神的健康に関連するさまざまな問題が生じ得

ることも指摘されており、MPFCの機能は神経科学および臨床研究においても重要な関心領域となっている。

4.4.2. 背外側前頭前野(DLPFC)とFPN

背外側前頭前野(DLPFC)は、高次認知機能および実行機能を司る脳領域であり、問題解決、計画立案、意思決定、注意の調整など、多くの目標指向的認知活動に関与している。また、DLPFCはワーキングメモリー(短期間の情報保持と操作)において中心的な役割を果たしており、情報を一時的に保持しながら処理する能力を支える重要な領域である[14]。

前頭頭頂ネットワーク(FPN)はワーキングメモリーおよび認知制御を担う大規模脳内ネットワークであり、DLPFCはその主要構成要素のひとつである。DLPFCはFPNの中核として、作業記憶の保持・更新、注意の焦点化、目標設定などの機能を統括し、FPN全体の調整役としても働く。FPNが活性化すると、デフォルトモード・ネットワーク(DMN)の活動が抑制され、外的課題への集中が促進される。これにより、個体は外部情報に基づいた計画的な行動や分析的思考を行うことが可能になる。

FPNはさらに、サリエンス・ネットワーク(SN)と連携し、重要な外的刺激や内部状態の変化を迅速に検出・評価する。SNが顕著な刺激を識別すると、FPNの活動が活性化し、注意の焦点が適切な情報へと移動する。DLPFCはこの過程において、タスク目標の設定、状況に応じた行動選択、注意の切り替えを実行する働きを担い、環境の変化に柔軟に適応するための意思決定プロセスを支えている。

DLPFCとFPNが適切に機能することで、私たちは複雑な問題を集中して解決し、日常生活のさまざまな課題に対応することができる。一方、これらのネットワークの機能が低下すると、注意制御の困難、実行機能の障害、計画力の低下などが生じ、認知障害や精神疾患のリスクが高まることが指摘されている。DLPFCは計画立案・注意調整・思考切り替えを支援し、FPNはDLPFCと協働して目標達成のためのタスク遂行を統括する。これらのネットワークが連携することで、柔軟な思考と適応的な行動が可能となり、複雑な課題に対しても効率的に対応できるようになる[15]。

4.4.3. 内側前頭前野(MPFC)とSN

内側前頭前野(MPFC)は、自己関連的思考、感情処理、社会的認知に深く関与する領域であり、デフォルトモード・ネットワーク(DMN)の主要構成要素とし

て位置づけられている。同時に、MPFCはサリエンス・ネットワーク（SN）とも密接な機能的連携をもつことが知られており、自己に関連する情報の評価や情動的価値づけを行うことで、重要な刺激に対する適応的な反応や行動を導く役割を担っている[16]。すなわち、MPFCはDMNおよびSNの架け橋として、自己関連情報の統合および価値判断を行う中核領域といえる。

SNは、外部環境や身体内部の変化の中から重要度の高い刺激を検出し、注意資源の配分や認知状態の切り替えを行う役割を果たす。MPFCは、この顕著性評価プロセスにおいて、自己関連性の観点から刺激の重要度を判断する機能を担う。例えば、自分自身や自分の価値観に関わる出来事は、MPFCとSNの協働によって顕著性が高く評価され、それに基づく注意の向け直しや行動選択に影響を与える[17]。このようにMPFCは、自己概念や価値判断と結びついた顕著性処理において、SNと機能的に連携して働く。

MPFCは、意欲・感情・動機づけといった自己の内部状態とも密接に関係する領域であり、内部状態に変化が生じた際には、SNがその変化を検出し、MPFCと協調して適応的な反応を促す。たとえば、ストレスや不安が高まった状況では、SNが内的緊張状態を検出し、MPFCの活動を調整することで感情制御や自己制御を支える役割を果たす。この協働により、個体は内的状態に即した適切な判断や行動を選択することが可能となる。

総じて、MPFCはSNと連携しながら、自己関連の顕著性評価、感情処理、価値判断、内部状態の変化に基づく行動調整といった一連の機能を統合している。これにより、自己意識や情動状態を踏まえた柔軟で適応的な意思決定が可能となる。MPFCとSNの協調的な働きは、個体の社会的行動や意思決定を支える重要な神経基盤であり、内的・外的状況の双方に応じて行動を最適化するために不可欠なメカニズムである。

4.5. 意識の生成

意識の生成は、単一の脳領域によって生じるのではなく、前頭前皮質、頭頂葉、側頭葉、後頭葉など複数の領域が相互に作用し合うことで形成されるとされている。知覚・認知・感情といった異なる処理過程が統合され、それらが主観的意識体験として立ち上がるという統合モデルが提唱されているが、意識の本質的メカニズムは依然として完全には解明されていない。

このような脳全体の協調プロセスを説明する理論として、Bernard Baarsが提唱した「グローバル・ワークスペース理論（Global Workspace Theory: GWT）」が広く知られている[18]。GWTでは、脳内に「グローバル・ワークスペース」と

呼ばれる情報統合のための機能的空間が存在し、ここに選択的に情報が共有されることで、意識的な体験が生じると考えられている。すなわち、複数の脳領域が情報を「放送 (broadcast)」し合うことで、意識が形成されるというモデルである。

また、Edelman と Tononi らによる「ダイナミック・コア仮説 (Dynamic Core Hypothesis)」[19] では、意識は複数の脳領域が一時的に強い結合を形成して生み出す「ダイナミック・コア」に基づくと考えられる。このコアは、課題遂行中には密接に連携し、非課題時にはゆるやかな結合へと変化するなど、動的に形成・解体されることが特徴であり、ネットワークの時間的変動が意識の生成に不可欠であるとされる。この仮説は、ネットワークの「動的な性質」に注目する意識研究の重要な流れを形成している。

さらに、複雑系科学に基づくアプローチでは、意識は脳内の大規模ネットワークにおける複雑な相互作用と非線形ダイナミクスによって生じると考えられている[20]。この視点では、意識は単一の機構に依存するのではなく、異なる時間スケールや空間スケールで活動する多様なネットワーク間の相互作用の結果として創発する現象だと捉えられる。

このように、意識の生成は脳内ネットワークの複雑かつ多層的な相互作用に支えられているという点では、これらの理論に共通性が見られる。特に、デフォルトモード・ネットワーク (DMN)、前頭頭頂ネットワーク (FPN)、サリエンス・ネットワーク (SN) は、意識の異なる側面を担う主要なネットワークとして注目されている。

DMN は内省、自己認識、記憶想起、未来予測など自己関連的意識を支えるネットワークであり[21]、安静時に活性化し、自己意識の基盤を形成する。一方、FPN は認知制御や目標指向的な注意集中を支え、論理的分析や課題遂行といった意識的プロセスに深く関与する[22]。SN は、内部および外部の環境から顕著な刺激を検出し、DMN と FPN のうちどちらを優先的に起動すべきかを判断する重要な切り替え機構として働く[23]。これにより、意識は重要な情報に迅速に反応し、状況に応じた適応的なモードへ移行することが可能となる。

総合すると、意識の生成は DMN・FPN・SN を含む複数の脳内ネットワークが、情報の選別、統合、切り替えなどを動的に連携させることで生み出される複雑な過程である。これらのネットワークの協調は、人間の自己認識、感情処理、注意制御、環境適応など、多様な意識の側面を支えており、意識が単なる特定領域の活動ではなく、脳全体の統合的現象であることを示している。

4.6. デザイン推論での脳内ネットワークの働き

デフォルトモード・ネットワーク (DMN) は創造性や内省を支え、前頭頭頂ネットワーク (FPN) は論理的分析と問題解決を促進し、サリエンス・ネットワーク (SN) は重要な要素への注意を選択的に向ける働きを担う。これらの脳内ネットワークを適切に活用することで、デザインの質は大きく向上し、ユーザーにとって機能的かつ価値のあるソリューションを創出できる可能性が高まる。

脳内ネットワークの働きを意識した思考法は、近年いくつか提案されている。「5 Whys」法は、問題の本質を繰り返し問うことで背後にある根本原因を浮き彫りにする手法であり[24]、SNによる顕著性の選別を促し、重要度の高い要素に注意を集中させることを可能にする。また、ユーザー視点での再評価は、デザイン作業を一度中断し、ユーザーの立場に立ってプロジェクト全体を見直すことで、デザイナー自身の無意識的バイアスを軽減し、DMNによる内省とFPNによる分析を適切に切り替える助けとなる。さらに、フィードバックループの活用は、他者からの意見を取り入れて再検討することで、批判的思考と再構築を促進し、ネットワーク間の柔軟な切り替えを支える。

デザイン思考の典型的なフレームワークである「共感 → 定義 → 発想 → プロトタイピング → テスト」のサイクル[25]は、内省的思考と課題指向的思考を往還させるプロセスを通じて、DMN・FPN・SNを含む脳内ネットワーク全体を活性化させ、デザイン推論の質を高める枠組みとして機能する。このプロセスにより、デザイナーはユーザー理解を深めつつ、創造的発散と論理的収束を繰り返すことができる。

脳内ネットワークの知見はユーザー中心設計においても有用である。例えば、ユーザーの注意がどこに向きやすいかを理解することで、重要機能や主要情報を適切に配置し、視覚的・操作的な顕著性を高めつつ、ユーザーの迷いを減らした直感的なインターフェース設計が可能となる。また、レイアウトやナビゲーションを最適化することで、ユーザーが自然に操作を続けられる環境を整えることができる。さらに、アニメーションやインタラクション要素を効果的に用いることで、SNの働きを活かして興味や注意を持続させ、総合的なユーザー体験の向上が期待できる。

加えて、ユーザーリサーチにおいても脳内ネットワークの知見は有益である。異なる状況下でユーザーの注意がどのように変化するかを調査することで、ユーザーの認知傾向やニーズをより精密に把握でき、製品の改善や新たなデザイン方針を導く手がかりとなる。

総じて、脳内ネットワークの理解とそれに基づくデザイン推論の適用は、ユーザーがどのように注意を向け、どのように製品を使用するかを予測可能にし、デザイナーにとって直感的で使いやすいデザインを創出するための強力な実践知となる。こうしたアプローチは、より良いユーザー体験（UX）を実現するための科学的根拠に基づくデザイン手法の発展へとつながり、製品やサービスの魅力向上に寄与することが期待される。

参考・引用文献

- [1] 苧阪直行 (2016) 「社会脳からみた意識の仕組み」『基礎心理学研究』 35, 14-19.
- [2] 越野英哉・苧阪満里子・苧阪直行 (2013) 「脳内ネットワークの競合と協調—デフォルトモードネットワークとワーキングメモリネットワークの相互作用—」『心理学評論』 56, 376-391.
- [3] Baars, B. J. (1997). In the Theater of Consciousness: The Workspace of the Mind. Oxford University Press.
- [4] Tononi, G. (2004). An information integration theory of consciousness. *Neuroscience*, 5, 1-22.
- [5] Buckner, R. L., Andrews-Hanna, J. R., & Schacter, D. L. (2008). The brain's default network: Anatomy, function, and relevance to disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124, 1-38.
- [6] Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., et al. (1999). Conceptual processing during the conscious resting state: A functional MRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 80-93.
- [7] Burgess, P. W., Dumontheil, I., & Gilbert, S. J. (2007). The gateway hypothesis of rostral prefrontal cortex (area 10) function. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 290-298.
- [8] Andrews-Hanna, J. R., Smallwood, J., & Spreng, R. N. (2014). The default network and self-generated thought. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1316, 29-52.
- [9] Seeley, W. W., & Menon, V. (2007). Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *Journal of Neuroscience*, 27, 2349-2356.

- [10] 永井知代子 (2022) 「脳の中の巨大な接合領域：頭頂葉」『神経心理学』38(1), 18-27.
- [11] 鈴木文丈・スズキユキヒロ (2019) 「複数の行動指標および fMRI 脳画像を用いたストレスによる情動制御の仕組みの解明」
- [12] Vincent, J. L., Kahn, I., Snyder, A. Z., Raichle, M. E., & Buckner, R. L. (2008). Evidence for a frontoparietal control system revealed by intrinsic functional connectivity. *Journal of Neurophysiology*, 100, 3328-3342.
- [13] 苧阪満里子 (2012) 『脳のイメージを読み解く：fMRI の基礎と応用』講談社.
- [14] 石井秀宗 (2015) 「前頭頭頂ネットワークの神経基盤と実行機能」『脳科学』53(4), 199-207.
- [15] 田中和智 (2018) 「背外側前頭前野 (DLPFC) と実行機能：FPN との連携による意思決定」『認知心理学研究』20(2), 89-97.
- [16] 佐藤陽介 (2019) 「サリエンス・ネットワークの内側前頭前野における機能：感情的サリエンスの評価」『神経心理学』29(3), 131-139.
- [17] 山本健一 (2021) 「内側前頭前野とサリエンスネットワークの協調関係：自己認識と感情評価」『心理学評論』63(1), 78-86.
- [18] Baars, B. J. (1988). *A Cognitive Theory of Consciousness*. Cambridge University Press.
- [19] Edelman, G. M., & Tononi, G. (2000). *A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination*. Basic Books.
- [20] Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. MIT Press.
- [21] 藤原一史・神崎亮平 (2014) 「デフォルトモードネットワークの発見とその発展的研究」『心理学評論』57(2), 167-179.
- [22] 乾敏郎 (2016) 『脳科学の挑戦：高次認知と実行機能のメカニズム』講談社.
- [23] 岡本康之 (2016) 『神経科学と自己認識のメカニズム』岩波書店.
- [24] Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Productivity Press.
- [25] Brown, T. (2009). *Change by Design: How Design Thinking Creates New Alternatives for Business and Society*. Harper Business.

5 章

デザイン発想時の助言内容の違いが
脳前頭前野部の賦活と自律神経状態に与える影響

5.1. 背景

筆者らは、デザイン活動中のアイデア発想時の脳活動と自律神経活動に着目した研究を継続して行っている。先の報告[1]では、二種類の推論段階すなわち「目的を達成する原理や方法についての抽象度の高いアイデア発想（コンセプトの考案）」と、「その結果に基づく具体的な形についてのアイデア発想（具体的な形状の考案）」の各段階を対象とした実験を実施し、脳前頭前野部の賦活についてはNIRS（Near-Infrared Spectroscopy）脳計測装置、自律神経系の活性状態についてはRRI（R-R Interval）の計測値を求めた。以降の本稿での脳賦活との表記は、脳前頭前野部の賦活を指す。得たデータ群の結果を統合的に説明可能な考察結果は、①抽象度の高いアイデア発想時には脳賦活が相対的に大きい、②類似するテーマに後で取り組む際には脳賦活が相対的に小さくなる、③アイデアを多く産出する実験協力者は最初の課題に取り組む際に大きな脳賦活をする、大別して以上の3点であり、デザイン課題の抽象度、課題に取り組む順序、そして個人のアイデア発想力、これらがもたらす影響についての基盤的な知見を得た。

デザイン活動中のアイデア発想に影響を及ぼす要因は上記の他にも存在する。アイデア発散フェーズに限定しても、スケッチ描画を繰り返す過程で外部からのフィードバックや助言を受ける場面は少なくない。教育現場においては、「どのような助言を与えるか」によって思考の促進や停滞が生じることは経験的に知られており、助言内容はデザイナーの思考と精神に何らかの影響を及ぼすことが推察される。

しかし、助言内容が思考活動や生理的反応に及ぼす影響を定量的に捉えた研究は少ない[2, 3]。現時点で得られている知見の多くは定性的な内容に留まり、外部からの助言が思考に及ぼす影響をリアルタイムかつ客観的に検証した研究は、筆者らが知る限り存在しない。以上の背景から、本研究ではデザイン発想時に個人が受ける助言内容の違いを対象とし、生理指標を用いた定量的アプローチによる知見の充実を図る。

5.2. 外部助言と創造的思考に関する先行研究

まず、経験に基づいた報告として、グループでのブレインストーミングでは、具体的な事例やヒントが示されることで特定のアイデアに引き寄せられて全体の発想が制限されることや、逆に、抽象的なテーマや質問が提示されるとメンバーが自由に考えることができ、より多様で独創的なアイデアが生まれやすいといった事例の報告がある[4]。

教育分野の研究では、抽象的な指示が創造性を引き出す傾向があり、教育現場においては生徒たちが自由に考えられる環境を整えることが重要であること、具体的な助言は時に有益だが独自の発想を妨げることもあるため、指導者はそのバランスを慎重に考える必要があることが示されている[5, 6]。

認知科学分野における創造性に関する研究からは、具体的な事例やヒントの提示が被験者のアイデアを「提示内容に近いもの」に偏らせる「設計固定化」を引き起こす可能性が示され[7]、Finkeらによる「創造的認知理論」では曖昧で抽象的な情報がむしろ発想の自由度を高めて構想の多様性を促すとされている[8]。

以上から、外部助言を受けた結果として産出されるアイデア品質は、具体的な内容の助言を受けた場合よりも、抽象的な内容の助言を受けた方が相対的に創造的や独創的なものになりやすいことが示されたといえる。しかし、助言を受けてからアイデアを生み出す推論過程の生理的反応についてはまだ明らかでない。助言内容の違いが脳賦活や自律神経活動に与える影響を調査することによって、デザイン活動における創造的思考のより深い理解につながることを期待できる。

5.3. 目的

この研究の目的は、デザイン発想時に外部から与えられる助言内容の違いが、脳前頭前野部の賦活状態および自律神経系の状態にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることである。特に、目的や利用状況の想定を主とする助言と具体的な形態操作を主とする助言という二種類の助言が、発想中の認知処理や心理生理的反応に与える差異を、生理指標を用いて定量的に検証する。

脳前頭前野部の賦活状態は主に認知的情報処理に関与し [9]、一方で自律神経系はストレス、覚醒、リラックス、休息などの生理的変化を反映する指標である。この研究では、脳前頭前野部の賦活状態の計測には NIRS (Near-Infrared Spectroscopy) 脳計測装置を、自律神経系の活性状態の評価には RRI (R-R Interval) を用いる。

実験計画においては、デザイン活動の実際場面で生じやすい状況を想定し、参加者がアイデア発想を進めている途中で助言を受けるという条件を設定する。これにより、助言が発想プロセスにリアルタイムで与える影響をより自然な形で捉えることを可能とする。

なお、本研究は京都女子大学臨床研究倫理審査委員会の承認 (2021-9) を得て実施する。

5.4. 生理指標データの取得方法

この研究の生理指標データは筆者らの第3章の研究[1]と同じ方法で取得した。以下に概要を記す。

5.4.1. 脳前頭前野賦活状態のNIRS脳計測装置による計測

(1) **原理および使用機材** NIRS脳計測装置は、脳活動に伴うヘモグロビン濃度変化による近赤外光の透過度変化を利用して大脳皮質部分の賦活の相対的な変化を測定できる。使用機器は株式会社NeU社製WOT-220で、前額部に22の計測チャンネルを備え、サンプリング周期は200msecである。

(2) **計測方法** 脳前頭前野部中央の16チャンネルを計測対象とする。国際10-20法で定義される電極位置と脳領域との対応関係を適用し、計測チャンネル12をFpzに位置づけてNIRS脳計測装置を装着することにより、各チャンネルと背外側前頭前野(DLPFC: Dorsolateral Prefrontal Cortex)、内側前頭前野(MPFC: Medial Prefrontal Cortex)、および眼窩前頭皮質(OFC: Orbitofrontal Cortex)の位置的対応関係を推定する(図3-1参照)。ただしNIRSは空間分解能が低く実験協力者の頭部の大きさによる違いもあるため、この対応関係は厳密ではない。

これらの領域の機能は本研究の目的と密接に関連している。DLPFCは作業記憶や注意制御を担い、課題遂行時の論理的思考やアイデアの操作に重要な役割を果たすため、創造的発想課題における認知的負荷を捉える上で適切である[10]。MPFCは自己参照的思考や内的動機づけと関連し、外部助言の有無が発想プロセスに与える影響を評価する際に不可欠な指標となる[11]。さらにOFCは価値判断や感情調整に関与し、生成されたアイデアの新規性や妥当性の評価に関わることから、創造的思考過程の質的側面を理解する上で重要である[12]。

なお、何らかの理由で正常に取得できないことが判明した計測チャンネルのデータは処理対象から予め除外する。

(3) **データ処理方法** 脳の賦活状態を最も感度高く反映するとされる酸素化ヘモグロビンの信号を処理対象とする。0.001Hz~0.3Hzのバンドパスフィルターで心拍と体動等の影響を概ね除外し、血流動態分離法により頭皮の血流動態変化の影響を除去し[13]、後述する各休息期間時の信号をゼロとするベースライン補

正処理を各タスクの信号に対して適用する。なおタスク終了の 15 秒後以降の区間をベースライン補正処理に用いる。

フィルター種類と設定値については、これまでの諸研究で NIRS 信号に適用されてきた処理と設定値の傾向[14] を参考に、本研究の実験内容から種類と設定値の目途を想定し、その範囲内で、後述する実験で取得された信号に対し除外する周波数域を変えた処理を複数回試行し、心拍や体動等の影響を概ね除去でき、また呼吸による影響はあまり大きくないと考えられたことから決定した。

以上のデータ処理は、血流動態分離法プラグイン[15]を適用した POTATO Ver. 3.8.60 を用いて行う。

5.4.2. RRI 解析による自律神経活性状態の計測

(1) **原理および使用機材** RRI (R-R Interval) は、一定期間における瞬時 R-R 間隔の平均であり、R は心電図の鋭い R 波を指す。ストレスは交感神経亢進・副交感神経抑制を介して RRI を短縮させるとされる[16]。計測にはユニオンツール株式会社製 WHS-1 を用いる。

(2) **計測方法** 実験協力者の胸部にセンサ付きベルト電極を装着し、継続して信号を取得する。何らかの理由で異常値が取得されていることが判明したデータは分析対象から予め除外する。

(3) **データ処理方法** RRI の周波数解析により、副交感神経状態の指標として HF、交感指標状態の指標として LF/HF を採用する[17]。解析にはユニオンツールの RRI Analyzer 2 を用い、LF 算出に必要な最短 30 秒を計算区間とし、解析周期は 1 秒とする。各タスクの自律神経状態のデータは、分析対象期間における HF および LF/HF の平均値とする。

5.4.3. 実験協力者のタスク遂行環境

この研究の実験での実験協力者のタスク遂行環境は筆者らの第 3 章の研究[1]と同様である (図 3-2 参照)。以下に概要を記す。

実験協力者はひとりずつ実験室へ入り、実験者が RRI センサと NIRS 脳計測装置を実験協力者へ装着する。その後、実験協力者は椅子に座り、実験者が椅子の座面と顎載せ台の高さを調節し、実験協力者がスケッチを自然に描画できる姿勢であることを確認する。顎載せ台は頭部の動きによる血流量変化の影響を抑える

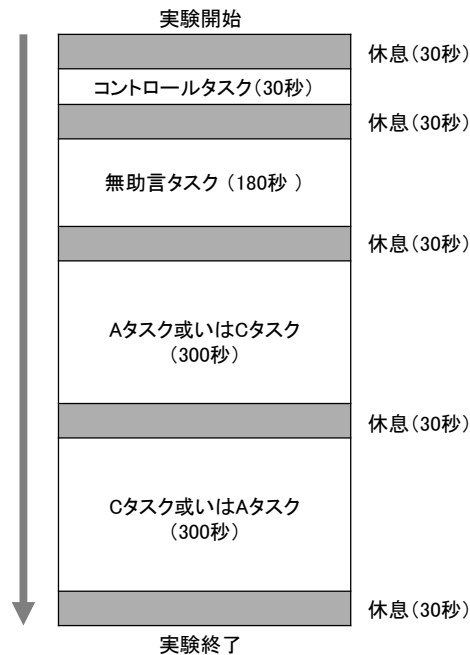


図 5-1 実験のブロックデザイン

ために用いる。描画には濃さ HB の鉛筆を用い、芯の太さは実験協力者間でほぼ一定とする。室温は適温に調整する。実験前に、実験協力者は実験中に頭部をできるだけ動かさないよう指示を受け、実験中の行動はほぼ水平のテーブル面の上方 550mm の高さに設置した小型カメラにより 30fps で動画記録される。

5.5. 実験計画

研究目的を達成するため、以下に示す 3 種類の条件下のスケッチタスクを全ての実験協力者へ課し、それぞれのタスクにおける脳賦活状態および自律神経活性状態を把握するための信号取得実験を計画する。いずれのタスクも具体的なデザイン課題であり、その内容は同一とする。タスク間で異なるのは助言の有無および助言の内容である。

- ① 無助言タスク：実験協力者には課題内容のみが提示され、外部からの助言を与えられないタスク。
- ② A タスク：実験協力者は、課題内容に加え、「利用目的や利用状況の想定を主とする助言」を与えられたタスクであり、助言内容は、「これまで使えなかった用途、場所、ユーザーを考えてみる」、「人が目覚めてから就寝するまでの行動を想像してみる」である。

③ C タスク：実験協力者は、課題内容に加え、「具体的な形態操作を主とする助言」を与えられたタスクであり、助言内容は、「曲げる」、「飛ぶ」、「くっつける」、「回す」、「複数使う」である。

実験は図 5-1 に示すブロックデザインに従って実施する。実験協力者が実施するタスクの順序は、まずコントロールタスク、次に無助言タスクであり、その後の A タスクと C タスクについては順序効果が生じないようにするため実験協力者ごとにランダムとする。したがって、半数の実験協力者のタスク順序は、無助言タスク→A タスク→C タスクであり、残りの半数は、無助言タスク→C タスク→A タスクの順に行う。実験協力者は、コントロールタスクにおいては、何も考えずに白紙に線を描画するよう指示を受け、各タスク間の 30 秒間の休息时间では、何も考えずに画板上の白紙を眺め続けるよう指示を受ける。

5.6. 分析の前提事項

5.6.1. NIRS データの標準得点化

NIRS データの分析に先立ち、各計測チャンネルの信号に対して標準得点化（Z スコア変換）を実施する。この処理を行なう理由は、NIRS 脳計測の原理が Lambert-Beer の法則に基づいており、得られる信号はヘモグロビン濃度の変化に応じた相対値であることから [18]、そのままの状態では、異なる実験協力者、異なる計測チャンネルの値を比較できないためである [19]。

標準得点の算出は以下の手順による。まず、計測チャンネル毎に、コントロールタスクでの描画開始 5 秒経過後から描画終了までの区間における信号の平均値（ C_{av} ）および標準偏差（ C_{sd} ）を求める。次に、分析対象タスクの分析期間内の各計測時点の信号値（ X_n ）に対し、以下の式に基づいて標準得点（ Z_n ）を算出する [20, 21]。なお、 n は 0.2 秒毎の各計測時点を指す。

$$Z_n = (X_n - C_{av}) / C_{sd}$$

上記手法により、各実験協力者における各計測チャンネルの各時点の標準得点（Z スコア）を算出した後、DLPFC, MPFC, OFC の領域ごとに、分析対象期間における標準得点を加算平均することで、各脳領域に対応する賦活量を導出する。コ

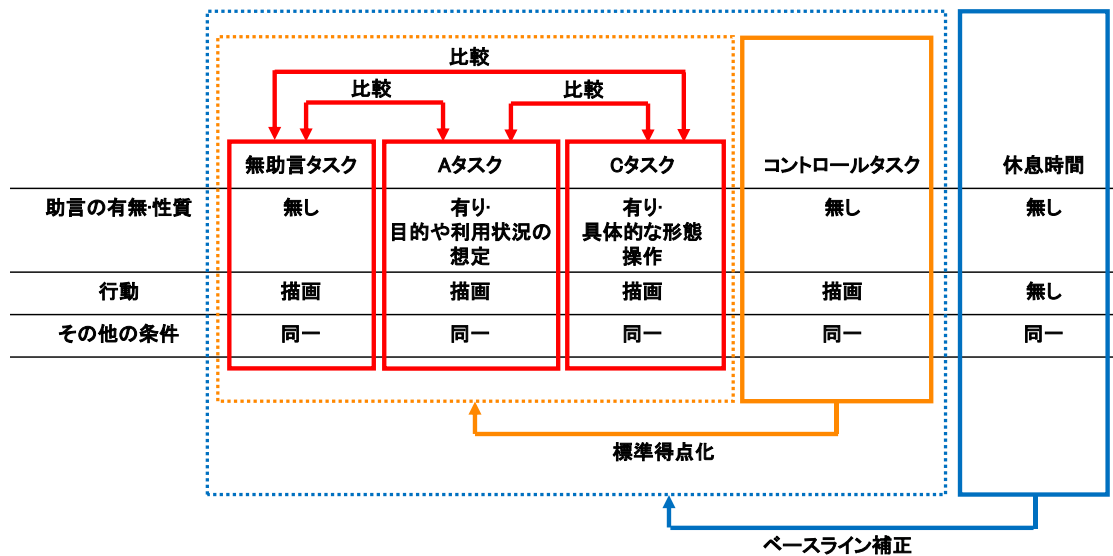


図 5-2 各タスクおよび休息期間の条件とそれぞれの関係および役割の概要

コントロールタスク、無助言タスク、Aタスク、Cタスク、休息期間の条件とそれぞれの関係および役割の概要を図 5-2 に示す。

5.6.2. 有意性判定

この研究では、分析対象となる実験協力者が 22 名と比較的少数であり、さらに被験者を複数の群に分けて比較する可能性があることから、各群の分散が等しいと仮定することは妥当ではないと判断した。そのため、有意差の検定には分布の仮定に依存しにくいノンパラメトリック手法を採用することとした。具体的には、同一実験協力者が複数のタスクを実施する状況におけるタスク間比較では、対応のある二条件間の差を評価するウィルコクソンの符号付き順位検定を用い、実験協力者を群に分けて比較する状況では、対応のない二群間の差を評価するマン・ホイットニーの U 検定を適用する。また、本研究における統計的有意性の判断基準は一般的に広く用いられる有意水準 $P < 0.05$ を基本とするが、 P 値がこの水準をわずかに上回る場合（例： $P < 0.08$ 程度）であっても、結果として一定の差異が存在する可能性を示唆すると解釈し、「有意傾向がある」と表現する。こうした解釈を行う理由は、統計的推論と科学的推論とを同一視することへの懸念に基づくものであり、統計的検定結果のみで事象の有無を二分することは適切でないという立場に依拠している [22]。

5.7. 実験

5.7.1. 実験方法

この研究の実験協力者には、大学でデザインまたは建築を専門的に学んでいる19～23歳の女性24名を採用した。特定の属性にサンプルを限定した理由は、デザイン発想に関わる思考特性や認知傾向が、年齢層や専門教育の有無によって大きく異なる可能性があるためであり、本研究では「適用範囲をあらかじめ限定し、その範囲内で確度の高い知見を得る」という研究方針を採用した。また、本研究は脳の左右半球差や利き手の違いに起因する脳活動の差異を研究目的に含んでおらず、NIRS装置およびRRIの取得方法からみても利き手の影響は本研究の主題に対して十分小さいと判断される。そのため、利き手による統制（右利きに限定する等）は実施していない。

実験開始前には、全協力者に対して実験の目的・手順・取得データの利用方法および管理方法について口頭および書面で丁寧に説明を行い、インフォームド・コンセントを得たうえで実施した。説明では、脳計測に伴う負荷やプライバシー保護の方法も明確に示し、研究倫理上の配慮を十分に行った。

実験は図5-1に示す手順に従い、各協力者が実験者の指示を受けながら順次タスクを遂行する形式とした。コントロールタスクに続いて実施する各タスク（無助言タスク、Aタスク、Cタスク）の課題内容はすべて同一であり、「革新的なスマートフォンをデザインせよ。形状・動き・画面グラフィックなど検討対象は任意とし、実現可能性は考慮しなくてよい」と提示した。ただし、被験者には事前に「すべてのタスクが同じ課題内容である」ことを告げず、各タスクごとに改めて課題が提示されるようにした。無助言タスクではデザイン案をひとつ提示しスケッチを行うよう求め、AタスクおよびCタスクでは「できるだけ多くのデザイン案を発想しスケッチする」よう指示した。

スマートフォンをデザイン対象として選定した理由は複数ある。第一に、スマートフォンは協力者にとってきわめて身近で日常的に利用される製品であり、使用状況やユーザー像を具体的に想起しやすい。このため、抽象度の高い発想から具体的な形状まで、幅広いレベルのアイデア生成が期待できる。第二に、既存のスマートフォンの形態バリエーションは比較的限定されており、革新性を生み出すには“機能 × 形態”の新しい組み合わせ方を考える必要がある。これは、抽象的アイデア発想と具体的アイデア発想を切り替える本研究の目的に合致しており、デザイン推論の特徴がより強く現れる題材である。第三に、スマートフォンはユーザーの生活文脈と密接に結びついているため、協力者がユーザー視点を自

然に取り入れながら発想できる可能性が高い。以上の理由から、研究目的に対して適合性の高い対象としてスマートフォンを採用した。

5.7.2. データ取得方法

(1) 脳前頭前野の賦活状態

無助言タスク、Aタスク、Cタスクにおける脳賦活状態を示す NIRS データは、スケッチ描画動作に基づく分析期間を個別に設定する方法で取得した。スケッチの開始タイミングは、実験協力者によっても、タスクによってもばらつきがあるため、テーブル上のカメラで撮影した動画をもとに、各協力者の描画開始時点を正確に特定した。そのうえで、描画開始後に脳賦活が安定すると考えられるタイミングである「開始約4秒後からの5秒間」を分析対象期間とした。このように、描画動作が実際に行われている区間に分析対象を限定することで、描画を伴わないコントロールタスクの信号を基準とした Z スコア化が妥当となり、タスク間比較の信頼性を確保できる。

分析に際しては、前述の Z スコア化によって標準化された信号を用い、DLPFC, MPFC, OFC に対応するチャンネルを抽出し、各協力者の脳賦活データとして算出した。これにより、描画動作中における三つの主要前頭前野領域の相対的な賦活状態を比較可能な形で取得することができる。

(2) 自律神経の活性状態

自律神経系の状態は、各タスク開始30秒後から終了時点までの RRI (R-R Interval) データを対象とし、その区間の平均値を分析データとして用いた。タスク開始直後は姿勢変化や認知的切り替えに伴う短期的な揺らぎが生じやすいため、30秒のウォームアップ期間を設け、タスク遂行中の比較的安定した心拍変動を評価することで、自律神経活動のタスク依存的変化をより精度高く捉えることを意図している。

5.7.3. 実験結果と分析

(1) アイデアスケッチ数

この研究では、実験を最後まで完遂した22名の実験協力者を対象に、AタスクおよびCタスクで産出されたアイデアスケッチ数をカウントし、その総数に基づいて協力者を2つの群に分類した。具体的には、両タスクの合計スケッチ数が

表 5-1 グループ α のタスク別アイデア数

実験協力者	Aタスクでのアイデア数	Cタスクでのアイデア数	アイデア総数
A	4	5	9
B	5	5	10
F	3	6	9
H	3	5	8
K	4	3	7
M	4	6	10
N	3	4	7
P	3	4	7
V	4	10	14
W	7	9	16
Y	4	4	8
平均値	4.00	5.55	9.55
母標準偏差	1.13	2.06	2.81

表 5-2 グループ β のタスク別アイデア数

実験協力者	Aタスクでのアイデア数	Cタスクでのアイデア数	アイデア総数
C	1	2	3
D	1	3	4
E	3	3	6
J	3	3	6
L	3	3	6
Q	2	2	4
R	3	3	6
S	3	2	5
T	2	2	4
U	3	3	6
X	1	1	2
平均値	2.27	2.45	4.73
母標準偏差	0.86	0.66	1.35

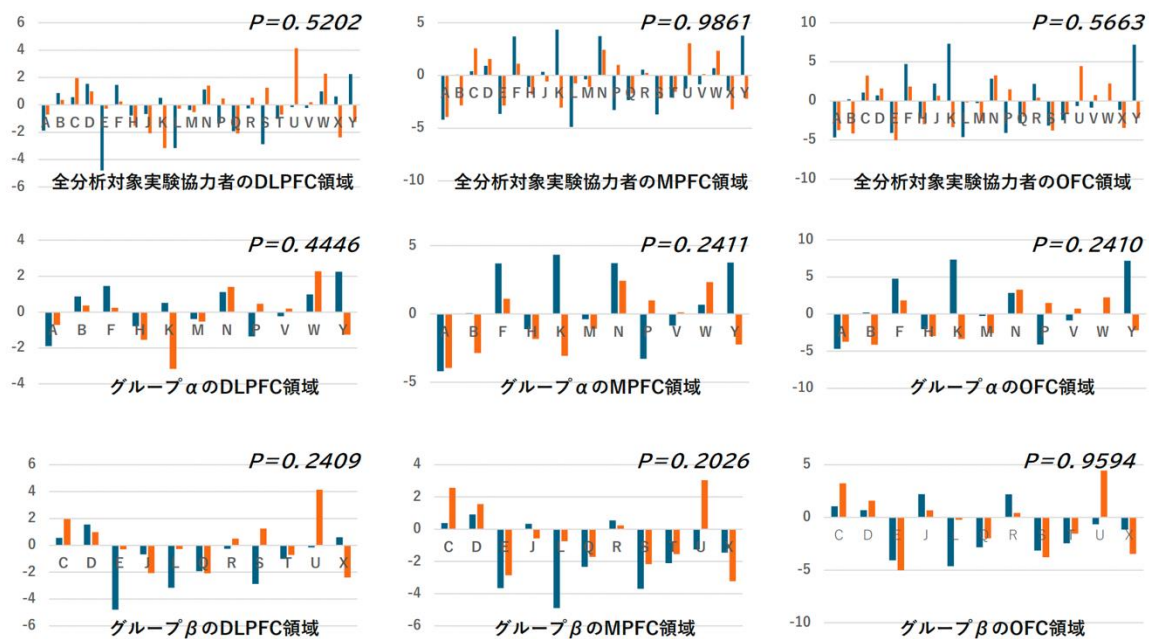


図 5-3 実験協力者の A タスクおよび C タスクの NIRS 標準得点データ

7 以上であった協力者を「グループ α」とし (11 名), 7 未満であった協力者を「グループ β」とした (11 名)。この分類は, 協力者間のアイデア発散傾向の違いを評価するための基礎的な指標として設定したものである。

表 5-1 および表 5-2 には, 各協力者が A タスクおよび C タスクで産出したアイデア数をグループ別に整理して示した。これらのデータについて, まず実験協力者 22 名全体, 続いてグループ α およびグループ β のそれぞれの群内において, A タスクと C タスクで産出されたアイデア数に差があるかを検定した。その結果, 22 名全体およびグループ α においては, C タスクの方が A タスクよりもアイデア数が有意に多いことが示された ($P = 0.0121$, $P = 0.0178$)。このこと

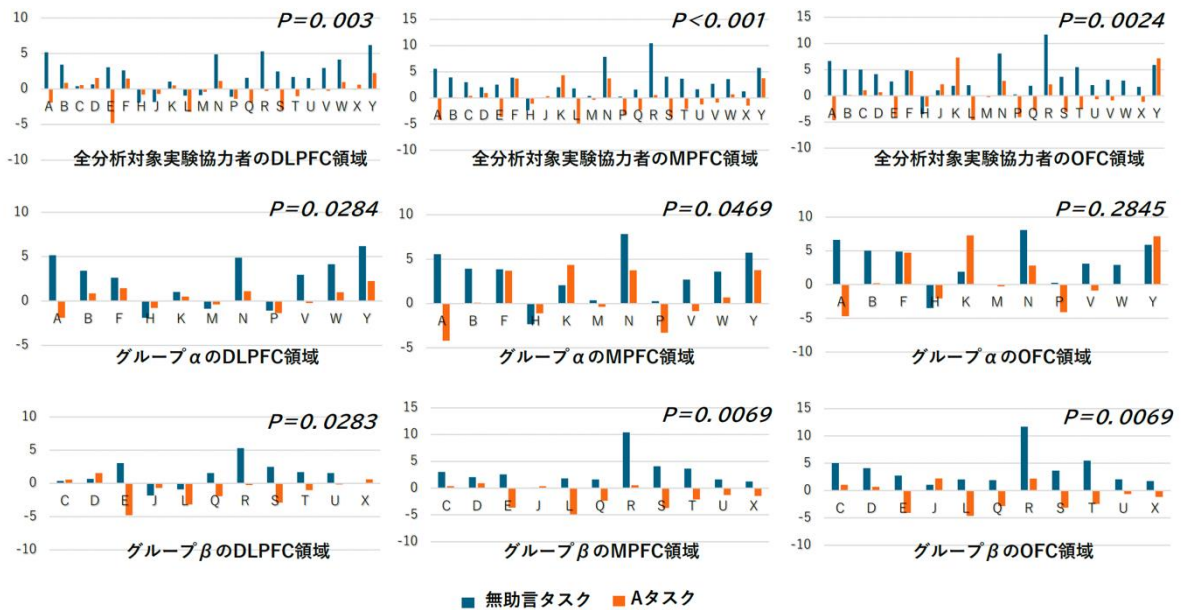


図 5-4 実験協力者の無助言タスクおよび A タスクの NIRS 標準得点データ

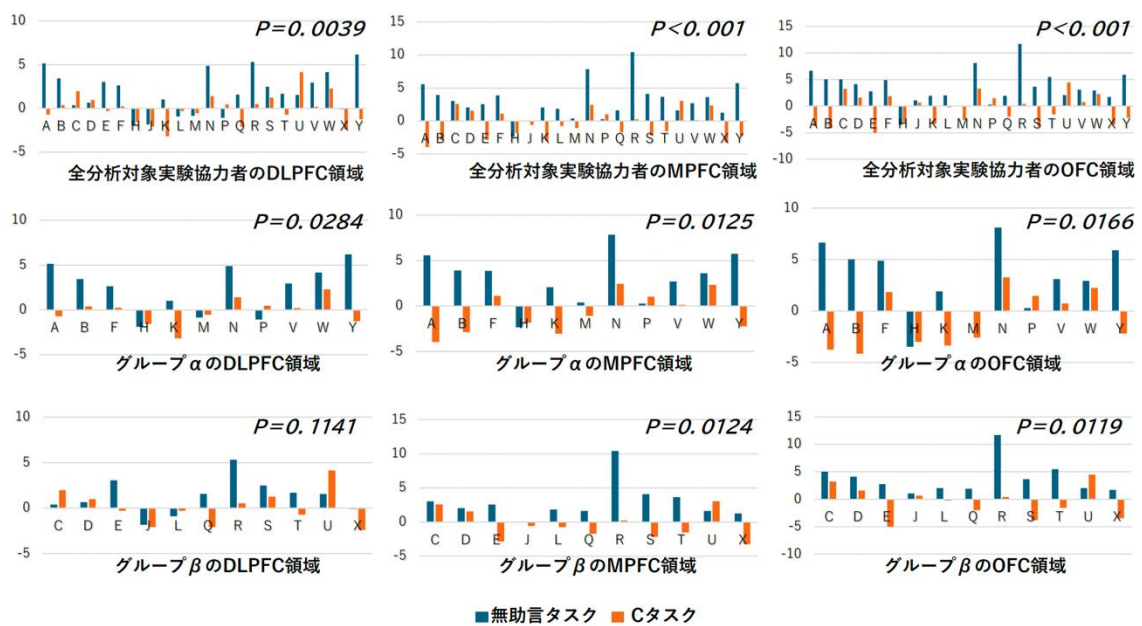


図 5-5 実験協力者の無助言タスクおよび C タスクの NIRS 標準得点データ

は、具体的な形態操作を主とする助言を受けた際の発散的思考が、目的や利用状況の想定を主とする助言よりも強く促進された可能性を示唆する。

一方で、実験協力者をタスクの提示順序 (A→C もしくは C→A) で層別化した場合には、A タスクと C タスクのアイデア数に統計的有意差は認められなかった。これは、助言の種類に対する反応よりも、「どちらのタスクを先に実施したか」がアイデア数に影響した可能性があり、順序効果を考慮する必要性を示している。

(2) 脳前頭前野の賦活状態および自律神経状態

脳前頭前野の賦活状態については、実験を完遂した 22 名のうち、NIRS 信号に異常値（アーチファクト）が含まれた計測チャンネルを除外したうえで、分析可能なデータを採用した。グループ分類と同様に、全協力者、グループ α 、グループ β のそれぞれについて、A タスク・C タスク・無助言タスク間の脳賦活レベルの差を検定した。

A タスクと C タスクの比較結果は図 5-3、無助言タスクと A タスクの比較結果は図 5-4、無助言タスクと C タスクの比較結果は図 5-5 に示す。これらの図では、DLPFC・MPFC・OFC の各領域に対応するチャンネルの Z スコアをもとに、タスクの違いによる脳活動の変化を視覚化している。

さらに、自律神経状態（RRI 指標）を含む主要な検定結果を表 5-3 にまとめ、各検定には本文中で参照できるよう検定結果番号（#1, #2, …）を付与した。これにより、脳活動と自律神経活動を横断的に比較しながら、助言内容およびタスク順序がデザイン発想時の認知負荷や精神的状態にどのような影響を及ぼすかを多角的に検討可能となった。

5.8. 考察

5.8.1. 脳前頭前野の賦活状態

助言の有無による脳賦活の違いについて、全 22 名の実験協力者のデータを用いて無助言タスクと A タスク、無助言タスクと C タスクのそれぞれを比較した。その結果、デザイン課題を最初に提示した無助言タスクにおいて、DLPFC・MPFC・OFC のすべての計測領域で、後続の A タスクおよび C タスクよりも有意に大きい賦活が示された（検定結果 #1, #5）。この結果は「助言が無いこと」が賦活の増加に影響した可能性を否定できないが、一方で A タスクおよび C タスクは無助言タスクと類似テーマの連続課題であるため、筆者らの先行研究 [1] が示した「類似課題を後に行うと、脳賦活が相対的に小さくなる」という“順序効果”の影響が強く表れた解釈も成立する。したがって、無助言タスクが高い賦活を示した主因は、助言の有無よりもむしろ課題順序である可能性が高い。

さらに、協力者をアイデア産出数に基づき分類したグループ α およびグループ β の各群内で同様の比較を行ったところ、両群ともに無助言タスクの脳賦活が A タスクおよび C タスクより有意に大きかった（検定結果 #2, #3, #6, #7）。この結果は順序効果を支持する一方、先行研究 [1] では「最初の課題への高い意欲」によりグループ α のみに有意差が生じたと解釈されていた。しかし今回の

表 5-3 脳前頭前野部の賦活状態と自律神経状態の主な検定結果

生理指標	標本	差違項目	差違内容	検定結果番号
無助言タスク/Aタスク間の比較：「無助言」と「目的や利用状況の想定を主とする助言」の違いの影響をみる				
脳賦活	全実験協力者	DLPFC, MPFC, OFC	最初の無助言タスクが大きい	#1
	グループα	DLPFC, MPFC	最初の無助言タスクが大きい	#2
	グループβ	DLPFC, MPFC, OFC	最初の無助言タスクが大きい	#3
自律神経系	グループα	HF	Aタスクが大きい	#4
無助言タスク/Cタスク間の比較：「無助言」と「具体的な形態操作を主とする助言」の違いの影響をみる				
脳賦活	全実験協力者	DLPFC, MPFC, OFC	最初の無助言タスクが大きい	#5
	グループα	DLPFC, MPFC, OFC	最初の無助言タスクが大きい	#6
	グループβ	MPFC, OFC	最初の無助言タスクが大きい	#7
Aタスク/Cタスク間の比較：助言内容の違いによる影響をみる				
脳賦活	全実験協力者	DLPFC, MPFC, OFC	有意差なし	#8
	グループα	DLPFC, MPFC, OFC	有意差なし	#9
	グループβ	DLPFC, MPFC, OFC	有意差なし	#10
自律神経系	グループα	LF/HF	Cタスクが大きい	#11
Aタスクの、最初/2つめスケッチ間、最初/3つめスケッチ間、2つめ/3つめスケッチ間、の比較：Aタスク内のアイデア考案過程における変化をみる				
脳賦活	グループα	DLPFC, MPFC, OFC	有意差なし	#12
Cタスクの最初/3つめスケッチ間の比較：Cタスク内のアイデア考案過程における変化をみる				
脳賦活	グループα	MPFC, OFC	3つめのスケッチが大きい	#13

実験ではグループβ（アイデア産出の少ない群）にも同様の有意差が現れたことから、AタスクおよびCタスクにおける脳賦活の減少には「助言が付与されたこと」も一定程度影響した可能性が示唆される。

助言内容の違いに関して、全協力者のAタスク/Cタスク間の比較では、全脳領域で統計的有意差は認められなかった（検定結果 #8）。これは両タスクが無助言タスクの後に提示されたため、いずれも「類似テーマの後続タスク」となり、先述の順序効果により賦活が低く抑えられたことが一因と推定される。一方、助言内容そのものが脳賦活に明確な違いを生むとはいえず、本実験の条件下では助言の抽象度の違いによる脳賦活の差は検出されなかった。グループαおよびグループβの群内分析においても同様であった（検定結果 #9, #10）。また、どのタスクにおいても、グループα/グループβ間で脳賦活に有意差は認められなかった。

以上の結果より、本実験のように「最初の課題＝無助言タスク」「後続の課題＝助言付きタスク」という構造では、助言の有無・助言内容の違いが脳賦活に及ぼす影響が“最初の課題を実施することによる賦活の高さ（順序効果）”に覆い隠されやすい可能性が示唆される。そこで次に、助言付きタスク内部での“アイデア発想を繰り返す過程”に焦点を当て、AタスクおよびCタスクそれぞれにおける連続スケッチ描画中の脳賦活変化を検討した。

本研究および先行研究で用いた脳賦活データはすべて「最初のスケッチ描画時」に限定されており、2つめ、3つめ以降のアイデア描画時の脳活動は分析されていない。したがって、助言が“発想の進行過程”に影響を与える可能性を検討するためにも、連続描画中の変化を調べる意義は大きい。分析対象を描画数の

多いグループ α に限定し、A タスクと C タスクそれぞれで「最初／2 つめ／3 つめ」のスケッチ描画時の脳賦活を比較した。

その結果、A タスクでは描画回数間に有意差は認められなかった（検定結果 #12）。一方 C タスクでは、最初の描画よりも 3 つめの描画時に MPFC および OFC の賦活が有意に大きくなるという特徴的な変化が見られた（検定結果 #13）。A タスクと C タスクの違いは助言内容のみであるため、この違いは C タスク特有の“具体的な形態操作を主とする助言”が、発想の進行に伴う脳活動を促進した可能性を示唆している。特に、最初の描画時のみを比較した A タスク／C タスク間の検定では差が検出されなかった（検定結果 #9）ことを踏まえると、助言内容の違いは「最初の描画ではなく、連続的な発想・描画のプロセスの中で顕在化する」可能性が高い。

以上は未検証の仮説段階であるものの、グループ α において C タスクのアイデア数が A タスクより有意に多かった（表 5-1, 表 5-2）という結果に対し、「具体的な形態操作を主とする助言が発想の進行過程で脳賦活を高め、アイデア発散を促進した」という一つの説明となり得る。

5.8.2. 自律神経状態

助言の有無および助言内容の違いが自律神経活動に与える影響について、まず全 22 名の実験協力者のデータを対象に検定を行った。その結果、自律神経指標（副交感神経活動および交感神経活動）に関して、無助言タスク・A タスク・C タスクのいずれの組み合わせにおいても統計的な有意差は認められなかった。次に、協力者をアイデア産出数に基づいて分類したグループ α およびグループ β の群内で同様の検定を実施したところ、グループ α においてのみ特徴的な変化が確認された。具体的には、無助言タスクと A タスクの比較では、A タスクにおける副交感神経活動が相対的に高く、有意傾向がみられた（検定結果 #4）。また、A タスクと C タスクとの比較では、C タスクにおける交感神経活動が有意に高い状態であることが示された（検定結果 #11）。これら以外に有意差は認められず、全タスクにおけるグループ α / グループ β 間の比較においても、自律神経活動に統計的な差異は確認されなかった。

以上の結果から、アイデア多産出群であるグループ α は、自律神経の観点からみても特徴的な反応パターンを示すことが明らかとなった。まず、A タスクにおいて副交感神経が相対的に高かったことは、無助言タスクよりもリラックスした状態で課題に取り組んでいたことを意味する。この点は、筆者らの先行研究で示された「グループ α は最初のタスクで交感神経活動が高くなる（＝緊張・覚醒

傾向が強い)」という結果と整合的であり、最初のタスクで高まった覚醒がその後のタスクで緩和されるという一連の生理的反応として理解できる。また、前タスクと類似テーマを持つ後続タスクで副交感神経がより活性化したことは、取り組む課題に馴染みが生まれ、認知的負荷が低下した可能性を示唆しており、これも先行研究の知見を支持する内容である。

さらに、グループ α において、利用目的や利用状況の想定を促す目的や利用状況の想定を主とする助言（A タスク）よりも、具体的な形態操作を促す助言（C タスク）を受けた方が交感神経活動が高く、より活発な身体反応が生じていた。このことは、グループ α が C タスクでより多くのアイデアを産出していった（A タスクより有意に多い）という結果と整合し、具体的な形態操作を主とする助言が発散的アイデア生成を生理学的にも促進した可能性を示す。すなわち、アイデア多産出群は A タスクでは落ち着き、具体的な形態操作を主とする助言では活発化する」という特徴的な生理的操作性を持つことが示唆され、これはデザイン発想における助言の種類が生理活動を通じて思考の進展に影響する可能性を示す重要な知見である。

5.9. 結論

この研究では、スケッチ描画を伴うデザイン推論の最中における生理反応に着目し、「利用目的や利用状況の想定を主とする助言」と「具体的な形態操作を主とする助言）」という 2 種類の異なる助言条件下での前頭前野の脳賦活状態および自律神経状態を定量的に分析した。本稿で述べる結論は、実験条件と得られた生理指標データとの関係を基に合理的に推定されるものであり、主要な結論の一覧を表 5-4 に示す。

まず、助言内容の違いがアイデア多産出者に与える影響について整理する。目的や利用状況の想定を主とする助言を受けた場合、協力者は比較的リラックスした状態でアイデアを検討する傾向があり、そのため短期的には描画対象が定まりにくくスケッチ行動への移行が遅れる傾向が見られた。さらに、目的や利用状況の想定を主とする助言を受けたタスク内では、スケッチ描画を繰り返す過程で脳賦活の増減が大きく変化せず、脳活動としては比較的安定した状態が保たれた。

これに対し、具体的な形態操作を主とする助言は描画対象が明確化しやすいことから、スケッチへ移行するまでの時間が短く、発想-描画の循環が促進されやすい。スケッチ描画を繰り返す過程においては交感神経活動が一定の活発さを維持しながら、考案初期よりも後半にかけて MPFC および OFC を中心とする脳賦

表 5-4 結論一覧

検定結果番号	対象群	生理データ	検定結果から導き出される現象	推定される理由	推定される上位理由
# 1, 2, 5, 6	全分析対象者 グループα	脳賦活状態	最初に実施した無助言タスクよりも、その後 に実施したAタスクお よびCタスクの脳賦活 は低下していた。	・前のタスクと類似したテーマに取り組む際は脳 賦活が低い。 <筆者らの先の報告を支持>	
# 4	グループα	自律神経 状態	最初に実施した無助言 タスクよりもAタスク の方が副交感神経は活 性化していた。	・最初のタスクで交感神経が活性化することとほ ぼ同義。 <筆者らの先の報告を支持> ・前に行ったタスクと類似したテーマに取り組む 際は、後タスクの方が副交感神経が活性化する。 <筆者らの先の報告を支持> ※ただし、Aタスクは該当するが、Cタスクは該当 しない。 ・アイデア多産者にとって、利用目的や利用状 況の想定を主とする助言を受けることは、リラッ クスしてアイデア考案することにつながる。	2回目以降のタスクでは交感神経の高まりは低 下し、また、前のタスクと類似したテーマでは 脳賦活が低下する。 ただし、アイデア多産者にとっては、具体的 な形態操作を主とする助言を受けると描画内容 が定まりやすくスケッチ行動へ移行しやすくな るため、交感神経はある程度の活発さを維持す る。 アイデア少産者にとっては、助言内容の違い は自律神経状態の変化をもたらさないが、助言 が付与されることによって脳賦活は減少する可 能性がある。
# 3, 7	グループβ	脳賦活状態	最初に実施した無助言 タスクよりも、その後 に実施したAタスクお よびCタスクの脳賦活 は低下していた。	・アイデア少産者にとって、助言の付与は脳賦 活を減少させる。	
# 8, 9, 10	全分析対象者 グループα グループβ	脳賦活状態	AタスクとCタスクの脳 賦活の程度には差が無 い。	・前に類似テーマに取り組んでおり、その後のタ スクにおける助言内容の違いは脳賦活に影響しな い。	本研究の助言内容の違いは脳賦活の違いとして 現れないが、アイデア多産者の自律神経状態 には反映される。
# 11	グループα	自律神経 状態	AタスクよりもCタスク の方が交感神経は活性 化していた。	・具体的な形態操作を主とする助言を受けると、 描画内容が定まりやすいため、スケッチ作業を行 いやすい。他方で、利用目的や利用状況の想定を 主とする助言を受けると、描画すべき内容は短期 的には定まりにくく、スケッチ作業を行いやすい とは言えない。	具体的な形態操作を主とする助言はデザイナー のスコープを小さくしてスケッチ作業を行いやす くする。 他方、利用目的や利用状況の想定を主とする助 言を受けた場合は、勘案事項が多くなり、利用 についての推測も必要のため、短期的には描画 内容が定まりにくく、スケッチ行動へ移行しに くい。
# 12	グループα	脳賦活状態	Aタスク内のアイデア 考案過程において、脳 賦活の程度は大きく変 化しない。	・利用目的や利用状況の想定を主とする助言を受 けてアイデア考案を繰り返す過程では、脳賦活の 増加や減少は生じにくい。	
# 4	グループα	自律神経 状態	最初に実施した無助言 タスクよりもAタスク の方が副交感神経は活 性化していた。	・最初のタスクで交感神経が活性化することとほ ぼ同義。 <筆者らの先の報告を支持> ・前に行ったタスクと類似したテーマに取り組む 際は、後タスクの方が副交感神経が活性化する。 <筆者らの先の報告を支持> ※ただし、そうであれば、Cタスクも含まれるは ず。 ・アイデア多産者にとって、利用目的や利用状 況の想定を主とする助言を受けることは、リラッ クスしてアイデア考案することにつながる。	アイデア多産者にとって、利用目的や利用状 況の想定を主とする助言を受けることは、リ ラックスしてアイデア考案することになり、そ の繰り返し過程において脳賦活の程度は大きく 変化しない。他方、具体的な形態操作を主とす る助言を受けてアイデア考案を繰り返す過程で は、交感神経はある程度の活発さを維持され、 最初の考案時よりも後の考案時の脳賦活は増加 し、考案されるアイデア数は増える。
※ 既出項目					
# 13	グループα	脳賦活状態	Cタスク内のアイデア 考案過程において、脳 賦活の程度は変化し、 最初のスケッチ描画時 よりも3つめのスケッ チ描画時の方が脳賦活 (MPFC領域、OFC領 域)は大きくなる。	・具体的な形態操作を主とする助言を受けてアイ デア考案を繰り返す過程では、最初の考案時よ りも後の考案時の脳賦活は増加し、考案されるアイ デア数は増える。	

活が有意に増加することが示された。これらの生理的特徴は、具体的な形態操作を主とする助言条件でアイデア数が増加した

という行動結果と整合し、具体的な形態操作を主とする助言が発散的思考を生理的にも促進する可能性を示している。

次に、タスク中に算出したアイデア数の多寡によって分類した実験協力者群に着目すると、以下のような特徴が得られた。アイデア多産出者（グループ α ）においては、上述のように助言内容の違いが発想の進行過程における脳賦活パターンへ影響し、特に具体的な形態操作を主とする助言によって後続のスケッチ描画時の脳賦活が増加するという特徴が確認された。このことから、本研究で採用した助言内容の違いは、「最初のスケッチ描画時の脳賦活を即時に変化させる」のではなく、「発想-描画を繰り返す中で徐々に脳賦活へ影響を及ぼす」という性質をもつことが示唆された。

一方、アイデア少産出者（グループ β ）では、助言が付与されること自体が脳賦活を相対的に減少させる可能性が示され、助言内容の違いによって脳賦活に明確な差は生じなかった。また、自律神経指標については、助言の有無・助言内容の違いのいずれにおいても安定した差は認められず、自律神経系は助言条件による変動に対して相対的に頑健であることが示唆された。

以上より、「助言の種類は発想プロセスの初期段階よりも進行段階で効果を表し、特に具体的な形態操作を主とする助言は生理的覚醒と脳賦活を高めることで多産出者の発散的発想を促進する」という点が本研究の主要な結論である。一方、少産出者では助言が必ずしも発想を促進せず、助言の生理的影響は個人の発想特性によって大きく異なる可能性が示された。

参考・引用文献

- [1] 張紫薇・前川正実 (2024) 「デザイン活動の二種類の推論段階での脳前頭前野と自律神経の活性状態」『デザイン学研究』70(4), 19-28.
- [2] Okada, T., & Simon, H. A. (1997). Collaborative discovery in a scientific domain. *Cognitive Science*, 21(2), 109-146.
- [3] Csikszentmihalyi, M. (1996). *Creativity: Flow and the Psychology of Discovery and Invention*. HarperCollins.
- [4] Smith, S. M. (1995). Getting into and out of mental ruts: A theory of fixation, incubation, and insight. In Ward, Smith & Vaid (Eds.), *The Creative Cognition Approach*. MIT Press.
- [5] 加藤司 (2003) 「大学生の対人葛藤方略スタイルとパーソナリティ精神的健康との関連性について」『社会心理学研究』, 78-88.
- [6] 藤村宣之 (2015) 『子どもの思考の多様性を生かす教科学習 — 学びの質を高める授業のデザイン』.
- [7] Jansson, D. G., & Smith, S. M. (1991). Design fixation. *Design Studies*, 12(1), 3-11.
- [8] Finke, R. A., Ward, T. B., & Smith, S. M. (1992). *Creative Cognition: Theory, Research, and Applications*. MIT Press.
- [9] 澤口俊之 (2005) 「前頭葉の認知的情報処理 — 前頭前皮質の『脳間・脳内操作系』仮説」『神経研究の進歩』49(4), 512-526.
- [10] Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167-202.
- [11] Gusnard, D. A., & Raichle, M. E. (2001). Searching for a baseline: Functional imaging and the resting human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(10), 685-694.
- [12] Kringelbach, M. L. (2005). The human orbitofrontal cortex: Linking reward to hedonic experience. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(9), 691-702.
- [13] Yamada, T., et al. (2015). Real-time system for extracting and monitoring the cerebral functional component during fNIRS measurements. *Biophotonics Japan 2015*, Vol. 9792, International Society for Optics and Photonics.

- [14] Pinti, P., et al. (2019). Current status and issues regarding pre-processing of fNIRS neuroimaging data: an investigation of diverse signal filtering methods within a general linear model framework. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 505.
- [15] Yamada, T., et al. (2012). Separation of fNIRS signals into functional and systemic components based on differences in hemodynamic modalities. *PLOS ONE*, 7(11), e50271.
- [16] Takatsu, H., et al. (2000). An evaluation of the quantitative relationship between the subjective stress value and heart rate variability. *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, 120(1), 104-110.
- [17] 林博史 (1999) 『心拍変動の臨床応用』医学書院.
- [18] Kocsis, L., Herman, P., & Eke, A. (2006). The modified Beer-Lambert law revisited. *Physiological Measurement*.
- [19] Scholkmann, F., Kleiser, S., et al. (2014). A review on continuous-wave fNIRS and imaging instrumentation and methodology. *Journal of Biomedical Optics*.
- [20] 鳥山悟・他 (2020) 「近赤外分光法を用いた顔肌への自己接触時の脳活動計測」『日本感性工学会論文誌』19(3), 255-261.
- [21] 利根川洋一・綿貫啓一 (2013) 「近赤外分光法を用いた音情報に対する脳賦活反応解析」『日本機械学会論文集 C 編』79(798), 442-449.
- [22] Wasserstein, R. L., et al. (2019). Moving to a world beyond “ $p < 0.05$ ”. *The American Statistician*, 73(sup1), 1-19.

6 章

デザイン発想時の助言内容とアイデアの質との関係

6.1. 背景と目的

近年、デザイン教育や創造的問題解決の分野では、発想者の思考をいかに適切に支援するかが重要な研究課題として注目されている。特に、他者から提供される「助言」や「フィードバック」は、学習者やデザイナーの思考方略、注意の向け方、心理的状态に直接的な影響を及ぼし、その結果として生成されるアイデアの質や多様性を左右する重要な要因である。しかし、従来のデザイン教育において助言は知識的・技術的な補助として扱われることが多く、その抽象度や内容の違いが発想プロセス、さらには心理生理的反応にどのような影響をもたらすかについては、未だ十分な知見が蓄積されていない。

創造的発想は一般に「発散 (Divergence)」と「収束 (Convergence)」を往復する二重過程として理解される。発散段階では、多様な視点から自由にアイデアを生成する内省的・概念的思考が重視される一方、収束段階では、アイデアの具体化や実行可能性の検討を行う論理的・実践的思考が求められる[1, 2]。この二つの思考モードは認知的性質が大きく異なるため、外部から与えられる助言の内容が、発想者をどちらの思考モードへ導くかは創造的成果に直接影響し得る重要な要素である。

しかしながら、助言の種類（目的や利用状況の想定を主とする助言／具体的な形態操作を主とする助言）が、発想者の脳活動や自律神経活動といった心理生理的プロセスにどのような変化をもたらすのかを定量的に検証した研究は極めて少ない。特に、発散的アイデア生成を伴うスケッチ描画の最中に助言が与えられたときに、発想者の前頭前野活動や自律神経状態がどのように変化するかについては、実験的・客観的知見が不足している。こうした研究ギャップが、本研究の動機となっている。

目的は、デザイン発想時における助言内容の違いが発想者の脳前頭前野部の賦活状態および自律神経系の活動にどのような影響を与えるかを定量的に明らかにすることである。具体的には、「利用目的や利用状況の想定を促す抽象的な助言」と、「形態操作や構造の検討を促す具体的な助言」という二つの助言条件を設定し、それぞれの条件下でスケッチ描画を伴うアイデア発想が行われた際の生理反応を比較する。脳活動の指標にはNIRS (Near-Infrared Spectroscopy) による前頭前野の賦活状態を、自律神経系の指標にはRRI (R-R Interval) による交感神経・副交感神経活動の変化を用いることで、助言が発想者の認知的・情動のプロセスへ及ぼす影響を多角的に検証する。本研究を通じて、助言が発散的アイデア生成を促進または抑制する生理的メカニズムの理解を深め、助言内容に応

じた効果的なデザイン教育・指導方法の構築およびデザイン推論過程の神経科学的基盤の解明に寄与することを目指す。

6.2. 先行研究との関係

これまでの研究では、助言の抽象度が思考内容や心理状態に影響を及ぼすことが示唆されている。抽象的な助言（例：「使う人の気持ちを想像してみよう」）は、課題の目的や本質を再考させる契機となり、自己参照的・内省的な思考を促すことが報告されている。一方で、具体的な助言（例：「ボタンの位置を工夫してみよう」）は、手段や操作に焦点を当てた実行的な思考を促し、課題解決を効率的に進める傾向がある[3, 4]。このように、助言の性質は単なる情報提示にとどまらず、発想者の認知方法や感情状態を切り替える「認知的スイッチ」として作用する可能性がある。

しかし、これらの研究の多くは発想過程を主に行動的・言語的側面から検討しており、助言による内的変化を神経科学的・生理的に捉えた研究は限られている。また、助言の効果は個人の創造性特性や心理的緊張状態などの個人差によっても変化すると考えられる。特に、発想初期における不安や緊張がアイデア生成を抑制する傾向があり[5]、そのような心理的負荷は自律神経系の活動に反映されるとされる。交感神経優位の状態では集中や実行モードが高まり、副交感神経優位の状態では内省的・拡散的な思考が促進されることが知られている[6]。

筆者らの先行研究では、アイデア発散段階で生成されるアイデアの量と助言内容の関係について、前頭前野の脳賦活および自律神経活動の指標に基づいて調査した。その結果、「利用目的や状況を想定する助言」はリラックスした発想を促すがスケッチ行動への移行が遅れ、脳賦活変化は小さい傾向がみられた。一方、「具体的な形態操作を促す助言」は描画内容が定まりやすく、交感神経活性の維持とともに脳賦活が増大し、アイデア数が増加した。また、助言の影響は多産出者では発想過程全体に段階的に現れるが、少産出者では脳賦活を低下させる可能性があり、自律神経指標には顕著な差はみられなかった。

上記の研究は、主としてデザイン構想段階における助言（提案）内容とアイデア産出数との関係に焦点を当てたものであり、助言の有無や性質がアイデアの量的側面に及ぼす影響を明らかにした。しかし、アイデアそのものの質的特徴、すなわち創造性・独創性・有用性といった観点からの分析は十分に行われていない。

この研究では、デザイン構想段階において与えられる助言内容の違いが、生成されるアイデアの質にどのような影響を及ぼすかについて、実験的データに基づ

く分析と考察を行う。これにより、助言の性質がデザイン発想過程における質的成果へ与える影響構造を明らかにすることを目的とする。

6.3. 実験

6.3.1. 実験方法

研究の目的を達成するために、この研究ではデザイン課題として「革新的なスマートフォン」を題材としたスケッチ描画タスクを設定し、3種類の助言条件下で全ての実験協力者に同一内容の課題を遂行させた。実験協力者は、大学においてデザイン系または建築系の専門教育を受けている19～23歳の女性24名であり、デザイン経験や基礎的な描画スキルを有するという共通した属性をもち、条件統制された環境下でデータを取得した。各タスクにおいて提示されるデザイン課題は同一である一方、タスク間で異なるのは「助言を与えない条件」「目的や利用状況の想定を主とする助言を与える条件」「具体的な形態操作を主とする助言を与える条件」という助言内容の違いのみである。課題の容易性や内容そのものは統一し、助言の性質だけを独立変数として操作することで、助言が思考プロセスおよび生理反応に及ぼす影響を直接的に比較可能な実験構造を構築した。なお、実験協力者はNIRS脳計測装置を装着した状態でスケッチを描画するが、本稿の当該節ではNIRSデータの詳細な分析結果には踏み込まず、実験条件および課題設定の概要に焦点を置いて記述する。

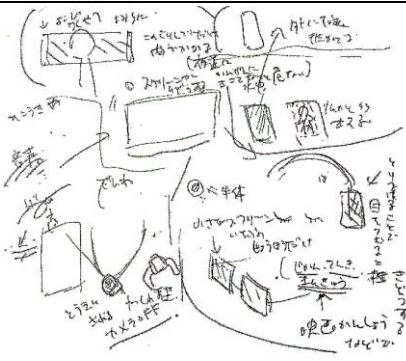
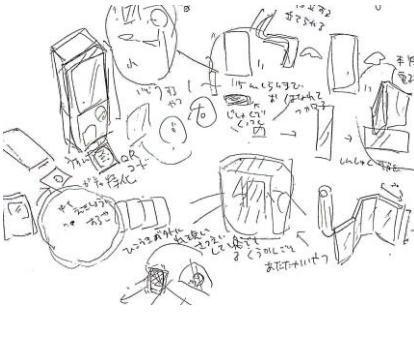
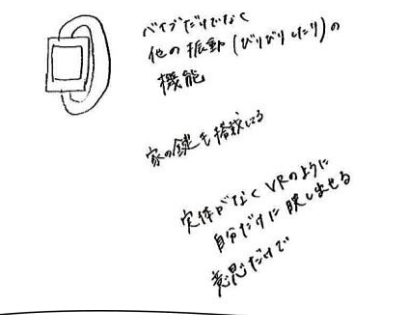

① 無助言タスク：実験協力者には課題内容のみが提示され、外部からの助言は一切与えられない。

② Aタスク：課題内容に加え、「利用目的や利用状況の想定を主とする助言」が与えられる。助言内容は「これまで使えなかった用途・場所・ユーザーを考えてみる」、「人が目覚めてから就寝するまでの行動を想像してみる」である。

③ Cタスク：実験協力者は、課題内容に加え、「具体的な形態操作を主とする助言」を与えられたタスクであり、助言内容は、「曲げる」、「飛ぶ」、「くっつける」、「回す」、「複数使う」である。

実験協力者が実施するタスクの順序は、まずコントロールタスク、次に無助言タスクとし、その後のAタスクおよびCタスクの順序は順序効果の影響を排除するため実験協力者間でランダムとする。したがって、半数の実験協力者は「無助

表 6-1 実験における A タスクと C タスクのスケッチの抜粋

実験協力者	Aタスクのスケッチ	Aタスクのスケッチ特徴	Cタスクのスケッチ	Cタスクのスケッチ特徴
B		<ol style="list-style-type: none"> 1. 複数のアイデア 2. 矢印による関係性・動きの指示が多い 3. 俯瞰図・側面図・使用場面など視点が混在 4. 「装着」「持ち運び」「固定」「回転」など操作性に関する記述 		<ol style="list-style-type: none"> 1. 折りたたみ・展開・回転などの構造 2. 様々な角度から形状を確認する 3. 発散（複数案の提示）と収束（機構の具体化）が同時進行
C		<ol style="list-style-type: none"> 1. アイデア数が極端に少ない 2. テキスト中心で、スケッチによる思考展開がほとんどない 3. 発散的思考よりも「単一の抽象的アイデア」を短く述べているだけ 		<ol style="list-style-type: none"> 1. アイデア数は少ない 2. 概念が具体的で、機能との対応が成立している 3. 思考の広がりも弱い

言タスク→A タスク→C タスク」、残りの半数は「無助言タスク→C タスク→A タスク」の順で実施する。

6.3.2. 実験結果

この研究では、24 名の実験協力者のうち、取得された生理データおよびスケッチ記録に欠損や測定不備が認められた 2 名を除外し、22 名を分析対象とした。表 6-1 には、分析に用いたスケッチデータの一部を抜粋して示している。完全版は付録に掲載されている。本節では、異なる助言内容がスケッチ表現およびアイデアの質的特徴にどのような影響を与えるのかを、描画内容の比較を通して検討する。

まず、抽象的な助言を与えた A タスクでは、全体的に描線量が少なく、形態的・構造的な描き込みは限定的であった一方、文字による説明文や補足的注釈が多くみられた。これらの注釈は、使用状況、利用場面、ユーザー像など、プロダクトが置かれる文脈的条件を思考する内容が中心であり、実験協力者が課題を「意味・価値・利用可能性の再構成」という概念的水準で捉えていたことを示す。スケッチとしては形態の具体性に欠けるものの、対象物の用途や意味を拡張

する方向へ思考が発散しており、目的や利用状況の想定を主とする助言が自由度の高い探索的思考を促進したと考えられる。また一部の協力者では、人物や行動シーンが描かれており、ユーザー中心の発想を視覚化する傾向が確認された。

これに対し、具体的な形態操作を主とする助言を与えたCタスクでは、描線密度が大幅に増加し、形状の輪郭、可動部の構造、寸法感、内部メカニズムなどが明確に描写されていた。スケッチは立体的なビューや断面図、部分メカニズムなど具体的で、形態操作を念頭に置いた設計的検討が中心であった。注釈や説明文は相対的に少なく、視覚的描写そのものに機能や構造の意図を組み込もうとする姿勢が表れている。これらの特徴から、Cタスクの助言は思考を「形態の特定」へと収束させ、構造的・実装的な推論を促進したと解釈できる。

以上の比較から、スケッチ表現だけを観察した場合でも、助言内容が思考方略に異なる影響を与えていることが明確に示された。Aタスクでは、発想初期の広範な探索や概念的再構成が強調され、スケッチは「意味の外化」の役割を果たしていた。一方、Cタスクでは、形態構築や構造検討へと推論が移行する過程が可視化され、スケッチが「形状の試作・構造検証の外化」として機能していた。すなわち、助言内容の違いはスケッチ描画の性質そのものに反映され、発想プロセスに対する外部助言の影響を明確に裏付ける結果が得られたといえる。

6.4. アイデアの評価と分析

6.4.1. アイデアの評価

アイデアの評価手法としてTTCT（トーランス創造的思考テスト）を採用する。これはアメリカの心理学者エリス・ポール・トーランスによって1960年代に開発された、創造的思考力を多面的に測定するための代表的な心理検査である[7]。TTCTは、単にアイデアの多さを測るものではなく、個人がどのように新しい発想を生み出し、既存の枠組みを超えて柔軟に思考するかを評価することを目的としている。そのため、教育学・心理学のみならず、デザイン思考や問題解決研究の分野でも広く用いられている[8]。評価は主に「流暢性（fluency：アイデアの量）」「柔軟性（flexibility：発想の多様性）」「独創性（originality：新規性）」「精緻性（elaboration：詳細さや完成度）」の4指標に基づいて行われる。これらの得点を総合的に分析することで、実験協力者の創造的思考の特徴を定量的に把握できる点に特徴がある。また、TTCTは文化的背景や教育環境の違いにかかわらず比較的安定した信頼性を持ち、創造性研究における国際的な標準テストとして高く評価されている[9]。

表 6-2 評価ルーブリック (TTCT 応用)

評価観点	5点 (非常に高い)	4点 (高い)	3点 (標準的)	2点 (やや不足)	1点 (不足)
流暢性 (Fluency) アイデアの量	多数のアイデアを提示し、多方向に展開している	複数のアイデアを提示している	必要最低限のアイデアは出している	限られた数のアイデアしか出せていない	ほとんどアイデアを出していない
柔軟性 (Flexibility) アイデアの多様性	多様な視点 (形状・用途・体験・素材など) から幅広く発想している	複数の視点から発想が展開されている	ある程度の視点の違いはある	視点が偏っており、発想の幅が狭い	ほぼ同一視点に基づく発想のみ
独創性 (Originality) 新奇性・独自性	非常に独創的で他者には見られないユニークな発想	独自性のある発想が複数含まれている	一部に独創性が見られる	平凡で一般的な発想が多い	既存のアイデアの模倣が中心で新しさがない
精緻性 (Elaboration) 具体性・完成度	アイデアが詳細に描かれ、利用シーンや機能まで具体的に説明されている	アイデアにある程度の具体性があり、理解しやすい	基本的な説明やスケッチがある	説明やスケッチが不十分で理解しにくい	簡単な記述のみで具体性がない

評価は得点方式で行い、評価項目は上記の「流暢性 (アイデアの量)」「柔軟性 (発想の多様性)」「独創性 (新規性)」「精緻性 (詳細さや完成度)」4種類とする (表 6-2)。さらに、A タスクには「条件の有効性」を、C タスクには「条件の想性」をそれぞれ追加する。各項目の満点は5点とし、各タスクの満点は25点、2つのタスクの合計満点は50点とする。評価結果の一部は表 6-3 に示す。完全版は付録に掲載されている。

6.4.2. 分析

分析対象とした22名の実験協力者が各タスクで描画したスケッチアイデアについて、第三者評価者 (デザイン実務経験者および創造性研究の知見を有する者) が評価を行った。評価指標には、創造的思考を多面的に捉えるために広く用いられている「流暢性 (アイデアの量)」「柔軟性 (発想の多様性)」「独創性 (新規性)」「精緻性 (詳細さや完成度)」の4側面を採用し、各指標の得点を総合してアイデア質得点を算出した。評価は複数名の評価者による独立採点方式で行い、評価の信頼性を確保するため、採点後に評定者間の不一致箇所について協議し、最終得点を確定した。

総合的な評価結果として、A タスク (目的や利用状況の想定を主とする助言条件) では、とりわけ「独創性」の平均得点が高く、実験協力者が既存の枠組みにとらわれずに自由な発想を展開していたことが確認された。A タスクでは、用途の再定義や利用場面の拡張に関する発想が多く見られ、形態的には簡略であっても概念的な広がりを伴うアイデアが多かったことが特徴である。これは、抽象度の高い助言が認知的探索範囲を拡大させ、発散的思考を促進した可能性を示唆している。

表 6-3 評価結果 (TTCT 応用) 一部

実験協力者	Aタスク					得点	Cタスク					得点	合計
	流暢性 (Fluency: アイデアの量)	柔軟性 (Flexibility: アイデアの多様性)	独創性 (Originality: 新奇性・独自性)	精緻性 (Elaboration: 具体性・完成度)	条件の有効性 (提示した条件を使えるかどうか)		流暢性 (Fluency: アイデアの量)	柔軟性 (Flexibility: アイデアの多様性)	独創性 (Originality: 新奇性・独自性)	精緻性 (Elaboration: 具体性・完成度)	条件の発想性 (提示した条件をそのまま使うか、よく発想するか)		
B	5種類以上のアイデア 5点	「形態変化(変形・吊り下げ)」「操作手段(視線・手の動き)」「利用環境(携帯・固定)」と、異なる観点で多面的な思考を展開。 5点	「視線による操作」や「吊るして使うスマホ」というアイデアは非常に独創的。既存技術を再構成して新しい使用体験を生み出している。 5点	図とメモが複数層で構成され、アイデア間の関連が線で結ばれており、思考の流れが可視化されている。 4点	条件を効果的に使用した 5点	24点	「自立式」「本型」「浮遊表示」「温度変化」「伸縮」「分離型」など、6件以上のアイデア 5点	「形状変化(折る・伸ばす)」「感覚拡張(温かさ・光)」「使用環境(机上自立・手持ち)」と、観点が多様。 5点	「あたたかいスマホ」や「QRカードが浮かぶ」など、感覚的・身体的な体験に焦点を当てた発想が非常に独創的。 5点	複数の構造・操作プロセスがスケッチで視覚的に整理されている。 4点	条件を効果的に使用した 4点	23点	47点
C	一つの中心的なアイデア 2点	「日常の道具(バックミラー)」「デジタルデバイス(スマホ)」という異領域融合が見られる。 4点	「車のミラーとして使えるスマホ」「動作に反応して自動視覚補助を行う」という発想は既存スマートフォンと一線を画しており、独創的。 4点	スケッチ自体は簡略的で、インタラクションや操作の描写が少ない。 2点	振動機能のみを考慮しており、あまり役に立たない。 2点	14点	2つの中心的なアイデア 2点	「曲げる空間」「身体動作と連動」「アバター操作」といった、物理・デジタル・身体を横断した視点がある。 3点	「曲がる場所」でスマホが自動で変形する」「体の動きに連動するデバイス」など、既存の折りたたみ式スマホを越えた応答型デザインとして独自性がある。 4点	立体構造の図解が描かれる 3点	条件とはあまり関係がない。 1点	13点	27点
H	感情・触覚・人間関係という複数の要素を連鎖的に発想。アイデア数自体も多い。 4点	技術・身体感覚・心理的交流という異分野を統合している。 5点	感情や肌を温度を「伝えるスマートフォン」という発想は非常に独創的。 5点	図解は簡潔だが、人物や操作動作の描写により使用状況が明確。 4点	指が使えない人を考慮した点はユニークで斬新だ。強制起床機能付きスマホは面白いが、同様の代替手段がある。 4点	22点	同一テーマ内で複数の構成(壁設置型、可変型、身体動作対応)を提示し、発想の展開が豊か。 4点	触覚・姿勢・構造といった異なる次元の要素を横断的に結び付け、使い方の多様化を試みている。 5点	「壁をタッチする」「身体の動きに反応する」など、スマートフォンの定義を拡張する点が斬新。 5点	各スケッチの描線がシンプルながら、動作・触覚・変形の意図が読み取れる構成。 4点	提示された条件に基づいて、四種類以上の興味深いデザインが生成された 5点	23点	45点
X	2つのアイデア 2点	持つ→装着の転換が優れている 2点	「スマートウォッチ」との共通性はあるものの、このスケッチの注目点は時計の延長としてスマホ機	操作・状況の描写が不足 1点	与えられた条件はほとんど使われていない 2点	10点	2つのアイデア 1点	「空間拡張」と「ネットワーク連動」という2つのまったく異なる次元で思考 2点	創造性がほとんどない 2点	スケッチとしては非常にミニマル 1点	与えられた条件はほとんど使われていない 1点	7点	17点

一方、Cタスク(具体的な形態操作を主とする助言条件)では、「精緻性」および「実現可能性・機能的有用性」に関連する指標が顕著に高く、形態構造の一貫性や機能的整合性が評価された。Cタスクのスケッチでは、立体的構造の提示、可動パーツの描写、モジュール配置など、具体的な造形操作を踏まえた構想が多く、助言内容が思考を収束的・構造的な方向へ導いたと考えられる。

個別の実験協力者の傾向として、AタスクではB、H、L、Q、Sなどが高得点を示し、文脈的発想の幅広さやユニークな用途提案が評価ポイントとなった。これに対しCタスクでは、M、R、X、Yなどが高得点であり、構造・形状の一貫性、

メカニズムの表現，具体的な造形アイデアが評価された。このように，抽象助言は概念操作の得意な協力者を，具体助言は造形思考・構造化思考を得意とする協力者を相対的に活性化させることが示唆される。

以上の結果から，助言の抽象度は発想者の思考モードに対して方向づけの効果を持ち，スケッチ内容における表現構造や創造性プロフィールに明確な差異を生じさせることが示された。特に，抽象助言は新規性を，具体助言は形態的完成度を高める傾向があり，外部からの助言がデザイン推論過程の質的構造にどのように影響するかを示す重要な知見となった。

6.5. 考察

6.5.1. タスク間比較

AタスクとCタスクは，同一課題を用いながらも，実験協力者の思考様式およびスケッチ表現において明確な差異を示した。Aタスクでは，助言内容が「利用目的」「使用状況」「ユーザー像」など，文脈的・意味的な水準での発想を促すものであったため，実験協力者は課題の解決そのものよりも「どのような新しい価値を生み出せるか」「どのような利用場面を想定できるか」といった方向に思考を展開する傾向を示した。この過程では，既存の製品や用途の枠を一時的に離れ，個人の経験や想像，感情といった内的資源を基盤とした自由で発散的な探索が行われていた。したがって，Aタスクの思考プロセスは，「課題の再定義→概念の再構築→新用途の探索」という上位レベルの意味形成的サイクルを特徴としている。

一方，Cタスクでは，「形を変えてみる」「部品を追加してみる」といった形態や構造の具体的操作に直結する助言が与えられたことにより，実験協力者の思考は手続き的かつ分析的な方向へと移行した。スケッチでは，構造や寸法，機能配置を検討する描写が中心であり，思考の流れは「構造分析→形態変換→機能整合」という実装志向のプロセスを示した。つまり，Aタスクが「概念生成モード」であるのに対し，Cタスクは「構造構築モード」として機能していたと考えられる。

スケッチ表現の比較からも両タスクの違いが明確に見られた。Aタスクでは描線が少なく，文字による注釈や矢印，使用者や場面の描写などが多く，アイデアの意味的關係を整理する「思考の外化ツール」としてスケッチが機能していた。これにより，Aタスクのスケッチは概念間のつながりを表す「セマンティックマップ」のような性質を示していた。対照的に，Cタスクでは線描密度が高く，透視図や断面図，分解図などの立体的表現が多く見られ，視覚情報そのものに設計

意図が含まれていた。スケッチは「視覚的推論」や「構造試行」のためのツールとして用いられ、造形的プロトタイプとしての性格を持っていた。すなわち、Aタスクが言語的・概念的の外化であるのに対し、Cタスクは形態的・視覚的外化であり、思考の表現構造が質的に異なっていた。

また、Aタスクでは抽象的な助言によって思考の自由度が高まる反面、発想の焦点が定まりにくく、特に低質群の実験協力者では情報を構造化できずに思考が拡散し、スケッチの抽象度が過度に高くなる傾向が見られた。対照的にCタスクでは、具体的な形態操作を主とする助言により思考の方向性が明確化し、課題理解やアイデア展開の速度が速く、安定した思考が促進された。しかし、自由度は限定されるため、発想は「既存枠内での最適化」に留まる場合が多かった。したがって、AタスクとCタスクの差異は「思考の自由度」と「構造化の度合い」のトレードオフ関係として説明できる。Aタスクは高自由・低構造、Cタスクは低自由・高構造であり、どちらが優れているかは実験協力者の認知スタイルや発想段階に依存するといえる。

両タスクを発想プロセス全体の中で位置づけると、Aタスクは発想初期において多様な概念生成や方向性の探索を支援し、Cタスクは発想後期においてアイデアの具体化や構造的実現を支える役割を果たす。つまり、Aタスクはアイデアの量的拡張を、Cタスクは質的深化を促すものであり、両者は創造的思考の異なる局面を補完的に支える関係にある。これらの結果から、AタスクとCタスクは発想の自由度と具体化の精度を交互に高めながら循環的に作用する「創造的反復プロセス (creative iteration)」を形成しており、この二段階を有機的に組み合わせることが、より高質なデザイン発想を導く鍵であると考えられる。要するに、Aタスクはアイデアの意味を広げる段階、Cタスクはそれを形にまとめる段階であり、両者は対立的ではなく、発想と構築が繰り返し結びつく創造的循環関係にある。

6.5.2. グループ間比較

分析対象とした22名を、各自の平均総合評価点に基づき、得点が40点以上の実験協力者をグループ α 、40点未満の実験協力者をグループ β として分類した。この分類により、実験協力者の発想能力・創造傾向と助言効果の相互関係を検討した。結果として、グループ α には実験協力者 A, B, F, H, K, L, N, P, V, W, Y が、グループ β には実験協力者 C, D, E, J, M, Q, R, S, T, U, X が含まれた。その結果、両群は助言の抽象度に対して異なる認知反応を示し、発想プロセスの質や方向性に顕著な差が現れることが明らかになった。

表 6-4 A タスク, C タスクおよび実験協力者群のまとめ

区分	条件／群	思考様式・プロセス	スケッチ表現の特徴	発想の傾向	効果・特徴的傾向
Aタスク (抽象的助言条件)	「利用目的」 「使用状況」 「ユーザー像」 など、意味的・文脈的助言	描線少・注釈多／意味的關係を整理するセマンティックマップ的スケッチ	自由度高いが焦点不明瞭／抽象的思考	高自由・低構造／初期発想拡張に有効	概念生成／自由・発散的思考／課題再定義→概念再構築→新用途探索
Cタスク (具体的助言条件)	「形を変える」 「部品追加」など形態操作的助言	線描密度高い／透視図・断面図など立体表現／視覚的推論・構造試行	方向性明確・安定／自由度低い	低自由・高構造／後期具体化に有効	構造構築／分析・収束的思考／構造分析→形態変換→機能整合
グループ α (高質群)	A, B, F, H, K, L, N, P, V, W, Y	概念的・文脈的アイデア展開	使用場面を想定したスケッチ多い	多様な案を提示	抽象助言で発散的思考が最大化
グループ β (低質群)	C, D, E, J, M, Q, R, S, T, U, X	構造的・手続き的思考	簡略線描・注釈少	発想数と多様性は低いが実現性高い	具体助言が思考の足場として有効

グループ α では、A タスクにおいて特に高い独創性および柔軟性が観察され、目的や利用状況の想定を主とする助言が概念探索を促進する作用を強くもつことが確認された。スケッチには使用状況・ユーザー像・時間軸など、文脈的情報に基づくアイデアが多く含まれており、課題の意味や価値を再構成しながら新たな方向性を模索する様子が視覚的に表現されていた。この群の実験協力者は、抽象度の高い助言を受けることで「自由探索的思考」が喚起され、概念の広がりや自発的に構築する傾向が強いと考えられる。一方で、具体的な形態操作を主とする助言が与えられる C タスクでは、構造や機能を検討する収束的思考が優位となり、発想の幅はやや抑制されるものの、構造的な精度や形態的整合性は比較的高い水準で維持されていた。

これに対し、グループ β では、C タスクにおける評価点が A タスクより明確に高く、具体的な形態操作を主とする助言が思考の方向付けとして効果的に機能していた。スケッチにおいても形態や構造が中心で、アイデアは限定的ながら一定の実用性と形の明確さがみられ、具体的な操作指示が思考の足場として作用していることが示唆された。A タスクでは課題の抽象性が認知負荷を増大させ、概念の広がりや十分に形成できず、発想が停滞する例が多かった。目的や利用状況の想定を主とする助言が思考の拡散を期待どおりに促進せず、むしろ発想を難しくしている可能性が高い。

両群の平均値を比較すると、グループ α では A タスクがより高い得点を示し、グループ β では C タスクが優位であった。この結果から、助言の抽象度と個人の認知スタイルとの間には明確な相互作用が存在することがわかる。すなわち、目的や利用状況の想定を主とする助言は概念的・文脈的思考を得意とする発想者

において創造性を最大化する一方で、具体的な形態操作を主とする助言は構造化志向の発想者にとって思考の整理と具体化を促す効果がある。この点は、創造的発想支援における助言設計において、個別最適化が不可欠であることを示す重要な知見である。

以上の知見を総合すると、AタスクとCタスクは発散と収束という創造的思考の異なる相を担っており、発想者の特性に応じてそれぞれ異なる効果をもつ。目的や利用状況の想定を主とする助言は発想の自由度を高めて概念生成を促し、具体的な形態操作を主とする助言は思考の方向性を明確にしながら形態的具体化を支える。この二つの助言は対立するものではなく、創造的推論の循環過程を形成する相補的な要素であるといえる。グループ別の平均値およびタスク特徴の概要については表 6-4 に整理した。

6.6. 考察

この研究では、デザイン発想の過程において、助言の内容や抽象度が発想者の思考にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的とした。AタスクとCタスクの2種類の条件を比較した結果、助言の性質によって発想の進め方やアイデアの表れ方が大きく異なることが確認された。

まず、Aタスクでは、助言が「使う人」「利用場面」「目的」などの想定を促すものであったため、実験協力者は「どんな新しい価値を生み出せるか」という視点で考える傾向が見られた。このような抽象的な助言は、思考を自由に広げるきっかけとなり、既存の枠にとらわれない独創的な発想を生み出す助けになっていた[10, 11]。Aタスクで描かれたスケッチは、線が少なく、注釈や説明が多いという特徴をもち、アイデアの意味的なつながりを考える「思考の外化ツール」として機能していた[12, 13]。つまり、Aタスクは新しい方向性を模索したり、発想の枠組みを作り直したりする「発散的な思考」(divergent thinking)を強く引き出す条件であったといえる。

一方、Cタスクでは、「形を変えてみる」「部品を追加してみる」など、具体的な操作を促す助言が与えられたことから、実験協力者の思考はより構造的・分析的な方向に進んだ。Cタスクのスケッチには、透視図や断面図など立体的な描写が多く見られ、アイデアを具体的な形に落とし込もうとする意図が明確に表れていた。発想の幅はAタスクに比べて狭まる傾向があるものの、実現性や完成度は高く、より具体的で整理されたアイデアが得られた[14, 15]。つまり、Cタスクは「形を作る」「構造を整える」段階を支える収束的思考 (convergent

thinking) を促す条件であり、具体的な形態操作を主とする助言が思考の方向性を定め、造形的検討を活性化させていたと考えられる。

また、実験協力者を総合評価点に基づいてグループ分けして分析した結果、助言の効果は個人の発想傾向によっても異なることが分かった。高質群（グループ α ）は A タスクで特に高い独創性を示し、自由に発想を広げながら自分の考えを構造化する能力を発揮していた。これに対し、低質群（グループ β ）は、抽象的な助言を受けた場合に思考が拡散し、方向性を見失ってしまう傾向があり、具体的な操作を促す助言を受けることで初めて明確な形を描けるようになっていた [16]。つまり、抽象度の高い助言は高い発想力をもつ者にとって創造性を高める効果をもつ一方で、具体的な形態操作を主とする助言は構造的思考を得意とする者や、思考のガイドラインを必要とする者に対して有効に働くことが示唆された [17]。

これらの結果から、A タスクと C タスクは互いに独立したものではなく、「発想」と「構築」という 2 つの思考フェーズが循環的に関係し合う創造的反復 (creative iteration) のプロセスを形成していることが分かる。A タスクで生まれた抽象的なアイデアが C タスクで具体化され、C タスクで得た形態的発見が再び新たな概念的発想を生み出すという往復的關係である [18]。つまり、両タスクの間には、創造性と実現性をつなぐ重要なフィードバックループが存在している。

教育や実践の観点から見ると、この知見はデザイン教育や創造的思考支援の方法を再考する上で重要な示唆を与える。発想初期の段階では A タスクのような目的や利用状況の想定を主とする助言を用いて自由なアイデア展開を促し、発想後期では C タスクのような具体的な形態操作を主とする助言によって形の精緻化を支援することで、思考の幅と深さの両方を高めることができる [19, 20]。さらに、学習者一人ひとりの発想スタイルに合わせて助言の抽象度を調整する「適応的助言 (adaptive feedback)」の導入が、今後のデザイン教育において有効であると考えられる。

総じて、この研究は、助言が発想者の思考様式と創造性にどのように作用するかを明らかにし、デザイン発想支援を「単なる指示」から「発想プロセスを導く知的支援」へと発展させる新しい視点を示したといえる。今後は、発想中の心理的状态や脳活動を同時計測し、助言がもたらす内的変化をより精密に捉えることで、創造的支援の仕組みをさらに深化させることが期待される。

参考・引用文献

- [1] Guilford, J. P. (1967). *The Nature of Human Intelligence*. New York: McGraw-Hill. (pp.21)
- [2] Lawson, B. (2006). *How Designers Think: The Design Process Demystified* (4th ed.) . Architectural Press. (p.15)
- [3] 佐藤雅彦 (2018) 「助言の抽象度が創造的発想に与える影響」『デザイン学研究』65(3), 112-120.
- [4] 中川健太・田村真理子・山本直樹 (2021) 「発想支援における助言の具体性と創造的成果の関係」『日本創造学会論文誌』25, 35-44.
- [5] Amabile, T. M. (1996). *Creativity in Context*. Boulder, CO: Westview Press. (p.43)
- [6] Porges, S. W. (2007). The polyvagal perspective. *Biological Psychology*, 74(2), 116-143.
- [7] Torrance, E. P. (1966). *Torrance Tests of Creative Thinking: Norms-Technical Manual*. Lexington, MA: Ginn and Company. (p.16)
- [8] Torrance, E. P. (1974). *Torrance Tests of Creative Thinking: Norms-Technical Manual (Revised Edition)*. Lexington, MA: Ginn and Company.
- [9] Kim, K. H. (2006). Can we trust creativity tests? A review of the Torrance Tests of Creative Thinking (TTCT). *Creativity Research Journal*, 18(1), 3-14. (p.7)
- [10] Guilford, J. P. (1967). The nature of human creativity. *The Journal of Creative Behavior*, 1(1), 3-15.
- [11] Runco, M. A., & Jaeger, G. J. (2012). The standard definition of creativity. *Creativity Research Journal*, 24(1), 92-96.
- [12] Tversky, B., & Suwa, M. (2009). Thinking with sketches. In *Tools for Innovation* (pp. 75-90). Oxford University Press.
- [13] Goldschmidt, G. (2014). *Linkography: Unfolding the Design Process*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [14] Goel, V., & Pirolli, P. (1992). The structure of design problem spaces. *Cognitive Science*, 16(3), 395-429.
- [15] Oxman, R. (2001). The mind in design: cognition and design knowledge. *Design Issues*, 17(1), 59-85.

- [16] Sarkar, P., & Chakrabarti, A. (2017). Assessing design creativity. *AI EDAM*, 31(1), 103-120.
- [17] Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285.
- [18] Schön, D. A. (1983). *The Reflective Practitioner*. New York: Basic Books.
- [19] Lawson, B. (2005). *How Designers Think: The Design Process Demystified*. Architectural Press.
- [20] Brown, T. (2009). *Change by Design: How Design Thinking Creates New Alternatives for Business and Society*. HarperCollins.

7 章

総括

7.1. まとめ

7.1.1. 各章のまとめ

本論文は、デザイン推論における発想者の脳前頭前野部の賦活および自律神経活性状態を、近赤外分光法（NIRS）と心拍 R-R 間隔（RRI）の解析によって多角的に計測し、デザイン課題の抽象度、課題提示の順序、さらに発想時に外部から与えられる助言内容という三つの要因が、思考プロセス・生理反応・創造的成果にどのような影響を与えるのかを包括的に解明することを目的とした研究である。従来のデザイン研究は観察やインタビュー、スケッチ分析といった質的手法が中心であり、発想者の内的心理状態や認知負荷の変化を客観的に捉えることが難しいという限界があった。本論文は、この研究上のギャップに取り組み、デザイン推論を脳科学・心理生理学・創造性研究の視座から再構築し、デザイン思考を支える神経生理学的基盤を明確化する点に大きな独自性を持つ。

(1) 第1章のまとめ

第1章では、本章では、デザイン推論の認知構造と生理反応の関係を明らかにする本研究の意義を、多面的な文脈から議論した。デザイン推論とは、利用価値や使用文脈を構想する抽象的思考と、形態・機能配置を検討しスケッチなどで具現化する具体的思考が往復する動的認知プロセスであり、創造的人間行為の中でも特に複雑な構造を持つ[1, 2]。しかし従来のデザイン研究は、観察・スケッチ分析・インタビューに基づく質的アプローチが中心であったため[3]、発想者の内面で生じる思考負荷、注意資源の変動、心理的緊張、思考モードの切替といった現象を客観的に把握することが困難であった。近年、デザイン教育では具体的な形態操作を主とする助言、目的や利用状況の想定を主とする助言、文脈的説明など多様な指導法が導入されているが、その効果は経験或いは指導者の直観に依存しており[4]、科学的根拠に基づく体系化が進んでいない。さらに、人間の創造的認知を扱う神経科学研究は急速に発展しているものの、実際のデザイン行為に適用された例は限られており、特に「デザイン課題の抽象度」「課題提示の順序」「外部助言の内容」といった教育実践に不可欠な要素が、脳前頭前野活動および自律神経反応にどのように表れるのかは、ほとんど未解明である。

こうした課題意識を踏まえ、本研究では非侵襲的生理計測である近赤外分光法（NIRS）と心拍 R-R 間隔（RRI）を用い、デザイン推論中の前頭前野活動および自律神経状態を精緻に捉えることを目指した。また、スケッチ・アイデア評価・後インタビューなどのデザイン研究手法を組み合わせ、脳活動・身体反応・

行動・思考内容を同時に扱う総合的研究枠組みを構築した。本章では、本論文全体の目的として、①抽象・具体の二種類の推論段階が生理指標にどのような差異として現れるか、②課題提示順序が思考展開と生理負荷をどのように変化させるか、③助言内容（抽象的・具体的）が脳活動・自律神経反応・アイデアの質にどのように影響するか、の三点を明確にした。これにより、本研究がデザイン学・認知科学・心理生理学の三領域を架橋する学際研究であることが示され、以降の章の実験設計および理論的議論の基盤が整えられた。

（２） 第２章のまとめ

第２章では、本研究の基盤となる三つの学術領域——脳前頭前野研究、自律神経研究、助言研究——を体系的に整理し、各領域で蓄積されてきた知見をクロスレビューすることで、本研究の立ち位置と必要性を明確化した。まず、脳前頭前野に関する神経科学研究では、背外側前頭前野（DLPFC）が収束的判断やワーキングメモリ、課題管理に関与する一方、内側前頭前野（MPFC）は自己参照、価値判断、自由連想などに関与することが示されている。これらは「具体思考」と「抽象思考」の神経基盤として有力であるが、デザイン推論そのものを扱った研究は極めて少ない。特に、スケッチという外化行為を伴う実際のデザイン課題中の脳活動を計測した研究は限定的であり、抽象／具体の往還がどのような脳活動パターンとして現れるかを検討した研究はほぼ存在しない。

次に自律神経研究では、RRI（心拍 R-R 間隔）が心理的負荷、緊張、覚醒度を敏感に反映する指標として注目され、HF の上昇が副交感神経活性、LF/HF の上昇が交感神経活性を示す。しかし、創造的課題や思考モードの違いと自律神経活動の関係は未解明部分が多く、デザイン推論への応用はほとんど進んでいない。

第三に助言研究の領域では、目的や利用状況の想定を主とする助言が発散的思考や意味構築を促し、具体的な形態操作を主とする助言が収束的判断や具体化を促すとされるが、その効果は行動観察やインタビューを通じた質的研究が中心で、脳活動・自律神経反応との関連を扱った研究は存在しない。本章の総括として、従来研究は「脳」「自律神経」「助言」「創造性評価」をそれぞれ独立に扱ってきたが、それらを統合して扱う枠組みは欠けており、本研究がそのギャップを埋める先駆的研究であることが示された。

(3) 第3章のまとめ

第3章では、デザイン推論を構成する「抽象的構想段階 (A タスク)」と「具体的形態段階 (C タスク)」の二種の認知モードが、生理反応としてどのように異なるのかを明らかにするため、A→C 条件と C→A 条件を比較する実験を実施した。NIRS による酸化ヘモグロビン計測と RRI の同時計測により、思考段階ごとの脳前頭前野活動および自律神経の変動を高時間解像度で捉えた。結果として、抽象段階では MPFC の活動上昇が顕著であり、副交感神経活性 (HF) の増加が観察された。これはユーザー像の想定、価値構築、利用場面の想像といった自由連想型・意味生成型の認知プロセスが優位であることを示している。一方で具体段階では DLPFC の活動が増大し、形態検討や構造判断に伴う収束的思考の増加により、交感神経優位状態 (LF/HF 上昇) が確認された。

さらに、本章では課題順序の影響にも焦点を当てた。A→C の順序では、抽象的枠組みの形成により思考の方向性が安定し、具体段階への移行が比較的負荷少なく進行することが示された。これに対し C→A の順序では、具体形態に意識が固定されやすく、抽象段階での MPFC 活性が抑制され、発散的思考に移行しにくい傾向がみられた。以上の知見は、デザイン推論が一見連続的に見えるプロセスでありながら、実際には異なる神経生理的状态を行き来し、それが思考の流れやアイデア生成の質に影響を与えることを明確に示している。本章は、デザイン推論の本質を「抽象思考と具体思考の生理的往還」として捉え直す重要な基礎となった。

(4) 第4章のまとめ

第4章では、第3章で明らかになった抽象/具体の生理指標の差異を「脳内ネットワーク」の視点から再解釈し、デザイン推論を DMN (デフォルトモードネットワーク)、FPN (フロント・パリエタル・ネットワーク)、SN (サリエンスネットワーク) の三つの主要ネットワークが協働するプロセスとして捉える枠組みを提案した。DMN は自己参照、内省、概念構築を担い、MPFC を中心とする領域群から構成され、抽象的構想段階と深く対応する。FPN は課題遂行、判断、計画、ワーキングメモリを担い、DLPFC を中心とする領域から構成され、具体的形態検討と対応する。SN は外界刺激や内的変化の中から重要情報を選択し、DMN と FPN の切り替えを調整する役割を持つ。

本章の議論では、デザイン推論は DMN が新たな価値や意味を生成し、FPN がそれを具体的形態として制御し、SN が両者を切り替えることで成立する複合

ネットワーク活動であることが示唆された。特に、抽象→具体への遷移時に SN の重要性が高まることが推測され、創造的発想の「モード切替」は単一部位ではなくネットワーク間の協働に基づく複雑な神経過程であることが理解された。このようなネットワーク的視座は、従来の「前頭前野のどの部位が活動するか」という部位中心の議論を越え、デザイン推論の包括的理解に貢献している。

(5) 第5章のまとめ

第5章では、デザイン発想時に外部から与えられる助言内容が、発想者の脳前頭前野活動と自律神経反応にどのような影響をもたらすかを明らかにするため、目的や利用状況の想定を主とする助言と具体的な形態操作を主とする助言を比較する実験を実施した。目的や利用状況の想定を主とする助言を与えられた条件では、MPFC の活動増加と HF の上昇が観察され、意味構築・自由連想の促進および心理的安定化を示す生理状態が形成された。一方、具体的な形態操作を主とする助言条件では、DLPFC の活動が強く、LF/HF 上昇による交感神経優位が確認され、形態検討、判断、作業負荷の増大を示す生理反応が見られた。

本章の重要な知見は、助言が単なる知識の提供ではなく、発想者の思考モードを「生理的に」切り替える介入として作用する点である。助言直後に生じる RRI の瞬時変化は、助言が心理生理的トリガーとして働き、注意の方向性、思考の始点、認知資源の配分を即座に変えることを示している。また、助言の抽象度が脳活動の局在だけでなく、ネットワークレベルの活動バランスに影響を与える可能性も示唆された。本章は、デザイン教育における助言がどのように機能し得るかに対して神経科学的根拠を与えた点で、教育的・実践的価値の高い成果となった。

(6) 第6章のまとめ

第6章では、助言内容が発想者の生成するアイデアの質にどのように影響するかを検証し、第5章の生理指標の結果と統合的に考察した。TTCT に基づく評価の結果、目的や利用状況の想定を主とする助言は独創性、柔軟性、流暢性を向上させ、発散的思考を促進する効果を持つことが確認された[5]。一方、具体的な形態操作を主とする助言は具体性、妥当性、実現可能性を高め、収束的判断や形態の精緻化を促すことが明らかになった。また、創造性レベルの高低による相互作用も重要であり、創造性の高い参加者は目的や利用状況の想定を主とする助言のもとでより自由な発想展開を行い、独創的アイデアを多く生成した。一方、創

造性の低い参加者は具体的な形態操作を主とする助言によって思考の方向性が明確になり、課題処理を円滑に進められる傾向が見られた。

さらに、第5章で示された生理指標との統合分析により、「副交感優位 → 発散思考 → 独創的アイデア」「交感優位 → 収束思考 → 妥当性の高いアイデア」という対応関係が明確となった。これは創造性の質的側面を生理学的に説明し得る新たな理論的知見であり、デザイン推論における「良い助言」の条件を科学的に説明する枠組みを提供している。本章は「助言 × 生理状態 × アイデアの質」を統合的に扱った点で、創造性研究にも重要な貢献を果たしている。

7.1.2. 本研究で得られた知見のまとめ

(1) 第3章より得られた知見のまとめ

① 抽象的発想 (A) と具体的発想 (C) では前頭前野の賦活パターンが異なる

第3章では、目的・原理・利用文脈などを構想する抽象的発想 (A タスク) と、形状・構造・機能などを検討する具体的発想 (C タスク) を、同一の実験協力者に遂行させ、その際の脳前頭前野活動と自律神経活動を比較した。その結果、とくに A タスクの方が C タスクよりも、DLPFC・MPFC・OFC のいずれの領域においても賦活が高くなる傾向が示された。これは、抽象的発想が複数の可能性の統合、価値や意味の再構成、遠隔記憶の検索など、より高度で広範な認知処理を必要とすることを反映していると考えられる。一方、C タスクは形態や構造の検討という明確な制約のもとで進行するため、前頭前野全体としては A タスクほど強い賦活を必要としないことが示唆された。

② タスク順序とテーマの関連性が賦活に大きく影響する

A タスク先行実験では、「A→C」という順序で課題を行った場合に、抽象的発想である A タスクの賦活が C タスクよりも明瞭に高くなることが確認された。一方、C タスク先行実験では、「C→A」の順序で課題を行ったとき、A タスクが C タスクよりも強く賦活するという明確な差は必ずしも認められなかった。さらに、二つの具体タスク (C2・C3) を連続して行わせた条件では、「先に行った C タスクの方が後の C タスクよりも MPFC や OFC の賦活が大きい」ことが示され、具体タスクにおいては「最初の課題に取り組むときにより強い認知的・感情的負荷が生じる」傾向が確認された。

加えて、テーマに関連性がある「C3 (電気スタンドの具体案) → A (暗い環境で本を読むための方法)」の組み合わせでは、先に行ったタスクの思考内容が後のタスクで再利用されることで、後続のタスクにおける賦活が抑えられる可能性

が示唆された。すなわち、タスク間の順序だけでなく、テーマの関連性が、前頭前野賦活の大きさに系統的な影響を及ぼすことが明らかになった。

③ アイデア数によるグループ差 (α 群・ β 群) と脳活動の関係

本研究では、抽象タスク (A) で「3種類以上の異なるアイデア」を生成できた協力者を α 群、3種類未満であった協力者を β 群として群分けし、両者の生理指標を比較した。その結果、 α 群では抽象タスク時の前頭前野賦活が高いこと、また具体タスクを複数回行う場合に「最初のタスクでの賦活が後のタスクよりも顕著に大きい」ことが確認され、抽象度の高い発想や新奇な課題に取り組む際に、意欲・遠隔記憶の検索・抑制解除といった機能を通じて MPFC や OFC が強く働く可能性が示された。

一方、 β 群では、前後のタスク間で賦活の差が小さく、タスク順序による影響も相対的に弱いという特徴が見られた。さらに、Cタスク先行実験におけるAタスクのDLPFC賦活では、むしろ β 群の方が α 群より高い賦活を示すという逆転現象も観察された。これは、抽象的発想を苦手とする協力者ほど、抽象タスクの遂行に際してより大きな認知的努力を必要とし、その負荷が前頭前野の賦活として現れている可能性を示すものである。すなわち、脳前頭前野の賦活量は、必ずしも「アイデアの多さ」と一次的には対応せず、「その人にとってどれだけ困難な課題か (努力量)」とも関係することが示唆された。

④ 自律神経反応とアイデア発想との関係

RRIを用いた自律神経解析の結果からは、交感神経活動 (LF/HF) および副交感神経活動 (HF) が、抽象・具体タスクや順序条件によって微妙に異なる変化を示すことが明らかになった。とくにAタスク先行実験では、多様なアイデアを生成した α 群において、抽象タスク (A) で交感神経指標 LF/HF がCタスクより高くなる傾向が見られ、抽象的発想が「精神的な覚醒状態や努力投入の高さ」を伴うことが示唆された。一方で、Cタスク先行実験の β 群では、後のタスク (Aや後半のC) で副交感神経活動 (HF) が高まる傾向が見られ、抽象タスクや後半の具体タスクにおいて「休息に近い状態」で課題に取り組んでいた可能性が示された。

これらの結果は、自律神経系の状態が、発想されるアイデアの量や思考スタイルと密接に関わることを示しており、交感神経優位の覚醒状態が発想の立ち上がりや探索に寄与する一方で、必ずしもすべての参加者に同じ効果をもたらすわけではないことも明らかになった。

(2) 第4章より得られた知見のまとめ

① デザイン活動は「意識」と「無意識」と脳内ネットワークの協調プロセスであることの明確化

第4章ではまず、デザインを「問題解決／価値創造を目的とした行為」であると同時に、「意識的プロセス」と「無意識的プロセス」が重なり合う認知活動として位置づけている。デザイナーはユーザーや文脈を意識的に分析しつつ、過去の経験や暗黙知、文化的背景など無意識下に蓄積された情報を動員しながら発想を行う。

この「意識／無意識の相互作用」によって、ひらめき・直感・連想・再構成といった創造的思考が成立すること、さらにデザイン過程自体がデザイナーの自己認識や視点の変容（共感の拡張、バイアスの修正）をもたらすプロセスであることが示されている。ここで扱われる「意識」の問題が、単なる哲学的テーマではなく、デザイン認知を理解する上で中核的な論点であることが確認された。

② DMN・FPN・SN という三つの大規模脳内ネットワークの導入と役割の整理

デザイン活動を脳レベルで理解するための枠組みとして、デフォルトモード・ネットワーク（DMN）、前頭頭頂ネットワーク（FPN）、サリエンス・ネットワーク（SN）の三つが導入され、それぞれの機能とデザイン活動との関わりが整理された。

DMN は自己内省・記憶想起・未来のシミュレーション・他者理解など、内的で自発的な思考に関与し、発散的・概念的なアイデア発想の基盤となる。FPN は注意制御・ワーキングメモリ・意思決定といった目標指向的な認知制御を担い、具体的な形態検討や問題解決、タスク遂行に対応する。SN は、内外の刺激の中から「重要なもの」を選び取り、DMN と FPN のどちらを優先して働かせるかを切り替えるハブとして機能する。

この枠組みにより、デザイン推論は「単一の前頭前野領域の働き」ではなく、「複数ネットワークの動的協働」として捉えられることが明確になった。

③ DMN・FPN・SN と前頭前野諸領域（MPFC, DLPFC など）の対応づけ

第4章では、ネットワークレベルの議論を、より具体的な脳領域レベルへとブリッジしている。DMN の中核としての内側前頭前野（MPFC）、FPN の中核としての背外側前頭前野（DLPFC）、そして SN を構成する前帯状皮質（ACC）や前部島皮質（AI）といった領域が、それぞれどのような心理機能——自己関連的思考、

価値判断、意欲、抑制制御、注意切り替え、社会的認知など——に関わるかが整理されている。

さらに、

MPFC と DMN：自己認識・他者理解・未来予測などを支える

DLPFC と FPN：ワーキングメモリ、課題制御、分析的思考を統括する

MPFC と SN：自己関連的な「重要度」の評価や感情価値づけに関与する

といった関係が示され、「特定部位」と「ネットワーク」が二重構造としてデザイン推論を支えていることが確認された。これにより、第3章で扱った DLPFC / MPFC / OFC の賦活結果を、ネットワークの観点から再解釈するための基盤が整えられている。

④ 意識生成理論と脳内ネットワークを接続する枠組み

グローバル・ワークスペース理論、ダイナミック・コア仮説、複雑系としての意識モデルといった主要な「意識理論」を踏まえつつ、意識が単一領域に局在するものではなく、広範なネットワーク間の情報統合や動的な結合パターンによって生成される現象であることが示されている。

この文脈で、DMN・FPN・SN は「自己関連的意識」「課題指向的意識」「顕著性に基づくモード切り替え」という、意識の異なる側面を担うネットワークとして位置づけられる。第4章では、意識研究の理論と脳内ネットワーク研究を踏まえ、デザイン推論における意識状態の変化——発散と収束、内面への沈潜と外界への集中——が、これらネットワークの協調と切り替えとして理解できる可能性が示されている。

⑤ デザイン推論／デザイン思考プロセスへの応用的含意

最後に、第4章はこれらの神経科学的知見をデザイン実践やデザイン教育への示唆へと結びつけている。

DMN・FPN・SN の役割を踏まえると、

「共感 → 定義 → 発想 → プロトタイピング → テスト」というデザイン思考のプロセスは、DMN による内省・共感的理解と、FPN による分析・検証を往還させる枠組みとして再解釈できること、

SN はユーザーからのフィードバックや環境の変化を「重要な刺激」として検出し、発散状態から収束状態、あるいはその逆への切り替えを媒介すること、

5 Whys やユーザー視点での再評価、フィードバックループの導入などの方法論は、実質的に SN・DMN・FPN 間の切り替えと協働を促す技法として理解できることが指摘されている。

さらに、ユーザー中心設計や UX デザインにおいては、「ユーザーの注意がどこに向かうか」「どの要素がサリエントになるか」を意識することが、情報配置・インタラクション設計・ナビゲーション設計の上で重要であることが述べられる。これは、SN および FPN の働きを前提に、ユーザーの認知負荷や迷いを軽減しつつ、DMN 的な没入や意味づけも促すようなデザインが可能であることを示唆している。

(3) 第 5 章より得られた知見のまとめ

① 助言の有無・課題順序と脳賦活の関係

無助言タスク（最初の課題）は、DLPFC・MPFC・OFC のいずれの領域でも、その後に行う A タスク（目的や利用状況の想定を主とする助言）・C タスク（具体的な形態操作を主とする助言）よりも有意に大きな脳賦活を示した。

この結果は、一見すると「助言がない方が前頭前野が強く働く」とも解釈できるが、第 3 章の先行研究とあわせてみると、「最初の課題で賦活が高く、その後の類似課題では賦活が低くなる」という順序効果が強く影響している可能性が高い。グループ α （多産出者）・グループ β （少産出者）のどちらにおいても、無助言タスクが最も高い賦活を示しており、「順序効果+助言付与の影響」が重なっている可能性が示唆された。結論として、「助言の有無そのもの」よりも、「それが最初の課題か、後続の課題か」という位置づけが、前頭前野賦活に大きく影響することが確認された。

② 助言内容の違い（抽象 vs 具体）と脳賦活

A タスク（目的や利用状況の想定を主とする助言）と C タスク（具体的な形態操作を主とする助言）を、最初のスケッチ描画時で比較した場合、全協力者、グループ α 、グループ β のいずれにおいても、DLPFC・MPFC・OFC の賦活に有意な差は見られなかった。

これは両タスクとも「無助言タスクの後に提示される類似課題」であり、全体として賦活水準が下がっているため、助言内容の差が顕在化しにくかったと考えられる。この段階では、「助言の抽象度の違いが、最初の一枚目のスケッチの脳賦活に即座に反映されるわけではない」ことが示された。

③ 連続スケッチ過程における助言効果（特にCタスク）

助言付きタスク内部での「発想の進行」に着目し、多産出者グループ α のみを対象として、AタスクとCタスクについて「1枚目/2枚目/3枚目」のスケッチ描画時の賦活を比較した。

その結果として、Aタスクでは、描画回数による賦活の有意な変化は見られなかった。Cタスクでは、1枚目よりも3枚目の描画時に MPFC と OFC 賦活が有意に大きくなるという変化が見られた。

さらに、Cタスクではアイデア数がAタスクよりも有意に多く、多産出者において「具体的な形態操作を主とする助言が発散的思考を促進している」ことが行動レベルでも示されている。

ここから導かれる含意、助言内容の違いは、「最初の一回の発想」ではなく、「発想・スケッチを繰り返す過程の中で、徐々に脳活動に違いをもたらす」という時間的に立ち上がる効果を持つ可能性が高い。

特に具体的な形態操作を主とする助言は、発想の進行に伴って MPFC・OFC をより強く賦活させ、行動としても「アイデア数の増加」という形で反映されることが示唆された。

④ 自律神経系（RRI 指標）から見た助言効果

自律神経系の指標（RRI：HF・LF/HF）をもとに助言効果を検討した結果、全22名を対象とした場合には、無助言タスク・Aタスク（目的や利用状況の想定を主とする助言）・Cタスク（具体的な形態操作を主とする助言）のいずれの組み合わせにおいても、副交感神経活動（HF）および交感神経活動（LF/HF）に明確な有意差は認められず、自律神経反応は助言の有無や助言内容に対して比較的安定したまま維持されていた。しかし、多産出者であるグループ α に対象を絞ると、生理状態に特徴的な「助言依存の切り替え」が観察された。無助言タスクとAタスクの比較では、Aタスクにおいて副交感神経活動が相対的に高くなる有意傾向が示され、目的や利用状況の想定を主とする助言を受けた際には、協力者がより落ち着いたリラックス状態で課題に取り組んでいた可能性が高い。

一方、AタスクとCタスクの比較では、Cタスクで交感神経活動が有意に高まっており、具体的な形態操作を主とする助言によって発想行動がより活発化し、覚醒度の高い「操作・試行モード」に切り替わっていたことが示唆された。

対照的に、少産出者グループ β では、助言の有無・助言内容による自律神経活動の安定した違いは確認されず、自律神経系の反応は助言条件に対して頑健なままであった。総合すると、多産出者では「目的や利用状況の想定を主とする助言 → 副交感神経優位（落ち着いた探究モード）」、そして「具体的な形態操作を主

とする助言 → 交感神経優位（活発な試行・操作モード）」という生理状態の切り替えが生じており、助言の種類が自律神経的覚醒レベルを通じて発想スタイルを調整している可能性を示す重要な知見が得られたといえる。

⑤ 多産出者（グループ α ）と少産出者（グループ β ）の違い

多産出者（グループ α ）と少産出者（グループ β ）の比較から得られた知見を総合すると、助言が発想過程へ及ぼす影響は一樣ではなく、個人の発想特性によって大きく異なることが明確に示された。多産出者グループ α では、助言付きタスクにおいてスケッチを重ねるほど、特に具体的な形態操作を主とする助言（Cタスク）において MPFC・OFC の賦活が増大し、発想が進むにつれて脳活動が段階的に活性化する特徴が見られた。また自律神経指標の分析からも、目的や利用状況の想定を主とする助言では副交感神経優位の落ち着いた状態、具体的な形態操作を主とする助言では交感神経優位の覚醒状態へと切り替わるという、助言内容に応じた生理的モードの変更が生じていることが確認された。これは、多産出者が助言の性質を「生理的に利用しながら」発想を加速させている可能性を示唆し、助言が発散的思考に対する触媒として機能していることを意味する。

一方、少産出者グループ β では、助言の有無や助言内容の違いが脳賦活パターンに明確な変化をもたらすことはなく、自律神経指標においても安定した差異は認められなかった。むしろ、助言が付与されること自体が認知的負荷として作用し、その結果として脳賦活の低下や思考停滞につながっている可能性も示唆される。つまり、少産出者にとって助言は思考を支援するよりもむしろ干渉として働き、発想過程のリズムを乱す一因となっている可能性がある。

以上のことから、助言の効果は個人の発想特性に強く依存するという重要な結論が導かれる。教育・デザイン指導・創造支援の実践においては、全員に均一な助言を与えるのではなく、個々の発想傾向に合わせて助言の量・タイミング・抽象度を調整する「個別化された助言デザイン」が不可欠である。多産出者には、具体的な形態操作を主とする助言を適切に活用することで発散的思考をさらに強化できる一方、少産出者には助言がむしろ負荷となる可能性があるため、過剰な具体性を避けつつ、認知的負担を最小限に抑えた抽象度の高い柔軟な助言が適切となる。こうした個別最適化された助言設計こそが、創造的思考支援の精度を高める鍵である。

(3) 第6章より得られた知見のまとめ

① 助言内容は発想モードを根本的に切り替える「認知スイッチ」として機能する

本研究の分析から、目的や利用状況の想定を主とする助言（Aタスク）と具体的な形態操作を主とする助言（Cタスク）が発想者の思考モードに明確かつ根本的な違いをもたらす「認知スイッチ」として作用していることが示された。目的や利用状況の想定を主とする助言は、「利用目的」「使用状況」「ユーザー像」といった文脈的・意味的要素への注意を促し、発想者を“価値や意味の再構成”を中心とする概念的・発散的思考へと導いた。Aタスクのスケッチは描線が少なく、説明文や注釈が多く、スケッチが「意味的整理」のための外化ツールとして使われていた点が特徴的であった。その結果、新しい利用価値の提案や文脈の拡張が多く生まれ、独創性・柔軟性のスコアが高くなる傾向が確認された。

一方、具体的な形態操作を主とする助言（Cタスク）は、「曲げる」「回す」「くっつける」などの形態操作や構造検討に直結する指示を与えるものであり、思考は形態変換・構造試案を中心とする収束的・実装的モードへと切り替わった。Cタスクのスケッチは線密度が高く、断面図、透視図、部分メカニズムなど具体的な造形表現が顕著で、構造的整合性や実現可能性が高いアイデアが生成されていた。これらの特徴は、具体的な形態操作を主とする助言が発想者の注意焦点を「形状」「構造」「仕組み」へと集中させ、思考を実装志向へ強く誘導した結果である。

以上より、助言内容の抽象度は、単に思考の方向性を少し調整する程度の情報ではなく、発想者の認知モードそのものを転換させる強力な外的入力として機能することが明らかになった。すなわち、目的や利用状況の想定を主とする助言は発散的・概念的思考を、具体的な形態操作を主とする助言は収束的・構造的思考を喚起し、助言の種類が発想の性質と成果を根本から変える「スイッチ」として作用していると結論づけられる。

② 抽象助言は「新規性」を、具体助言は「完成度」を選択的に高める

TTCT 指標に基づくアイデアの質的評価から、目的や利用状況の想定を主とする助言（Aタスク）と具体的な形態操作を主とする助言（Cタスク）がそれぞれ異なる側面の創造性を選択的に強化することが確認された。まず、Aタスクでは独創性（Originality）の得点が有意に高く、実験協力者は用途の再定義、文脈の再構築、利用者像の拡張など、既存の枠組みを超える大胆な発想を展開していた。スケッチ自体は簡略であっても、新しい価値の提案や独自の利用シナリオの

提示が多く、抽象度の高い助言によって「概念の飛躍」や「意味の再創造」が促進されたと解釈できる。すなわち、抽象助言は思考を広範に拡散させ、意味的創造 (semantic creativity) を強く引き出す役割を担っていた。

これに対して C タスクでは、精緻性 (Elaboration) や機能的有用性に関する評価が特に高かった。スケッチには構造的整合性や仕組みの説明が明確に示され、立体構造、可動部、メカニズムなど具体的な造形検討が多く含まれていた。これらの特徴は、具体的な形態操作を主とする助言によって思考が収束し、形態の検証や機能性の向上に向けて思考が深まった結果である。つまり具体助言は「実現可能性の高い形態的創造 (form-based creativity)」を強化し、完成度の高いアイデアを生成する方向へ発想者を導いていた。

抽象助言は新規性の向上を、具体助言は完成度の向上をそれぞれ促すという、明確な役割分担が存在していることが実証された。これは、助言内容が単に発想量を左右するのではなく、創造性の「質的側面」を精密に方向付ける効果を持つことを示す重要な知見であり、デザイン教育や創造的問題解決において助言の抽象度をどう使い分けるべきかに関する理論的根拠を与えるものとなっている。

③ 発想能力の高低によって助言の効果は大きく変化する

実験協力者を総合評価点に基づいてグループ α (高質群) とグループ β (低質群) に分類して比較した結果、助言が発想に及ぼす効果は一様ではなく、個人の発想能力・思考スタイルとの適合性によって大きく変化する事が明確に示された。まず、グループ α (高創造性群) では、抽象助言 (A タスク) が特に顕著な効果を持ち、文脈の広がり、新たな概念の生成、独自の用途提案など、創造性のコアとなる発散的発想が強く活性化していた。さらに C タスク (具体助言) では収束的思考が強まり、形態の精度や構造の整合性が高まり、高レベルの創造的循環 (A で発散 \rightarrow C で収束) が円滑に機能していた。この群の被験者は、抽象と具体の両局面で助言を柔軟に活用し、発想プロセス全体を自律的に前進させる能力を備えていたと解釈できる。

一方で、グループ β (低創造性群) では、抽象助言 (A タスク) が逆効果となる傾向が確認された。抽象度の高い指示は思考の焦点をぼかし、認知負荷を増大させ、発想が散漫化して停滞するケースが多かった。これに対し、具体助言 (C タスク) は明確な方向付けを与える役割を果たし、形態や構造の検討を中心とした安定したアイデア生成が可能になった。この群においては、具体助言によって初めて発想が効果的に展開し、スケッチ内容にも一定のまとまりが見られた。この違いは、思考の初期段階で「どこから考え始めればよいか」が明確でない者にとって、具体的な指針が認知的足場として機能することを示唆している。

以上の結果から、助言の効果は発想者の能力や認知スタイルと密接に関連しており、高創造性者には抽象助言が飛躍を与え、低創造性者には具体助言が安定した思考の基盤を与えるという明確な適合関係が存在することが確認された。これは、助言設計の実践において「誰に・どのタイミングで・どの抽象度の助言を与えるか」を精密に検討する必要があることを示す重要な知見であり、デザイン教育や創造的思考支援における個別最適化 (adaptive feedback design) の必然性を強く示している。

④ 抽象助言と具体助言は対立ではなく「創造的反復」を構成する相補的プロセスである

第6章で得られた最も重要な理論的示唆は、Aタスク（抽象助言）とCタスク（具体助言）が創造的プロセスにおいて対立的に機能するのではなく、発散と収束という異なる段階を担いながら相補的に循環する「創造的反復 (creative iteration)」を形成しているという点である。抽象助言は、課題の意味や価値を再構成し、新しい方向性を探索する「発散」段階を強く促進する。利用場面の拡張、ユーザー像の再設計、用途の再定義といった概念的飛躍が生まれ、アイデアの意味的可能性が大きく広がる。一方、具体助言は、構造や機能の検討、形態の確定、実装可能性の追求といった「収束」段階を支え、アイデアを現実的な形にまとめあげる方向へ思考を導く。

重要なのは、これらが直線的な発想手順ではなく、往復的で相互に影響し合うダイナミックなサイクルを形成しているという点である。すなわち、Aタスクによって生まれた抽象的・概念的な発想が、Cタスクで形態化されることで具体的な構造や機能の発見につながり、その発見が再び新しい概念や用途の生成へとフィードバックしていく。「概念生成 → 形態構築 → 新たな概念生成」という循環構造こそが、創造的発想の本質的メカニズムであり、抽象助言と具体助言はその両輪として機能していると言える。

したがって、AタスクとCタスクは決して競合するものではなく、創造活動の異なる相を補完しながら、発想を深め、広げ、具体化するための相互依存的・発展的プロセスを構成している。この視点は、創造性支援やデザイン教育において「抽象か具体か」を二者択一で選ぶのではなく、発想段階に応じて両者を戦略的に組み合わせることの重要性を明確に示している。

⑤ 教育的含意：学習者の特性に応じた「適応的助言」が不可欠である

本研究の知見は、デザイン教育および創造性教育に対して、助言を“固定的な指示”として扱う従来の枠組みを超え、発想段階と学習者の特性に応じて柔軟に

調整される「適応的助言」の必要性を強く示している。まず、発想初期には自由度の高い探索が求められるため、利用場面や目的の再構成を促す目的や利用状況の想定を主とする助言によって思考の広がり確保し、固定観念をほぐすことが有効である。一方、発想後期ではアイデアの具体化や形態決定が中心となるため、構造操作や形態的工夫を促す具体助言が思考の収束に寄与し、実現可能性の高いアイデアへ到達しやすくなる。

さらに本研究で明らかになったように、助言の効果は学習者の発想傾向によって大きく異なるため、学習者の認知スタイル・創造性プロフィールに合わせて助言の抽象度を最適化する必要がある。

高創造性群（グループ α ）の学習者には抽象助言が強力な発散効果を持ち、概念の広がりや新規性を高める一方、具体助言は形態的精度を向上させる役割を担う。これに対し、低創造性群（グループ β ）の学習者にとって抽象助言は負荷が高く、思考の拡散や停滞を引き起こしやすいが、具体助言は思考の方向付けとして有効に働く。つまり、「誰にどの助言を与えるか」によって学習者の思考反応は大きく変化する。

このように、助言は単なる指示やヒントではなく、学習者の思考モードそのものをデザインする「知的支援」として理解する必要がある。発想の広がりや構造化、抽象と具体、発散と収束といった創造的プロセスの特性を踏まえ、助言の質・抽象度・タイミングを調整することが、学習者の創造性を最大限に引き出す鍵となる。以上より、デザイン教育においては、一律的な助言ではなく、個別化された適応的助言戦略の構築が極めて重要であると言える。

7.2. 本研究の今後の課題と展望

本論文は、デザイン推論における抽象的構想段階と具体的形態段階の生理的差異、脳内ネットワークに基づく思考モードの切替機構、外的助言による思考変容の生理的実体、そして助言内容がアイデアの質に与える影響を、四つの独立研究を通して多角的に明らかにしてきた。これらの知見は、従来のデザイン研究が扱ってきた「発想過程の観察」「スケッチ分析」「行動データ」に限定された枠組みを超え、デザイン推論を神経生理学的基盤から解明するという新たな研究領域を切り開くものである。しかしながら、本論文で得られた知見は、研究デザイン・計測手法・サンプル構成など、いくつかの点で限界を有しており、今後の研究において克服すべき課題が存在する。

第一の課題は、本研究が「同一参加者が複数タスクを連続して遂行する形式」を採用したことによる順序効果である。抽象→具体の遷移と具体→抽象の遷移を比較する実験デザインは、学習効果を排除するためにテーマを変更したものの、

最初に実施したタスクに対する意欲、注意喚起、認知的立ち上がり、後続のタスクの脳賦活および自律神経活動を抑制する方向に働く傾向が認められた。この順序効果は、デザイン推論に固有の現象である可能性もあるが、実験条件に由来するアーティファクトである可能性も残されている。今後は、同一テーマでタスク順序のみを操作するクロスオーバー設計や、タスク間間隔を十分に確保した計測プロトコルを導入し、順序効果を統制したうえで思考モード遷移の純粋な生理指標を検証する必要がある。

第二の課題は、NIRS と RRI という計測手法の制約である。NIRS は前頭前野表層の変化のみを捉え、DMN の中核 (PCC や後帯状皮質)、FPN の中枢 (頭頂葉)、SN の主要部位 (島皮質) など、深部領域や大規模ネットワークの全体動態を直接評価することができない。RRI についても、短時間 HRV の統計的安定性、呼吸影響の除去、個人差の補正といった課題が残る。デザイン推論の本質をネットワークレベルで精密に把握するためには、fMRI による大規模ネットワークの因果解析、EEG-NIRS 同時計測による時間・空間精度の補完、あるいは瞳孔径や眼球運動など覚醒レベル指標との統合的解析が不可欠となる。

第三の課題は、発想者の個人差に基づく分析が十分に深められていない点である。本研究では、創造性レベルによる高質群／低質群の比較から、助言効果が個人の創造特性と密接に関連することを明らかにした。しかし、創造性は単一の次元ではなく、注意制御、空間認知、発散思考、抑制制御、ワーキングメモリ容量、性格特性など、複数の認知因子の複雑な構成に基づいている。助言が「誰に、どのような条件で、どのくらい効果的なのか」を説明するには、より多面的な個人差指標を収集し、創造特性の階層構造をモデル化する必要がある。この方向性は、今後のデザイン教育研究において極めて大きな意義を持つ。

第四の課題は、アイデア生成の内的過程を十分に捉えきれていない点である。本研究はスケッチ描画に焦点を当てたが、実験協力者が頭の中で生成し、外化しなかったアイデアは分析から漏れている可能性がある。今後は、口頭プロトコル、視線計測、心的イメージの検出方法、生成 AI を用いた外化支援など、内的アイデア生成を公平に捉える新たな研究手法の導入が求められる。

これらの課題に基づき、今後の展望としてはいくつかの研究プログラムが考えられる。第一に、デザイン推論を「脳内ネットワーク動態の観点からモデル化」することである。DMN・FPN・SN がどのタイミングで同期・非同期化し、助言やタスク遷移がどのようにネットワーク間のバランスを揺り動かすのかを明確化することで、デザイン推論は“前頭前野のどの部位が働くか”という表層的理解を超え、“ネットワーク間の動的配分によって成立する複雑系”として再定義される可能性がある。第二に、助言による思考モード切替をリアルタイムに検出する

「神経フィードバック型デザイン支援システム」の構築が挙げられる。助言直後の自律神経変動, DLPFC/MPFC 活動の偏り, 眼球反応などをその場で検出し, 最適な助言抽象度を自動選択するシステムは, 今後のデザイン教育に革新をもたらす可能性がある。第三に, 創造性の個人差分析をさらに深め, 高創造性者・低創造性者に最適化された「適応的助言モデル」を確立することである。これにより, 創造性教育は「万人に同じ助言を与える場」から, 「個人の認知特性に応じて思考モードをデザインする場」へと発展するだろう。

総じて, 本論文はデザイン推論を神経生理学的に捉える新たな研究基盤を構築するとともに, デザイン教育, 創造性研究, さらには人間中心設計の研究領域に対して多くの可能性を開くものである。今後は, 本研究で提示した知見をさらに精緻化し, 神経科学・認知科学・デザイン学を横断した学際的研究の枠組みとして発展させることで, 創造性思考の本質に迫ることが期待される。

参考・引用文献

- [1] Lawson, B. (2006). How designers think: The design process demystified. Architectural Press.
- [2] Cross, N. (2006). Designerly ways of knowing. Springer.
- [3] Goldschmidt, G. (1990). Linkography: Unfolding the design process. Design Studies, 11(3), 291-309.
- [4] Guilford, J. P. (1967). The nature of human intelligence. McGraw-Hill.
- [5] Torrance, E. P. (1974). Torrance tests of creative thinking. Scholastic Testing Service.

研究業績

学術論文（査読あり）

張紫薇，前川正実：デザイン活動の二種類の推論段階での脳前頭前野と自律神経の活性状態. デザイン学研究, Vol. 70 No. 4, pp19-28, 2024

学術論文（査読中）

張紫薇，前川正実：デザイン発想時の助言内容の違いが脳前頭前野部の賦活と自律神経状態に与える影響. デザイン学研究, 2025

学術論文（査読なし）

張紫薇，前川正実：デザイン活動における脳内ネットワークの働きに関する考察. 生活造形, Vol. 70, pp. 43-50, 2025

張紫薇，前川正実：デザイン発想時の助言内容とアイデアの質との関係. 生活造形, Vol. 71, 2026

国内口頭発表

張紫薇，前川正実：二種類のアイデア発想段階の生理指標計測に基づく基礎的考察. 日本デザイン学会第 70 回研究発表大会, p. 50, 2023

張紫薇，前川正実：二種類のアイデア発想段階での脳前頭前野と自律神経の活性状態. 日本デザイン学会第 71 回研究発表大会, p. 332, 2024

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始ご指導とご助言を賜りました。京都女子大学大学院家政学研究科生活環境学専攻教授前川正実先生に心より深く御礼申し上げます。

前川先生には、研究計画の立案段階から、実験設計、データ解析、論文執筆に至るまで、常に的確で洞察に富むご指導をいただきました。特に、本研究の核となるデザイン推論の理論的整理や、生理指標を用いた分析の妥当性について、数多くの示唆と学術的支えを頂きました。先生から賜った豊富な知識と温かい励ましがなければ、本論文をまとめることは到底できませんでした。

また、本研究の実験にご協力くださった学生の皆様に、心より感謝申し上げます。限られた時間の中で、複数回にわたる課題遂行や計測への参加をご快諾いただき、本研究の成果は皆様のご協力なしには成し得ませんでした。

さらに、大学院生活を通して温かく支えてくれた家族に深く感謝します。長期間に及ぶ研究生活を続けられたのは、家族の理解と励ましがあつたからこそです。この場を借りて、心からの謝意を申し上げます。

最後に、本研究に関わるすべての方々に、改めて感謝の意を表します。皆様からいただいたご厚情とご支援に深く感謝するとともに、今後も本研究で得られた知見を活かし、デザイン学と認知科学の発展に寄与できるよう、一層研鑽を積んでまいります。

付録

A. 3章で用いたAタスク先行実験用紙

① 実験前の説明

まず、椅子の高さと前後の位置、あごを置く台の高さ、頭の角度などを、自分が楽になるように調整する。実験は13分半間程度である。おこなってもらえる内容は5種類あり、それぞれ、A3用紙1枚に描いてもらう。チャイムが鳴る度に、実験者(張あるいは前川)が紙をめくる。描いてもらう紙のときは、まず説明をする。説明は紙の左上にも書いてある。説明が終わったら、その紙にサインペンで描き始める。描き間違いをしても構わない。説明が書いてない白紙が現れたときは、その紙を見ながら安静にしている。実験が開始されてこの紙がめくられたら、最初は白紙になる。

② コントロールタスク1

ウォーミングアップとして、何も考えずに、サインペンで無意味な図形や線をたくさん引く。1分経過するとチャイムが鳴り終了である。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

③ タスクA

人が水面を進むための新たなモノゴトを創り出そうとしている。「水面を進むさまざまな方法とそれを実現するモノゴト」について大まかなスケッチや図を描きながら、多様なアイデアを出す。4分経過するとチャイムが鳴り終了である。途中で終わっても構わない。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

④ タスクB

それぞれのアイデアを評価して、優れていると考えられる案をひとつかふたつ選び出して、その図を囲うか印を付けるなどする。1分経過するとチャイムが鳴り終了である。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

⑤ タスクC

選んだアイデアについて、スケッチを描きながら具体的なデザインをする。4分経過するとチャイムが鳴り終了である。途中で終わっても構わない。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

⑥ コントロールタスク2

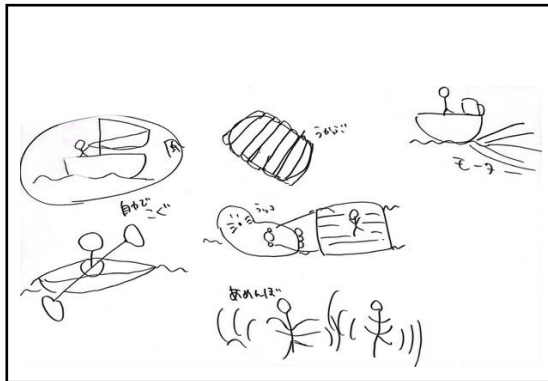
薄く描かれている線を大まかになぞって、サインペンで線を引く。1分経過するとチャイムが鳴り終了である。途中で終わっても構わない。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

B. 3章でAタスク先行実験の各実験協力者の情報

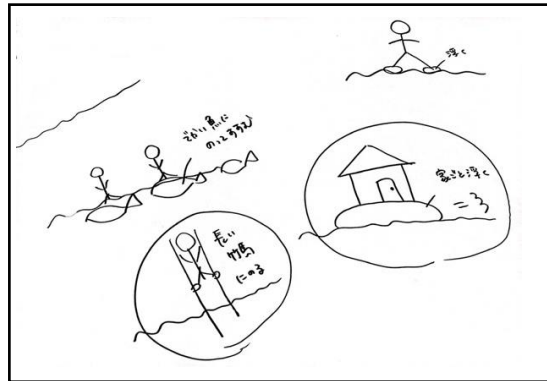
実験協力者	データ名	学年	利き手	日	時刻	α	β	トラブル	タスクA(描いている)分:秒	描いていない時間	タスクA(描いている)分:秒	描いていない時間	タスクC(描いている)分:秒	描いていない時間	タスクC(描いている)分:秒	描いていない時間	悪いc.h
A	A2022033112331393MS 4	右	2022/3/31	12:33	1			NIRS通信悪い、RRIのデータを取れない	2:03-2:23	20	2:24-5:50	206	7:55-8:09	14	8:10-11:40	210	19
B	A2022040510485993MS M2	右	2022/4/5	10:48	1				2:14-2:19	5	2:20-5:50	210	8:00-8:05	5	8:06-11:40	214	
C	A2022040511320293MS 4	右	2022/4/5	11:32	1				2:20-2:35/3:00-5:50	15, 170	2:36-2:59	23	8:00-8:24/9:56-11:40	24, 104	8:25-9:55	90	
D	A2022040513235193MS 4	右	2022/4/5	13:23	1				2:24-3:18	54	3:19-5:50	151	8:00-8:14	14	8:15-11:40	205	
E	A202204051503893MS 4	右	2022/4/5	15:50	1			眠かった	2:22-2:58	36	2:59-5:50	171	8:00-8:20	20	8:21-11:40	199	8
F	A2022040614333293MS 4	右	2022/4/6	14:33	1				2:22-2:27	5	2:28-5:50	202	8:00-8:05	5	8:06-11:40	214	
G	A2022040615230393MS M2	右	2022/4/6	15:23	1				2:20-2:24	4	2:25-5:50	205	8:00-8:04	4	8:05-11:40	215	
H	A2022040715152193MS 2	右	2022/4/7	15:15	1				2:20-2:23	3	2:24-5:50	206	7:59-8:05	6	8:06-11:40	214	
J	A2022040715463893MS 2	右	2022/4/7	15:46	1			騒音、RRIのデータを取れない	2:20-2:28/4:55-5:50	8, 55	2:29-4:54	145	8:00-8:25	25	8:26-11:40	194	
K	A2022040716203593MS 2	右	2022/4/7	16:20	1				2:20-2:50	30	2:51-5:50	179	8:00-8:26	26	8:27-11:40	193	
L	A2022040716531993MS 2	左	2022/4/7	16:53	1				2:20-3:13	53	3:14-5:50	156	8:00-8:31	31	8:32-11:40	188	12
M	A2022040717321093MS 2	右	2022/4/7	17:32	1				2:20-3:28	68	3:29-5:50	141	8:00-8:08	8	8:09-11:40	211	19
N	A2022041109513393MS 3	右	2022/4/11	9:51	1			タイムスタンプなし、RRIのデータを取れない	2:20-2:24	4	2:25-5:50	205	8:00-8:16	16	8:17-11:40	203	17,19
O	A2022041110241993MS 3	右	2022/4/11	10:24	1			RRIのデータを取れない	2:20-2:28/2:56-4:47/5:31-5:50	8, 111, 19	2:29-2:55/4:48-5:30	26, 42	8:00-8:22	22	8:23-11:40	197	
P	A2022041111015093MS 3	左	2022/4/11	11:01	1			RRIのデータを取れない	2:20-2:36	16	2:37-5:50	193	8:00-8:10	10	8:11-11:40	209	
Q	A2022041111465793MS 3	左	2022/4/11	11:46	1				2:20-2:25	5	2:26-5:50	204	8:00-9:05	65	9:06-11:40	154	
R	A2022041114130393MS 3	左	2022/4/11	14:13	1				2:20-3:40/3:46-4:53/5:00-5:30/5:36-5:50	80, 67, 30, 14	3:41-3:45/4:54-4:59/5:31-5:35	4, 5, 4	8:00-8:20/8:26-9:50/10:11-11:20	20, 84, 69	8:25-9:50-10:10/11:21-11:40	4, 20, 19, 8	
S	A2022041116330693MS 3	右	2022/4/11	16:33	1				2:20-2:47/3:41-5:14/5:26-5:50	27, 93, 24	2:48-3:40/5:15-5:25	52, 10	8:00-8:09	9	8:10-11:40	210	
T	A2022041117353293MS 3	右	2022/4/11	17:35	1				2:20-2:45	25	2:46-5:50	184	8:00-8:17	17	8:18-11:40	202	12
U	A2022041118195393MS 3	右	2022/4/11	18:19	1				2:20-2:29/5:13-5:50	9, 37	2:30-5:12	162	8:00-8:21	21	8:22-11:40	198	

C. 3章でAタスク先行実験の各実験協力者のスケッチ

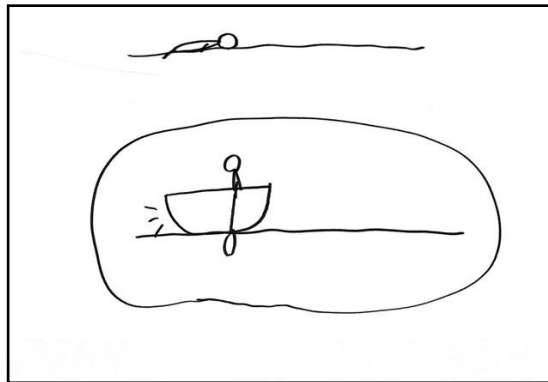
①Aタスクのスケッチ



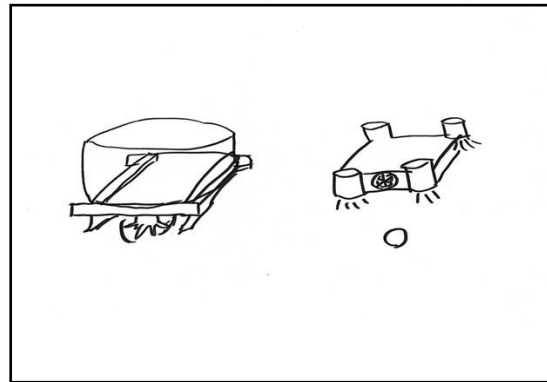
A



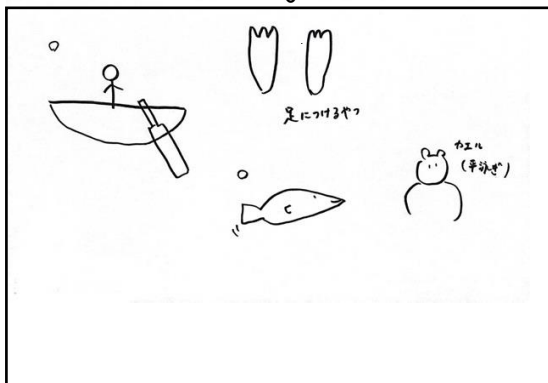
B



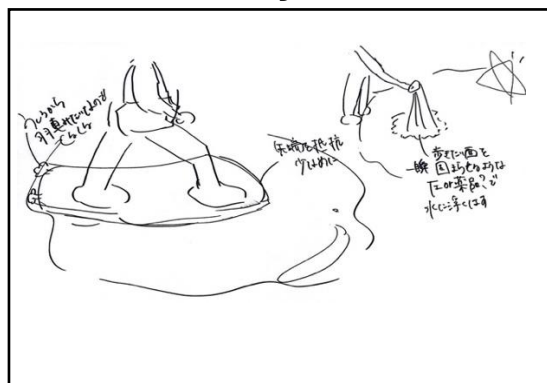
C



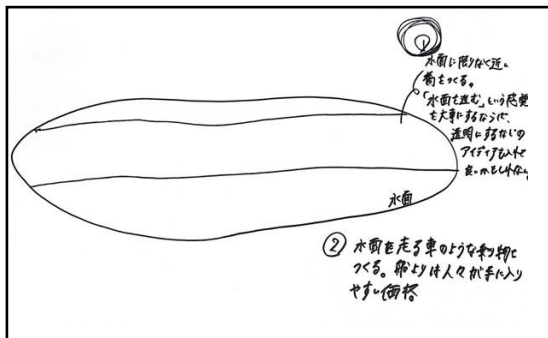
D



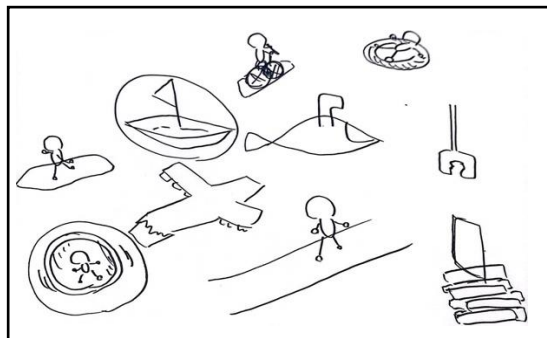
E



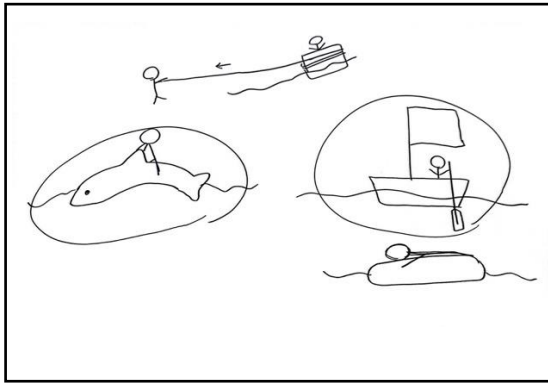
F



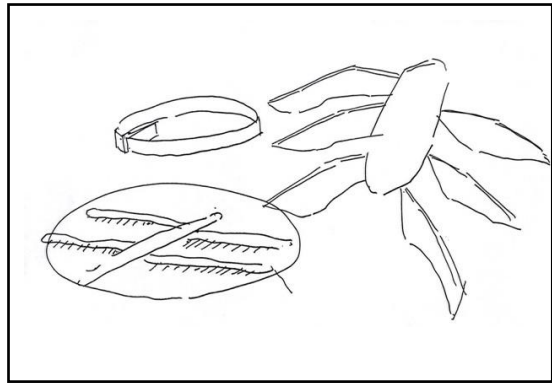
G



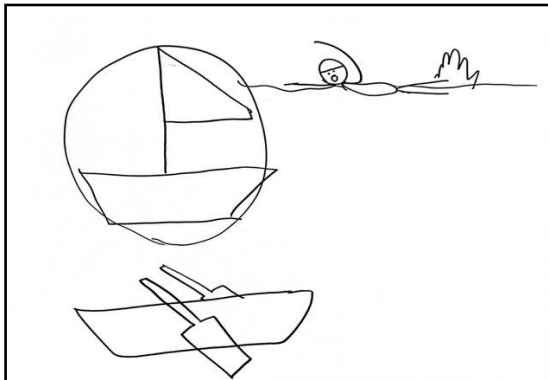
H



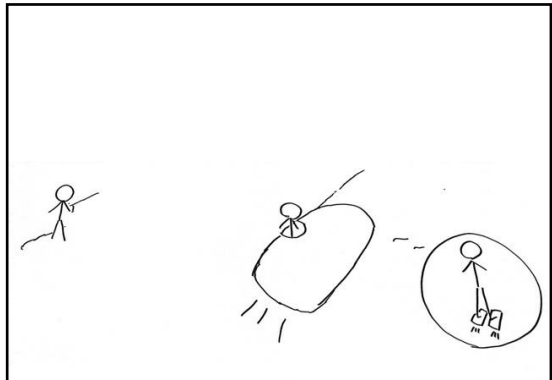
J



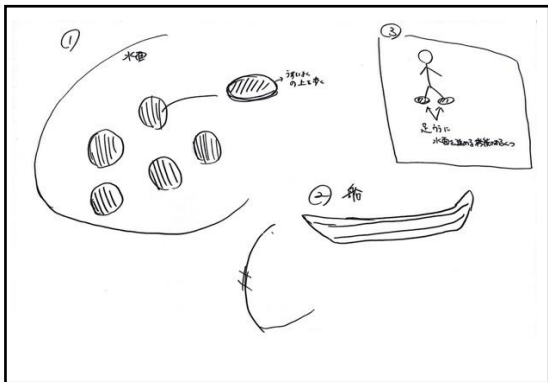
K



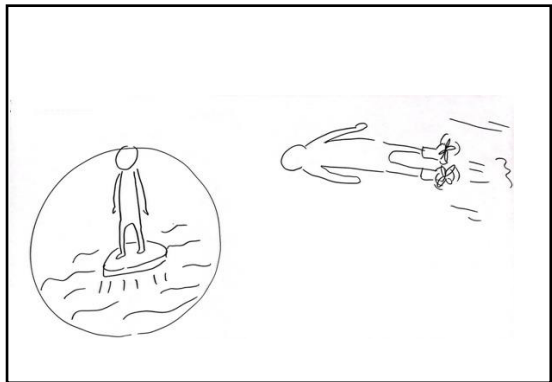
L



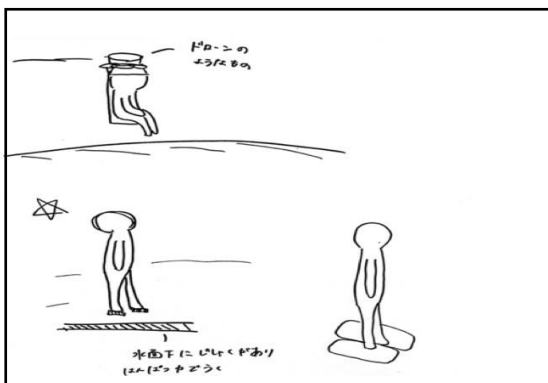
M



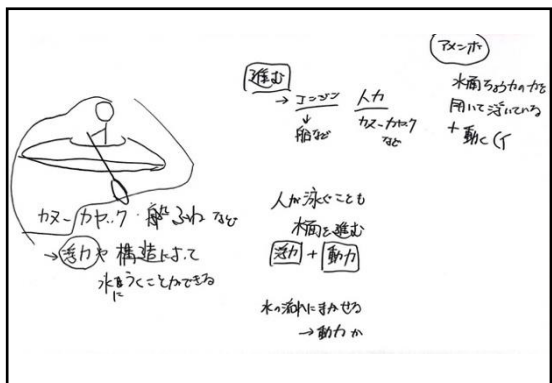
N



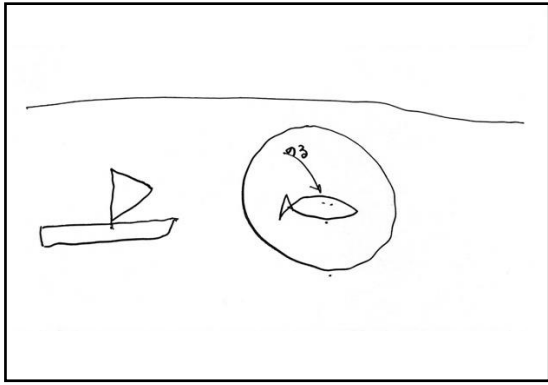
O



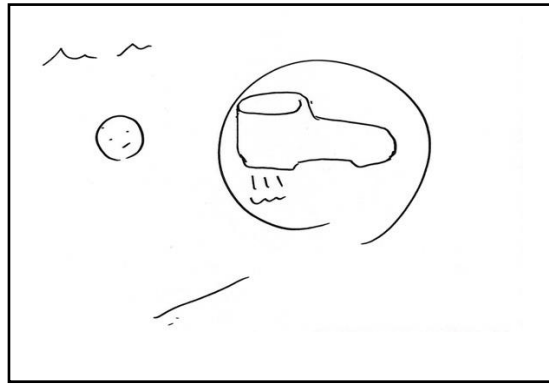
P



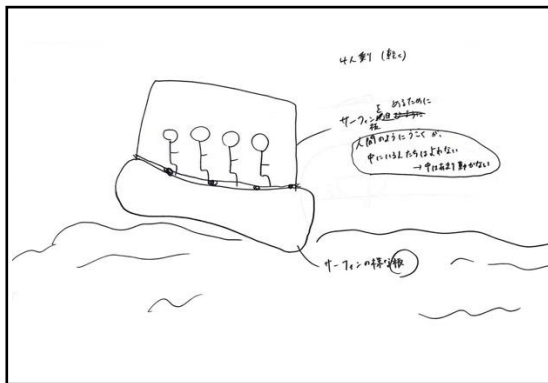
Q



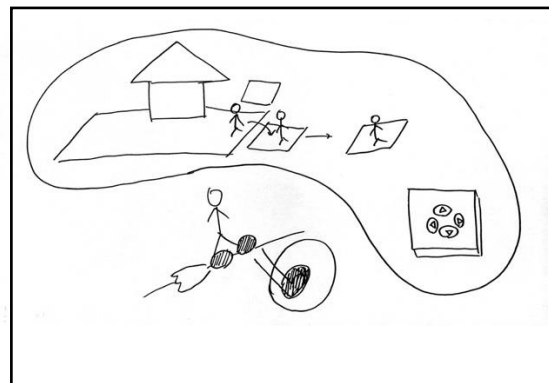
R



S

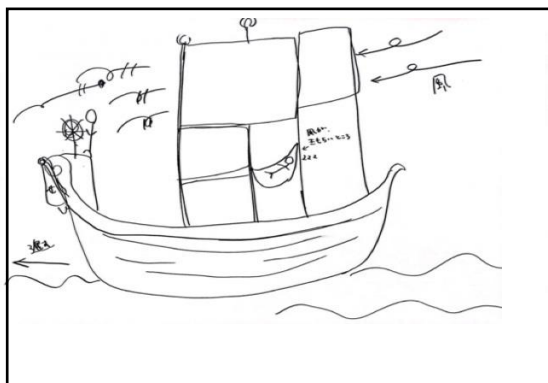


T

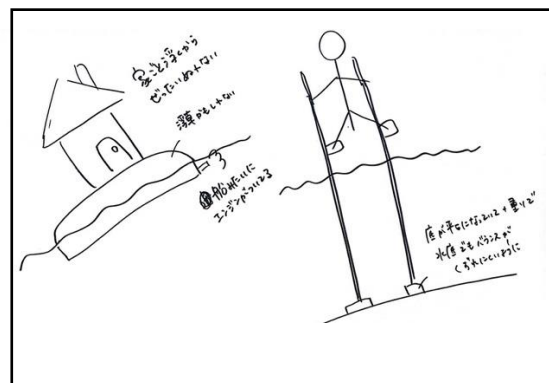


U

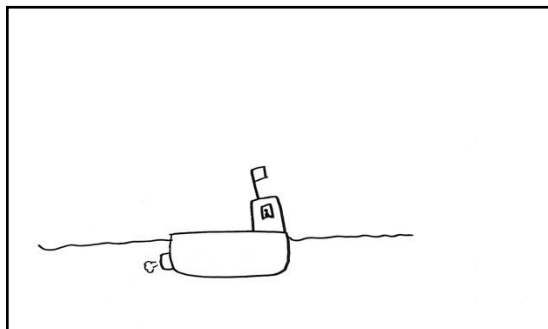
②C タスクのスケッチ



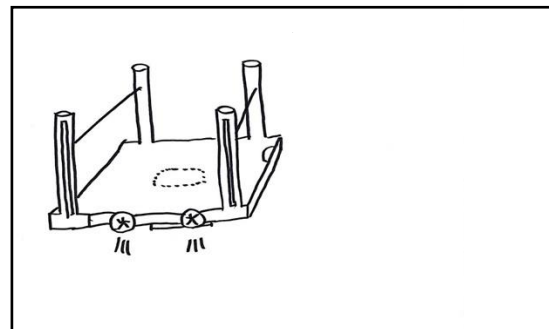
A



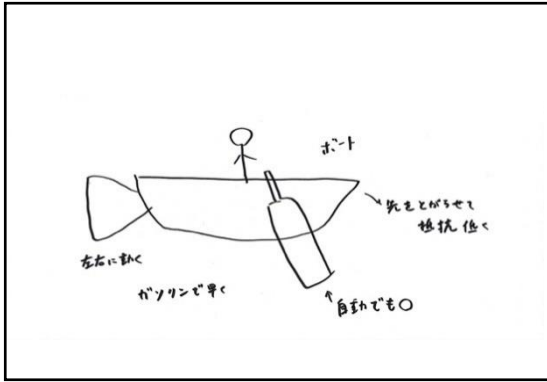
B



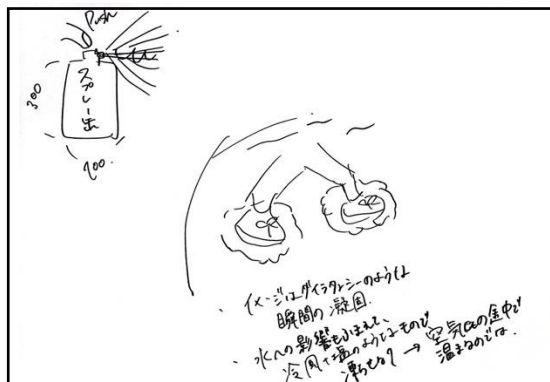
C



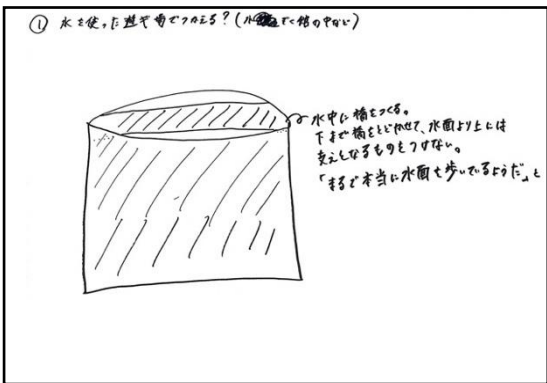
D



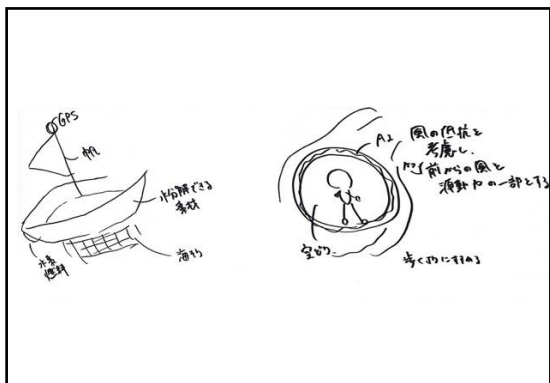
E



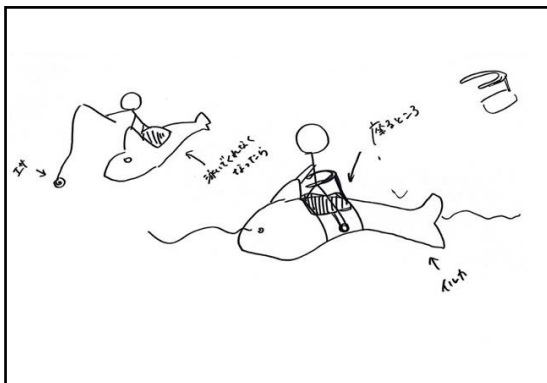
F



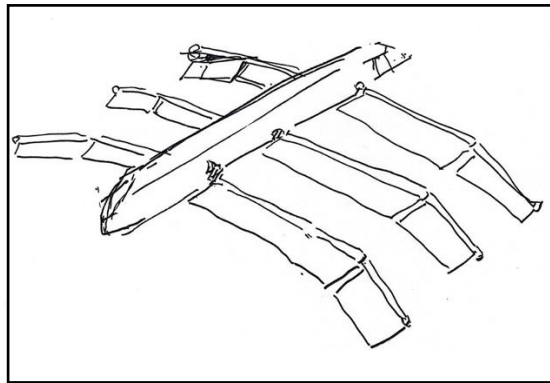
G



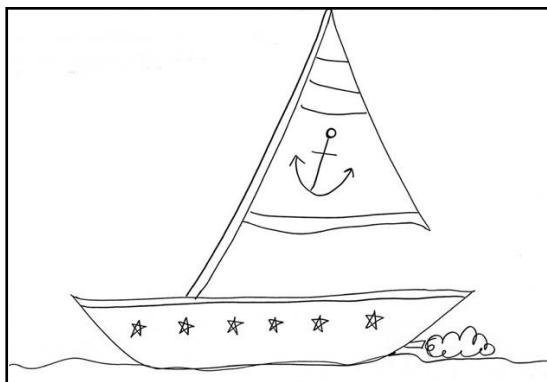
H



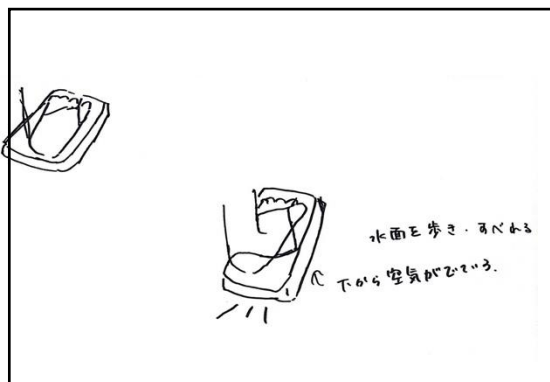
J



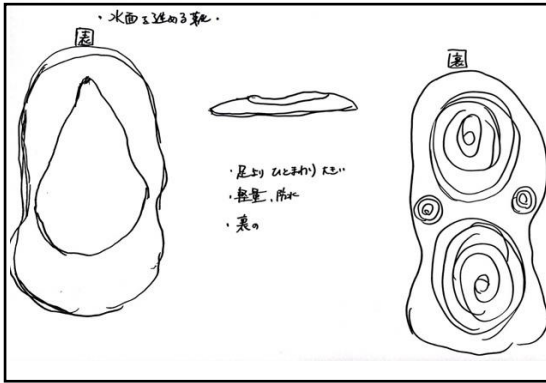
K



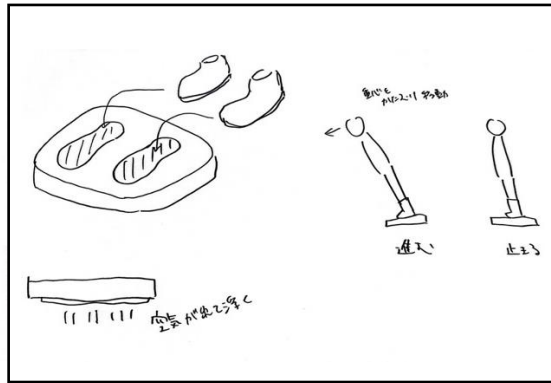
L



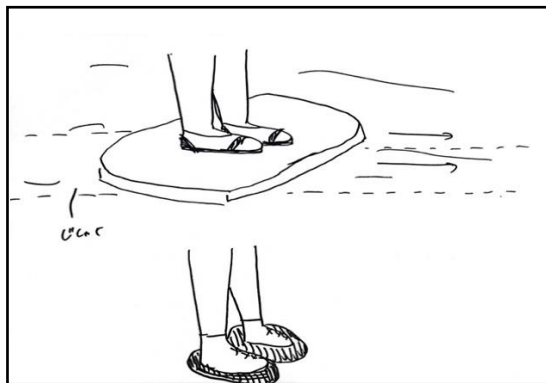
M



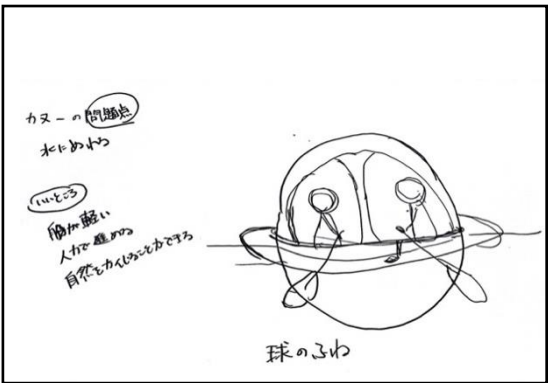
N



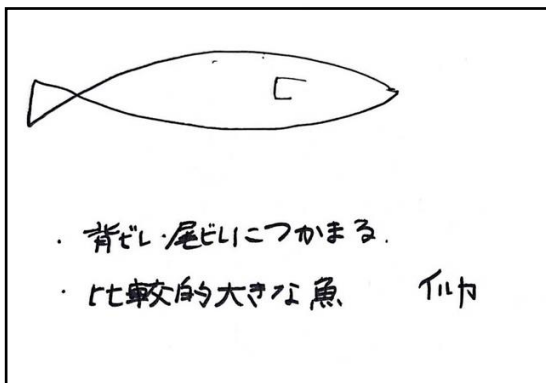
O



P



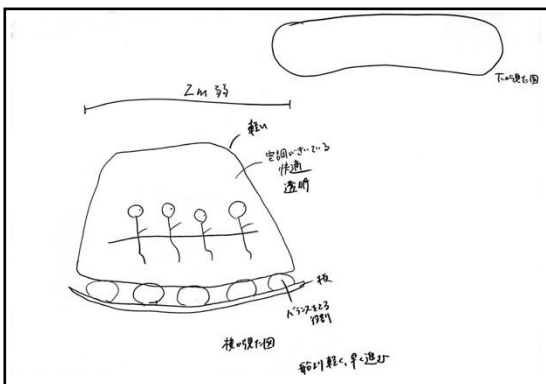
Q



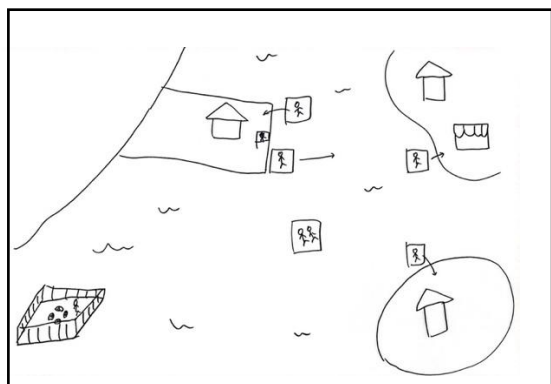
R



S



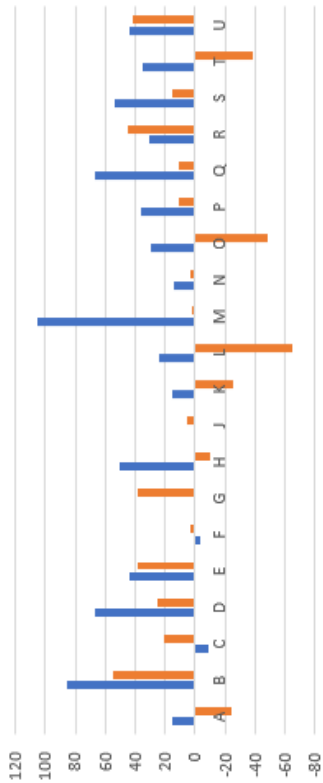
T



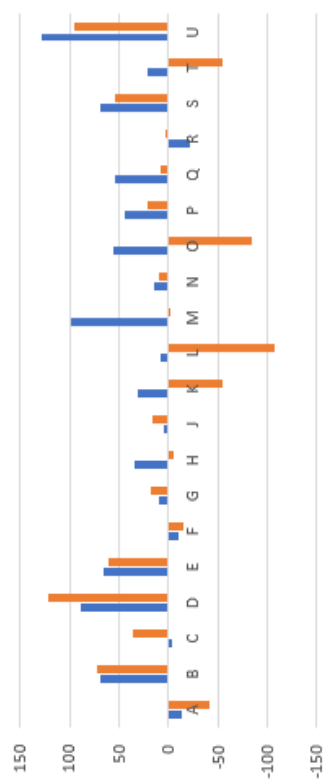
U

D. 3章でAタスク先行実験のNIRS結果

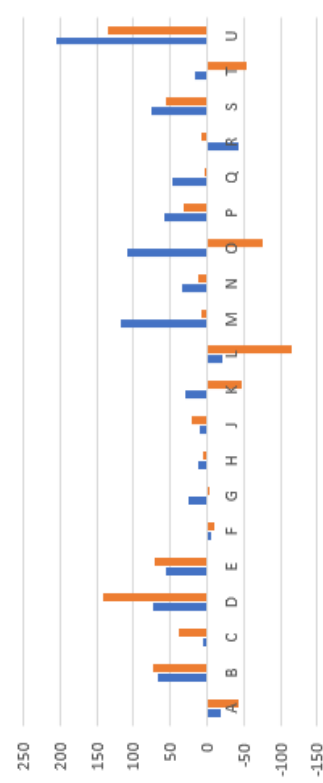
①全実験協力者のAタスクとCタスクの比較



ウィルコクソンの符号付き順位検定		正規化検定	
統計数値表による検定	両側検定	統計量z	両側P値
50	5%有意	2.0533	0.0400 *
		* : P<0.05 ** : P<0.01	

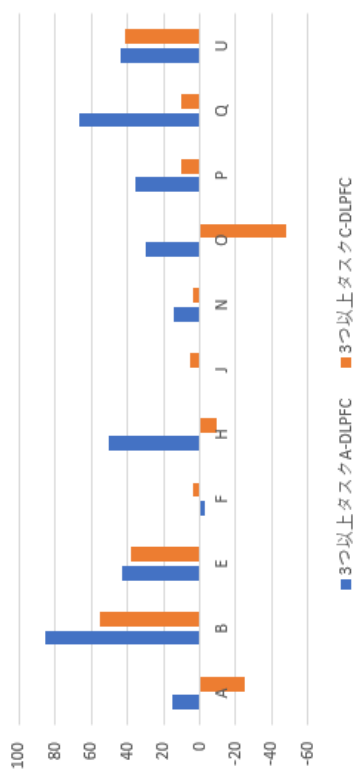


ウィルコクソンの符号付き順位検定		正規化検定	
統計数値表による検定	両側検定	統計量z	両側P値
46	5%有意	2.2026	0.0276 *
		* : P<0.05 ** : P<0.01	

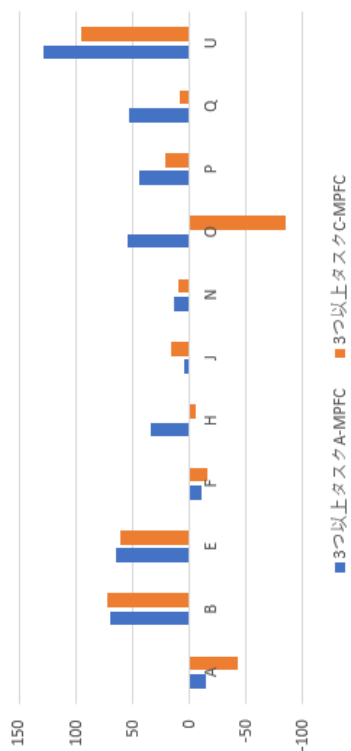


ウィルコクソンの符号付き順位検定		正規化検定	
統計数値表による検定	両側検定	統計量z	両側P値
30	1%有意	2.8000	0.0051 **
		* : P<0.05 ** : P<0.01	

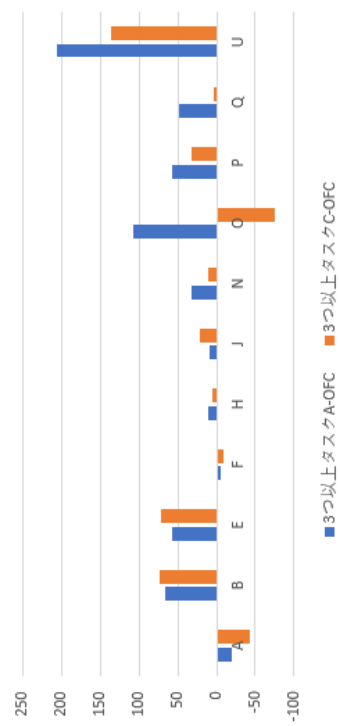
②グループ分けて、A先グループαのAタスクとCタスクの比較



ウィルコクソンの符号付き順位検定		
統計数値表による検定	正規化検定	
両側検定	統計量:z	両側P値
6	2.4006	0.0164 *
5%有意		* : P<0.05 ** : P<0.01



ウィルコクソンの符号付き順位検定		
統計数値表による検定	正規化検定	
両側検定	統計量:z	両側P値
6	2.4006	0.0164 *
5%有意		* : P<0.05 ** : P<0.01

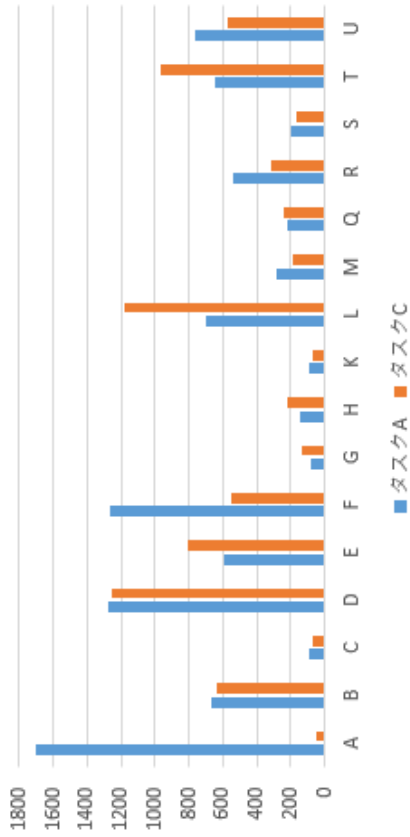


ウィルコクソンの符号付き順位検定		
統計数値表による検定	正規化検定	
両側検定	統計量:z	両側P値
12	1.8671	0.0619
-		* : P<0.05 ** : P<0.01

E. 3章でAタスク先行実験のRRI結果

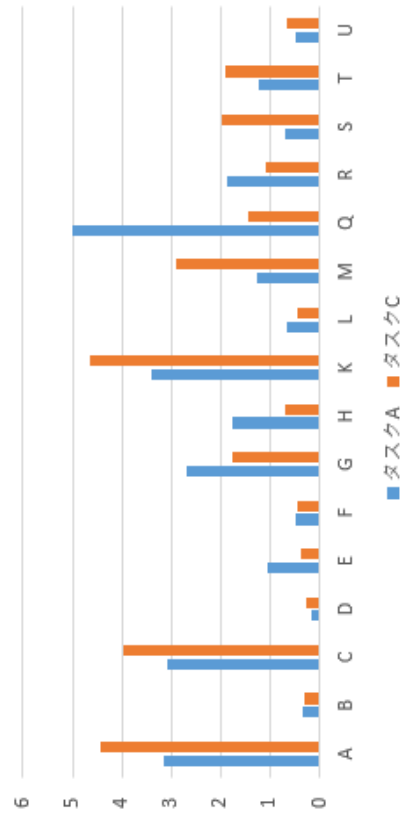
①全実験協力者のAタスクとCタスクの比較

HF(Ave)リラックス



ウィルコクソンの符号付き順位検定		正規化検定	
統計数値表による検定	両側検定	統計量:z	0.6205
統計量	両側検定	両側P値	* : P<0.05 ** : P<0.01
56 -		0.5349	

LF/HF(Ave)ストレス



ウィルコクソンの符号付き順位検定		正規化検定	
統計数値表による検定	両側検定	統計量:z	0.4137
統計量	両側検定	両側P値	* : P<0.05 ** : P<0.01
60 -		0.6791	

F. 3章で用いたCタスク先行実験用紙

① 実験前の説明

まず、椅子の高さと前後の位置、あごを置く台の高さ、頭の角度などを、自分が楽になるように調整する。実験は15分間程度である。おこなってもらえる内容は4種類あり、それぞれ、A3用紙1枚に描いてもらう。チャイムが鳴る度に、実験者(張あるいは前川)が紙をめくる。描いてもらう紙のときは、まず説明をする。説明は紙の左上にも書いてある。説明が終わったら、その紙にサインペンで描き始める。描き間違いをしても構わない。説明が書いてない白紙が現れたときは、その紙を見ながら安静にしている。実験が開始されてこの紙がめくられたら、最初は白紙になる。

② コントロールタスク1

ウォーミングアップとして、何も考えずに、サインペンで無意味な図形や線をたくさん引く。1分経過するとチャイムが鳴り終了である。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

③ タスクC2

テーマ：時計

スケッチを描きながら具体的なデザインをする。4分経過するとチャイムが鳴り終了である。途中で終わっても構わない。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

④ タスクC3

テーマ：電気スタンド

スケッチを描きながら具体的なデザインをする。4分経過するとチャイムが鳴り終了である。途中で終わっても構わない。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

注：C2とC3タスクの順序は、実験協力者ごとにランダムに変えて実施する

⑤ タスクA

「暗い環境で紙の本を読めるようにするさまざまな方法と、それを実現するモノゴト」について大まかなスケッチや図を描きながら、多様なアイデアを出す。4分経過するとチャイムが鳴り終了である。途中で終わっても構わない。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

⑥ コントロールタスク2

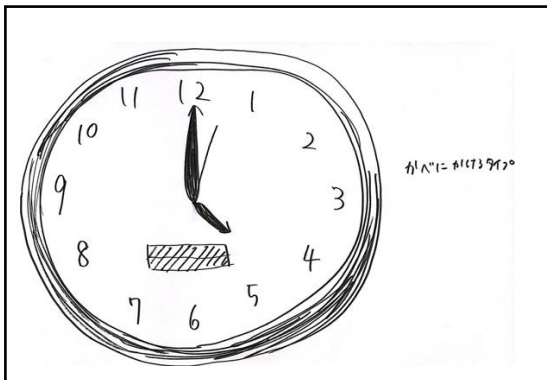
薄く描かれている線を大まかになぞって、サインペンで線を引く。1分経過するとチャイムが鳴り終了である。途中で終わっても構わない。終わったら、白い紙を見ながら安静にしている。

G. 3章でCタスク先行実験の各実験協力者の情報

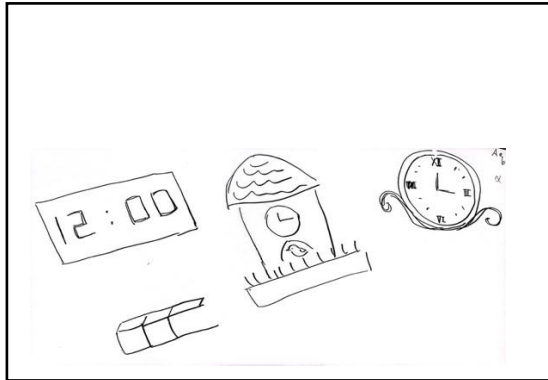
実験協力者	学データ名	学年	利き手	日	時刻	最初のタスクC	トラブル	悪いc.h	時計タスクC2(描いていない)分:秒	描いていない時間	時計タスクC2(描いていない)分:秒	描いていない時間	電気スタンドタスクC3(描いていない)分:秒	描いていない時間	電気スタンドタスクC3(描いていない)分:秒	描いていない時間	電気スタンド原理タスクA3(描いていない)分:秒	描いていない時間	電気スタンド原理タスクA3(描いていない)分:秒	描いていない時間
A	A20220627105202	4	右	2022/6/27	10:52	時計C2		13.19	2:06-2:10	4s	2:11-5:50	219s	6:30-6:39	9s	6:40-10:15	215s	11:03-11:26	23s	11:27-14:40	193s
B	A20220627165111	M2	右	2022/6/27	16:51	電気スタンドC3			6:30-6:37	7s	6:38-10:15	217s	2:06-2:12	6s	2:13-5:50	217s	11:03-11:10	7s	11:11-14:40	209s
C	A20220627145922	4	右	2022/6/27	14:59	時計			2:06-2:20/4:12-5:50	14s/98s	2:21-4:12	111s	6:30-7:45/9:21-10:15	75s/54s	7:46-9:20	94s	11:03-11:45/13:38-14:40	42s/62s	11:46-13:28	102s
D	A20220705094945	4	右	2022/7/5	9:49	電気スタンド		19	6:30-6:52	22s	6:53-10:15	202s	2:06-2:12	6s	2:13-5:50	217s	11:03-12:40	97s	12:41-14:40	119s
E	A20220705114158	4	右	2022/7/5	11:41	時計		8.19	2:06-2:34	28s	2:35-5:50	195s	6:30-6:48	18s	6:49-10:15	192s	11:03-11:30	27s	11:31-14:40	189s
F	A20220705163655	4	右	2022/7/5	16:36	時計			0	0	2:06-5:50	224s	0	0	6:30-10:15	225s	0	11:03-14:40	217s	
G	A20220628105012	M2	右	2022/6/28	10:50	時計			2:06-2:26	20s	2:27-5:50	203s	6:30-6:53	23s	6:54-10:15	201s	11:03-11:14	11s	11:15-14:40	205s
H	A20220630145410	2	右	2022/6/30	14:54	電気スタンド			6:30-6:35	5s	6:36-10:15	205s	2:06-2:10	4s	2:11-5:50	219s	11:03-11:10	7s	11:11-14:40	209s
J	A20220630154301	2	右	2022/6/30	15:43	時計	タスクC3とA3 使える	8.19					6:30-6:35	5s	6:35-10:15	220s	11:03-11:15	12s	11:16-14:40	204s
K	A20220628112741	2	右	2022/6/28	11:27	電気スタンド		7.12.19	6:30-6:57	27s	6:57-10:15	198s	2:06-2:24	18s	2:25-5:50	205s	11:03-11:36	33s	11:37-14:40	183s
L	A20220630164358	2	左	2022/6/30	16:43	電気スタンド			6:30-7:54	84s	7:55-10:15	140s	2:06-3:23	77s	3:24-5:50	146s	11:03-11:29	26s	11:30-14:40	190s
M	A20220628164231	2	右	2022/6/28	16:42	電気スタンド	タスクA3の前のレストのときNIRSがずれた		6:30-6:50	20s	6:51-10:15	204s	2:06-2:28	22s	2:29-5:50	201s	11:03-11:45	42s	11:46-14:40	174s
N	A20220627095430	3	右	2022/6/27	9:54	電気スタンド		4	0	0	6:30-10:15	225s	0	0	2:06-5:50	222s	0	11:03-14:40	217s	
O	A20220627092458	3	右	2022/6/27	9:24	時計		9.12.15.19	2:06-2:10	4s	2:11-5:50	219s	6:30-6:37	7s	6:38-10:15	217s	11:03-11:11	8	11:12-14:40	208s
P	A20220627132551	3	左	2022/6/27	13:25	時計		4	2:06-2:10	4s	2:11-5:50	219s	6:30-6:40	10s	6:41-10:15	214s	0	11:03-14:40	217s	
Q	A20220627112732	3	左	2022/6/27	11:27	電気スタンド		12.15.19	6:30-6:35	5s	6:36-10:15		2:06-2:10	4s	2:11-5:50	219s	0	11:03-14:40	217s	
R	A20220627140521	3	左	2022/6/27	14:05	電気スタンド			6:30-6:36	6s	6:37-10:15	218s	2:06-2:21	15s	2:22-5:50	207s	11:03-11:18/14:00-14:40	15s/40s	11:19-14:00	161s
S	A20220628145833	3	右	2022/6/28	14:58	時計		12	2:06-2:12	6s	2:13-5:50	217s	6:30-7:10	40s	7:11-10:15	184s	11:03-11:15	12s	11:16-14:40	204s
T	A20220704163954	3	右	2022/7/4	16:39	時計		12.17	2:06-2:11	5s	2:12-5:50	218s	6:30-7:10	40s	7:11-10:15	184s	11:03-11:49	46s	11:50-14:40	170s
U	A20220705150317	3	右	2022/7/5	15:03	電気スタンド	ビデオX	19												

H. 3章でCタスク先行実験の各実験協力者のスケッチ

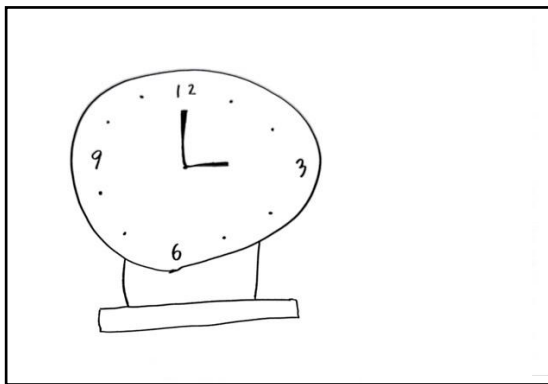
①C2タスク(時計)のスケッチ



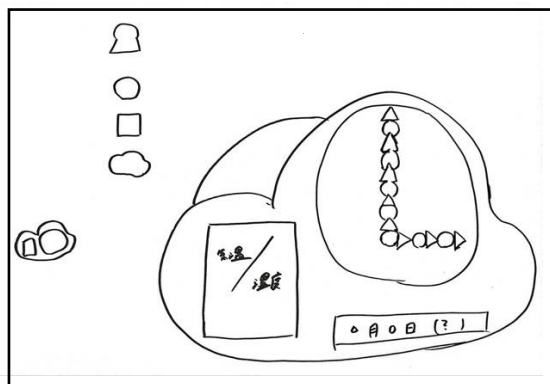
A



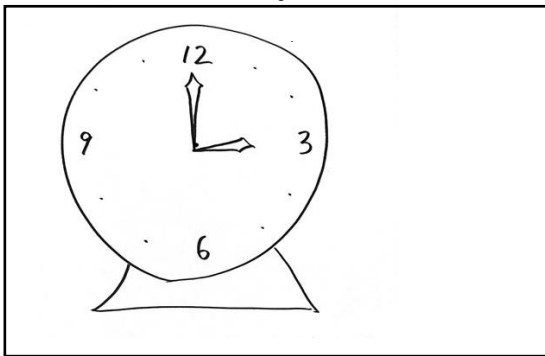
B



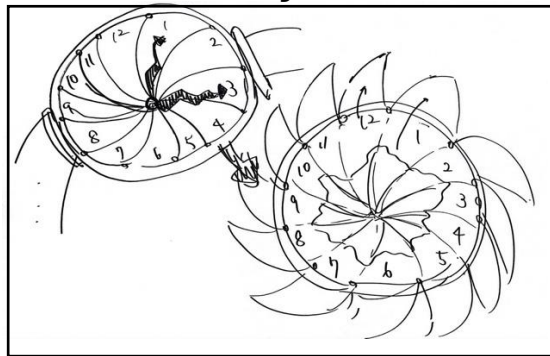
C



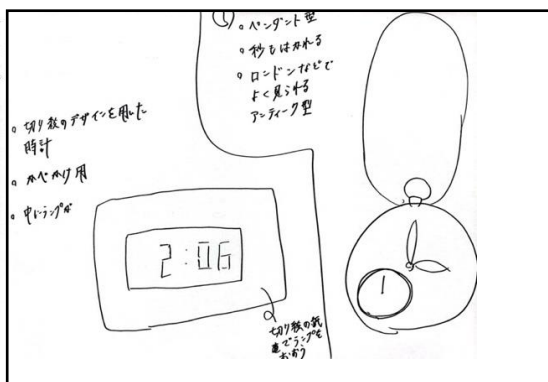
D



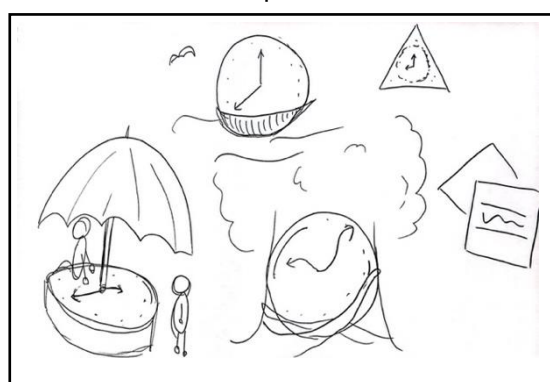
E



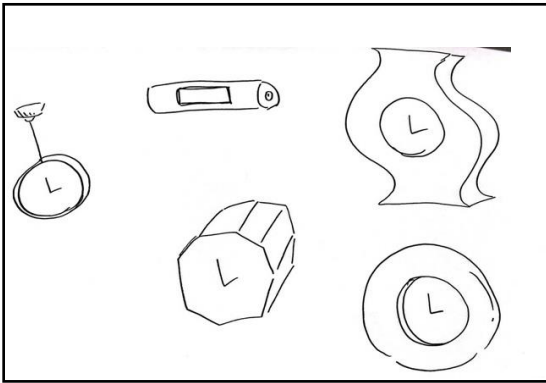
F



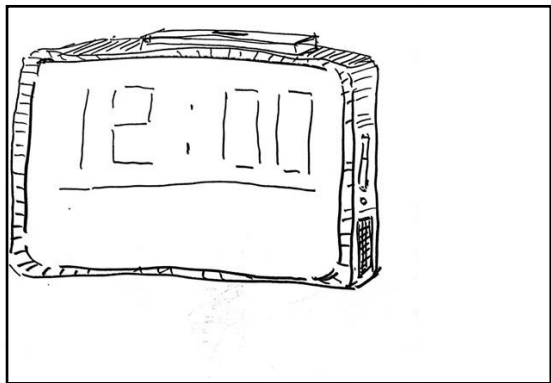
G



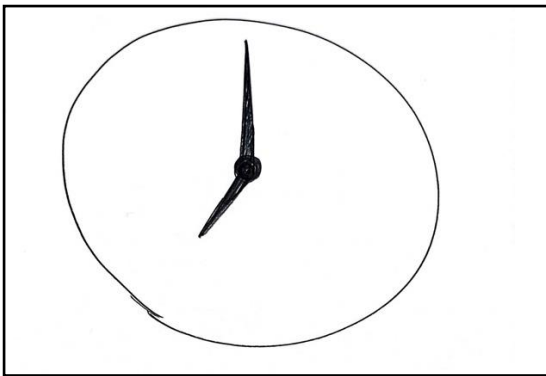
H



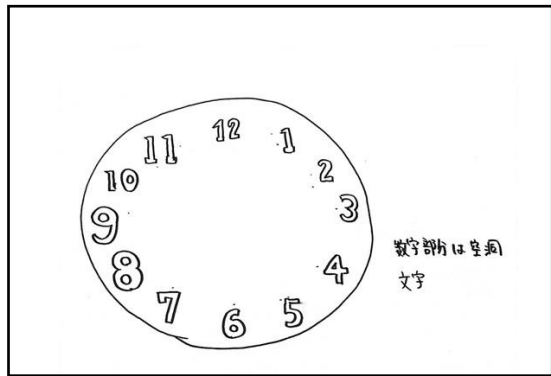
J



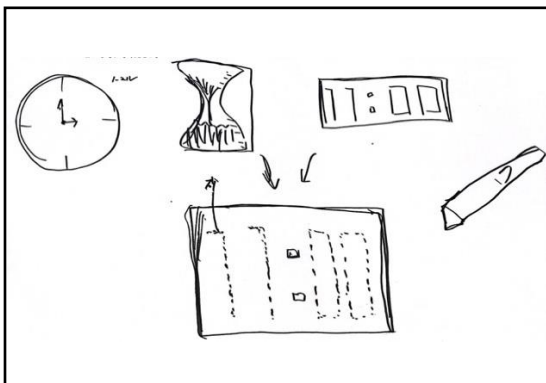
K



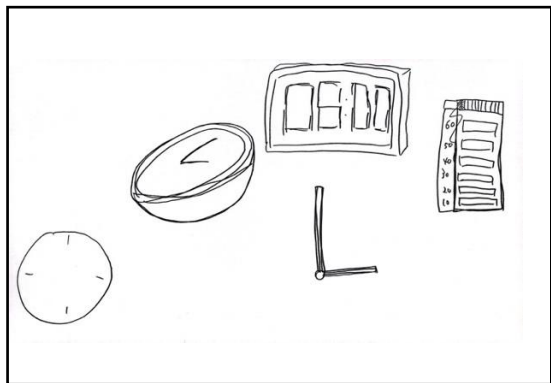
L



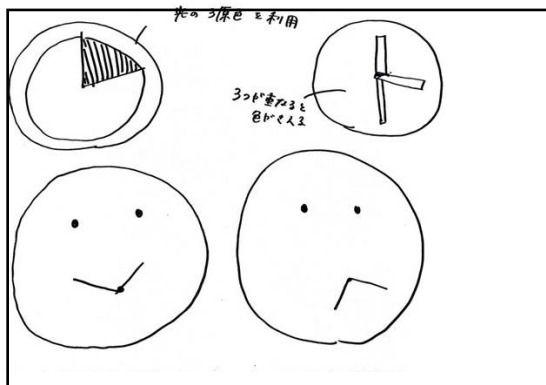
M



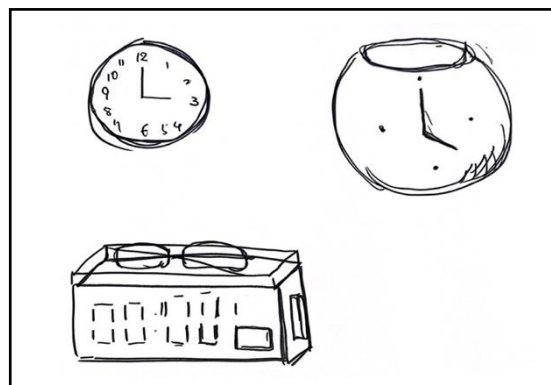
N



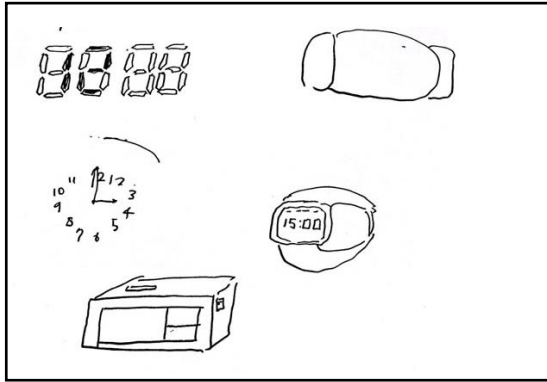
O



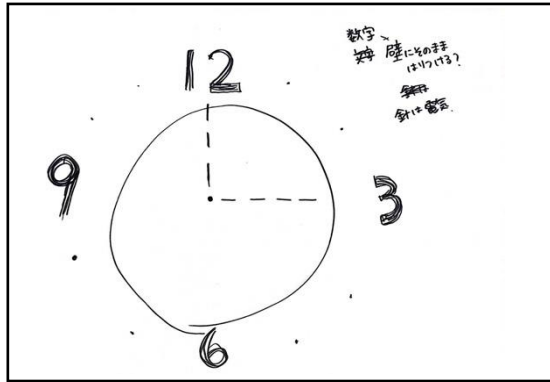
P



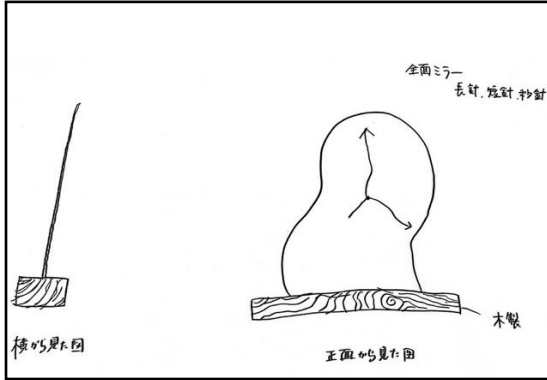
Q



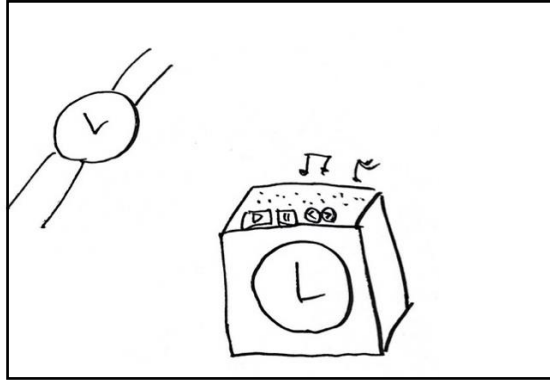
R



S

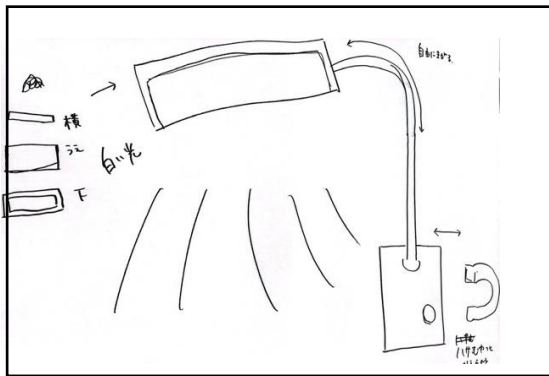


T

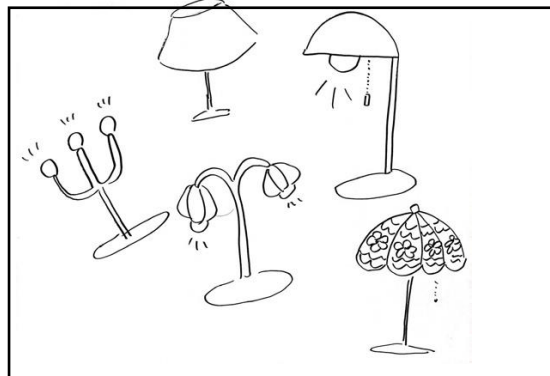


U

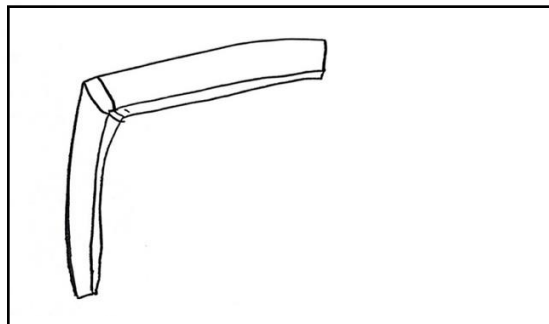
②C3 タスク (電気スタンド) のスケッチ



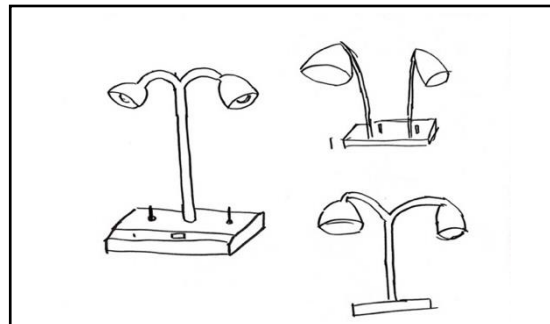
A



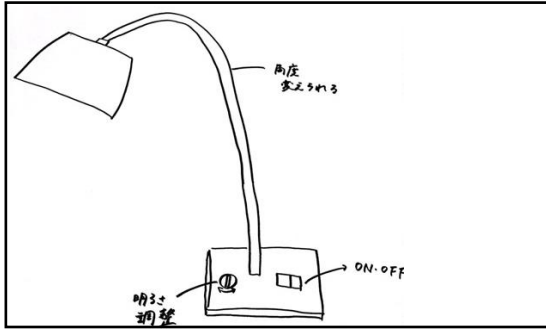
B



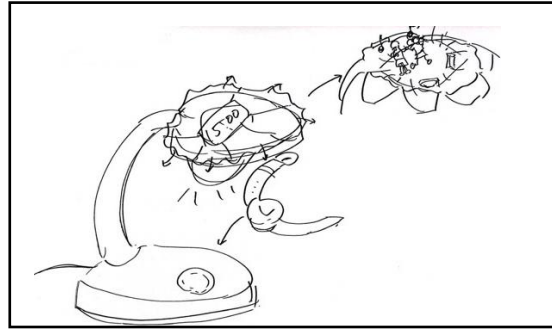
C



D



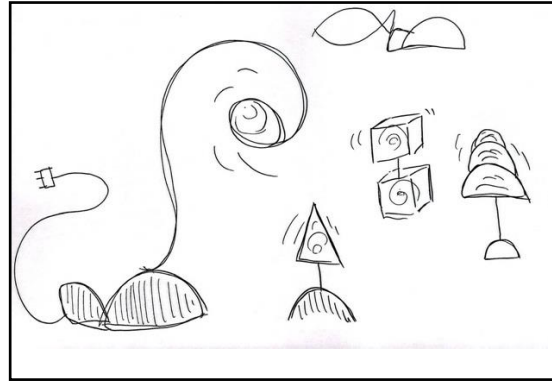
E



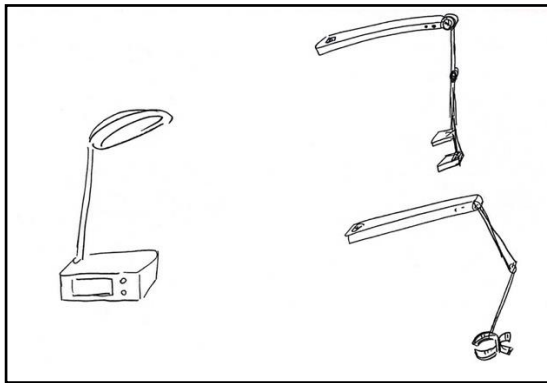
F



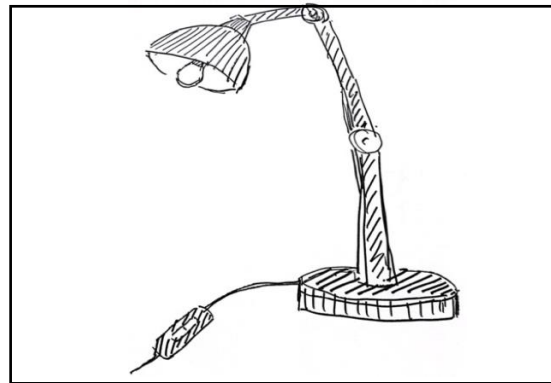
G



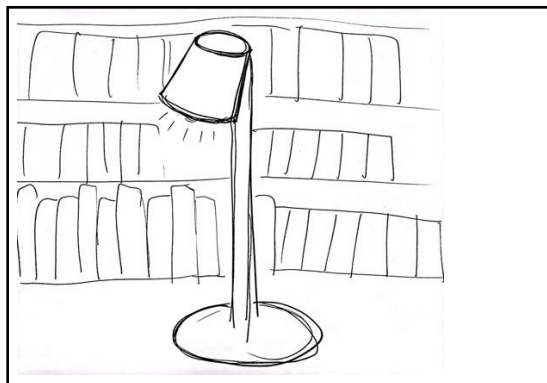
H



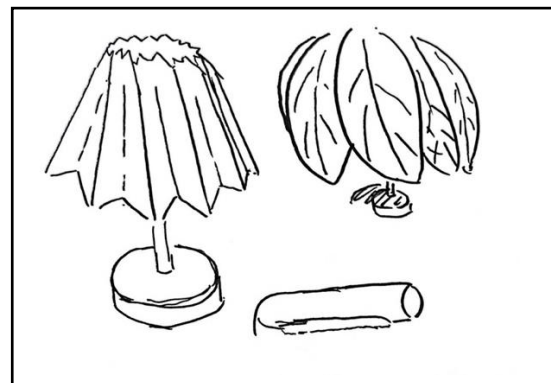
J



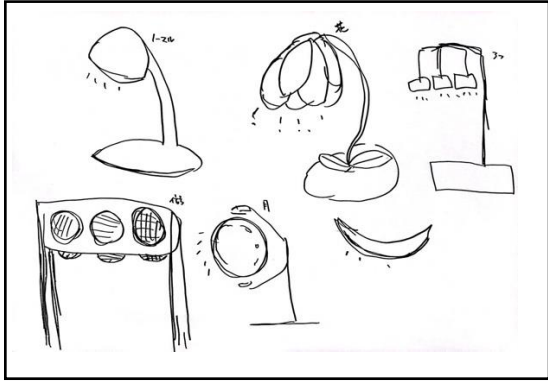
K



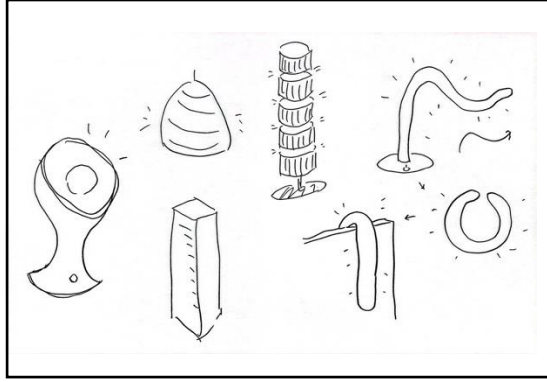
L



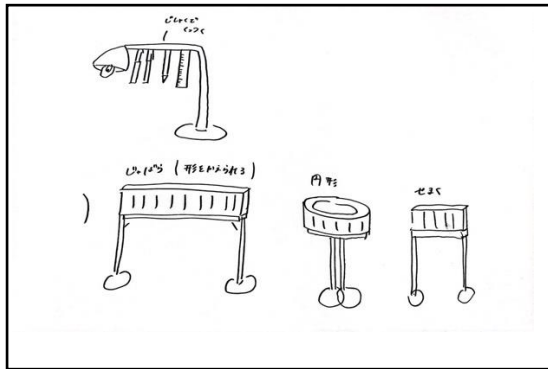
M



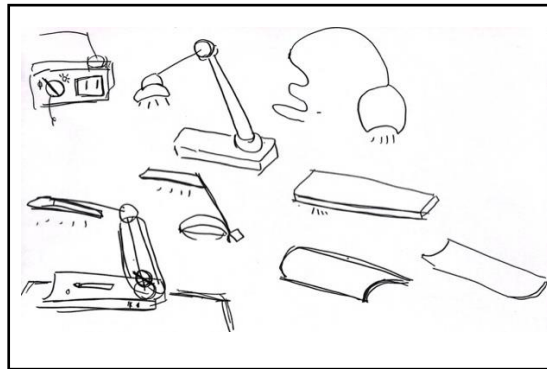
N



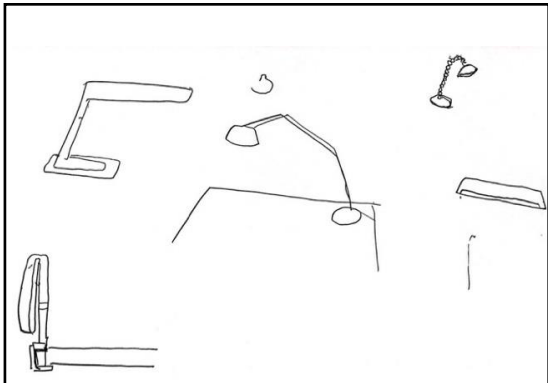
O



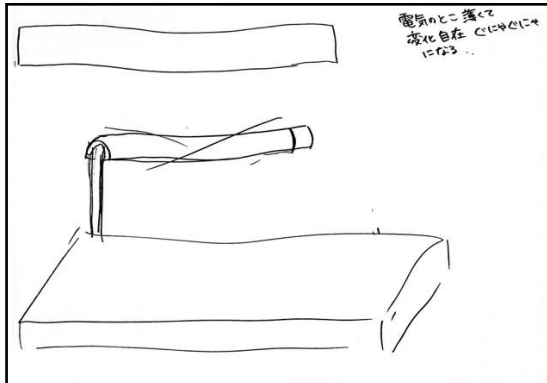
P



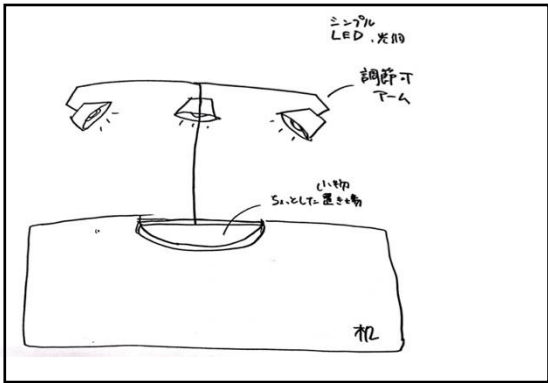
Q



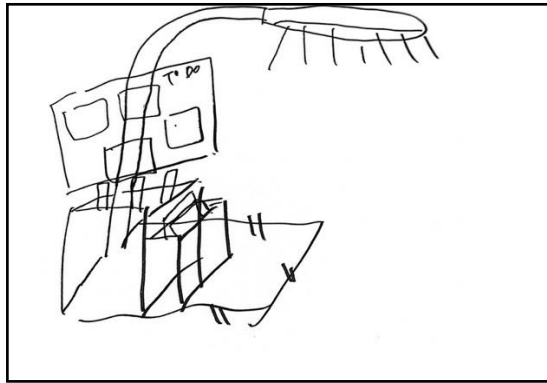
R



S

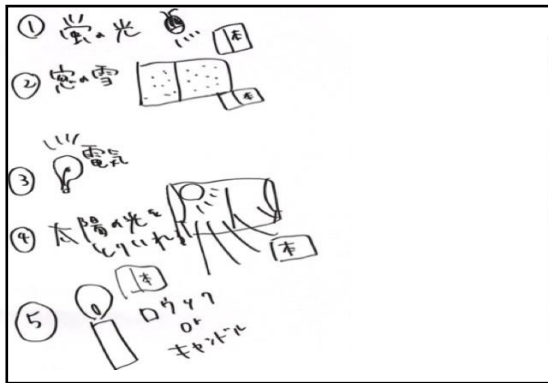


T

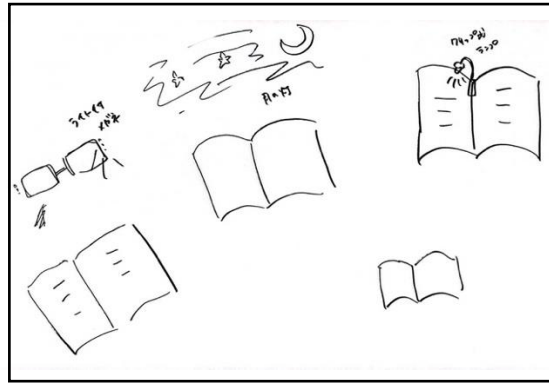


U

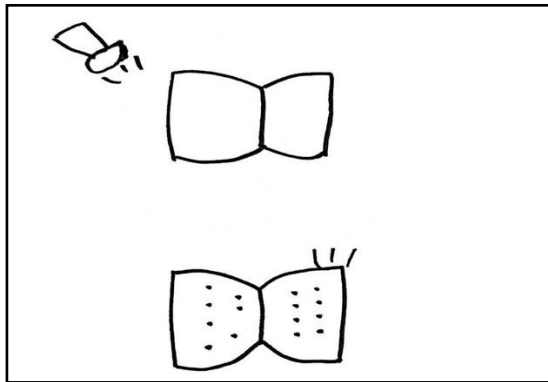
③A タスク (電気スタンド原理) のスケッチ



A



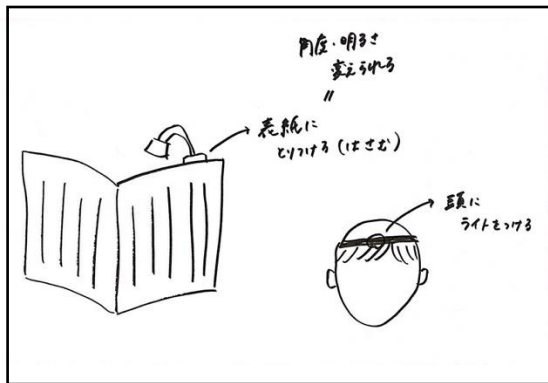
B



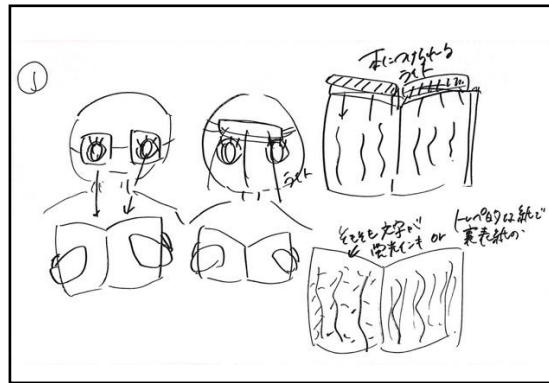
C



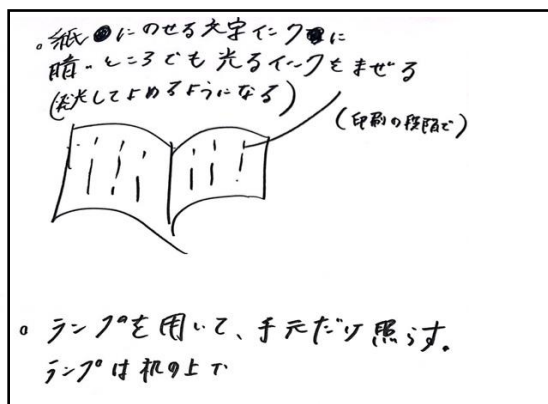
D



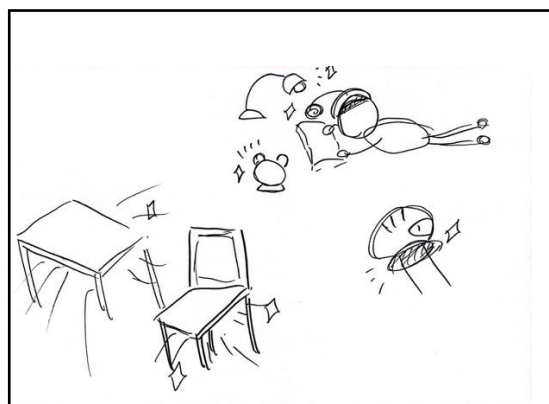
E



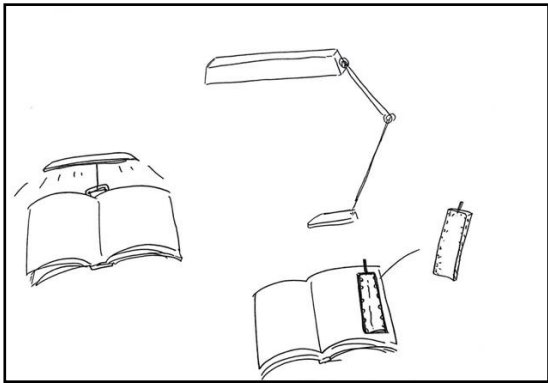
F



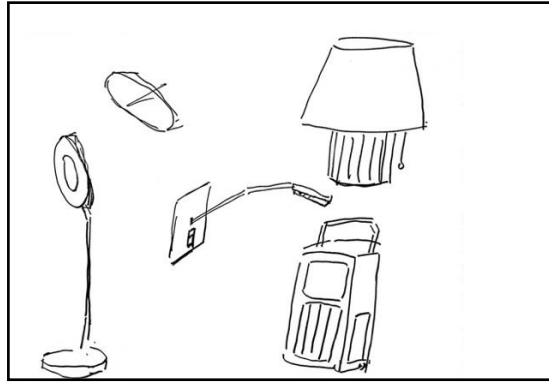
G



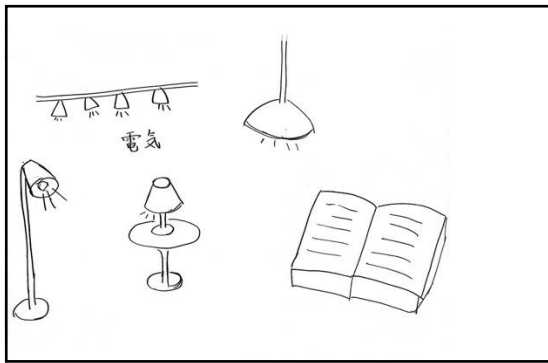
H



J



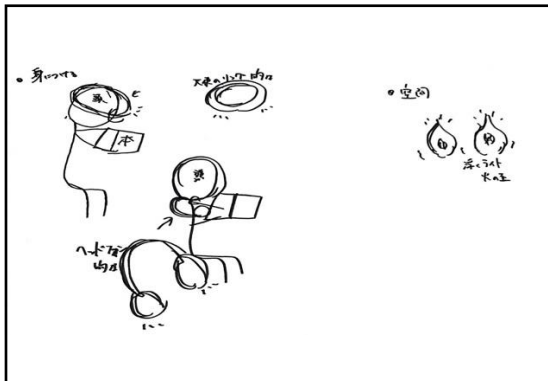
K



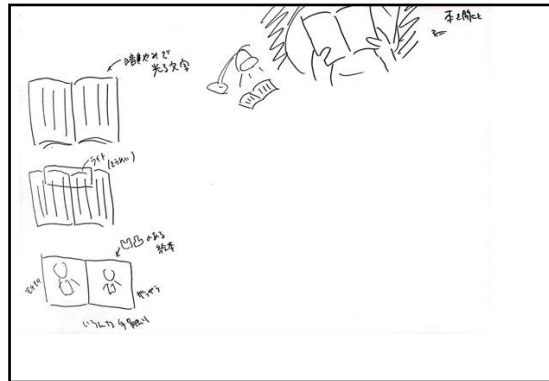
L



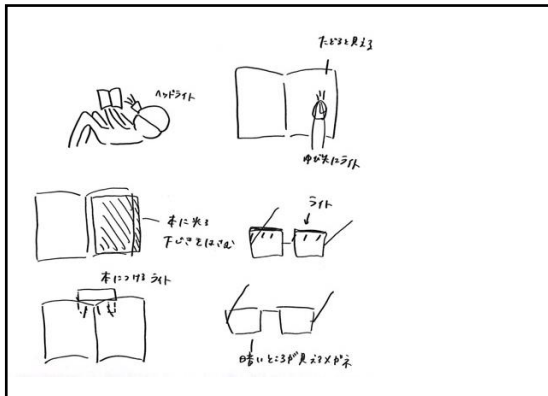
M



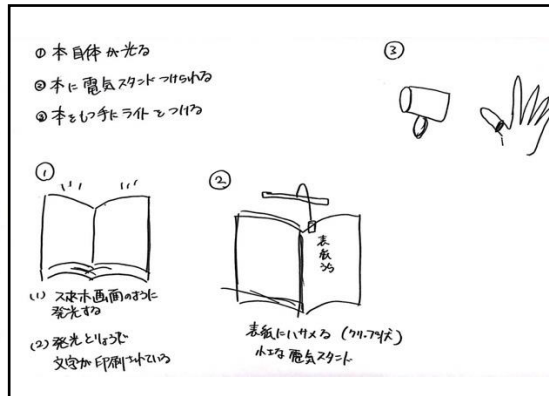
N



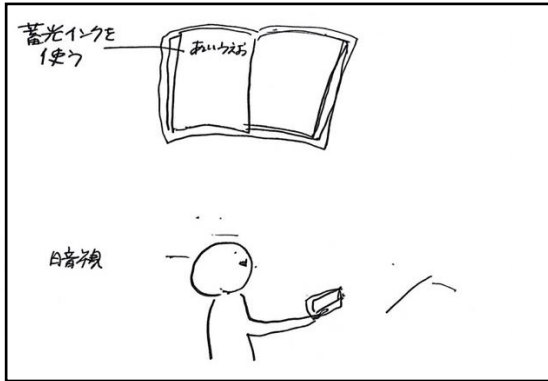
O



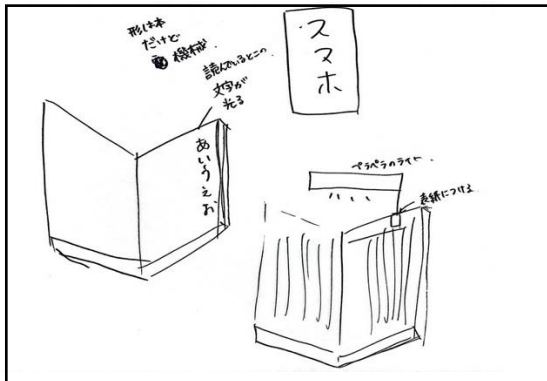
P



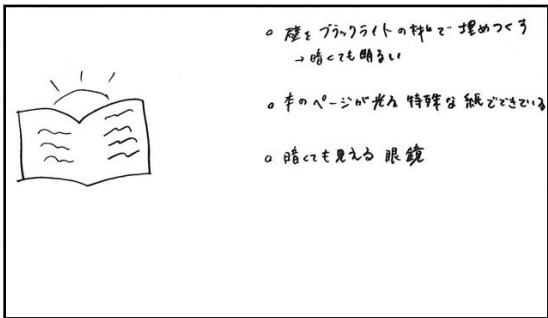
Q



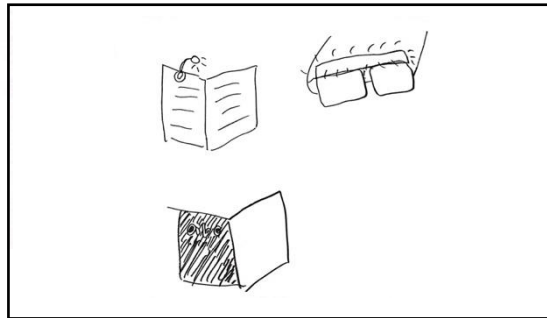
R



S



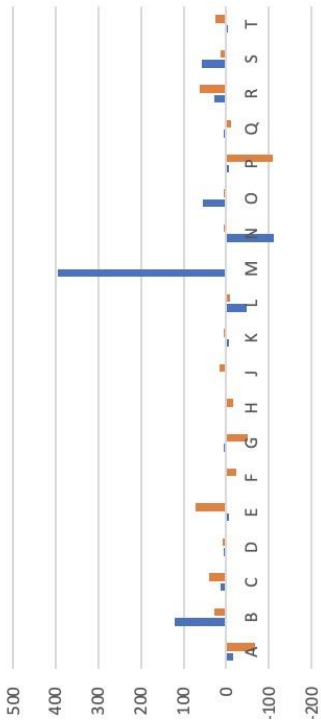
T



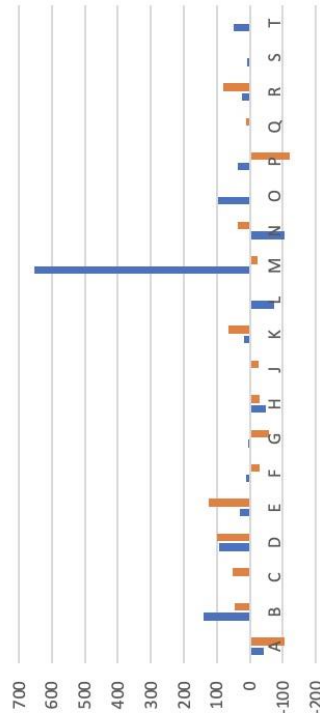
U

I. 3章でCタスク先行実験のNIRS結果

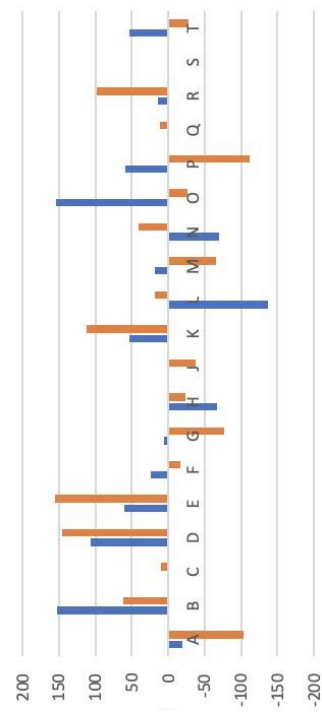
①全実験協力者のC2タスクとC3タスクの比較



ウィルコクソンの符号付き順位検定			
統計数値表による検定	正規化検定		
統計量	両側検定	統計量:z	両側P値 * : P<0.05 ** : P<0.01
64	-	0.9363	0.3491

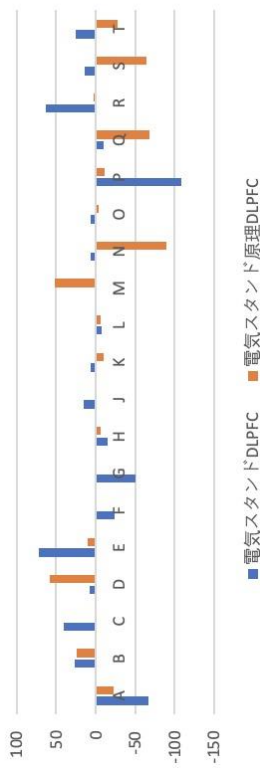


ウィルコクソンの符号付き順位検定			
統計数値表による検定	正規化検定		
統計量	両側検定	統計量:z	両側P値 * : P<0.05 ** : P<0.01
72	-	0.5879	0.5566

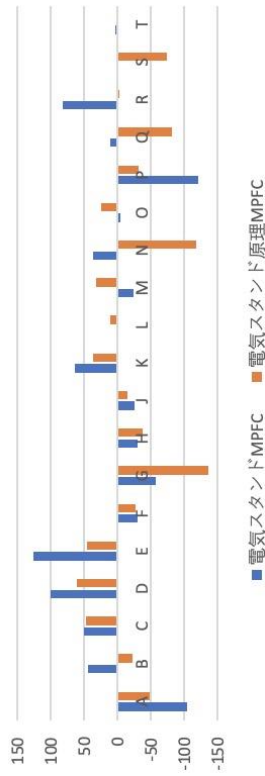


ウィルコクソンの符号付き順位検定			
統計数値表による検定	正規化検定		
統計量	両側検定	統計量:z	両側P値 * : P<0.05 ** : P<0.01
78	-	0.3266	0.7439

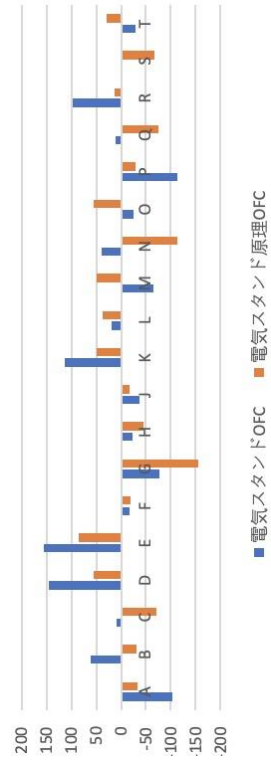
②全実験協力者の C3 タスクと A タスク間の比較



ウィルコクソンの符号付き順位検定			
統計数値表による検定		正規化検定	
統計量	両側検定	統計量z	両側P値
72	-	0.9256	0.3547
		*: P<0.05 **: P<0.01	

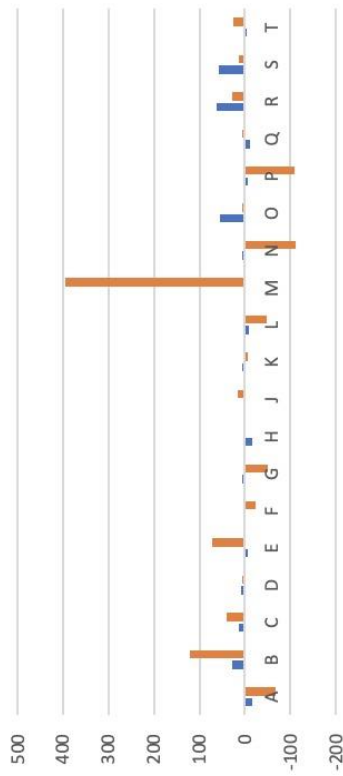


ウィルコクソンの符号付き順位検定			
統計数値表による検定		正規化検定	
統計量	両側検定	統計量z	両側P値
59	-	1.4487	0.1474
		*: P<0.05 **: P<0.01	

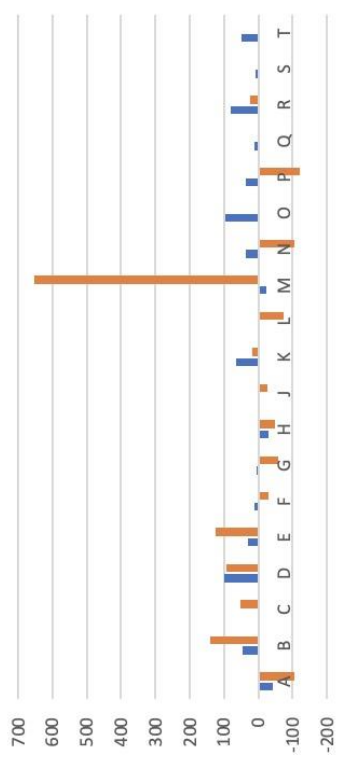


ウィルコクソンの符号付き順位検定			
統計数値表による検定		正規化検定	
統計量	両側検定	統計量z	両側P値
62	-	1.3280	0.1842
		*: P<0.05 **: P<0.01	

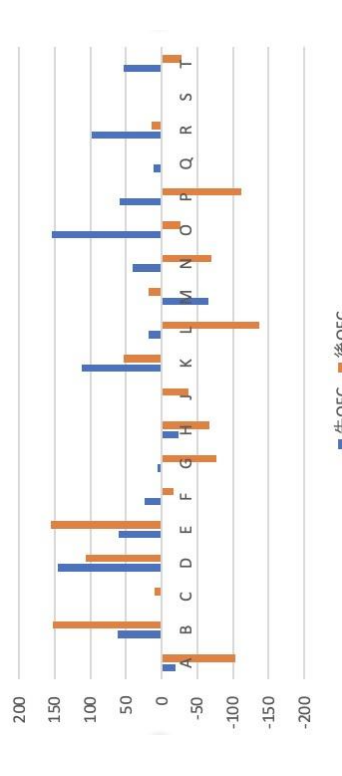
③全実験協力者の先に行ったCタスクと後で行ったCタスク間の比較



■先DLIPC ■後DLIPC



■先MPFC ■後MPFC



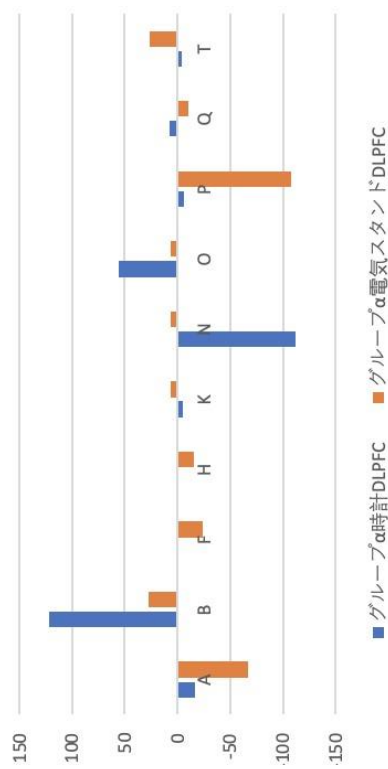
■先OFC ■後OFC

ウイルコクソンの符号付き順位検定	
統計数値表による検定	正規化検定
統計量	統計量-z
67	0.8057
-	両側検定
	両側P値
	0.4204
	* : P<0.05 ** : P<0.01

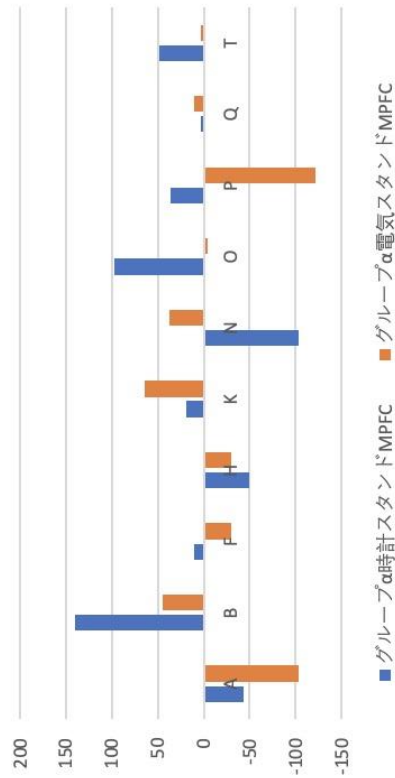
ウイルコクソンの符号付き順位検定	
統計数値表による検定	正規化検定
統計量	統計量-z
53	1.4154
-	両側検定
	両側P値
	0.1570
	* : P<0.05 ** : P<0.01

ウイルコクソンの符号付き順位検定	
統計数値表による検定	正規化検定
統計量	統計量-z
42	1.8944
-	両側検定
	両側P値
	0.0582
	* : P<0.05 ** : P<0.01

④グループ分けて、C先グループ α のC2タスクとC3タスクの比較

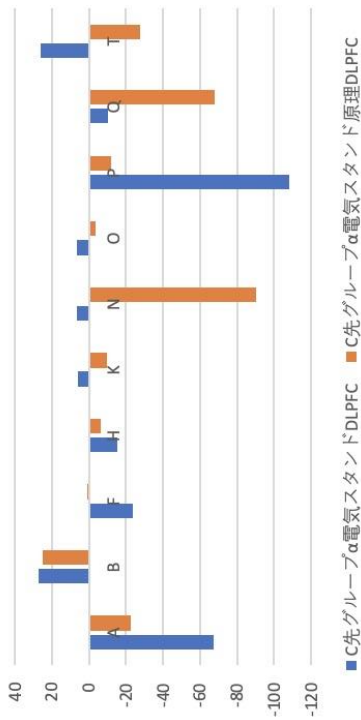


ウィルコクソンの符号付き順位検定	
統計数値表による検定	正規化検定
統計量	両側P値
16 -	1.1722
	0.2411
	* : P<0.05 ** : P<0.01

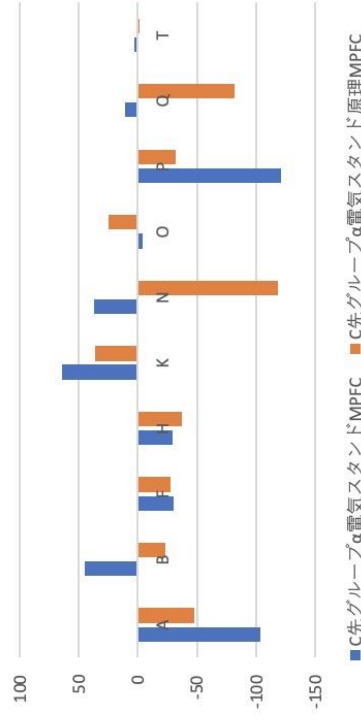


ウィルコクソンの符号付き順位検定	
統計数値表による検定	正規化検定
統計量	両側P値
16 -	1.1885
	0.3401
	* : P<0.05 ** : P<0.01

⑤グループ分けて、C先グループαのC3タスクとAタスクの比較

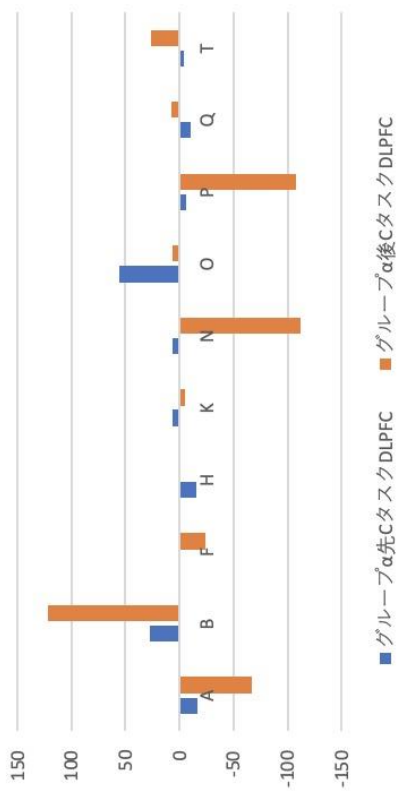


ワイルコクソンの符号付き順位検定		正規化検定	
統計数値表による検定	統計量z	両側P値	* : P<0.05 ** : P<0.01
22 -	0.5606	0.5751	

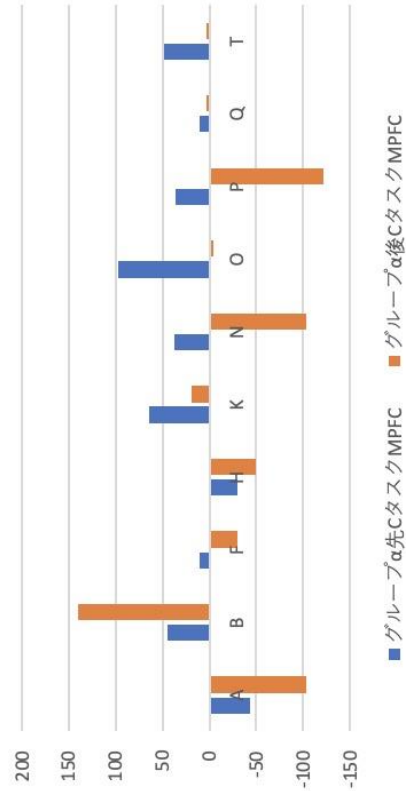


ワイルコクソンの符号付き順位検定		正規化検定	
統計数値表による検定	統計量z	両側P値	* : P<0.05 ** : P<0.01
20 -	0.7645	0.4446	

- ⑦ グループ分けて、C先グループ α の先に行ったCタスクと後で行ったCタスクの比較



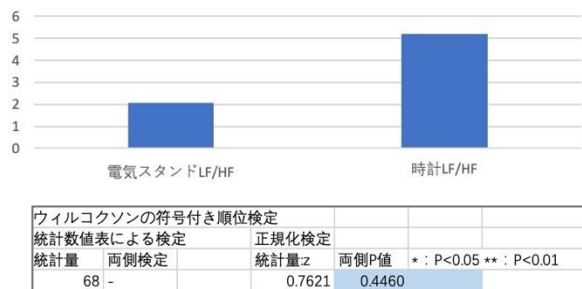
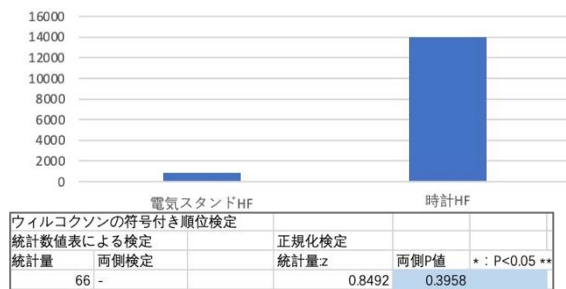
ワイルコクソンの符号付き順位検定	
正規化検定	
統計量	両側P値
18 -	0.3329
* : P<0.05 ** : P<0.01	



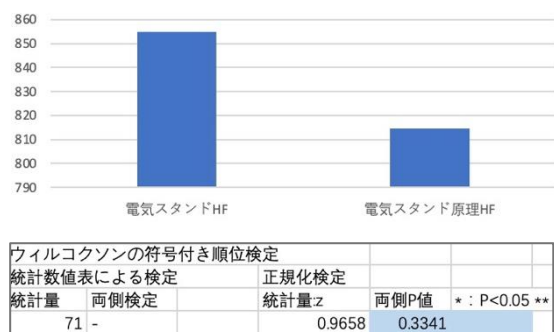
ワイルコクソンの符号付き順位検定	
正規化検定	
統計量	両側P値
7.5%有意	0.0367 *
* : P<0.05 ** : P<0.01	

J. 3章でCタスク先行実験のRRI結果

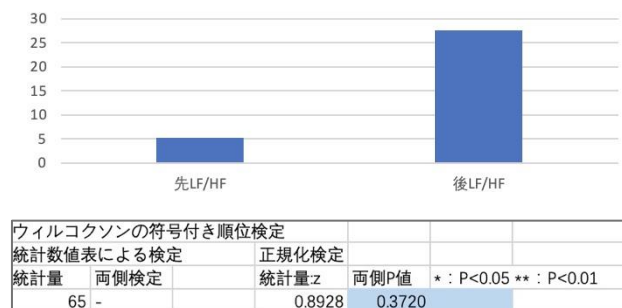
① 全実験協力者のC2タスクとC3タスクの比較



② 全実験協力者のC3タスクとAタスクの比較



③ 実験協力者の先に行ったCタスクと後で行ったCタスクの比較



K. 5章で用いた実験用紙

① 実験前の説明

この実験では、デザイン案をスケッチ描画していただきます。

まず、椅子の高さと前後の位置、あごを置く台の高さ、頭の角度などを、自分が楽になるように調整してください。

実験の所要時間は16分間程度です。

おこなってもらう内容は複数あり、それぞれ、A3用紙1枚に描いてもらいます。

チャイムが鳴る度に、実験者(張あるいは前川)が紙をめくります。

スケッチを描いてもらう紙のときは、紙の左上に書いてある説明を読んでから、その紙に鉛筆で描き始めてください。描き間違いをしてもかまいません。説明が書いてない白紙が現れたときは、その紙を見ながら、何も考えずに安静にしてください。実験が開始されてこの紙がめくられたら、最初は白紙です。

考案する対象は、モノの形状や動き、画面グラフィック等、任意です。
実現可能性は考慮しなくてよいです。

② コントロールタスク

ウォーミングアップとして、何も考えず、無理せずに、一筆書きのように線を描き続けてください。30秒経過するとチャイムが鳴り終了です。終わったら、白い紙を見ながら、何も考えずに、安静にしてください。

③ 無助言タスク

テーマ：「画期的・革新的なスマートフォン」のデザイン

デザイン案を1つ考案し、できるだけ詳しくスケッチ描画してください。文字を加えても構いません。3分経過するとチャイムが鳴り終了です。途中で終えても構いません。

④ Aタスク

ほどと同じく、「画期的・革新的なスマートフォン」のデザイン案を、たくさん考案し、それぞれをスケッチ描画してください。文字を加えても構いません。

アドバイス：「これまで使えなかった用途、場所、ユーザーを考えてみる」「人が目覚めてから就寝するまでの行動を想像してみる」「常識を打ち破る」

5分経過するとチャイムが鳴り終了です。途中で終えても構いません。

⑤ Cタスク

先ほどと同じく、「画期的・革新的なスマートフォン」のデザイン案を、たくさん考案し、それぞれをスケッチ描画してください。文字を加えても構いません。

アドバイス：「曲げる」「飛ぶ」「くっつける」「回す」「複数使う」

5分経過するとチャイムが鳴り終了です。途中で終えても構いません。

L. 5章で実験の各実験協力者の情報

実験協力者	データ名	実験日付	実験手順	利き手	トラブル	悪い.c.h	実験開始時間	最初タスク書き始め時間	最初タスク描く直前5秒間	最初タスク描く前5秒間	Aタスク書き始め時間	Aタスク描く直前5秒間	Aタスク描く前5秒間	Cタスク書き始め時間	Cタスク描く直前5秒間	Cタスク描く前5秒間			
A	A20250214150816	250214	C-A	右			15:08:14	15:09:44	15:10:14	115.2s-120s	120.2s-125s	15:18:44	15:19:10	651.2s-656s	656.2s-661s	15:13:14	15:13:43	324.2s-329s	329.2s-334s
B	A20250214155143	250214	A-C	右			15:52:09	15:53:39	15:53:49	95.2s-100s	100.2s-105s	15:57:09	15:57:25	311.2s-316s	316.2s-321s	16:02:39	16:02:52	638.2s-643s	643.2s-648s
C	A20250214163530	250214	A-C	右			16:35:55	16:37:25	16:37:44	104.2s-109s	109.2s-114s	16:40:55	16:41:44	344.2s-349s	349.2s-354s	16:46:25	16:47:25	685.2s-690s	690.2s-695s
D	A20250214173639	250214	A-C	右			17:36:43	17:38:13	17:38:50	122.2s-127s	127.2s-132s	17:41:43	17:42:25	337.2s-342s	342.2s-347s	17:47:13	17:48:20	692.2s-697s	697.2s-702s
E	A20250217105843	250217	A-C	右			10:58:37	11:00:07	11:00:48	126.2s-131s	131.2s-136s	11:03:37	11:04:15	333.2s-338s	338.2s-343s	11:09:07	11:10:00	678.2s-683s	683.2s-688s
F	A20250217115959	250217	C-A	右		4.5	11:59:54	12:01:24	12:02:55	176.2s-181s	181.2s-186s	12:10:24	12:11:01	662.2s-667s	667.2s-672s	12:04:54	12:05:40	341.2s-346s	346.2s-351s
G	A20250217150840	250217	A-C	右	Aタスク何も書いてない	4.5	15:08:58	15:10:28	15:11:21	138.2s-143s	143.2s-148s	15:13:58				15:19:28	15:21:39	756.2s-761s	761.2s-766s
H	A20250220095927	250220	C-A	右		19	10:00:09	10:01:39	10:02:08	114.2s-119s	119.2s-124s	10:10:39	10:11:23	669.2s-674s	674.2s-679s	10:05:28	10:05:58	314.2s-319s	319.2s-324s
J	A20250220112453	250220	C-A	右		17.19	11:24:42	11:26:12	11:26:36	109.2s-114s	114.2s-119s	11:35:12	11:35:31	644.2s-649s	649.2s-654s	11:29:42	11:30:00	313.2s-318s	318.2s-323s
K	A20250415110304	250415	C-A	左		17.19	11:02:21	11:03:51	11:04:10	104.2s-109s	109.2s-114s	11:12:51	11:13:25	659.2s-664s	664.2s-669s	11:07:21	11:07:38	312.2s-317s	317.2s-322s
L	A20250415131415	250415	A-C	右		4.5, 17.19	13:13:07	13:14:37	13:14:53	106.2s-111s	111.2s-116s	13:18:07	13:18:38	326.2s-331s	331.2s-336s	13:23:37	13:24:03	651.2s-656s	656.2s-661s
M	A20250415144304	250415	C-A	右	途中で電話が鳴った		14:42:12	14:43:42	14:44:10	113.2s-118s	118.2s-123s	14:52:42	14:53:25	668.2s-673s	673.2s-678s	14:47:12	14:47:45	328.2s-333s	333.2s-338s
N	A20250416092930	250416	A-C	右			9:28:55	9:30:25	9:30:52	112.2s-117s	117.2s-122s	9:33:55	9:34:26	326.2s-331s	331.2s-336s	9:39:25	9:39:48	648.2s-653s	653.2s-658s
P	A20250416151034	250416	A-C	右		5.17, 19	15:09:22	15:10:52	15:11:18	111.2s-116s	116.2s-121s	15:14:22	15:15:00	333.2s-338s	338.2s-343s	15:19:52	15:20:13	646.2s-651s	651.2s-656s
Q	A20250416154347	250416	C-A	左		4.5, 19	15:43:15	15:44:45	15:45:08	108.2s-113s	113.2s-118s	15:53:45	15:54:40	680.2s-685s	685.2s-690s	15:48:15	15:48:41	321.2s-326s	326.2s-331s
R	A20250417145238	250417	A-C	右		4.19	14:52:28	14:53:58	14:54:32	119.2s-124s	124.2s-129s	14:57:28	14:58:06	333.2s-338s	338.2s-343s	15:02:58	15:04:04	691.2s-696s	696.2s-701s
S	A20250417153514	250417	A-C	右			15:35:05	15:36:35	15:36:55	105.2s-110s	110.2s-115s	15:40:05	15:40:30	320.2s-325s	325.2s-330s	15:45:35	15:46:44	694.2s-699s	699.2s-704s
T	A20250417164517	250417	C-A	右			16:45:03	16:46:33	16:46:52	104.2s-109s	109.2s-114s	16:55:33	16:56:25	677.2s-682s	682.2s-687s	16:50:03	16:50:51	343.2s-348s	348.2s-353s
U	A20250421130724	250421	C-A	右			13:06:40	13:08:10	13:08:25	100.2s-105s	105.2s-110s	13:17:10	13:17:49	664.2s-669s	669.2s-674s	13:11:40	13:12:20	335.2s-340s	340.2s-345s
V	A20250421135513	250421	A-C	右		19	13:54:38	13:56:08	13:56:25	102.2s-107s	107.2s-112s	13:59:38	14:00:00	317.2s-322s	322.2s-327s	14:05:08	14:05:26	643.2s-648s	648.2s-653s
W	A20250422100901	250422	C-A	右		8.19	10:08:09	10:09:39	10:10:00	106.2s-111s	111.2s-116s	10:18:39	10:19:01	647.2s-652s	652.2s-657s	10:13:09	10:13:30	316.2s-321s	321.2s-326s
X	A20250422104940	250422	C-A	右		12.19	10:48:37	10:50:07	10:50:50	128.2s-133s	133.2s-138s	10:59:07	10:59:57	675.2s-680s	680.2s-685s	10:53:37	10:54:23	341.2s-346s	346.2s-351s
Y	A20250422145118	250422	A-C	右		4	14:50:40	14:52:10	14:52:27	102.2s-107s	107.2s-112s	14:55:40	14:56:12	327.2s-332s	332.2s-337s	15:01:10	15:01:34	649.2s-654s	654.2s-659s
Z	A20250422170325	250422	C-A	右	AタスクのNIRSデータエラー		17:03:14	17:04:44	17:05:48	149.2s-154s	154.2s-159s					17:08:14	17:09:11	352.2s-357s	357.2s-362s

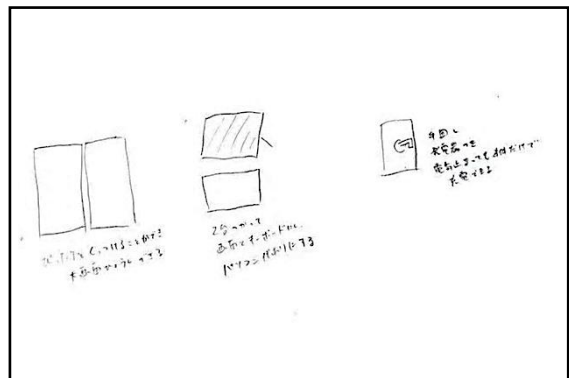
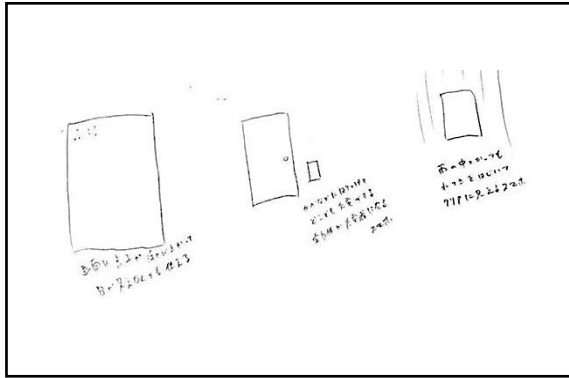
M. 5 章で実験結果のまとめ

生理指標	標本	差違項目	差違内容	分析結果番号
無助言タスクとAタスク間の比較：抽象的な助言の有無による影響をみる				
脳賦活	全実験協力者	DLPFC,MPFC,OFC	最初タスク(先に実施)が大きい	#1
	グループα	DLPFC,MPFC	最初タスク(先に実施)が大きい	#2
	グループβ	DLPFC,MPFC,OFC	最初タスク(先に実施)が大きい	#3
	グループα	HF	有意傾向あり 0.0593	#4
無助言タスクとCタスク間の比較：具体的な助言の有無による影響をみる				
脳賦活	全実験協力者	DLPFC,MPFC,OFC	最初タスク(先に実施)が大きい	#5
	グループα	DLPFC,MPFC,OFC	最初タスク(先に実施)が大きい	#6
	グループβ	MPFC,OFC	最初タスク(先に実施)が大きい	#7
			有意差なし	#8
AタスクとCタスク間の比較：抽象的な助言と具体的な助言による影響をみる				
脳賦活	全実験協力者		有意差なし	#9
	グループα	全領域		#10
	グループβ			#11
	グループα	LF/HF,LF/(LF+HF)		#12
グループαとグループβ間の比較：アイディア数による影響をみる				
脳賦活	全タスク	全領域	有意差なし	#13
	無助言タスク	LF/(LF+HF)	グループβが大きい	#14

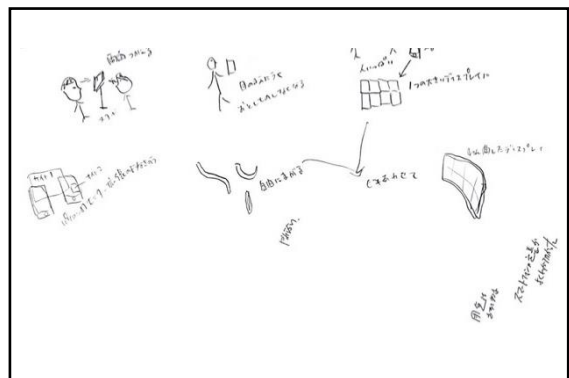
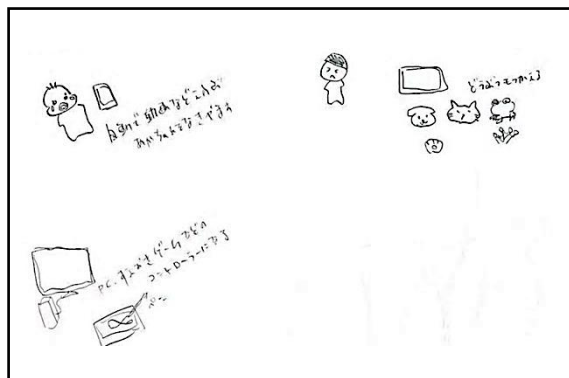
A タスク

C タスク

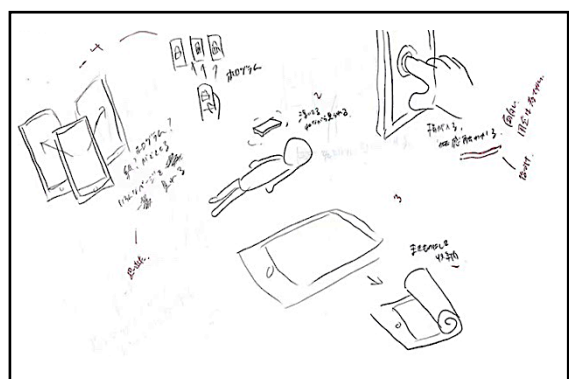
E



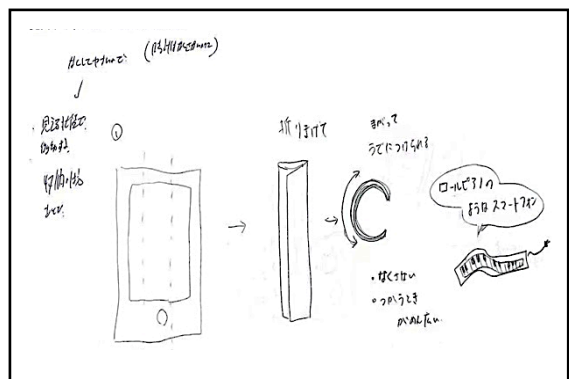
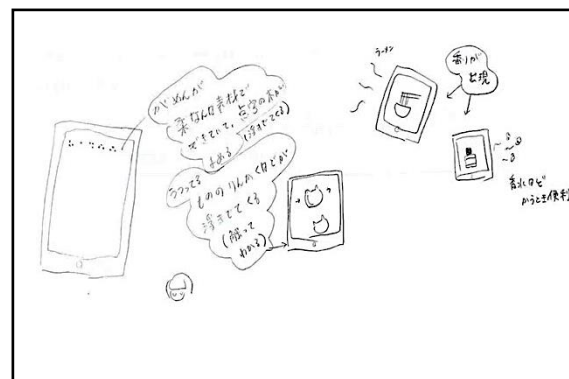
F



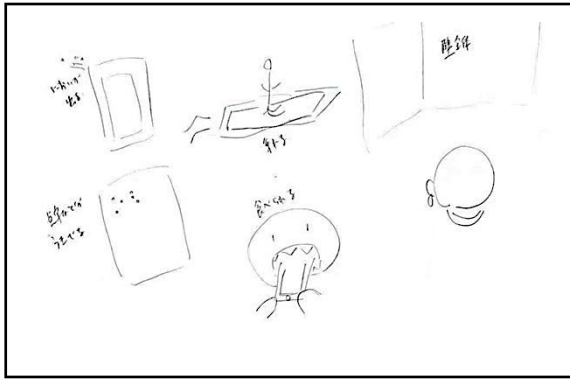
H



J

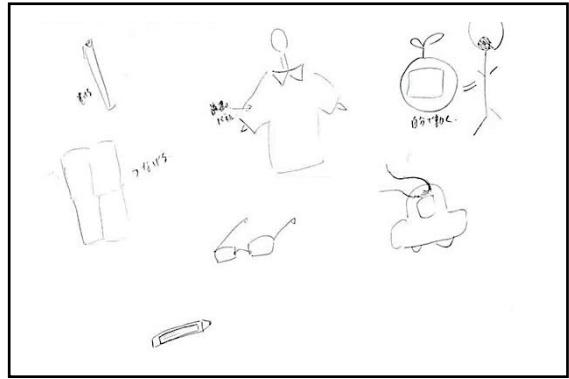


A タスク

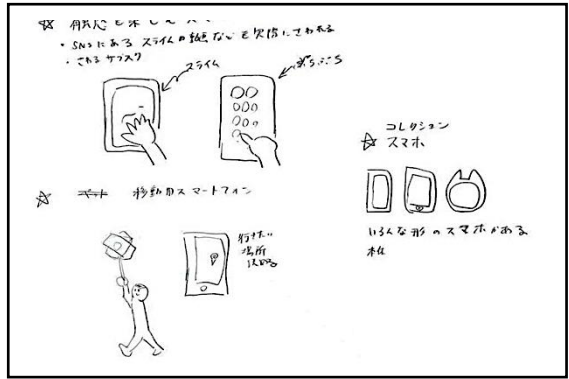
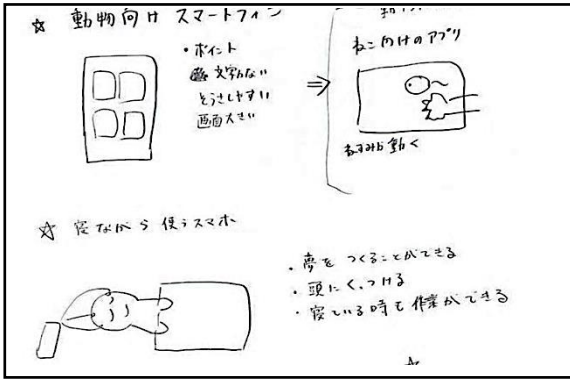


K

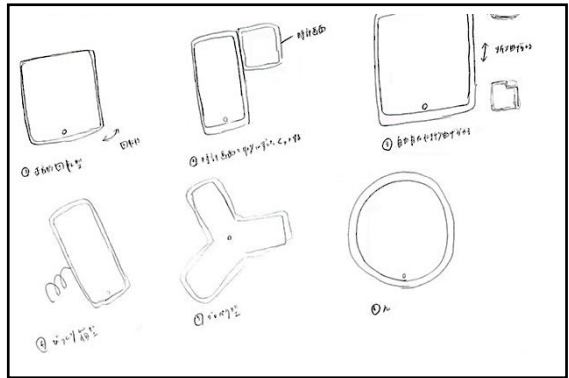
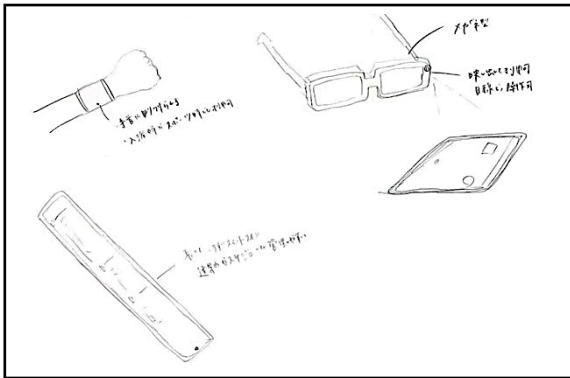
C タスク



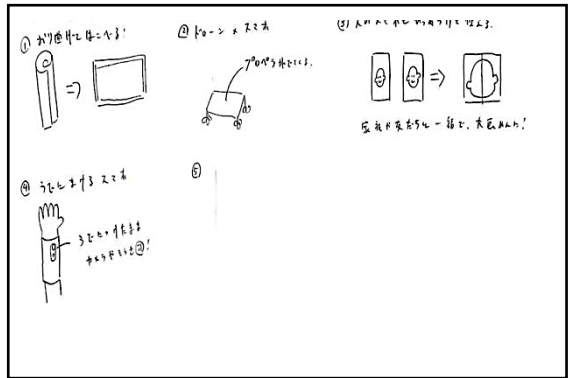
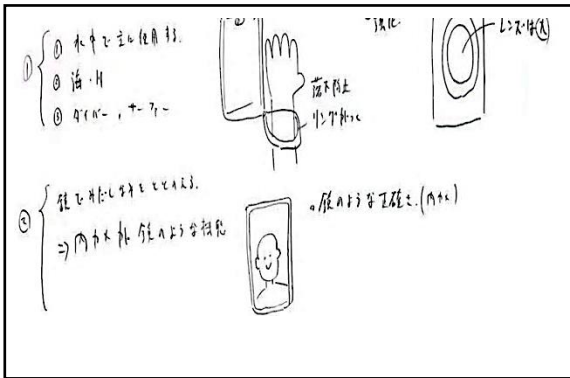
L



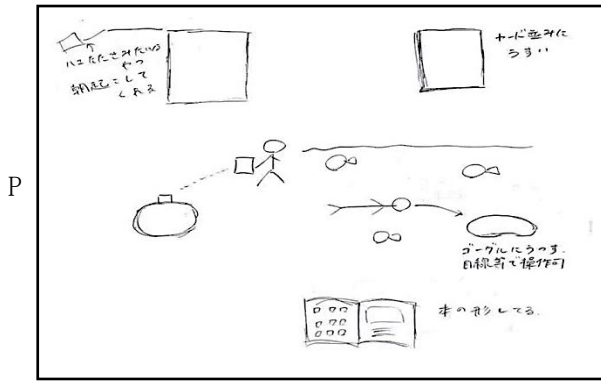
M



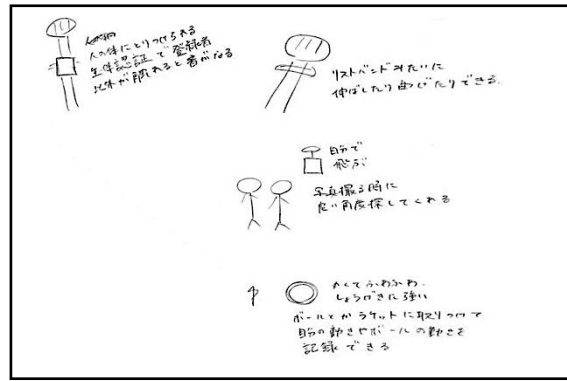
N



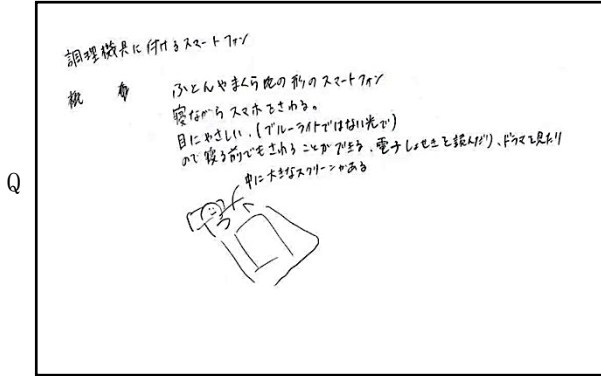
A タスク



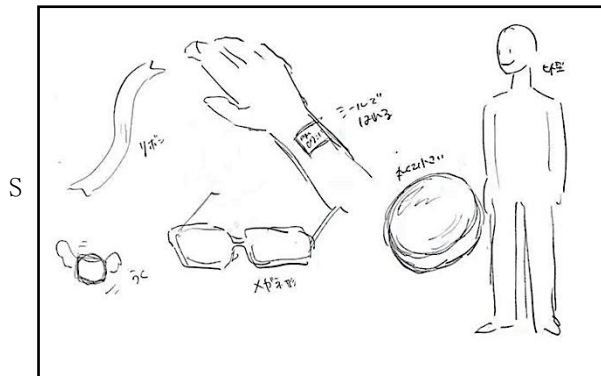
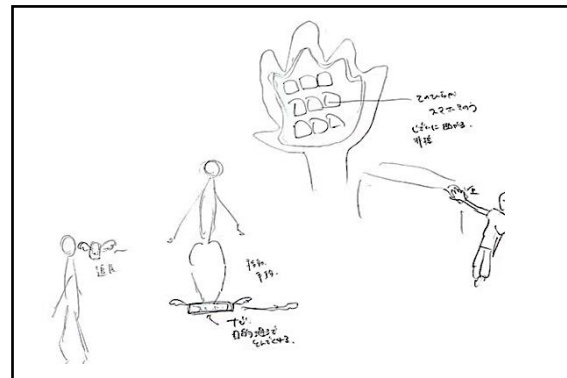
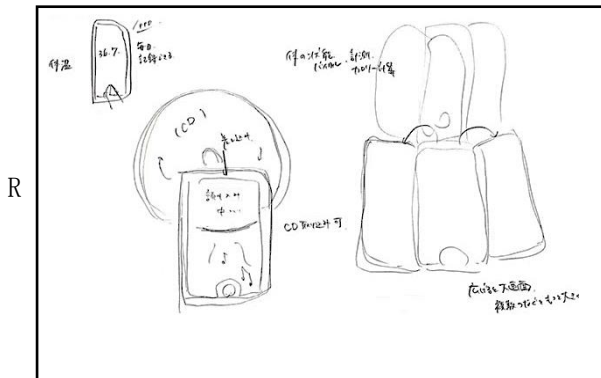
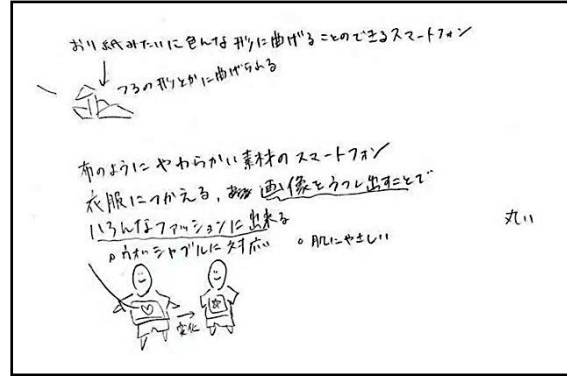
C タスク



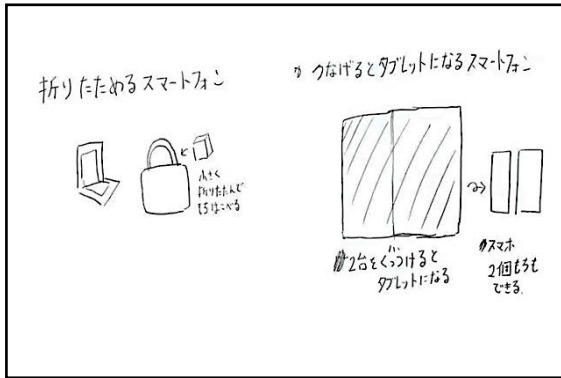
調理器具に何があるスマートフォン



折り紙が太りに色んな形に曲がる 二つのスマートフォン

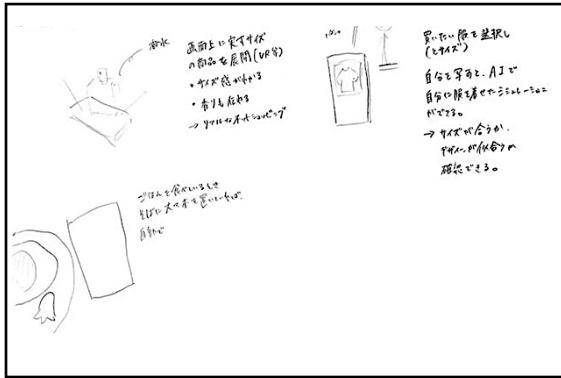
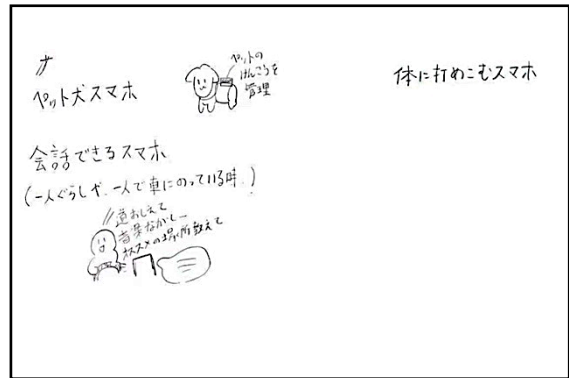


A タスク

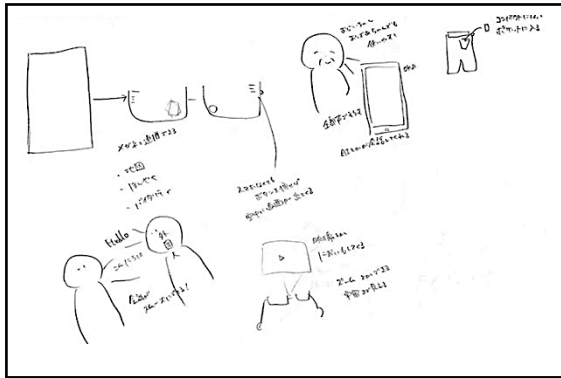
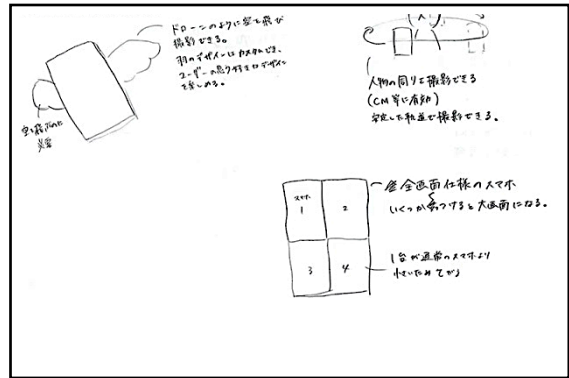


T

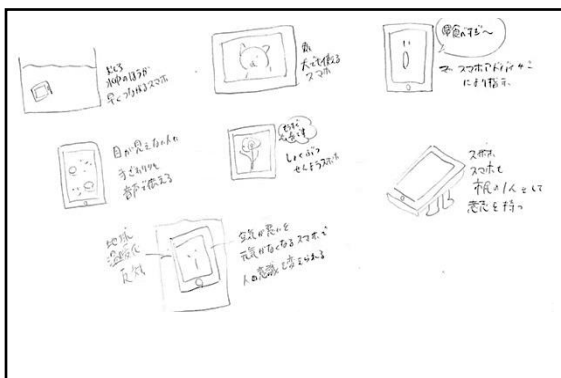
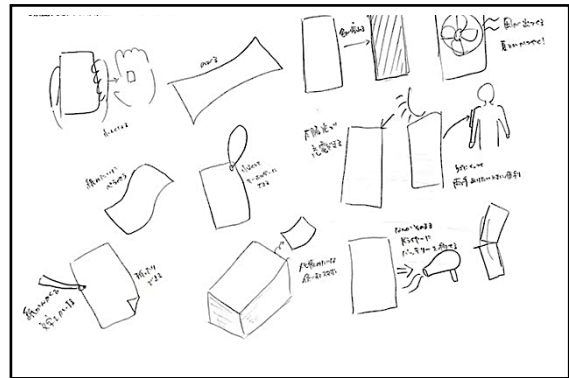
C タスク



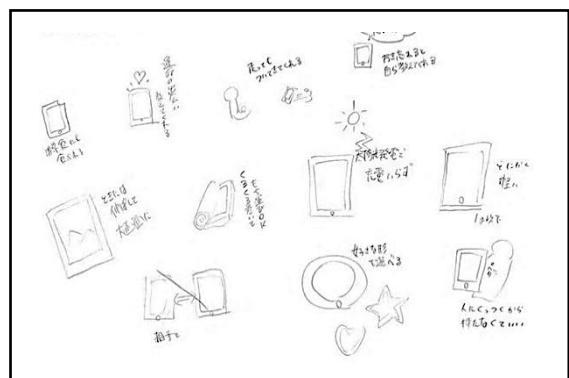
U



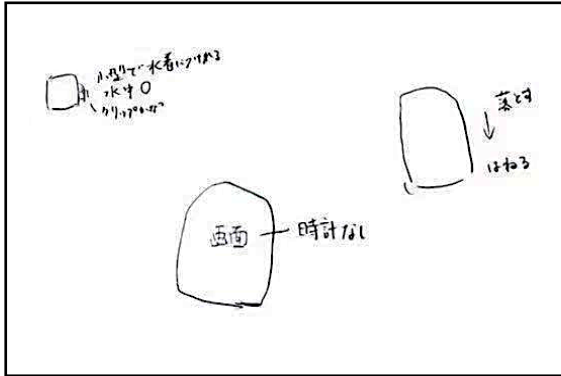
V



W

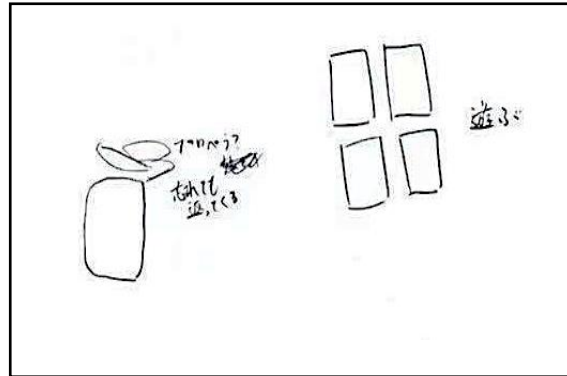


A タスク

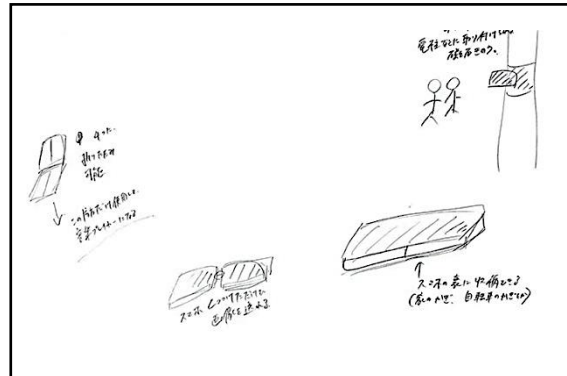
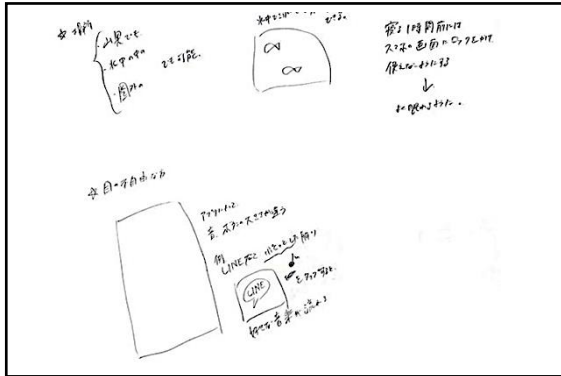


X

C タスク



Y



P. 6章で評価結果 (TTCT 応用)

		Aタスク					得点	Gタスク					得点	合計
実験協力者	手順	流暢性 (Fluency: アイデアの 量)	柔軟性 (Flexibility: アイデアの 多様性)	独創性 (Originality: 新奇性・ 独自性)	精緻性 (Elaboration: 具体性・完成 度)	条件の有効性 (提示した条件 を使えるか どうか)		流暢性 (Fluency: アイデアの 量)	柔軟性 (Flexibility: アイデア の多様性)	独創性 (Originality: 新奇性・独 自性)	精緻性 (Elaboration: 具体性・完成 度)	条件の発想性 (提示した条件 をそのまま使う か、よく発想す るか)		
A	A-C	複数のアイデアが描かれており、発想の数が多く、短時間で多様な方向を出している。 4点(高い)	「ボールにつける」「赤ちゃん用」「浮かぶ」といった、使用場面や目的が大きく異なるカテゴリにまたがっており、視点の転換が柔軟。 5点(非常に高い)	スマートフォンを“ボールにつける” “ネックレス”“赤ちゃん用”といった、通常の電子機器とは無縁の領域に転用しており、既存概念を打ち破る独自性が強い 5点(非常に高い)	スケッチの描線は簡素だが、「手を離しても浮くスマホ」「LEDがゆっくりに光る」など、機能面の補足が明確に書かれており、具体的な使用イメージが伝わる。 4点(高い)	「スポーツシーン用」「赤ちゃん用」「料理シーン用」「ネックレス型」など、用途や場面、ユーザーに応じた新たなデザインが行われました。 5点(非常に高い)	23	複数のアイデア(腕時計型・巻物型・ボール型など)が展開されており、バリエーションが豊かな。 4点(高い)	「装着型」「変形型」「運動運動型」など、スマホの機能を異なる使用文脈に展開しており、視点が柔軟。 4点(高い)	スマートフォンを“巻物”や“ボール”のような形状で捉える発想は非常にユニークで、従来の「板状デバイス」の常識を超えている。 5点(非常に高い)	描線は簡略ながら、動作説明(回転・展開など)と使用状況が明示され、機能イメージが具体的。 4点(高い)	手首に装着するスマートフォンと三つ折り式携帯電話、このデザインは既に存在する。対応するコンタクトレンズを装着すると、スマートフォンの画面が見え、プライバシーを保証する。 4点(高い)	21	44
B	A-C	5種類以上のアイデア 5点(非常に高い)	「形態変化(変形・吊り下げ)」「操作手段(視線・手の動き)」「利用環境(携帯・固定)」と、異なる観点で多面的な思考を展開。 5点(非常に高い)	「視線による操作」や「吊りして使うスマホ」というアイデアは非常に独創的。既存技術を再構成して新しい使用体験を生み出している。 5点(非常に高い)	図とメモが複数層で構成され、アイデア間の関連が線で結ばれており、思考の流れが可視化されている。 4点(高い)	条件を効果的に使用した 5点(非常に高い)	24	「自立式」「本型」「浮遊表示」「温度変化」「伸縮」「分離型」など、6件以上のアイデア 5点(非常に高い)	「形状変化(折る・伸ばす)」「感覚拡張(温かさ・光)」「使用環境(机上自立・手持ち)」と、観点が多様。 5点(非常に高い)	「あたたかいスマホ」や「QRカードが浮かぶ」など、感覚的・身体的な体験に焦点を当てた発想が非常に独創的。 5点(非常に高い)	複数の構造・操作プロセスがスケッチで視覚的に整理されている。 4点(高い)	条件を効果的に使用した 4点(高い)	23	47
C	A-C	一つの中心的なアイデア 2点(やや不足)	「日常の道具(バックミラー)」「デジタルデバイス(スマホ)」「という異領域融合が見られる。 4点(高い)	「車のミラーとして使えるスマホ」「動作に反応して自動視覚補助を行う」という発想は既存スマートデバイスと一線を画しており、独創的。 4点(高い)	スケッチ自体は簡略的で、インタラクションや操作の描写が少ない。 2点(やや不足)	振動機能のみを考慮しており、あまり役に立たない。 2点(やや不足)	14	2つの中心的なアイデア 2点(やや不足)	「曲げる空間」「身体動作と連動」「アバター操作」といった、物理・デジタル・身体を横断した視点がある。 3点(標準)	「曲がる場所」でスマホが自動で変形する」「体の動きに連動するデバイス」など、既存の折りたたみ式スマホを越えた環境応答型デザインとして独自性がある。 4点(高い)	立体構造の図解が描かれる 3点(標準的)	条件とはあまり関係がない。 1点(不足)	13	27
D	A-C	複数のアイデア、3~4案程度に留まる 3点(標準的)	通常の形態の改良、身体に埋め込み 4点(高い)	体内に内蔵するスマートフォンという案はユニークで常識を打ち破っている。 4点(高い)	3点(標準的)	条件を効果的に使用した 5点(非常に高い)	19	三角形・回転・複数面構成 3点(標準的)	折り曲げる、三角形に立てる、複数面で共有閲覧、個人利用から複数人共有 4点(高い)	三角錐型のスマートフォン、複数人が同時に使う 5点(非常に高い)	立体構造の図解や人との関係性が描かれる、機能面や操作インタフェースなし 3点(標準的)	提供された条件は使用したが、用途については特に考慮しなかった。 3点(標準的)	18	37

E	A-C	3つのアイデア 3点(標準)	「空間設置型」「建築連携型」「環境対応型」といった異なる方向性が含まれており、多様な視点からアプローチしている。 4点(高い)	壁やドアにスマートフォン機能を埋め込むという考えは、従来のモバイルデバイス概念を拡張しており、独創的。 4点(高い)	スケッチ自体は簡略的で、インタラクションや操作の描写が少ない。 2点(やや不足)	提示された条件を考慮したが、非常に曖昧である。 3点(標準的)	16	3つのアイデア 3点(標準)	3案とも構造変化型に集中しているため、利用シーンの多様性は限定的。 3点(標準)	「複数台をつなげる」「回転で機能変化する」といった要素は、既存の折り畳み端末に近いが、機械的動作を発想の中心に据えている点で独自性がある。 3点(標準)	具体性が不足。 3点(標準)	提示された条件を考慮したが、非常に曖昧である。 3点(標準的)	15	31
F	C-A	複数の発想(AI搭載スマホ、ペットとの対話、PCコントローラー化など)が描かれ、アイデア数としても豊富。 4点(高い)	発想の領域が「人とのコミュニケーション」「動物との交流」「他機器との接続」と多岐にわたり、異なるカテゴリの融合が見られる。 5点(非常に高い)	特に「動物が音声を理解してスマホを介して人とやり取りする」という発想は、他者との関係性を拡張する創造的な概念で、きわめて独創的。 5点(非常に高い)	描写は簡略ながら、使用状況(会話、ペットの反応、ゲーム操作)を丁寧に補足しており、使う場面が想像しやすい。 4点(高い)	異なるユーザーや使用シーン、用途に合わせて、3種類の興味深いデザイン案が考案されました。 5点(非常に高い)	23	アイデアの数が多く、複数人で連携する利用法、変形する構造、拡張ディスプレイなど、さまざまな方向から検討している。 4点(高い)	発想の焦点が「個人使用」から「協働・共有」に移っており、機能面(ディスプレイ連結)と社会的側面(人と人のつながり)の両方を考慮している。 5点(非常に高い)	複数のスマートフォンをつなげて1つの大画面ディスプレイにするという構想は、通常の使用観を拡張しており、非常に創造的。 4点(非常に高い)	スケッチ内には操作シーン(人同士で見せ合う、曲げて合わせるなど)が描かれ、動きや関係性が分かりやすい。ただしデバイス構造の描写は簡略。 3点(標準)	条件に基づいて、用途の異なる複数の有意義なデザイン案が作成されました。 4点(非常に高い)	20	43
H	C-A	感情・触覚・人間関係という複数要素を連鎖的に発想。アイデア数自体も多い。 4点(高い)	技術・身体感覚・心理的交流という異分野を統合している。 5点(非常に高い)	感情や肌の温度を「伝えるスマートフォン」という発想は非常に独創的。 5点(非常に高い)	図解は簡潔だが、人物や操作動作の描写により使用状況が明確。 4点(高い)	指が使えない人を考慮した点はユニークで斬新だ。強制起床機能付きスマホは面白いが、同様の代替手段がありそうだ。 4点(高い)	22	同一テーマ内で複数の構成(壁設置型、可変型、身体動作対応)を提示し、発想の展開が豊か。 4点(高い)	触覚・姿勢・構造といった異なる次元の要素を横断的に結び付け、使い方の多様化を試みている。 5点(非常に高い)	「壁をタッチする」「身体の動きに反応する」など、スマートフォンの定義を拡張する点が斬新。 5点(非常に高い)	各スケッチの描線がシンプルながら、動作・触覚・変形の意図が読み取れる構成。 4点(高い)	提示された条件に基づいて、四種類以上の興味深いデザインが生成された。 5点(非常に高い)	23	45
J	C-A	香りの提示→食品・香水・感情表現への展開が自然に連想されている。 3点(標準)	嗅覚という異なる感覚領域を情報メディアに導入しており、認知の切り替えがある。 5点(非常に高い)	「香りを出すスマホ」という日常の延長上にはない発想。五感拡張という未来的テーマ。 5点(非常に高い)	香りの種類や用途(食品・香水)まで描き込みがある。描写も分かりやすい。 4点(高い)	異なるユーザーに応じて様々な方法が生み出された。しかし、場所などの要素は考慮されていない。 3点(標準)	20	通常→折り畳み→巻き付けという連続的な形態変化を自然に描写。 2点(やや不足)	携帯機器からウェアラブルへの機能転換という異なる使用モードを提案。 5点(非常に高い)	ロールピアノという比喻で“巻けるスマホ”の新しい形態を連想させる。 5点(非常に高い)	図の流れとコメントが分かりやすく、使い方の想像がしやすい。 4点(高い)	条件に基づき、巻き上げ可能なスマートフォンを設計した。展開すると最も携帯性の高いピアノとなる。面白い。しかし、たった一つの案しかない。 3点(標準的)	19	39
K	C-A	味・食・身体感覚という複数の連想が広がり、表現も生き生きしている。 4点(高い)	視覚・聴覚中心のデバイスに「味覚」という全く異なる感覚を導入。思考の転換が明確。 5点(非常に高い)	「食べられるスマホ」や「味で情報を得る」という発想は非常に希少。 5点(非常に高い)	構造描写や使用シーンはまだ抽象的。概念的に強いが具体化が今後の課題。 3点(標準)	多くの斬新なアイデアがあり、食べられる携帯電話、乗れる携帯電話、視覚障害者向けに設計された携帯電話など、非常に革新的。 5点(非常に高い)	22	服・眼鏡・車・ペンなど複数の連想が展開されており、アイデア数が豊富。 5点(非常に高い)	異なるカテゴリ(ファッション/モビリティ/文具)を横断的に結びつけている。 5点(非常に高い)	日常物とスマホを「融合させる」発想自体は過去にもあるが、これを自律的行動や環境適応と結びつけた点が独創的。 4点(高い)	各案が簡略スケッチで示されているが、機能関係や使用状況の描写はまだ粗い。 3点(標準的)	アイデアはたくさんあるが、条件に基づいて形状を変更しただけである。 2点(やや不足)	19	41

L	A-C	動物向けスマホ、寝ながら使えるスマホ 3点(標準的)	異なるユーザー層・使用環境を考慮している。通常のスマートフォン利用を大きく拡張する。 4点(高い)	現実には存在しない独自の発想、「夢を作る」「寝ている間も操作可能」 5点(非常に高い)	絵の構図はわかりやすく、説明も簡潔 3点(標準的)	ペット用のスマートフォン、就寝時に使用できるスマートフォン。 4点(高い)	19	触感を楽しむスマホ、移動用スマホ、コレクションスマホ、アイデア数が多い 4点(高い)	感覚(触覚)、行動(移動)、所有体験(コレクション)、異なる発想 5点(非常に高い)	「触感を楽しむ」という感覚デザイン観点から新しい、「移動用スマホ」も、スマートデバイスの身体拡張的発想として面白い。 5点(非常に高い)	各スケッチに簡単な説明が添えられ、意図が伝わりやすい。デザイン詳細はやや少ない。 3点(標準的)	感覚(触覚)、行動(移動)、所有体験(コレクション)、異なる発想 4点(高い)	21	40
M	C-A	3つの異なる着想を展開しており、発想量は中程度。 4点(高い)	形態・使用部位・操作方法が多種で、柔軟な思考を示す。 5点(非常に高い)	ARメガネ+生体連動操作など、既存技術を超えたビジョンがある。 5点(非常に高い)	各デバイスの機能説明は簡潔だが、連携構造がまだ抽象的。 3点(標準的)	手に持って使うスマートフォンはすでに存在していますが、眼鏡型で映像を投影できるスマートフォンはとて新しく斬新です。長い形のスマートフォンにはあまり意味がありません。 3点(標準的)	20	6つの異なる形態を展開しており、数的豊かさが際立つ。 5点(非常に高い)	平面→立体・分離→合体・直線→曲線など、発想の軸が多様。 5点(非常に高い)	「形状変化するスマホ」は既存例もあるが、Y字型や円形などの自由発想が新しい。 4点(高い)	各アイデアの描写は簡潔で、使用状況や構造説明はまだ粗い。 3点(標準的)	多くのアイデアは形状の変更にとどまっておろ、数が多いものの、その意味はあまり大きくありません。 2点(やや不足)	19	39
N	A-C	3つのアイデア 4点(高い)	利用シーンの幅が広い。 5点(非常に高い)	「水中使用」「作業中でも操作可能な防汚スマホ」というアイデアは現実には少なく、独自の。 5点(非常に高い)	各案に対して簡潔な補足説明があり、意図が明確。 4点(高い)	用途、場所、ユーザーなどを考慮した上で、条件に合致している。 5点(非常に高い)	23	「巻ける」「飛ぶ」「連結」「装着」といった4種類のアイデア 5点(非常に高い)	形態変化(巻ける)、機能拡張(ドローン)、社会的連結(人とつながる)、身体装着(腕スマホ)と、多様な方向性を含む。 5点(非常に高い)	既存概念を超える独自の発想。日常に密着した創造性もあり、バランスが良い。 5点(非常に高い)	各スケッチに動作・機能説明が明記されており、意図が明確。 4点(高い)	提示された条件に完全に基づいて設計しましたが、一部は既存製品と類似しています。 4点(高い)	23	46
P	A-C	3つの異なるアイデア 3点(標準的)	「生活習慣支援(目覚まし)」「環境拡張(水中通信)」「情報閲覧(本型)」と、使用状況の多様性が見られる。 5点(非常に高い)	「ゴーグルを通じて水中で操作できるスマホ」という発想は斬新で、現実にはほとんど見られない。「本の形のスマホ」もユニークな表現方法で、デジタルとアナログの融合を感じさせる。 5点(非常に高い)	動作や仕組みのイメージがわかる構成 4点(高い)	使用場所、対象、用途などを考慮した。しかし、考え方があまりにも単純すぎる。 3点(標準的)	20	「リストバンド型」「飛行型」「球状」など、3つの異なる形態 4点(高い)	形態(リスト・球体・飛行)、機能(自動撮影・健康管理)、身体との関係(貼付・装着)など、複数の異なる観点からの展開が見られる。 5点(非常に高い)	現実のスマートデバイスには見られない未来的で自由な発想が多い。 5点(非常に高い)	描線はシンプルだが、動きや使用状況が理解できるレベル 4点(高い)	使用場所、対象、用途などを考慮した。しかし発想が単純すぎる。空飛ぶ自動撮影スマホは既存のドローンに類似。球体は自動で球技の動作を記録可能。 4点(高い)	22	42
Q	C-A	2点(やや不足)	「電子機器→寝具」「視覚→触覚・快適性」への思考切り替えが見られる。機能と感覚の融合という柔軟な発想。 4点(高い)	スマートフォンを枕型インターフェースにするという発想はきわめて独自の。既存の「持つ」概念から「身につけて休む」へ転換している。 5点(非常に高い)	図と文で使用状況を丁寧に説明 4点(高い)	アイデアは斬新だが、ヒントの内容とはあまり関係がない 2点(やや不足)	17	「折り紙のように曲げられる」「布のような柔らか素材」「服にくっつける」 3点(標準的)	「電子機器」から「ファッション」「身体表現」「感触」「安全」などへ視点を自在に移動。 5点(非常に高い)	新しい身体拡張型デバイスを提案。 4点(高い)	絵+注釈で具体的な使用場面を示しており(服に貼る、絵柄を変える等)、視覚的にも理解しやすい。 4点(高い)	二つのアイデアが浮かんだが、提示された条件との関連性は高くない。 2点(やや不足)	18	35

R	A-C	3種類の提案(体温記録、CD再生、連結ディスプレイ)各案に機能説明が添えられており、思考の広がりが見られる。 4点(高い)	健康管理(体温記録)、エンタメ(CD再生)、視覚体験(連結拡張)生活行動の複数側面 5点(非常に高い)	CD再生機能というレトロな発想を現代スマホに統合する。体温を自動測定して記録するスマホも、ヘルスケアとスマートデバイスの融合として創造的。ユーザー体験を広げる点で独自性が高い。 4点(高い)	各アイデアに簡単な補足説明やスケッチがある。形状や操作UIの描き込みはやや少ない。 3点(標準的)	体温を記録し、三つ折りにし、体調を記録する機能は、いずれも現在すでに存在する。CDを読み取れるのは面白い。 3点(標準的)	19	「手のひら型」「自動追尾」「浮遊型」といった複数の異なるスマホ形態、発想数が豊富。 4点(高い)	人体との関係を中心に、「装着」「自立」「追尾」という異なる機能概念を展開しており、発想の軸が多方向。デバイスと人間の関係性の変化を想像している点で柔軟性が高い。 5点(非常に高い)	現実には存在しないアイデアが多く、非常にユニーク。人間とデバイスの融合・拡張という未来的発想が強く表れている。 5点(非常に高い)	描写は概念的だ。各案の細部(構造・操作方法)はまだ抽象的。 3点(標準的)	乗れるスマホ、飛べるスマホ、とても新奇だ。 3点(標準的)	20	39
S	A-C	「腕」「眼鏡」「大型体装着」と、3つのアイデア 4点(高い)	身体の異なる部位(腕・頭・全身)にスマホを融合させるという発想が多面的。 5点(非常に高い)	視覚・装飾・情報機能が新しい。 5点(非常に高い)	図はシンプルだが、各アイデアが視覚的に明確で伝わりやすい。 4点(高い)	メガネ型の携帯電話、小型の丸型携帯電話は、常識を破るデザインである。しかし、最初の二つの条件は活用されていない。 3点(標準的)	21	「キーホルダー」「靴底」など、2つの異なる形態アイデアが描かれている。 2点(やや不足)	「アクセサリ」「ファッション」「機能性(靴底)」など、用途や設置部位の異なる観点から構想されており、柔軟な発想が見られる。 4点(高い)	「靴底につけるスマホ」や「キーホルダーのように携帯するスマホ」は、実際のスマートデバイス設計にはほとんどないユニークな発想。 5点(非常に高い)	機能や動作プロセスの説明がもう少しある 3点(標準)	2点(やや不足)	16	37
T	C-A	3種類のまったく異なる方向のアイデア 3点(標準的)	「モノ」から「生体・感情・関係」への発想転換 5点(非常に高い)	サイボーグ的・共感的発想が極めて独創的 5点(非常に高い)	3点(標準)	犬が使う携帯電話。一人暮らしの人が会話できる携帯電話、今似たようなものがある。 2点(やや不足)	18	2つしかない 2点(やや不足)	異なる機能を自由に組み合わせている 5点(非常に高い)	現実の発想を越えたモジュールの構想 4点(高い)	スケッチはシンプル 3点(標準)	分解・組み立て可能なスマートフォンと折りたたみ可能なスマートフォン。提示条件に関連するが、そのうちいずれか一方の条件のみに関連する。 3点(標準)	17	35
U	C-A	スマートフォンの未来的応用(AI試着、嗅覚連動、AR拡張、行動検知など)を複数提示。 3点(標準的)	デバイス→生活→身体→感覚→AIと、複数の思考カテゴリを自由に往復している。 5点(非常に高い)	香りを伝達するスマートフォンの、食事中的自動認識など、感覚・生活行動の融合は既存概念を越える。 5点(非常に高い)	各アイデアに機能説明(例:香水の利便性、サイズ認識など)が加えられ、シナリオ的展開が想定されている。ただし描写は簡略的。 4点(高い)	スマートフォンが物品の実寸を投影できるのは新奇だ。AI試着は既に存在する。常識を打ち破る 3点(標準的)	20	飛行型・回転型・連結型と、複数の明確な構想を提示している。 3点(標準的)	「空間」「映像」「構造」と異なる次元の発想が組み合わされている。 5点(非常に高い)	ドローン+スマホの融合は既存技術に近いが、カスタマイズ性や連結発想がユニーク。 4点(高い)	描写はシンプルだが、機能意図が明確で理解しやすい。 4点(高い)	空中で撮影するスマートフォンは、既存のドローンに類似している。人を囲んで撮影するスマートフォンは、多くのカメラと同様である。アイデアが単一で、既存製品と似通っている。 2点(やや不足)	18	38
V	A-C	「メガネ連携」「翻訳機能」「体温測定」「投影表示」「収納型」など複数のアイデア 5点(非常に高い)	健康管理・コミュニケーション・視覚表示・携帯性という異なる用途領域、発想を拡張している点 5点(非常に高い)	現実のスマホの枠を超えたアイデア、身近で自然な操作と未来的機能の両立が見られ、創造性が高い。 5点(非常に高い)	意図が伝わりやすい 3点(標準的)	三種類以上のアイデアが生まれたが、その大部分は既存のものと同類している。 3点(標準的)	21	約8~10個のアイデア 5点(非常に高い)	機能面(風が出る・バッテリー共有)、形態面(折る・分離する・分離する、使用状況(身につける・持ち運ぶ)など、多方向的発想 5点(非常に高い)	「扇風機になるスマホ」「ペーパーモード」「分離して使える」など、従来のスマホにはない創造的発想が多い。 5点(非常に高い)	各アイデアに機能説明のメモが書かれており、意図が明確に伝わる。 4点(高い)	非常に多くのアイデアが生まれ、また条件に基づいて提示された。 4点(高い)	23	44

W	C-A	発想点数が非常に多い。 5点(非常に高い)	機能(通信・反応・音声)から生物的・感情的・環境的な視点まで幅広く展開。技術・生物・心理・社会的側面を行き来する柔軟性が高い。 5点(非常に高い)	スマホを“生き物”や“心を持つ存在”として捉える発想が非常にユニーク。特に「気分が悪いと元気をしてくれるスマホ」などは感情的共感を組み込んだ新鮮な視点。 5点(非常に高い)	絵とコメントが対応しており、機能や状況(例:「水中で使える」「目が見えない人への支援」など)が明確。 4点(高い)	異なるユーザー、異なる場所、異なる用途に応じて7つのアイデアが生まれた 5点(非常に高い)	24	「食べられるスマホ」「太陽光充電不要」「形を自由に変える」「人につく」など、短時間で多数のアイデアを提示。 5点(非常に高い)	各案の説明は簡潔だが、行為(食べる/貼る/伸ばす)や文脈が伴っており、行動イメージが明確。 4点(高い)	“スマホを食べる”“人にくっつく”といったユーモラスで身体的な発想は非常に独創的。発想の飛躍度が高い。 5点(非常に高い)	機能(充電・形状・記憶・通信)だけでなく、感情・身体・環境との関係まで拡張。多角的な思考展開。 5点(非常に高い)	提示された条件に基づいて、多くの興味深いデザインが生み出されました。例えば、太陽光で充電できるもの、伸縮可能なサイズのもの、食べられる携帯電話、自動で通知してくれる携帯電話などです。 5点(非常に高い)	24	48
X	C-A	2つのアイデア 2点(やや不足)	持つ→装着の転換が優れている 2点(やや不足)	「スマートウォッチ」との共通性はあるものの、このスケッチの注目点は“時計の延長としてスマホ機能を最小化する”方向にあること 3点(標準的)	操作・状況の描写が不足 1点(不足)	2点(やや不足)	10	2つのアイデア 1点(不足)	「空間拡張」と「ネットワーク連動」という2つのまったく異なる次元で思考 2点(やや不足)	2点(やや不足)	スケッチとしては非常にミニマル 1点(不足)	1点(不足)	7	17
Y	A-C	3つの明確なアイデア 3点(標準的)	「使用環境(屋外・水中)」と「ユーザー属性(視覚障がい者)」という異なる発想軸から考えられている。発想の方向性に多様性がある。 4点(高い)	「水中でも使えるスマホ」は実用的かつ創造的なアイデア。「音で操作するスマホ」は、アクセシビリティとデザインを結びつける視点が非常に優れている。 5点(非常に高い)	スケッチ自体は簡素だが、コンセプトが明確で伝わりやすい。 4点(高い)	異なる場所やユーザーに応じて効果的な設計を行う。 4点(高い)	20	数量として十分なアイデア 4点(高い)	「携帯デバイス」「都市インフラ」「デザイン表現」という異なる発想 5点(非常に高い)	「スマホを都市の一部にする」「自転車に収納する」「色が変化する」など、既存スマホの枠を超えた発想。生活空間・交通・インフラなど社会的文脈と融合しており、独自性が高い。 5点(非常に高い)	3点(標準的)	四つ折りの携帯電話。写真を撮るときに壁などに自動吸着できる。条件に少し依存する。 3点(標準的)	20	40