

学位論文

日中作業時の精神生理状態マネジメントに関する研究

Management of the Psychophysiological State
during Daytime Tasks

2013年12月

澤井 浩子

京都工芸繊維大学

日中作業時の精神生理状態マネジメントに関する研究

目次

第1章 序論.....	1
1-1 はじめに.....	1
1-2 対象とする日中作業.....	3
1-3 精神生理状態の定義.....	4
1-4 パフォーマンス発揮の基盤となる精神生理状態の構造.....	6
1-5 技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法.....	8
1-6 光環境が精神生理状態に及ぼす影響.....	11
1-6.a 光の伝達経路.....	11
1-6.b 光が精神生理状態に及ぼす影響に関する先行研究.....	12
1-7 知的作業時の精神生理状態マネジメント手法.....	14
1-8 研究の意義と目的.....	17
1-9 本論文の構成.....	18
1-10 引用・参考文献.....	20
第2章 技能系作業時の精神生理状態マネジメント;技能習熟過程における精神生理状態の定量的評価.....	24
2-1 緒言.....	24
2-2 EOG 時系列変動指標を用いた技能習熟過程の評価.....	27
2-2.a 実験 A 方法;腕による技能系作業.....	27
2-2.b 実験 A 結果.....	32
2-2.c EOG 時系列変動指標を用いた技能習熟過程の評価に関する考察.....	42
2-3 技能習熟過程評価に適した指標の検討;動作の種類による分類.....	44
2-3.a 実験 B 方法;手や指による技能系作業.....	44
2-3.b 実験 B 結果.....	51
2-3.c 技能習熟過程評価に適した指標の検討に関する考察;動作の種類による分類.....	54
2-4 技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法まとめ.....	56
2-5 引用・参考文献.....	58
第3章 知的作業時の精神生理状態マネジメント;光環境が精神生理状態に及ぼす影響.....	60
3-1 緒言.....	60
3-2 方法.....	63

3-2.a 被検者.....	63
3-2.b 照明条件および装置.....	63
3-2.c 実験手順.....	67
3-2.d 解析指標および解析方法.....	69
3-2.e 統計解析.....	70
3-3 照度比較結果.....	72
3-3.a 照度上昇による影響.....	72
3-3.b 3時間光曝露による影響.....	78
3-4 光源比較結果.....	83
3-4.a 照度上昇による影響.....	83
3-4.b 3時間光曝露による影響.....	86
3-5 考察.....	93
3-5.a 異なる照度への照度上昇と、その後の光曝露が精神生理状態に及ぼす影響.....	93
3-5.b 異なる光源での照度上昇と、その後の光曝露が精神生理状態に及ぼす影響.....	94
3-5.c 考察まとめ.....	95
3-6 引用・参考文献.....	97
第4章 知的作業時の精神生理状態に影響を及ぼす光環境要件の検討.....	100
4-1 緒言.....	100
4-2 方法.....	101
4-3 統計解析.....	102
4-4 結果.....	103
4-5 考察.....	108
4-6 日中知的作業時の精神生理状態マネジメント手法まとめ.....	113
4-7 引用・参考文献.....	115
第5章 総括.....	116
謝辞.....	121
付録1.....	122
付録2.....	123
付録3.....	125

第1章 序論

1-1 はじめに

1日24時間の社会において、ヒトは活動し休息をとる生活を毎日繰り返している。ヒトの生体リズム周期（平均的な値）は24時間よりもやや長い（Middleton et al., 1996、Czeisler et al., 1999）、夜明けの光によってリズムが調整され（Khalsa et al., 2003）、24時間社会に適応することができている。1日の中で、活動期には働き、学び、余暇を過ごし、休息期には睡眠をとる。就労者世代では、24時間のうちほとんどが仕事と睡眠に費やされ、残りの時間が余暇の生活時間となる。しかしながら、長時間労働や過労、睡眠時間の減少が問題となっており、これら生活シーンの時間的・負荷的バランスは崩れ、生活の質向上が求められている。

政府では、2007年に仕事と生活の調和（ワーク・ライフ・バランス）憲章を定め、仕事と生活の調和がとれた生活を実現するための指針を提示している（内閣府）。仕事と生活の調和が実現した社会とは、「国民一人ひとりがやりがいや充実感を感じながら働き、仕事上の責任を果たすとともに、家庭や地域生活などにおいても、子育て期、中高年期といった人生の各段階に応じて多様な生き方が選択・実現できる社会」とし、その中の一つとして、健康で豊かな生活のための時間が確保できる社会を条件に掲げている。また昨今は、生活の質（Quality of Life : QOL）向上に関わる様々な活動や研究が行われており、仕事に関する社会の視点は、技術や生産性の向上はもとより、生活の質向上へも広がっている。

以上のことから、長時間労働を避け、仕事と生活の調和がとれた生活を実現し、生活の質向上を図ることが現代社会の課題である。このような生活を実現する方策の一つとして、生理環境工学の立場からはまず、作業時のパフォーマンスを向上させることを挙げることができる。パフォーマンスを向上することができれば、作業効率向上による労働時間削減や生産性向上に寄与し、同時に、達成感や充実感、満足感を得ることができる。さらに、仕事の満足感が高いほど幸福度も高い（内閣府経済社会総合研究所、2012）という調査結果があり、生活の質向上を図ることも可能である。

パフォーマンス内容は、職種や業務によって異なり、知的作業、技能系作業、身体作業など様々なものが存在する。一方で、ヒトが活動するときには必ず、睡眠・覚醒機能、生体リズム、自律神経活動、情動など様々な精神生理機能が関与している。そのため、パフォーマンス向上を図る

ためには、関与する精神生理機能を作業に適した状態にすることが、どのような作業においても共通して重要である。しかし、パフォーマンス向上のみを追究すると、疲労や精神状態の悪化などを招くため、作業の充実感、満足感を得ることができる精神生理状態の範囲内において、パフォーマンス向上を目指すことも重要である。そして、作業の充実感、満足感を得ることができると、他の精神生理機能に影響が波及し、さらなるパフォーマンスの向上および心身の健康促進という好循環の関係性が期待される。これらの好循環の関係性は、仕事以外の生活シーンに対する心身のゆとりを導き、ワーク・ライフ・バランスの実現、生活の質向上につながると考えられる。

本研究では、上記の作業に適した精神生理状態、パフォーマンス、作業充実感・満足感の関係を管理することを精神生理状態マネジメントと位置づけ、心身の健康促進および生活の質向上を目指し、日中作業時の精神生理状態マネジメントに関して研究を行った。

1-2 対象とする日中作業

日本において、就労者の職業や業務内容は多種多様である。総務省政策統括官による日本標準職業分類では、専門的・技術的職業従事者、事務従事者、販売従事者など 12 種類の大分類があり、小分類レベルでは 329 種類に職業が分類されている。2012 年の日本全国における各職業従事者数の割合は、図 1-2-1 の通りである。事務従事者が最も多く（19%）、次いで専門的・技術的職業従事者（16%）、生産工程従事者・販売従事者（各 14%）であった。

知的生産性研究委員会（2008）では、知的活動を情報処理、知識処理、知識創造の 3 段階に分類しており、事務従事者や専門的・技術的職業従事者の業務内容は、知的作業と位置づけることができる。また、生産工程従事者は、主に、手によるモノづくりに関わる業務内容であり、技能系作業と位置づけることができる。本研究では、就労者の日中作業として、異なる作業形態であり、多くの従事者が存在する知的作業と技能系作業に着目し、研究を進めた。

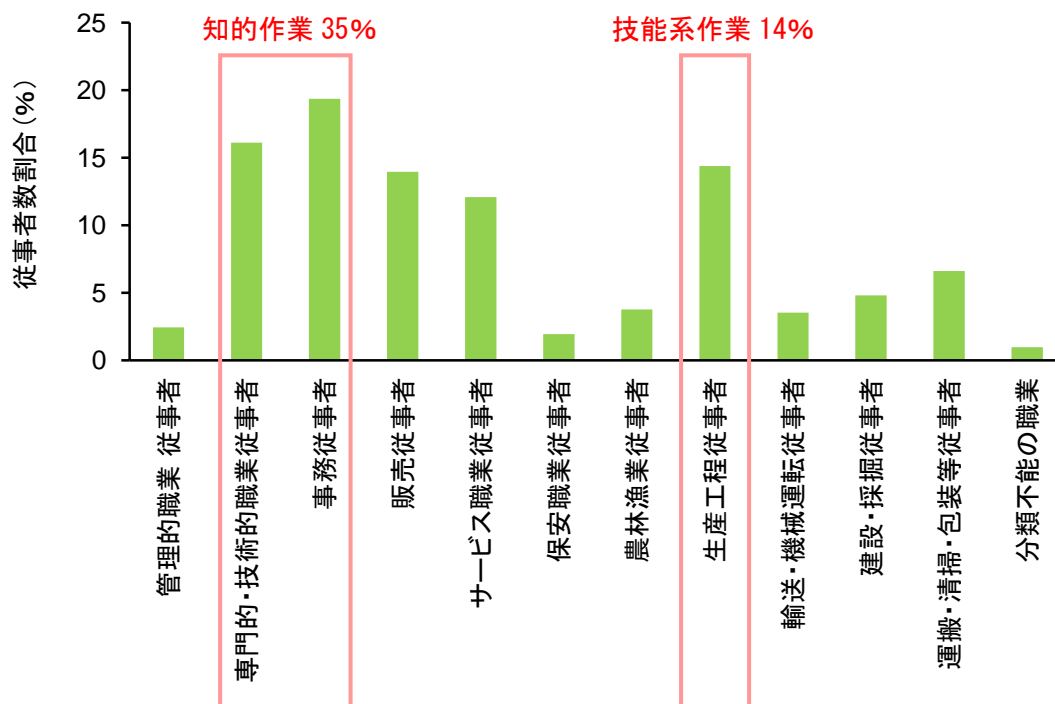


図 1-2-1 各職業従事者数の割合

（総務省「労働力調査」2012 をもとに従事者数割合を算出）

1-3 精神生理状態の定義

日中作業において、パフォーマンス向上により、生産性や成果物の質、安全性の向上を図ることが可能となる。本研究では、生産性や成果物といったアウトプットをもたらす行為そのものを、パフォーマンスと表現し、特に、成果物の質が重視される技能系作業と、知的作業におけるパフォーマンスを扱った。

技能系作業と知的作業におけるパフォーマンスとは、知覚、認知、記憶、思考、運動などを伴う一連の行為である。作業の難易度上昇によってパフォーマンスが低下するのはもちろんのこと、例えば、睡眠不足によって反応時間の遅延（Jewett et al., 1999）やエラー増加（Jewett et al., 1999、Van Dongen et al., 2003）といったパフォーマンス低下が起こる。また、精神的負荷によって記憶機能が低下し（Schoofs et al, 2008 など）、情動は思考のレパートリーに影響を及ぼす（Fredrickson et al, 2005）ことが報告されている。このように、パフォーマンスは、心理状態（精神状態）、生理状態を基盤としているため、より良いパフォーマンスを発揮するには、関与する精神生理機能を作業に適した状態にすることが重要である。このような、パフォーマンス、心理状態、生理状態の関係は、Moore-Ede（1993）により概念図として示されており、参考とした（図 1-3-1）。

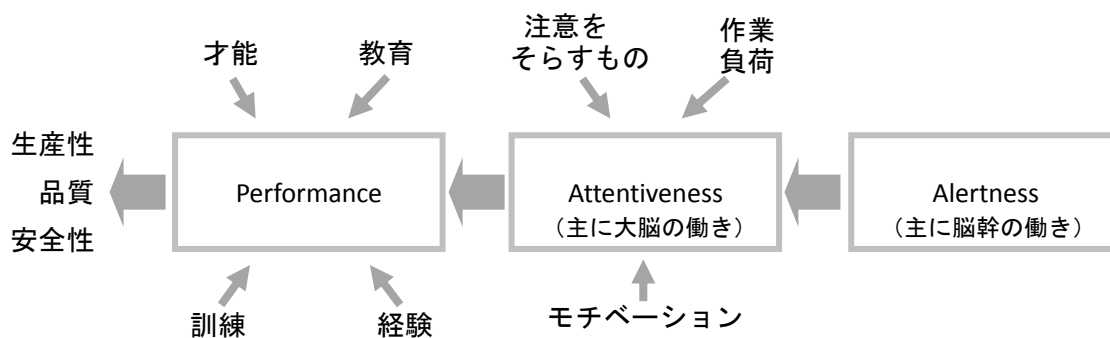


図 1-3-1 パフォーマンス、心理状態、生理状態の関係（Moore-Ede, 1993 を参考に作成）

図 1-3-1 において、Attentiveness とは、作業時を想定した場合、作業に適した主に大脳レベルの注意・集中の状態、Alertness とは、作業に適した主に脳幹¹レベルの脳活動の状態と解釈する

¹ 脳幹：視床下部を含む間脳や、中脳、橋、延髄の総称であり、睡眠・覚醒、自律神経活動などの様々な生命維持機能を司る中枢。間脳を含めない場合もあるが、本研究では前述のように定義した。

ことができる。生産性、品質、安全性向上につながるパフォーマンスを発揮するには、大脳レベル、脳幹レベルともに作業に適した活性状態であることが望ましい。活性度が高すぎても、パフォーマンスは低下するため (Yerkes et al., 1908)、至適状態を目指す必要がある。

実際に作業をしているときを考えると、作業が面白くないと眠くなったり、疲れているとやる気がでなかったりと、大脳レベルおよび脳幹レベルの活性状態は互いに影響を及ぼし合っている。よって、パフォーマンスには大脳レベルおよび脳幹レベルの活性状態の複合的な影響が及ぶため、本研究では、**Attentiveness** と **Alertness** を総合して、「作業時の至適精神生理状態」と定義した。そして、心身の健康促進および生活の質向上を目指し、作業に適した精神生理状態をマネジメントする手法を検討した。作業時の至適精神生理状態の概念については、1-4 で述べる。

1-4 パフォーマンス発揮の基盤となる精神生理状態の構造

パフォーマンス発揮の基盤となる作業に適した精神生理状態をマネジメントする手法を検討するため、Attentiveness、Alertness に影響を及ぼす因子について、Moore-Edo(1993)と小山(2011)による概念図をもとに整理した(図 1-4-1)。ここでは、Attentiveness に至るまでの注意・集中の状態を示す尺度を、心理的(精神的)活性度、Alertness に至るまでの脳活動の状態を示す尺度を、生理的活性度と定義した。

Attentiveness の尺度である心理的活性度は、主に大脳レベルの状態であり、モチベーションや作業負荷などの影響を受ける。作業環境も影響因子であり、作業環境の快・不快、明るさや温度は、心理的活性度に影響を及ぼし、生理的活性度への刺激ともなる。Alertness の尺度である生理的活性度は主に脳幹レベルの状態であり、生体リズム、覚醒や緊張状態を土台とし、それぞれの因子が直前の主睡眠からの経過時間、累積断眠量、サーカディアンリズム(概日リズム)の位相、興奮/抑制、代謝、高照度光などによって影響を受ける。そして心理的活性度の基盤となっている。また、パフォーマンスは心理的活性度と生理的活性度を基盤とするが、パフォーマンスが向上することで、作業の充実感を得ることができるため、パフォーマンスと心理的活性度は互いに作用している。

これらのことから、心理的活性度と生理的活性度は互いに作用する関係にあるため、総合して、統合的活性度²(精神生理状態)と定義する。また、統合的活性度が作業に適した活性度に至った状態を至適精神生理状態と定義すると、パフォーマンス向上のためには至適精神生理状態を達成することが重要であり、なおかつ、パフォーマンスが向上すると統合的活性度が向上し、至適精神生理状態に近づく方向に寄与する関係にある。よって、心身の健康促進および生活の質向上を目指すには、作業に適した精神生理状態を達成することをきっかけとした「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」、または、パフォーマンス向上をきっかけとした「パフォーマンス向上→作業の充実感向上→至適精神生理状態の達成」という2種類の手順により、精神生理状態マネジメントの検討を進めることができる。

さらに、光は心理的活性度、生理的活性度の両方に影響を及ぼす因子であり(図 1-4-1)、その生体への影響は数多く報告されている(第1章 1-6、1-7 参照)。したがって本研究では、「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」という精神生理状態マネジメントにおいて、至適精神生理状態を達成するための光環境要件に着目をした。また、「パフォーマンス

² 統合的活性度：知的作業の場合は、知的活性度(NEO、2007)と表現する場合もある。

向上→作業の充実感向上→至適精神生理状態の達成」という精神生理状態マネジメントにおいては、パフォーマンスを向上させる手法に着目をした。

1-5では、技能系作業時における「パフォーマンス向上→作業の充実感向上→至適精神生理状態の達成」という精神生理状態マネジメント手法について述べる。また1-7では、「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」という光環境に着目した精神生理状態マネジメント手法について述べる。

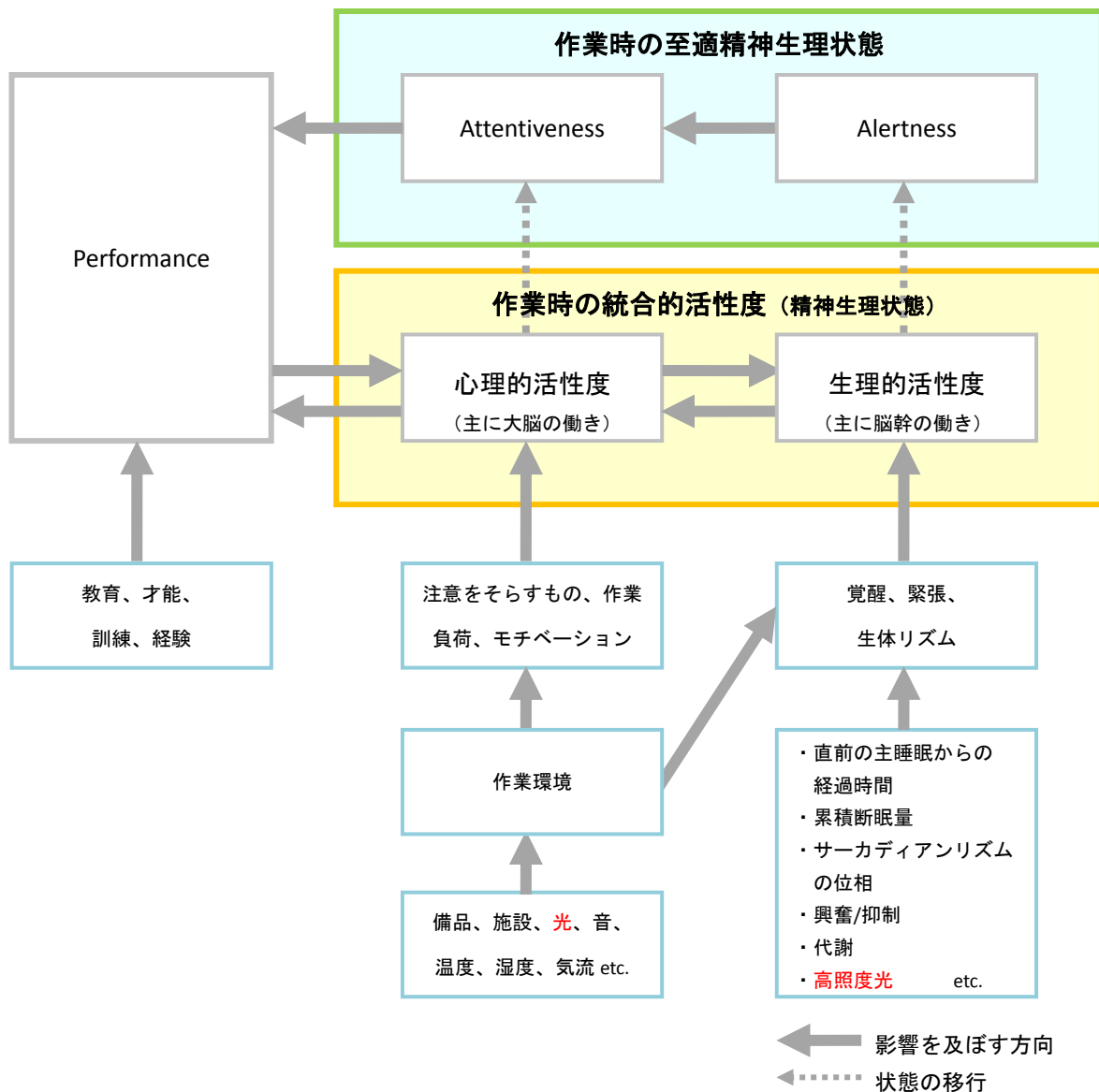


図 1-4-1 パフォーマンス、心理状態、生理状態の関係

(Moore-Ede, 1993、小山、2011 をもとに作成)

1-5 技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法

生産工程従事者（職人）を想定した技能系作業において、作ったものを商品にするには、ある一定の質を達成する必要がある。工場生産の現場であっても、工芸品などの制作現場であっても、基準となる質を達成しなければ、商品として扱うことができない。特に、伝統工芸品の制作現場では、高品質が要求される。これまで、技能系作業のパフォーマンスに関する研究では、作業スピードなど量的な指標を基準に研究が行われてきた。したがって本研究では、成果物の質に関わるパフォーマンスに重点を置き、「パフォーマンス向上→作業の充実感向上→至適精神生理状態の達成」により、心身の健康促進、生活の質向上を目指すという精神生理状態マネジメント手法に着目した。

成果物の質向上を目指すには、作り方の手順を覚えるだけでは不十分であり、技能を習得する必要がある。さらに技能を習得するには、成果物の質に影響を及ぼす技能のこつ（技能素³）を習得する必要がある。しかしながら、技能素は暗黙知であるものが多く、習得することは容易ではない。特に高度な技能を必要とする伝統工芸品の制作現場において、非熟練者が高度な技能を身に付けた熟練者になるまでには長い年月を要する。よって、技能素を定量的に抽出することができれば、技能習熟の効率化、つまりパフォーマンス向上の効率化を図ることができると考えられる。

伝統技能の技能素を定量的に評価した研究は数少ない。その中で、包丁研ぎの熟練者では、研ぎ動作における腕の筋放電量に顕著なリズムがみられることや（加藤 他、2006）、金網製作の熟練者では、指の動作に加速度が低下する「間」が存在し、加速度変化に一定のリズムがみられることが報告されている（田中 他、2008）。また、熟練者では動作のリズムが確立されるだけでなく、動作と呼吸のリズムが同期することや（伊藤 他、2009）、動作中の注視時間にメリハリがあることも報告されている（Iue et al., 2009）。伝統技能以外の作業においても、熟練者には重要な作業に時間を割くといった行動のメリハリや（武雄 他、2010）、動作のリズムがみられることが示されている（田口 他、2002）。以上のことから、動作のリズムが技能素の一つであると考えられる。

一方、これら動作のリズムを発揮するには、その基盤となる精神生理状態が重要となる。1-3で述べたように、注意、睡眠不足、情動など精神生理状態に関わる様々な因子がパフォーマンス発揮に影響を及ぼすため、成果物の質向上を目指すには、動作だけでなく、精神生理状態も考慮

³ 技能素：科学研究費補助金 基盤研究(B)課題番号 20300037 において、技能のこつを技能素と定義した。

する必要がある。しかしながら、技能系作業時の精神生理状態、行動特性、成果物の質の関係性は明らかになっていない。

したがって本研究では、「パフォーマンス向上→作業の充実感向上→至適精神生理状態の達成」という精神生理状態マネジメントを実施するため、技能系作業における成果物の質に関わるパフォーマンス向上に関し、技能習熟過程における精神生理状態、行動特性、成果物の質の関係性を評価した。

技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法に関する概念図を図 1-5-1 に示す。

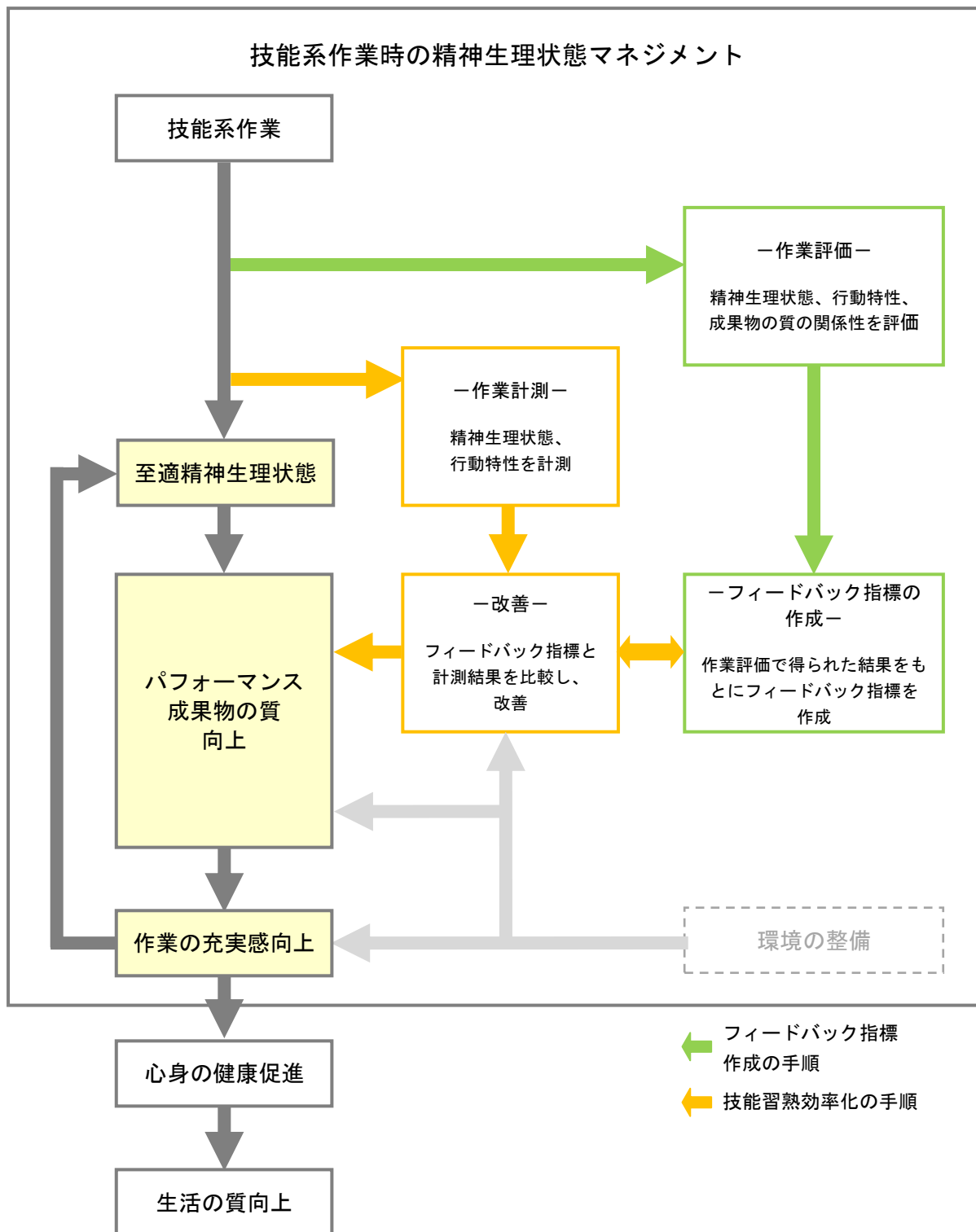


図 1-5-1 技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法の概念図

1-6 光環境が精神生理状態に及ぼす影響

1-4 で述べたように、「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」による精神生理状態マネジメントに関し、至適精神生理状態を達成するための光環境に着目をした。ここでは、光が精神生理状態に及ぼす影響と、その伝達経路について整理した。

1-6.a 光の伝達経路

光は心理的活性度、生理的活性度の両方に影響を及ぼす。光が生体に及ぼす作用は、色や形といったイメージ形成に関わる視覚的作用と、視覚以外の生体リズムや睡眠・覚醒機能、自律神経活動などに関わる非視覚的生理作用がある。そして、視覚的作用と非視覚的生理作用が複合的に統合的活性度である精神生理状態（心理的活性度と生理的活性度）に影響を及ぼす。視覚的または非視覚的作用を引き起こす光の伝達経路を図 1-6-1 に示す。

角膜から入った光（光子＝フォトン）は、眼球内を通過し、網膜へ到達する。網膜内の錐体や桿体で受光された光は電気的活動に変換され、水平細胞やアマクリン細胞と接続をもつ双極細胞を経由し、神経節細胞⁴に伝達される。その後、活動電位に変換され、視神経、視交叉を経て、各部位に信号が伝達される（安藤、1995）。また、錐体、桿体以外の光受容体であるメラノプシンを含む神経節細胞（ipRGCs⁵）で、直接受光する経路も存在する（Berson et al.、2002）。そして、色や形の知覚、または生理的な作用を引き起こすに至る。その間に、角膜や水晶体などで紫外域の波長は吸収され（植田、2010）、S、M、L 錐体⁶、桿体⁷、ipRGCs の分光感度によって可視光範囲の波長（380 - 780nm）内で選択的に受光される。

視交叉以降の光の伝達経路として、視覚的作用では、外側膝状体⁸を経由し、大脳視覚野に信号が伝達され、色や形などのイメージ形成に関与する（阿山、1995）。非視覚的生理作用では、サーカディアンリズムの中枢である視交叉上核⁹を経由し、室傍核¹⁰、内側前脳束¹¹、脳幹網様体¹²、松果体¹³といった様々な部位に信号が伝達され（本間、1995、Saper et al.、2005、Lockley et al.、

⁴ 神経節細胞：網膜上にあり、光による情報を活動電位に変換後、視神経に伝達する。

⁵ ipRGCs：メラノプシンという視物質を含み、光を直接受光することができる神経節細胞の一種。

⁶ S、M、L 錐体：色覚に関わる視細胞であり、分光感度のピーク波長が短い方から S、M、L である。

⁷ 桿体：暗所視や薄明視レベルの明るさのときに、明るさ知覚に関わる視細胞。

⁸ 外側膝状体：視床の一部であり、神経節細胞と大脳視覚野の間で信号を中継する。

⁹ 視交叉上核：視床下部の一部であり、視交叉の上に位置するサーカディアンリズムの中枢。

¹⁰ 室傍核：視床下部の一部であり、自律神経活動やホルモン分泌などに関与する。

¹¹ 内側前脳束：視床下部と中脳被蓋や網様体などの連絡をとる神経線維の束。

¹² 脳幹網様体：脳幹に広がり、睡眠・覚醒、運動など様々な機能に関与する。

¹³ 松果体：視床の一部であり、メラトニンの分泌を行う。

2006、小山、2009)、生理作用に関与する。また、視交叉を經由し視蓋前域¹⁴に伝達された信号 (Lockley et al.、2006) は、対光 (瞳孔) 反射に関与する。

1-6.b 光が精神生理状態に及ぼす影響に関する先行研究

光が精神生理状態に及ぼす影響のうち、生理的活性度への影響として、光に曝露する時刻によって生体リズムの位相変化が起こる (Khalsa et al.、2003)。また、夜間就寝前に光に曝露することで、就寝時に分泌されるリズムをもつメラトニン¹⁵の分泌抑制 (Brainard et al.、2001) や就寝時の体温低下抑制、徐波睡眠量減少が起こり、青色光や短波長成分を多く含む光 (相関色温度¹⁶が高い光) では、その影響がより大きいことが報告されている (Koyama et al.、2011 など)。逆に、日中に光に曝露することで、覚醒度上昇、パフォーマンス向上 (反応時間の短縮、Phipps-Nelson et al.、2003)、夜間メラトニン分泌量増大 (Mishima et al.、2001) がみられ、照度増大によって覚醒度が増大し (萩原ら、1997)、また、短波長成分増大によって主観的パフォーマンスが向上する (Viola et al.、2008) ことが報告されている。

心理的活性度への影響として、照明が暗いと視作業に支障をきたし、照明が明る過ぎるとグレアにより不快感が生じる。一方、日中に高照度光に曝露することで、季節性感情障害¹⁷の改善 (Lewy et al.、1981) がみられたことが報告されている。

以上のことから、光は精神生理状態に様々な影響を及ぼし、その影響強度は、照度、相関色温度、波長に起因すると考えられる。しかしながら、様々な研究結果が報告されているものの、日常生活における日中の光環境が精神生理状態に及ぼす影響強度に関し、照度、相関色温度、波長の関係性の全容は明らかとなっていない。そこで、本研究ではそれらの関係性に着目をした。

¹⁴ 視蓋前域：中脳の一部であり、対光 (瞳孔) 反射に関与する。

¹⁵ メラトニン：睡眠に関わるホルモンであり、ヒトなどの昼行性の動物では、夜間に分泌、昼間に抑制されるリズムを持つ。

¹⁶ 相関色温度：黒体 (すべての光を吸収し、放射する物体) の温度で光源色を表した指標。

¹⁷ 季節性感情障害：日長 (日照時間) と関連し消長する気分障害 (うつ病など)。(粥川、2009)。

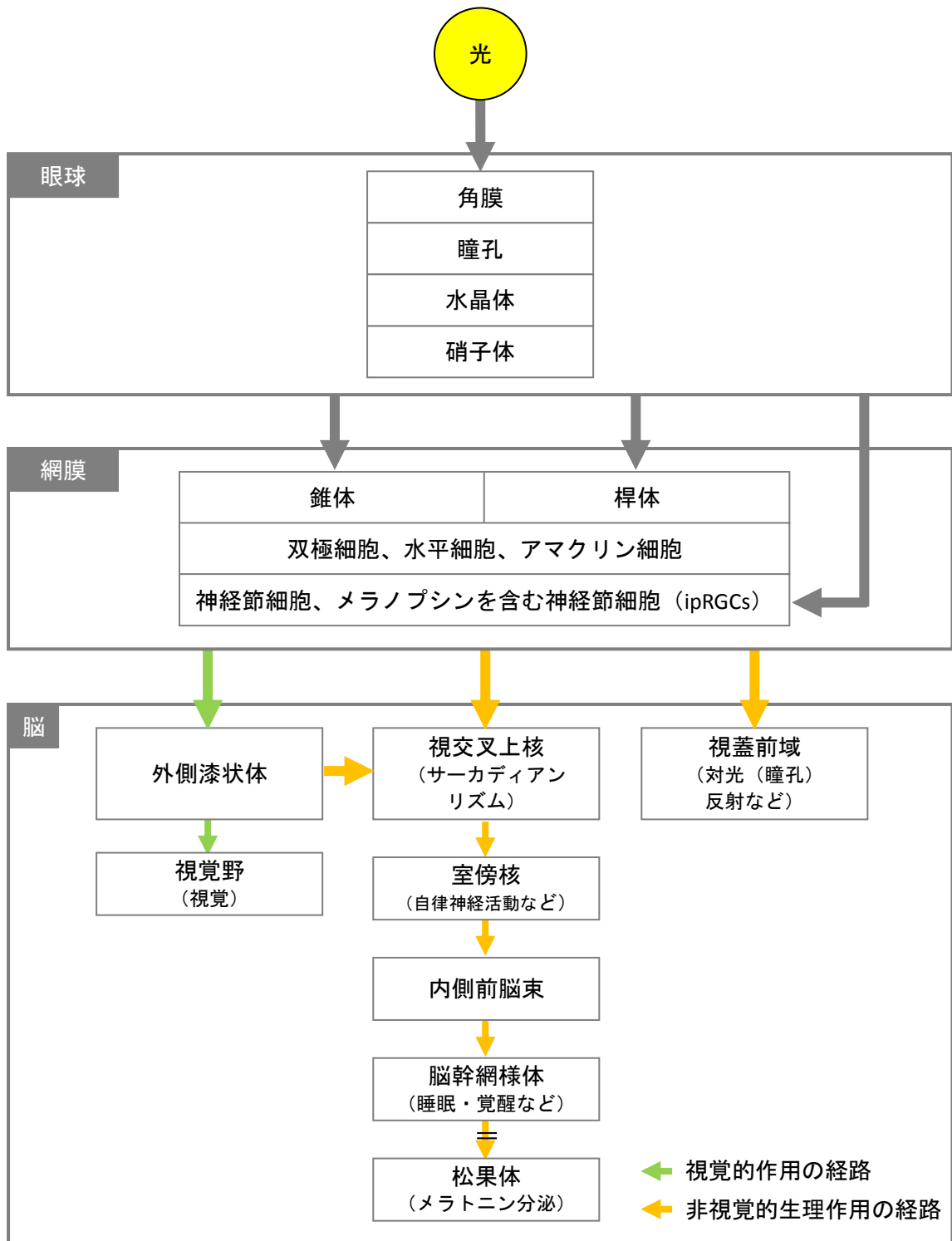


図 1-6-1 光の視覚的作用と非視覚的生理作用の主な経路
 (安藤、1995、阿山、1995、Berson et al.、2002、本間、1995、Saper et al.、2005、
 Lockley et al.、2006、小山、2009 をもとに作成)

1-7 知的作業時の精神生理状態マネジメント手法

事務従事者や専門的・技術的職業従事者（オフィスワーカー）を想定した知的作業において、個人の作業パフォーマンスを定量的に評価することは困難である。市川ら（2001）は、知的生産 = （社外論文 + 社外発表 + 社内技術資料 + 特許件数） / （人件費 + 材料費）とし、知的作業のパフォーマンス評価を試みている。しかし、開発過程での貢献や、コミュニケーション、アイデア創造のような、数値にはできないが、最終的な企業・団体の生産性に寄与しているパフォーマンスは数多い。そこで本研究では、至適精神生理状態に重点を置き、「至適精神生理状態の達成 → パフォーマンス向上 → 作業の充実感向上」により、心身の健康促進、生活の質向上を目指すという精神生理状態マネジメント手法に着目した。

知的作業時の精神生理状態に影響を与える要件として、作業内容やモチベーション、オフィス環境（光、音、温度、湿度、気流）など様々なものがある。その中で昨今、照明などの光は、イメージ形成や印象といった視覚に関わるだけでなく、生物時計（Khalsa et al., 2003）や自律神経活動（道盛ら、1997、Mukae et al., 1992）などに影響を及ぼすことが報告されている。1-6で示したように、光の視覚的作用では、光による信号は網膜、外側膝状体を經由し、大脳視覚野に伝達され、イメージ形成や印象に関与する（阿山、1995）。一方、非視覚的生理作用では、光による信号は網膜を經由し、視交叉上核に伝達され、生物時計や自律神経活動などに影響を及ぼす（本間、1995、Saper et al., 2005、Lockley et al., 2006、小山、2009）。光は、脳幹レベル、かつ大脳レベルで精神生理状態に影響を及ぼすため、本研究では光環境に着目した。

オフィスで知的作業を行う際、照明は必要不可欠な存在である。日中作業では様々な活動を行い、自然光を併用して室内を照明しているため、有彩色光¹⁸照明ではなく、黒体軌跡¹⁹近傍の白色光照明（以下、白色照明）を用いることが必要条件である。これまで、室内白色照明として、主に蛍光灯が使用されてきた。しかし昨今、省電力化や技術の進歩により、青色励起光²⁰と黄色蛍光体を組み合わせた白色LEDや調光システム（照度、相関色温度）が普及し、日常生活において様々な光環境を選択できるようになりつつある（NEDO、2010）が、知的作業に適した照明環境要件が確立されているとは言い難い。さらに、日常的にオフィスで使用されている様々な光環境が、日中作業時の精神生理状態に及ぼす影響強度を定量化する方法は確立されていない。また、光は様々な視覚的作用、非視覚的生理作用を引き起こすため、利用者の好みだけで照明条件

¹⁸ 有彩色光：色味のある光⇔白色光。

¹⁹ 黒体軌跡：黒体の温度変化に伴う色の軌跡。

²⁰ 励起光：蛍光体を発光させるための光。

を選択するのではなく、精神生理状態の観点から、知的作業に適した照明を選択する必要があると考える。

したがって本研究では、知的作業を対象とし、「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」により精神生理状態をマネジメントするため、日常的にオフィスで使用されている様々な光環境（照度、分光分布）が、精神生理状態に及ぼす影響を評価し、精神生理状態の観点から知的作業に適した光環境要件を検討した。

知的作業時の精神生理状態マネジメント手法に関する概念図を図 1-7-1 に示す。

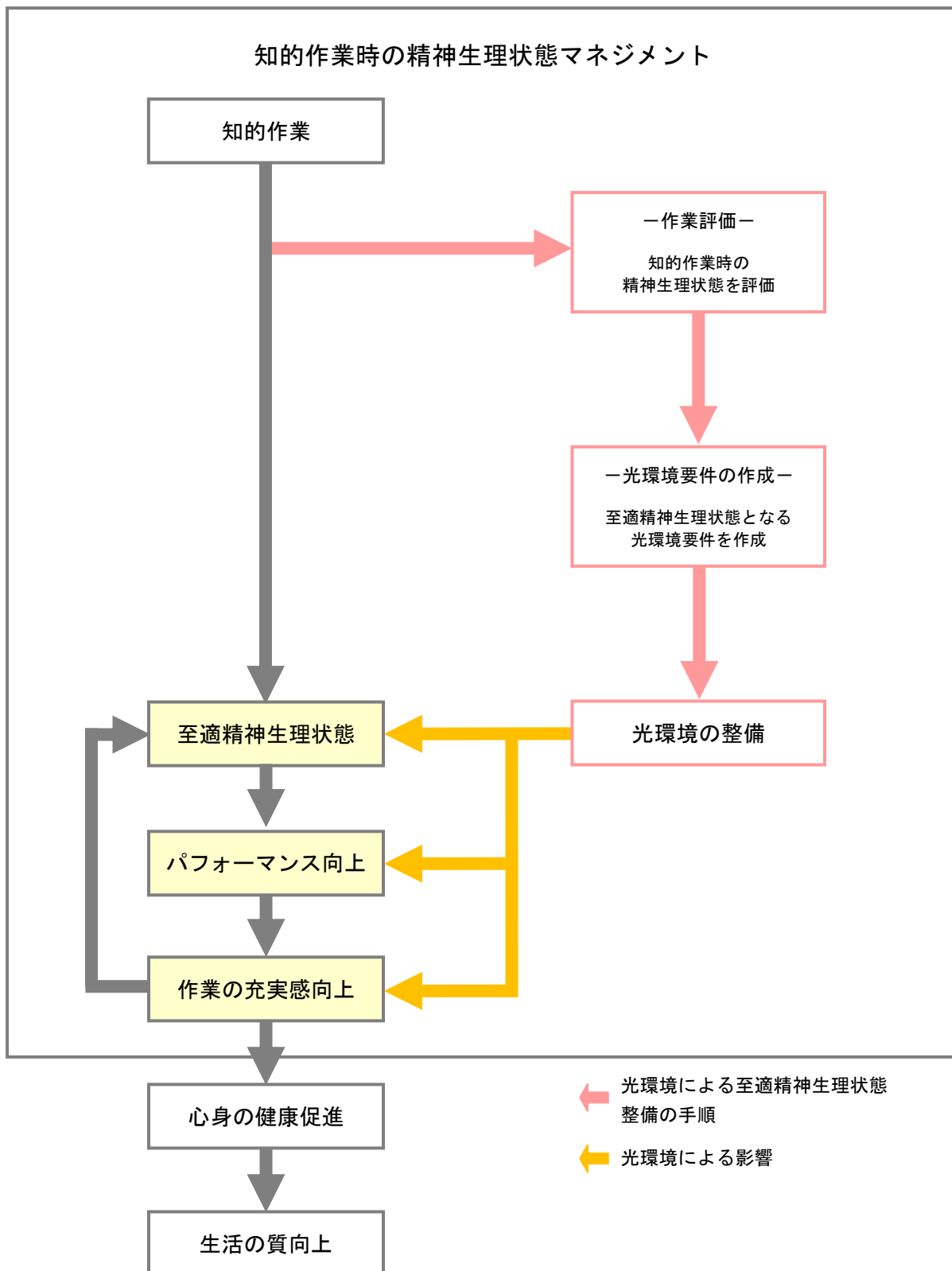


図 1-7-1 知的作業時の精神生理状態マネジメント手法の概念図

1-8 研究の意義と目的

本研究では、心身の健康促進、生活の質向上を目指し、作業の充実感向上および至適精神生理状態の達成につながるパフォーマンス向上を試みることで、また、パフォーマンス向上および作業の充実感向上につながる至適精神生理状態の達成を試みることで、という 2 種類の手順によって、精神生理状態をマネジメントする手法について検討することを目的とした。

パフォーマンス向上に関する研究は、これまで数多く実施されてきた。技能系作業に関して、パフォーマンス評価の指標として、作業量やエラー数が着目されてきた。また、熟練者と非熟練者の比較により、動作などの評価が実施されてきた。これらのことから、本研究ではパフォーマンス評価として成果物の質に着目し、なおかつ、技能習熟過程におけるパフォーマンスと精神生理状態の相互関係に着目している点に新規性がある。そして、成果物の質向上に関わる精神生理状態をマネジメントする手法について検討を行うことで、実社会において、製品の質向上を目指すことが可能であり、社会的に意義のあることであると考えられる。

知的作業に関して、光環境が生体に及ぼす影響は、これまで多くの研究が実施されてきた。照度、相関色温度、波長といった各光学特性に関して、様々な知見が得られている。また、光治療のような臨床的応用も進んでいる。一方、技術の進歩によって、日常生活では様々な照度、相関色温度、光源の選択肢が用意されているが、知的作業時に適した光環境要件は、各光学特性が生体に及ぼす影響を総合的に捉えた観点からは整備されていない。光は様々な視覚的作用、非視覚的生理作用を引き起こすため、好みだけで照明条件を選択するのではなく、精神生理状態の観点から、知的作業に適した照明を選択する必要がある、そのためには、光環境要件の整備が必要であると考えられる。以上のことから、本研究では、基礎的な研究で明らかになった知見を、日常生活に応用するためのトランスレーショナル研究として、実使用可能な条件範囲において、白色照明の照度、光源（分光分布）の両方が精神生理状態に及ぼす影響に着目し、光環境要件を検討する点に新規性があり、かつ、社会的な意義のあることであると考えられる。

1-9 本論文の構成

本論文「日中作業時の精神生理状態マネジメントに関する研究」は、以下の全 5 章により構成される。

本章「序論」では、本研究の背景に言及し、現状の課題を明らかにした。

第 2 章「技能系作業時の精神生理状態マネジメント；技能習熟過程における精神生理状態の定量的評価」では、職人を想定した技能系作業に着目し、技能習熟過程において、精神生理状態、行動特性、成果物の質の関係性を定量的に評価し、精神生理状態をマネジメントする手法について検討した。

第 3 章「知的作業時の精神生理状態マネジメント；光環境が精神生理状態に及ぼす影響」では、オフィスワーカーを想定した知的作業に着目し、知的作業時において、光環境（照度、照度制御、光源分光分布）が精神生理状態に及ぼす影響を評価し、精神生理状態をマネジメントする手法について検討した。

第 4 章「知的作業時の精神生理状態に影響を及ぼす光環境要件の検討」では、第 3 章で導かれた結果に対し、知的作業時の精神生理状態に影響を及ぼす光環境要件について検討した。

第 5 章「総括」では、日中作業時の精神生理状態マネジメントについて、本研究から得られた結果を総括し、今後の展望を述べた。

なお、第 2 章は、下記の論文内容をもとに再構成したものである。

- 1) 澤井浩子、渡守武和音、上野敬介、小山恵美：塗り動作習熟過程の定量的評価方法に関する研究；EOG 時系列変動に着目した解析、時間学研究、6、pp.49-59、2013
- 2) Sawai H., Tomotake K., Ishii Y., Ueno K., Koyama E.: A Study of evaluating the process of mastering skills including pause and adjustment; Psychophysiological and behavioral evaluation using the information of biological signals and subjective scores, Proceedings of 2nd IIAI International Conference on Advanced Applied Informatics, pp.355-360, 2013
- 3) Sawai H., Tomotake K., Ishii Y., Ueno K., Koyama E.: Psychophysiological and behavioral evaluation of the process of mastering skills; To select appropriate indices for a target movement, Lee R. (Ed.), Studies in Computational Intelligence; Applied Computing and Information Technology, 553, Springer, 2014 (in press)

第3章は、下記の論文内容をもとに再構成したものである。

- 4) 澤井浩子、塩尻佳子、八田和洋、渡守武和音、上野敬介、小山恵美：実務中の光環境制御が覚醒度およびパフォーマンスに及ぼす影響の予備的研究、第34回情報・システム・利用・技術シンポジウム、pp.31-36、2011
- 5) 澤井浩子、松田恵里、松原明央、渡守武和音、宮井早希、塩尻佳子、小山恵美：実務中の光環境制御が覚醒度およびパフォーマンスに及ぼす影響－ステップ状の照度上昇変化が及ぼす影響の照度間および光源間比較－、第35回情報・システム・利用・技術シンポジウム、pp.97-102、2012
- 6) 澤井浩子、松田恵里、松原明央、渡守武和音、塩尻佳子、小山恵美：日中実務課題時における白色照明光環境の精神生理的影響－照度と分光分布に着目した比較－、人間生活工学、15(1)、通巻41号、2014 (in press)

また、第4章は、上記6)の内容を一部含み、追試実験からの考察を踏まえ、再構成したものである。

1-10 引用・参考文献

- 安藤啓司：視覚の神経生理機構、佐藤愛子、利島保、大石正、井深信男（編）、光と人間の生活ハンドブック、朝倉書店、東京都、pp.10-19、1995
- 阿山みよし：色覚の神経生理機構、佐藤愛子、利島保、大石正、井深信男（編）、光と人間の生活ハンドブック、朝倉書店、東京都、pp.19-27、1995
- Berson D., Dunn F., Takao M.: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, *Science*, 295, pp.1070-1073, 2002
- Brainard G., Hanifin J., Greenson J., Byrne B., Glickman G., Gerner E., Rollag M.: Action spectrum for melatonin regulation in humans; evidence for a novel circadian photoreceptor, *J Neurosci*, 21(16), pp.6405-6412, 2001
- 知的生産性研究委員会：知的生産性研究委員会報告書、国土交通省、p.2、2008
- Czeisler C., Duffy J., Shanahan T., Brown E., Mitchell J., Rimmer D., Ronda J., Silva E., Allan J., Emens J., Dijk D., Kronauer R.: Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker, *Science*, 284, pp.2177-2181, 1999
- Fredrickson B., Branigan C.: Positive emotions broaden the scope of attention and thought-action repertoires, *Cognition and Emotion*, 19(3), pp.313-332, 2005
- 萩原啓、荒木和典、道盛章弘、斎藤正己：脳波を用いた覚醒度定量化の試みとその応用、*BME*、11(1)、pp.86-92、1997
- 本間さと：光とホルモン、佐藤愛子、利島保、大石正、井深信男（編）、光と人間の生活ハンドブック、朝倉書店、東京都、pp.90-98、1995
- 市川照久、辻秀一、笠原久美雄：企業内研究所の知的生産性評価法に関する提案と実証、*経営情報学会誌*、9(4)、pp.19-32、2001
- 伊藤里香、檜山敦、並木秀俊、宮下真理子、谷川智洋、宮廻正明、廣瀬通孝：伝統技法における技能伝達のための暗黙知抽出に関する研究、*映像情報メディア学会技術報告*、33 (21)、pp.123-127、2009
- Iue M., Ota T., Hamasaki K., Kume M., Yoshida Y., Nakai A., Sasaoka N., Goto A.: Eye motion analysis in Chado, the way of tea、*京都工芸繊維大学 伝統みらい研究センター 伝統みらい便り'09*、pp.221-227、2009

- Jewett M., Dijk D., Kronauer R., Dinges D.: Dose-response relationship between sleep duration and human psychomotor vigilance and subjective alertness, *Sleep*, 22(2), pp.171-179, 1999
- 加藤寛子、森本一成：和包丁の研ぎ動作における筋負担の解析からみた技の検討、京都工芸繊維大学 伝統みらい研究センター 伝統みらい便り'06、pp.61-64、2006
- 粥川裕平：気分障害、日本睡眠学会（編）、*睡眠学*、朝倉書店、東京都、pp.584-589、2009
- Khalsa S., Jewett M., Cajochen C., Czeisler C.: A phase response curve to single bright light pulses in human subjects, *J Physiol*, 549(3), pp.945-952, 2003
- 小山恵美：光環境と騒音、日本睡眠学会（編）、*睡眠学*、朝倉書店、東京都、pp.421-424、2009
- 小山恵美：知的生産物を多く生み出すことにつながるオフィス要件を考える材料、京都工芸繊維大学講義資料、2011
- Koyama E., Hasegawa A., Okamoto N., Matsubara A., Ishii Y., Ueno K., Sawai H.: Consideration of the optical properties in the nocturnal indoor light environment related to sleep, *Proc of 4th International Conference on Human-Environment System 2011*, pp.49-54, 2011
- Lewy A., Wehr T., Goodwin F., Newsome D., Rosenthal N.: Manic-depressive patients may be supersensitive to light, *Lancet*, 14(1), pp.383-384, 1981
- Lockley S., Gooley J.: Circadian photoreception: Spotlight on the Brain, *Current Biology*, 16(18), R795-797, 2006
- 道盛章弘、荒木和典、萩原啓、阪口敏彦：照度の覚醒度、自律神経活動に及ぼす影響、*照明学会誌*、81、p.185、1997
- Middleton B., Arendt J., Stone B.: Human circadian rhythms in constant dim light (8 lx) with knowledge of clock time, *J Sleep Res*, 5, pp.69-76, 1996
- Mishima K., Okawa M., Shimizu T., Hishikawa Y.: Diminished melatonin secretion in the elderly caused by insufficient environmental illumination, *J Clin Endocrinol Metabol*, 86(1), pp.129-134, 2001
- Moore-edde M.: *The twenty four hour society*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, pp.44-63, 1992

- Mukae H., Sato M.: The effects of color temperature of lighting sources on the autonomic nervous functions, *Ann Physiol Anthropol*, 11(5), pp.533-538, 1992
- 内閣府：仕事と生活の調和の実現に向けて、<http://www.cao.go.jp/wlb/government/index.html>
- 内閣府経済社会総合研究所：生活の質に関する調査結果（検討用資料）クロス集計、生活の質に関する調査（平成 23 年度）、pp.1-51、2012
- NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構：エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発/自律分散最適化アルゴリズムを用いた省エネ型照明システムの研究開発、平成 20 年度－平成 22 年度成果報告書、管理番号 20110000000875、2010
- NEO 新世代オフィス研究センター：オフィスにおける知的活性度に影響を及ぼす行動とその促進・阻害要因に関する研究、NEO Research Summary 2007、pp.17-20、2007
- Phipps-Nelson J., Redman J., Dijk D., Rajaratnam S.: Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance, *Sleep*, 26(6), pp.695-700, 2003
- Saper C., Scammell T., Lu J.: Hypothalamic regulation of sleep and circadian rhythms, *Nature*, 437(27), pp.1257-1263, 2005
- Shoofs D., Preub D., Wolf O.: Psychosocial stress induces working memory impairments in an n-back paradigm, *Psychoneuroendocrinology*, 33, pp.643-653, 2008
- 総務省政策統括官：日本標準産業分類、http://www.stat.go.jp/index/seido/shokgyou/gen_h21.htm
- 総務省政策統括官：労働力調査、<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001106144>
- 田口博丈、長谷和徳、前野隆司：ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析、日本機械学会論文集（C 編）、68(670)、pp.25-32、2002
- 武雄靖、夏恒：測定技能の習熟度と注視点の変化に関する実験的検討、一般社団法人国際 P2M 学会研究発表大会予稿集、pp.212-221、2010
- 田中辰憲、大西明宏、久米雅、白土男女幸、辻賢一、仲井朝美、芳田哲也：金網製作時にみる「間」、京都工芸繊維大学 伝統みらい研究センター 伝統みらい便り'08、pp.62-66、2008
- 植田俊彦：可視放射による眼の急性傷害、太陽紫外線防御研究委員会（編）、からだと光の辞典、朝倉書店、東京都、pp.208-211、2010
- Van Dongen H., Maislin G., Mullington J., Dinges D.: The cumulative cost of additional wakefulness: Dose-response effects on neurobehavioral functions and sleep physiology from chronic sleep restriction and total sleep deprivation, *Sleep*, 26(2), pp.117-126, 2003

Viola A., James L., Schlangen L., Dijk D.: Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality, *Scan J Work Environ Health*, 34(4), pp.297-306, 2008

Yerkes R., Dodson J.: The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation, *J Comp Neurol Psychol*, 18(5), pp.459-482, 1908

第2章 技能系作業時の精神生理状態マネジメント；

技能習熟過程における精神生理状態の定量的評価

2-1 緒言

生産工程従事者（職人）を想定した技能系作業において、成果物の質向上を目指すためには、序論で述べたように（第1章 1-5）、技能のこつ（技能素）として動作リズムの習得が必要であり、これら動作リズムを発揮するには、その基盤となる精神生理状態の管理が重要となる。つまり、動作リズムの基盤となる精神生理状態もまた、技能素の一つであると考えられる。そして、技能習熟過程において、作業時の精神生理状態と行動特性を評価することで、成果物の質向上に寄与する精神生理状態と行動特性に関わる技能素が明らかとなる。さらに、これら指標における技能素をフィードバックすることで、パフォーマンス向上、成果物の質向上、作業の充実感向上といった技能習熟の効率化を図り、さらには心身の健康促進と生活の質向上を図ることができる。本研究では、これら一連の枠組みを、技能系作業時の精神生理状態マネジメントと位置づけた。

技能系作業時の精神生理状態をマネジメントするためには、まず、技能の習熟過程において、作業時の精神生理状態を評価し、動作リズムや成果物の質との関係性を明らかにする必要がある。しかしながら、技能系作業時の精神生理状態、行動特性、成果物の質の関係性は明らかになっていない。また、動作リズムに関わる精神生理状態を評価するためには、動作と同時に、時系列で各種指標を計測する必要がある。

高度な技能を必要とする伝統技能において、技能素の定量化に関する先行研究では、筋電図（加藤ら、2006）、動作の軌跡および加速度（田中ら、2008）、呼吸（伊藤ら、2009）、視線（Iue et al.、2009）などにより熟練者の動作リズムが評価されてきた。一方、眼電図（Electrooculogram：EOG）²¹を用いた眼球運動時系列変動に着目した研究はみられない。日常の経験則として、手で作業するときに対象物を「見る」ことが重要であることは明白である。対象物を見るとき、眼球運動の時系列変動として、注視点移動時の早い運動であるサッカード²²や、追従運動であるパーシュート²³（苧阪ら、1993）、注視時の停留²⁴といったEOG波形が出現する。

²¹ 眼電図：眼球の角膜側が正、網膜側が負に帯電していることを利用し、眼球の動きに伴った電位変化を計測する電氣的な計測手法。

²² サッカード：眼球運動のうち、速度の速い動き。

²³ パーシュート：眼球運動のうち、速度の遅い動き。

また、注意散漫時のよそ見、注意集中に起因する瞬目 (Stern et al., 1984) や眼球運動 (Fischer et al., 1987) といった精神生理状態も EOG 波形に反映される。よって、EOG 波形を計測することで、行動特性と精神生理状態の両方を反映する状態を評価できると考えられるため、本研究では EOG を用いた眼球運動時系列変動に着目した。

基本的な動作や動く指標に伴う眼球運動についての研究は、いくつかある。物を手で操作するときの眼球運動に着目した研究では、手の動きに先行してサッカードと目的部位への注視が発生し、注視することで手の動きを補助していると推測されている (Johansson, 2001)。図形をなぞるとき (トレース) と描画するときの眼球運動を比較した研究では、図形トレース時には手を動かす直前に振幅の小さいサッカードが発生し、図形描画時にはトレース時よりもサッカードは少ないが振幅が大きく、パーシュートも少ないことが示されている (Gowen et al., 2006)。よって、手を動かす時には、手の動きに連動した視線移動としての眼球運動だけでなく、手の動きに関連し脳活動を反映した眼球運動も出現するということが言える。また、動体視力トレーニング時における指標識別中の眼球運動を評価した研究では、トレーニングで動体視力が向上すると、繰り返し行った試行の EOG 波形が安定すると報告されている (吉井ら 2003)。

以上の報告より、技能系作業時において、動作の種類に関連した眼球運動が時系列で複合的に出現し、技能の習熟により変動が安定すると推測される。しかし、技能の習熟過程における EOG 時系列変動特性は明らかにされていない。

一方で、技能を構成する動作には様々な種類があり、眼球運動をあまり伴わず、EOG では評価が困難な動作も存在する。動作の大きさ、動作の継続時間、動作に要する体の部位などによって、習熟過程における精神生理状態の評価に適した指標は異なると考えられる。よって、動作の種類ごとに、習熟過程の評価に適した指標を明らかにする必要もある。

以上のことから、技能系作業における成果物の質に関わるパフォーマンス向上に関し、「パフォーマンス向上→作業の充実感向上→至適精神生理状態の達成」により精神生理状態をマネジメントするため、技能習熟過程において、以下二つの観点から、精神生理状態、行動特性、成果物の質の関係性を評価することを目的とした。

1. EOG 時系列変動指標を用いて技能習熟過程を評価する
2. 技能習熟過程評価に適した指標を、動作の種類によって分類する

²⁴ 停留：注視しているときなど大きな眼球運動がない状態。

なお、本研究は、実験 A（渡守武、2013）と実験 B（石井、2012）の計測データをもとにしている。時系列変動指標である EOG を用いて、技能習熟過程の評価手法を検討するため、渡守武（2013）による計測データを用い、技能習熟過程の EOG 時系列変動に新たに着目し、独自にデータの抽出、解析、検定を実施した。

また、技能習熟過程評価に適した指標を、対象となる動作の種類によって分類するため、石井（2012）による計測データを用い、手や指による技能の習熟過程に関する評価指標を再構成した。さらに、新たな視点として、一連の研究結果（実験 A、実験 B）を総合し、成果物の質に関わる技能習熟過程評価に適した指標に関し、対象となる動作の種類によって、適・不適を考察した。

2-2 EOG 時系列変動指標を用いた技能習熟過程の評価

2-2.a 実験 A 方法；腕による技能系作業

2-2.a.(1) 被験者

健常若年成人男性 8 名（20–26 歳、利き手：右）を対象とし、京都工芸繊維大学内に設置された倫理委員会の承認を得て実験を実施した。全ての被験者に対し、睡眠障害や眠気を伴う薬の使用がないことを確認し、実験の目的・方法を説明した上で、文書による同意を得て、適切な報酬を支払った。

2-2.a.(2) 作業課題

漆塗り基本動作の一つである平面の中塗り動作を模擬し、塗り動作作業課題を設定した。作業課題では、液晶タブレット（画面サイズ 1100×700 ピクセル＝約縦 19cm×横 29cm、Wacom 社製 DTU-1631C）と幅 5cm の刷毛型カバーを取り付けた入力装置を用い、灰色の液晶画面（キャンバス）に黒色を塗る作業とした（図 2-2-1）。キャンバスは、左から右への塗り動作 4 ストロークで塗り切ることができる。液晶タブレットは机上面に置き、座位にて作業を行った。課題実施前には、キャンバス左上から塗り始め右方向へ塗ること、筆圧を均一にすること、塗り残しを少なくすること、時間内に可能な限り多くのキャンバスを塗ることを指示した。

一つのキャンバスを塗り終わると、指定の画面切り替えボタンをクリックし、次のキャンバスを塗り始めるという一連の動作を 2 分間繰り返した。2 分経過後に塗った各キャンバスの塗りムラ（グレースケール表示）と筆圧（カラースケール表示）に関するプレビュー画面を表示し、作業結果を 1 分間確認することとした（図 2-2-2）。

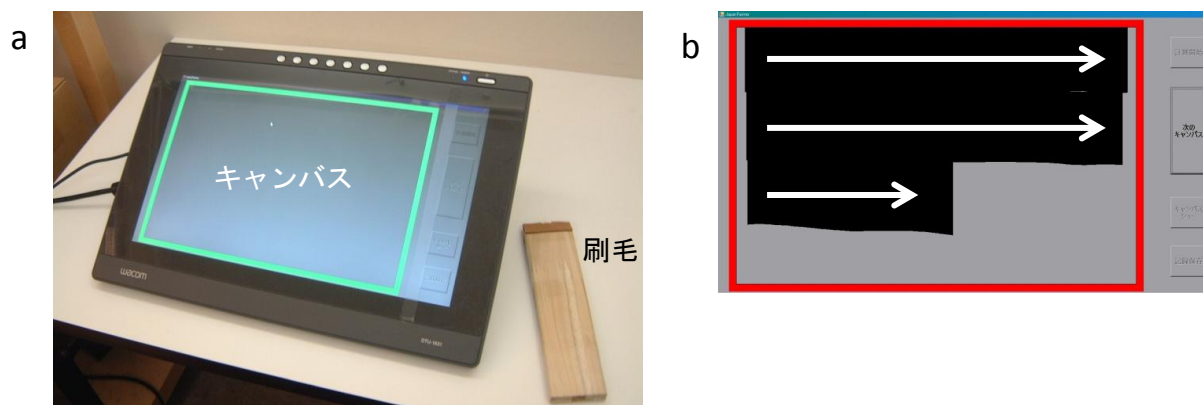


図 2-2-1 実験装置（a：キャンバスと刷毛、b：塗り課題中のキャンバス表示例、渡守武、2013）

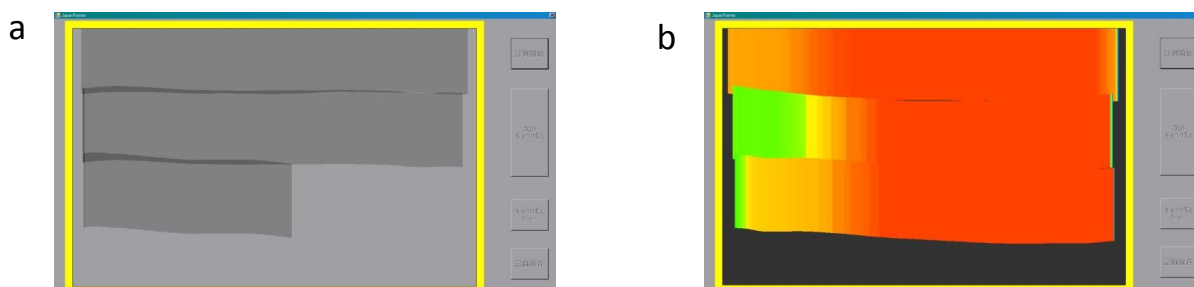


図 2-2-2 プレビュー表示例 (a : 塗りムラ、b : 筆圧、渡守武、2013)

2-2.a.(3) 実験手順

2012年8-11月、京都工芸繊維大学内の生体計測実験室において、10時-12時30分の時間帯に計測を実施した。実験は生体計測練習1日、作業練習1日、そして本計測5日である。本計測日には、全日程で主観評価と作業を行い、1、3、5日目のみで主観評価と作業に加え、生体計測を行った(図2-2-3)。本計測前に作業へ習熟することを避けるため、練習日での作業実施は1回とした。本計測1日目の7日前から実験最終日まで、就寝24時、起床7時を目安に就寝起床時刻をそろえるよう生活統制を課し、睡眠日誌および手首活動量(Actiwatch、Mimi Mitter製)による就寝起床時刻の記録および確認を行った。

本計測日には、主観評価と3分間の漆塗りを模擬した塗り動作作業(2分間の作業および1分間の作業結果確認)を各5回繰り返した。また、計測開始時および終了時に覚醒度評価(Alpha Attenuation Test : AAT²⁵、Stampi et al. 1995)、作業実施前後に主観評価(Visual Analog Scale : VAS²⁶)を実施した。

²⁵ AAT : 脳波 α 波パワー値を用いた覚醒度評価手法。覚醒度が高いほど、 α 波パワー値は開眼中に減少、閉眼中に増大することを利用する。

²⁶ VAS : 左右に両極となる言葉を配置した100mm線分を用い、現在の状態に合う位置に線を引くという主観評価の手法。

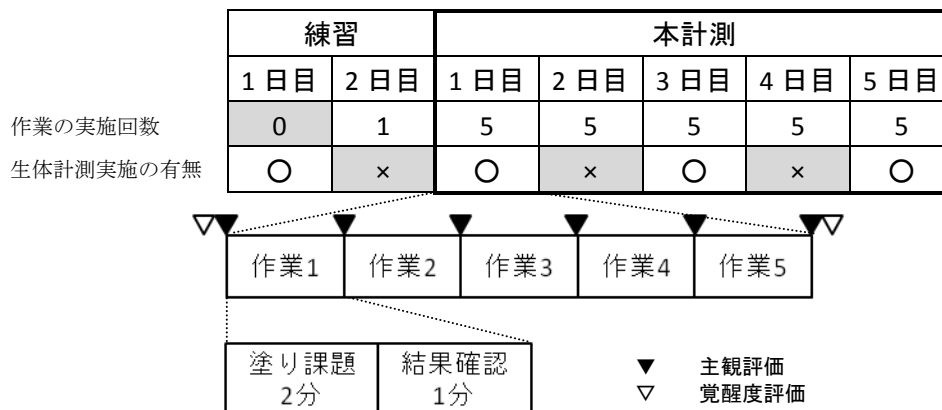


図 2-2-3 実験 A スケジュール (Sawai et al., 2013、澤井 他、2013 をもとに作成)

2-2.a.(4) 解析指標および解析方法

本研究では、渡守武 (2013) の実験で計測された指標のうち、EOG 時系列変動指標に新たに着目し、独自にデータの抽出、解析、検定を実施した。また、作業成績結果は、再構成をした。

作業成績：作業スピードに関わる量的作業成績として、2 分間に塗られた各キャンバスにおいて、1 回以上塗られたピクセル数の総和 (描画量) を求めた。さらに、作業精度に関わる質的作業成績として、2 分間に塗られた各キャンバス (課題最後に塗り途中であったキャンバス 1 枚を除く) において、各ピクセルの筆圧分散平均値 (筆圧分散) を求めた。筆圧は、液晶タブレットが 1 ピクセルごとに検出することができる 500 段階の圧力範囲での相対値である。

眼電図 (Electrooculogram : EOG) : ティアック製多用途生体アンプ Polymate AP1132 と ACT 生体電極を用いて計測した。EOG の電極配置は、左目垂直位置と斜め左右位置 (電極は右目上方と左目下方位置に装着) とした (図 2-2-4)。本研究では、左右方向の腕動作に伴う眼球運動に着目するため、斜め左右位置の眼電図信号を解析対象とした。信号処理には NoruPro Light Systems 製生体信号解析ソフトを使用し、500Hz で計測したデータは 30Hz のハイカットフィルタと 60Hz のノッチフィルタを適用後、100Hz にダウンサンプリングした。

本計測で使用した上記の計測・解析概要をブロック図 (図 2-2-5) で示す。

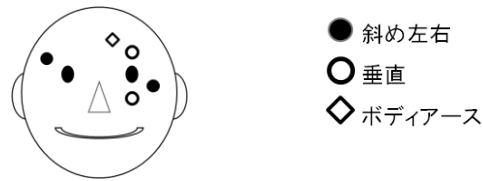


図 2-2-4 EOG 電極配置 (澤井 他、2013)

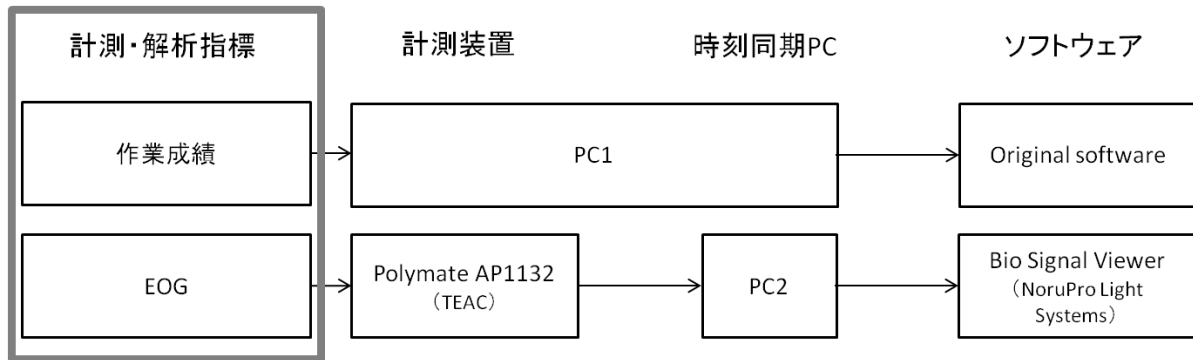


図 2-2-5 実験 A 計測・解析概要ブロック図 (Sawai et al., 2013 をもとに作成)

2-2.a.(5) 統計解析

被験者 1 名で他の被験者と塗り動作が異なり、EOG 波形に差異がみられたため解析から除外した (ID6)。被験者 7 名について、IBM SPSS Statistics 20 を用い検定を行った。日程間の比較では、反復測定一元配置分散分析を実施した。反復測定において自由度が 1 よりも大きい場合は、Huynh-Feldt の ϵ による補正を用いた。分散分析で主効果がみとめられた項目に関し (有意水準 5%)、対応のある t 検定を行い、信頼区間の調整には Bonferroni の方法を適用した。

EOG の時系列変動解析では、1 つのキャンバスを塗っている間の波形を抽出し (図 2-2-6a)、各波形における自己相関係数を求めた (図 2-2-6b)。サンプリング周波数 100Hz の EOG データに関し、ラグ値分解能を 1/100 秒として 0-999/100 秒までの自己相関係数を算出した。そして、左から右への塗り動作 1 ストロークに伴う EOG 時系列変動周期に着目し、自己相関係数における正方向の初期ピーク位置から、第 1 ピーク相関係数とそのラグ値²⁷を求めた (図 2-2-6b)。また、各本計測日の作業 5 において自己相関係数が最も高かった試行を、その日に最も動作リズムが安定していた試行と仮定し、その波形を基準として日ごとに他の波形との相互相関係数 (ラグ値=0) を求めた (図 2-2-6c)。

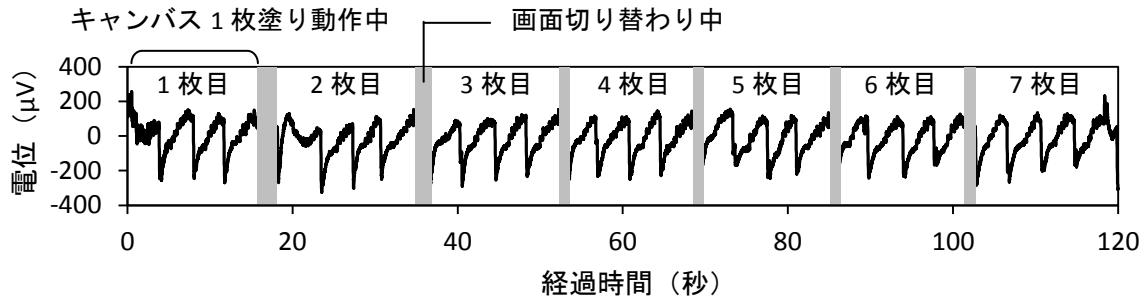
また、EOG 各指標と各作業成績間の関係を調べるため、Pearson の積率相関係数を求めた。

結果図中では、 $p < 0.01$ を **、 $p < 0.05$ を *、 $p < 0.1$ を † と表記した。

²⁷ ラグ値：自己相関を求めるときに、波形をシフトさせる量 (時間)。

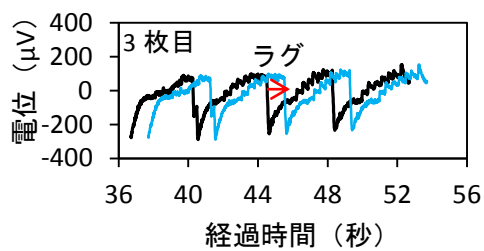
a

◆キャンバスごとの EOG 信号を抽出

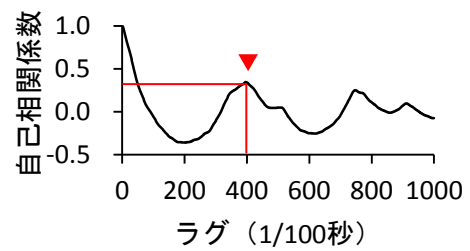


b

◆自己相関



◆自己相関係数の正方向第 1 ピーク



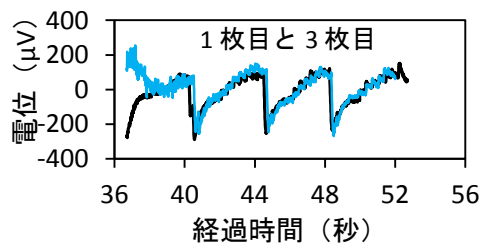
◇▼ラグ値=1 ストロークの所要時間

◇自己相関係数

=各ストロークの塗り動作安定性
+精神生理状態

c

◆相互相関 (各日作業 5 で自己相関係数が最も高かった試行を基準とする)



◇相互相関係数

=各キャンバスの塗り動作安定性
+精神生理状態

図 2-2-6 EOG 時系列解析方法の概略図 (a : 信号抽出、b : 自己相関、c : 相互相関)

2-2.b 実験 A 結果

2-2.b.(1) 作業成績結果

描画量では、被験者全体 (7 名) として、分散分析で日による主効果が有意であった ($F_{4,24}=3.1$ 、 $p<0.05$ 、 $\epsilon=0.85$ 、図 2-2-7)。1 日目と他の日程間において、描画量の差は有意ではなかったが、課題を繰り返すことで描画量が増加し、作業量に関する習熟傾向がみとめられた。

本計測 5 日間全作業 25 回における被験者ごとの描画量推移を図 2-2-8a、b に示す。被験者 7 名中 4 名 (ID2、3、5、7) で作業を繰り返すほど描画量が増加する傾向がみられ (図 2-2-8a)、残る 3 名では、5 日間の途中で描画量が安定する傾向がみられた (ID1、4、8、図 2-2-8b)。ID8 の作業 22 は、描画装置の不具合によりデータが欠損している。

筆圧分散では、被験者全体 (7 名) として、分散分析での日による主効果が有意ではなく、作業精度に関わる習熟傾向は明確にならなかった (図 2-2-9)。

本計測 5 日間全作業 25 回における被験者ごとの筆圧分散推移を図 2-2-10a、b に示す。描画量が増加傾向であった群と安定していた群でそれぞれ結果を確認すると、描画量が増大した群では、3 名 (ID2、5、7) で作業ごとの筆圧分散にばらつきがあり、1 名 (ID3) で安定していた (図 2-2-10a)。また、描画量が安定していた群では、2 名 (ID1、8) で作業を繰り返すごとに筆圧分散がばらつきつつも減少する傾向がみられ、1 名 (ID4) では低い値でばらついていた (図 2-2-10b)。

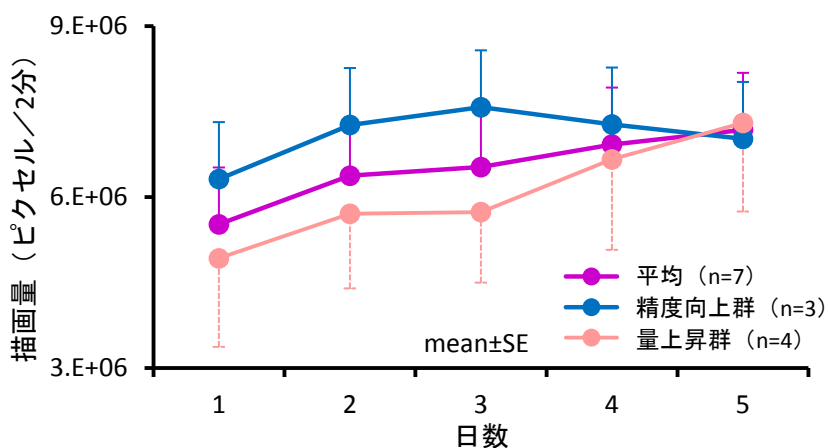


図 2-2-7 日ごとの量的作業成績 (描画量) 推移 (Sawai et al., 2013 をもとに作成)

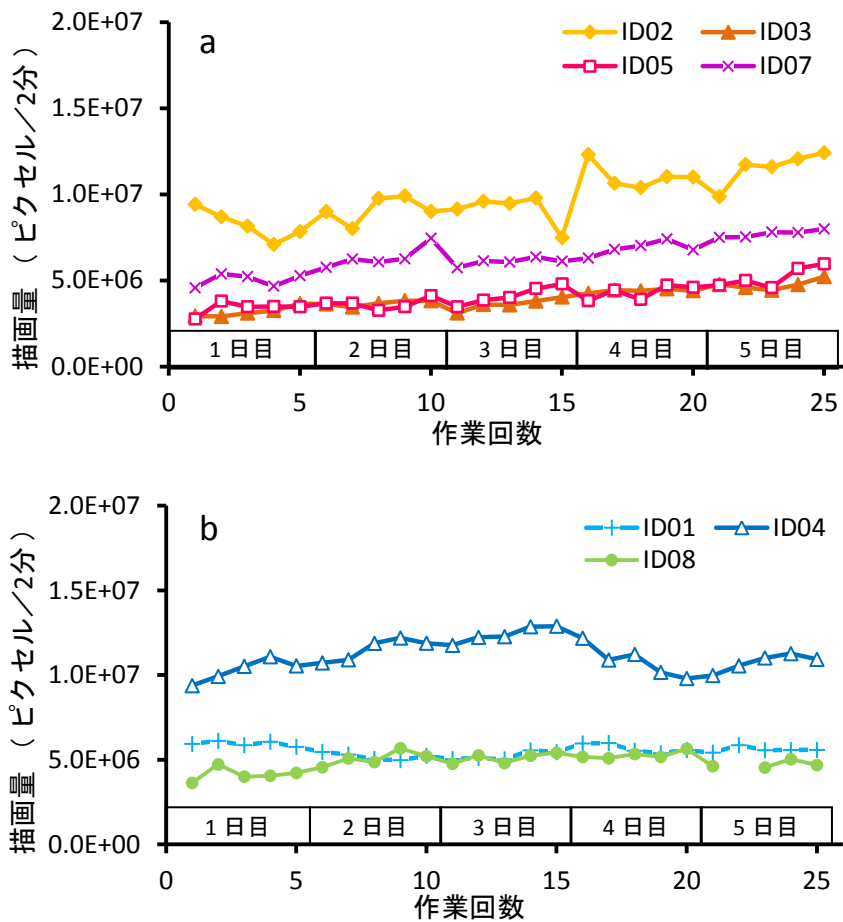


図 2-2-8 被験者ごとの量的作業成績（描画面積）推移

(a : 成績に増大傾向がみられた 4 名、b : 成績に安定傾向がみられた 3 名、
澤井 他、2013 をもとに作成)

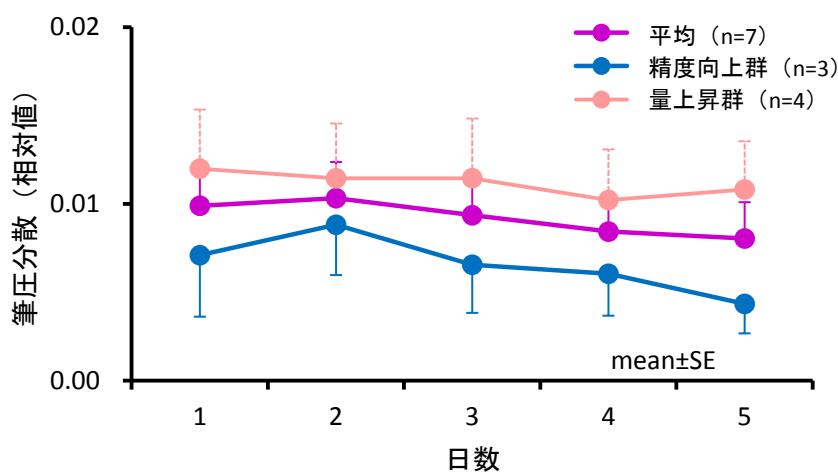


図 2-2-9 日ごとの質的作業成績（筆圧分散）推移 (Sawai et al., 2013 をもとに作成)

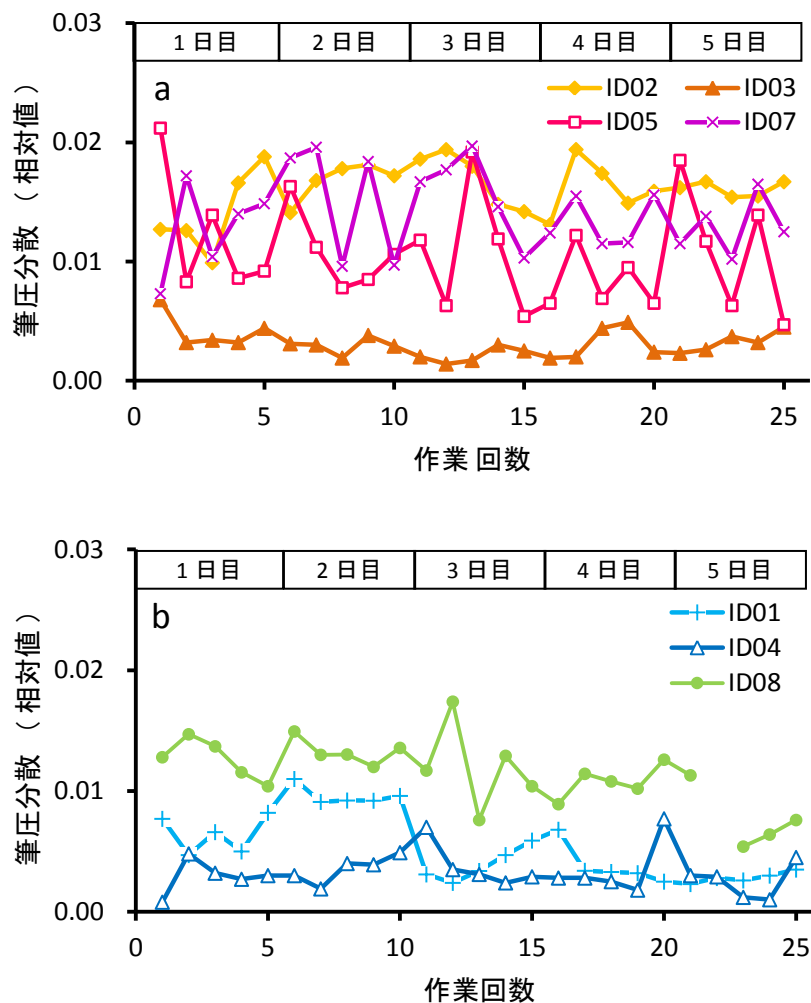


図 2-2-10 日ごとの質的作業成績（筆圧分散）推移
 (a : 成績に増大傾向がみられた 4 名、b : 成績に安定傾向がみられた 3 名、
 澤井 他、2013 をもとに作成)

2-2.b.(2) 群分け

以上の量的、質的作業成績の結果より、描画量が増加傾向であった群は作業量の習熟段階であり、描画量が安定傾向であった群は作業精度の習熟段階であったと特徴づけられる（表 2-2-1、図 2-2-7、2-2-9）。よって、作業量の習熟段階群を量上昇群（ID2、3、5、7）、作業精度の習熟段階であった群を精度向上群（ID1、4、8）とし、被験者全体および 2 群の各群内について解析を進めた。

表 2-2-1 作業結果による群分け (澤井 他、2013)

群	ID	課題繰り返しによる成績変動	
		描画量	筆圧分散
量上昇群	2	上昇	不安定
	3	上昇	安定
	5	上昇	不安定
	7	上昇	不安定
精度向上群	1	安定	不安定・減少
	4	上昇後安定	不安定
	8	上昇後安定	不安定・減少

2-2.b.(3) EOG 時系列解析結果

斜め左右に電極を配置し計測した EOG 波形から、全被験者に共通して、塗り動作に伴い眼球が左右へ動く変動が繰り返しみられた。左から右へ塗る動作の時には、振幅の小さなサッカードが繰り返し出現し、右から左へ腕を戻すときには振幅の大きなサッカードが 1 回出現していた。また、瞬目波形の混入もみられた (図 2-2-11)。

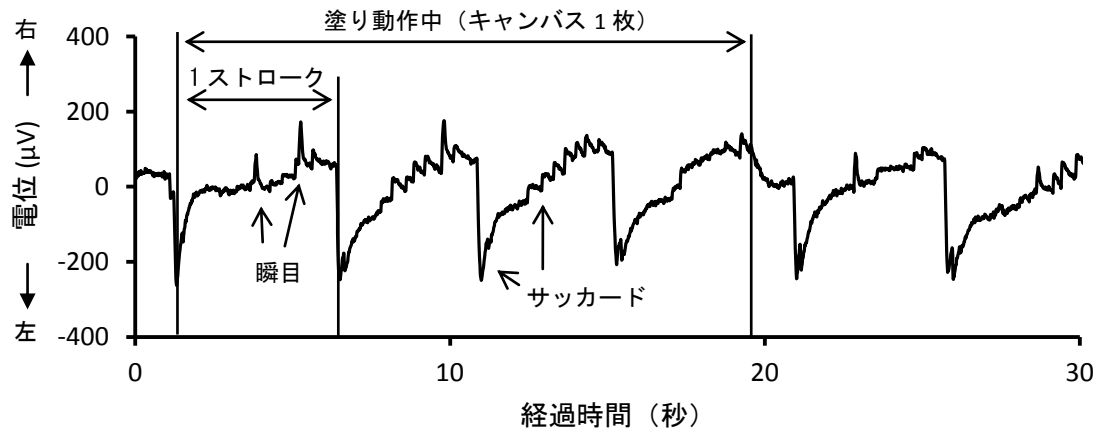


図 2-2-11 EOG 波形例 (澤井 他、2013 をもとに作成)

EOG 波形推移例を図 2-2-12 に示す。作業スピードの変化に伴った EOG 時系列変動周期を明らかにするため、生体計測を行った 3 日間について、キャンバスごとに EOG 自己相関係数の第 1 ピークラグ値を求めた。被験者全体として、分散分析での日による主効果が有意であり ($F_{2,12}=7.7$ 、

$p < 0.05$ 、 $\varepsilon = 0.75$)、5日目は1日目よりも周期が短い傾向がみられた ($p < 0.1$ 、図 2-2-13)。よって作業を繰り返すことで、左から右への塗り動作 1 ストロークに伴う EOG 時系列変動周期が短縮する傾向であった。作業成績同様に、量上昇群では EOG 時系列変動周期の短縮が顕著であり、精度向上群では変動周期が安定している傾向であった。

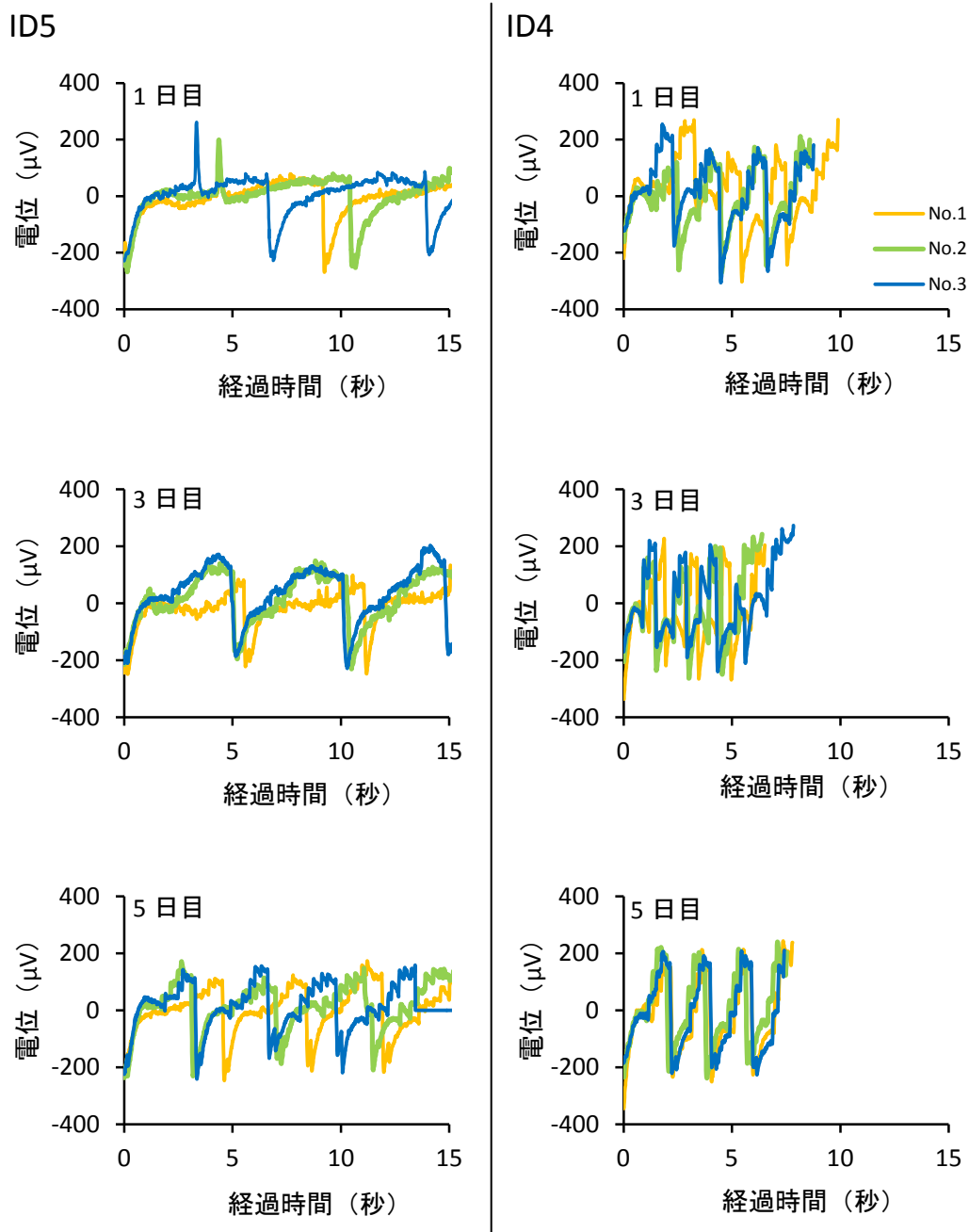


図 2-2-12 生体計測 3 日間の EOG 波形推移例

(a : ID5、b : ID4、キャンバス No.1-3 における塗り動作中の EOG 波形を示す、
澤井 他、2013 をもとに作成)

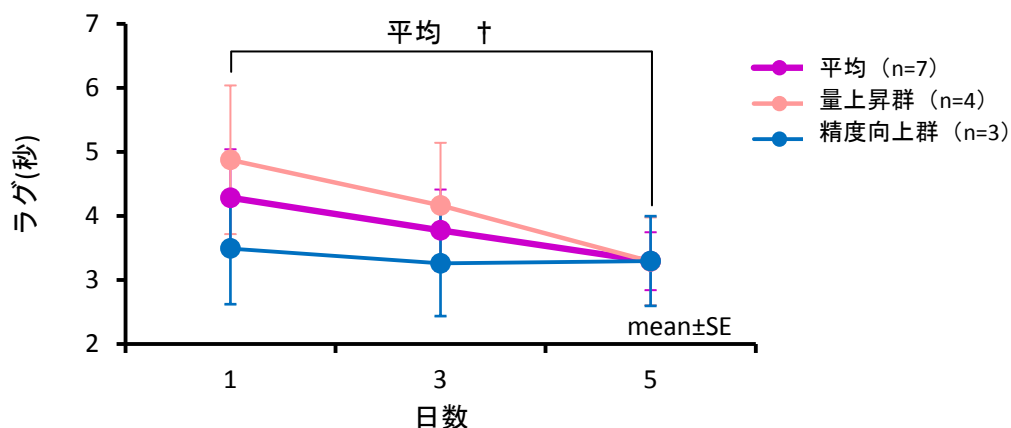


図 2-2-13 EOG 時系列変動周期の推移 (澤井 他、2013 をもとに作成)

キャンバス 1 枚作業中の EOG 時系列変動安定性を確認するため、生体計測を行った 3 日間について、キャンバスごとの EOG 自己相関係数を求めた。また、1 日に行った作業間の EOG 時系列変動安定性を確認するため、各日の作業 5 において自己相関係数が最も高かった作業時の EOG 波形を基準とし、他の波形との相互相関係数 (ラグ値=0) を求めた。2 群の各群内において、EOG 自己相関係数 (図 2-2-14)、相互相関係数 (図 2-2-15) とともに、3 日間を通して被験者間に共通する傾向はみられなかった。一方、全被験者のうち 3 名 (ID2、4、7) で、日ごとに自己相関係数および相互相関係数が大きくなる傾向がみられた。この 3 名では、作業を繰り返すことで、塗り動作各ストローク単位および各キャンバス単位での EOG 時系列変動が安定し、かつ一定の波形に収束してゆく傾向がみられた (図 2-2-14、2-2-15)。他の 4 名では、日ごとの自己相関係数および相互相関係数推移に一貫した傾向はみられなかった (図 2-2-14、2-2-15)。

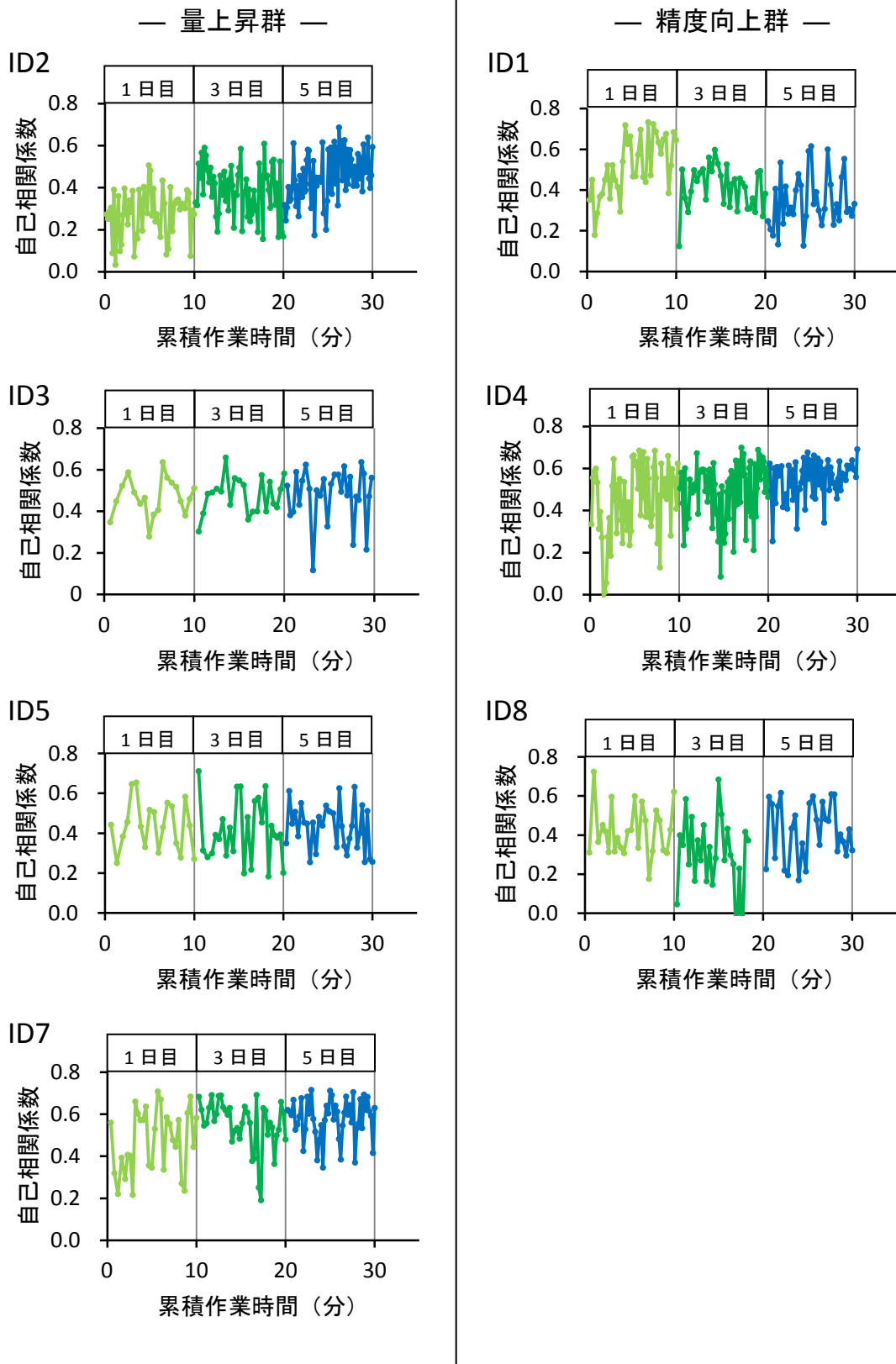


図 2-2-14 EOG 自己相関係数の推移 (Sawai et al., 2013 をもとに作成)

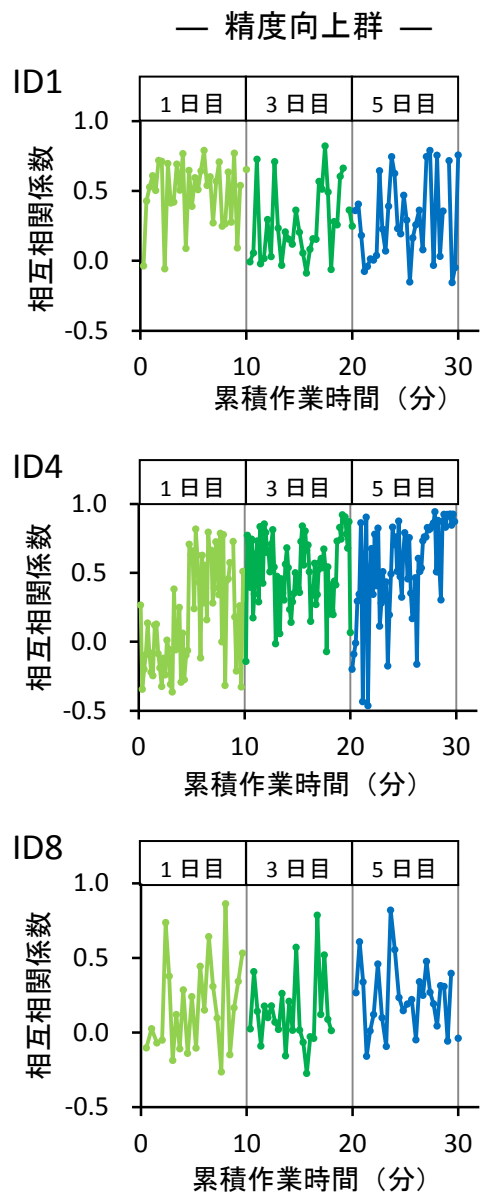
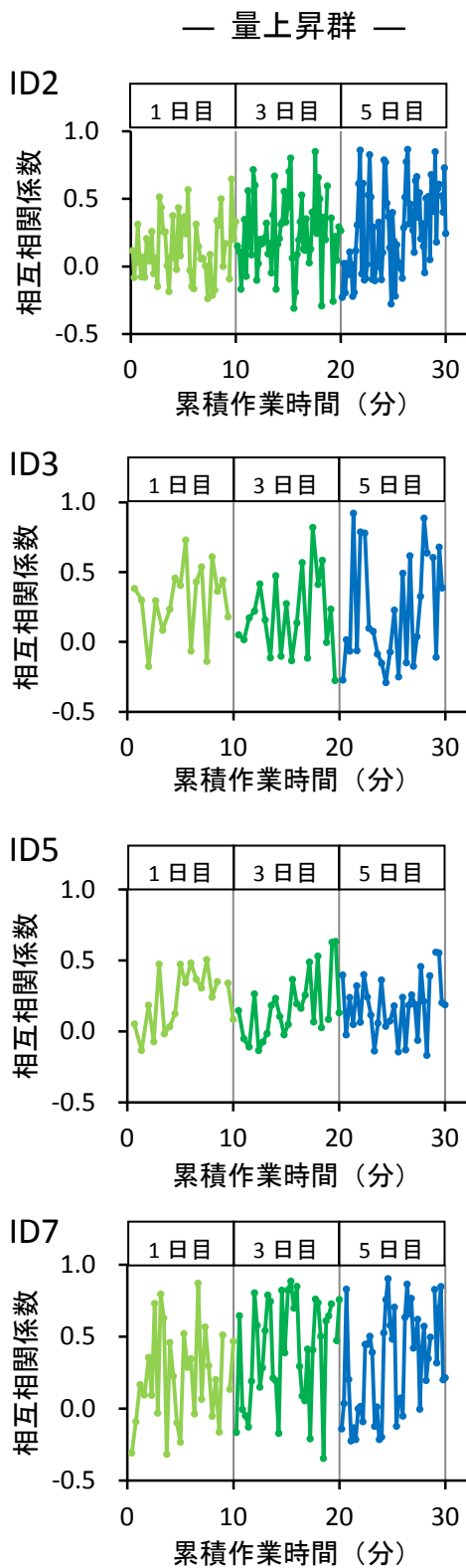


図 2-2-15 EOG 相互相関係数の推移 (澤井 他、2013 をもとに作成)

2-2.b.(4) 相関解析結果

キャンバスごとの EOG 時系列変動（自己相関係数、相互相関係数）と量的、質的作業成績の関係を明らかにするため、各群において、各指標の相関関係を確認した。

量上昇群では、描画量とキャンバスごとの EOG 自己相関係数に弱い正の相関がみとめられた ($r = 0.27$, $p < 0.001$, 図 2-2-16a)。その他の指標間には、有意な相関関係はみられなかった (図 2-2-16b)。よって描画量が多いほど、各ストロークに伴い繰り返される EOG 時系列変動が安定する関係であった。

精度向上群では、描画量とキャンバスごとの EOG 自己相関係数に弱い正の相関 ($r = 0.24$, $p < 0.001$, 図 2-2-17a)、筆圧分散と EOG 自己相関係数および相互相関係数に弱い負の相関 (順に $r = -0.24$, $p < 0.001$, 図 2-2-17b, $r = -0.13$, $p < 0.05$, 図 2-2-17d) がみとめられた。描画量と EOG 相互相関係数の間には、有意な相関関係はみられなかった (図 2-2-17c)。よって描画量が多いほど、また筆圧分散が小さいほど、各ストロークに伴い繰り返される EOG 時系列変動が安定する関係であった。さらに、筆圧分散が小さいほど、各キャンバスの塗り動作に伴う EOG 時系列変動が安定する関係であった。

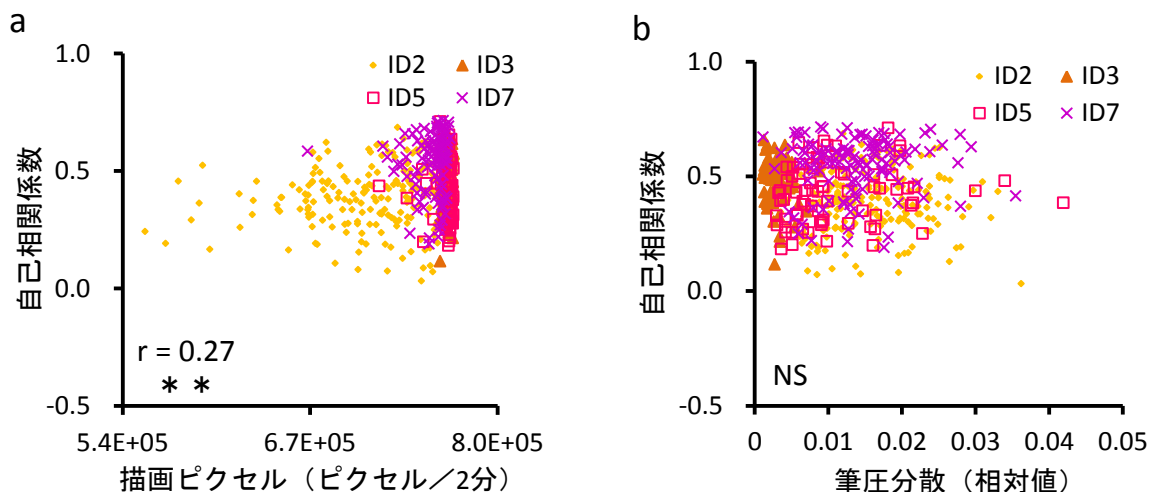


図 2-2-16 量上昇群における作業成績と EOG 自己相関係数との関係

(a : 量的作業成績×EOG 自己相関係数、b : 質的作業成績×EOG 自己相関係数、

Sawai et al., 2013 をもとに作成)

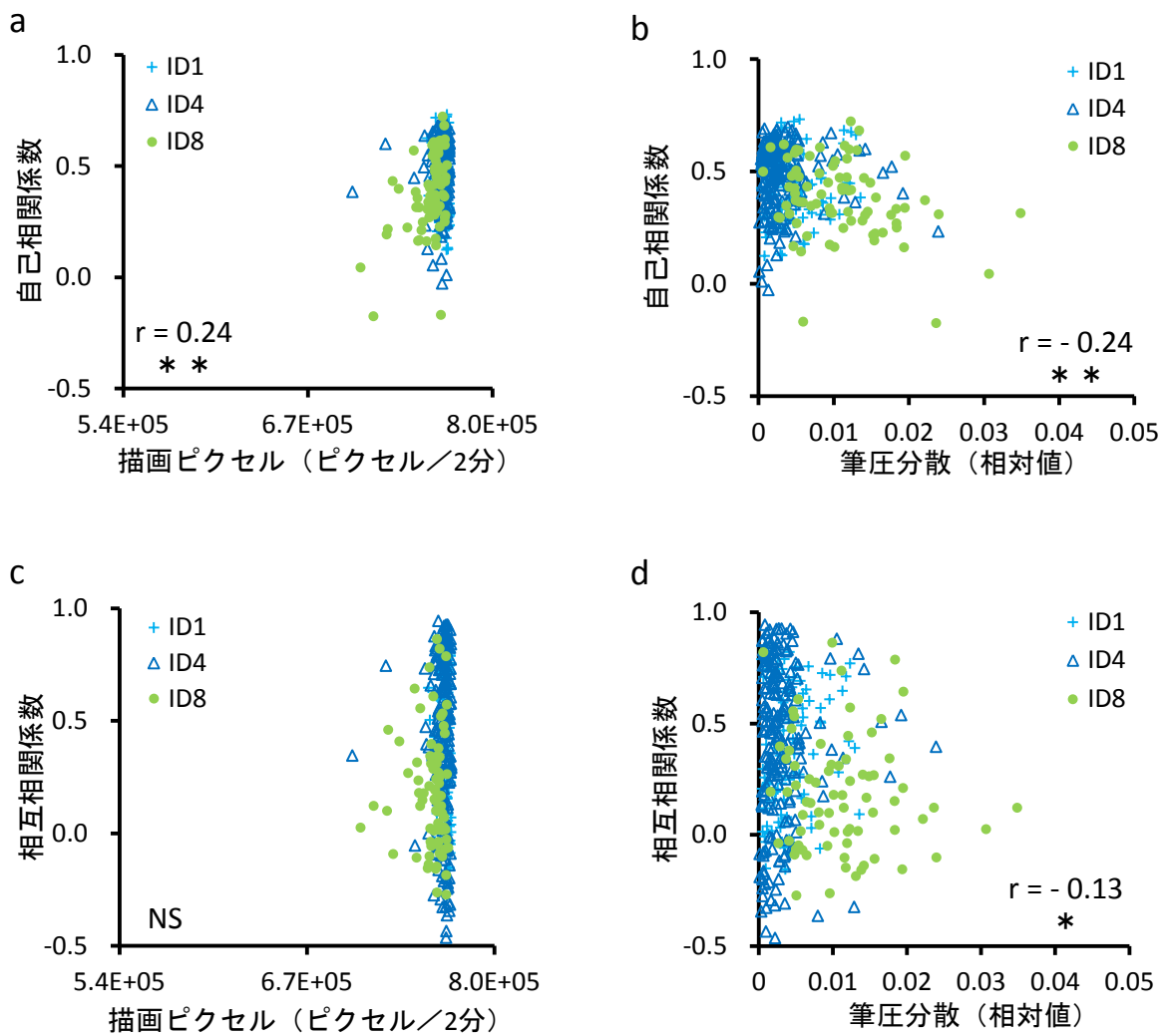


図 2-2-17 精度向上群における作業成績と EOG 自己相関係数との関係

(a : 量的作業成績×EOG 自己相関係数、b : 質的作業成績×EOG 自己相関係数、
c : 量的作業成績×EOG 相互相関係数、d : 質的作業成績×EOG 相互相関係数、

Sawai et al.、2013、澤井 他、2013 をもとに作成)

2-2.c EOG 時系列変動指標を用いた技能習熟過程の評価に関する考察

実験 A の結果より、技能習熟過程の初期段階において、作業時の EOG 時系列変動は、質的作業成績と関係があることが示された。塗り作業の筆圧分散で表される質的作業成績が高いほど、EOG 時系列変動リズムの安定性が増す関係がみとめられた。作業量が安定した精度向上段階においては、腕の動作に伴った眼球運動のリズム、および、精神生理状態を反映するサッカードや注視といった眼球運動の出現パターンが、質的作業成績の向上に伴い安定していったと考えられる。しかし、本研究でみとめられた質的作業成績と EOG 時系列変動の関係は弱い相関関係であった。これは、各被験者の描画量がキャンバスのピクセル数最大値に近く、かつ、筆圧分散は最小値に近い値であり、全被験者で作業成績の値が収束していたことが原因であると考えられる。技能習熟過程において、作業精度の顕著な変化がみられる作業（高難易度作業など）においては、より明確な質的作業成績と EOG 時系列変動の関係性がみとめられる可能性があると考えられる。

また、精度向上群 3 名では、自己相関係数や相互相関係数で表される EOG 時系列変動において、日程を通して共通した変化はみられず、一部の被験者間で共通した日ごとの変動収束傾向がみられた。よって、被験者ごとに、作業量、作業精度、眼球運動リズムの安定性に関する習熟が異なるタイミングで進んでいた可能性がある。よって、技能習熟過程の評価では、作業量や作業精度のみを評価するのではなく、動作や精神生理状態の変動特性を反映した指標も同時に評価することで、成果物の質につながる技能素を抽出することができると考えられる。また、被験者ごとに習熟パターンが様々であるため、被験者数を増やし、各習熟パターンにおいて、EOG 指標の有用性を検証する必要があると考えられる。

被験者間の EOG 時系列変動を比較すると、計測 5 日目であっても、EOG 波形は各被験者で異なっていた。EOG 信号には頭部の動きが影響するため、左右の塗り動作に合わせて頭部を左右にスライドする被験者や回転する被験者がいたため、変動差異の一因になったと考えられる。また、振幅の小さいサッカードが出現する時、EOG 波形は主にノコギリ状をしており、サッカード後に一時的に電位が下がるパターンを繰り返していた。これは、左から右へのサッカードがまず出現し、遅れて頭部が左から右へ動いたため、注視しているが、頭部の動きにより電位が変化したと推察される。

本研究で使用した斜め左右誘導の EOG では、塗り直し時に発生する不規則な眼球運動や、注意散漫時のよそ見、注意集中に起因する瞬目（Stern et al., 1984）や眼球運動（Fischer et al., 1987）などが信号に反映される。しかし、今回の EOG 時系列変動の安定性は、習熟過程の初期段階であったため、塗り直し時の眼球運動や動作周期の差異による影響が大きかったと予測され

る。今後、より動作に熟練した状態での EOG を計測することができれば、注意集中など精神面も反映した習熟過程を評価できると考えられる。

本研究から導かれた EOG 時系列変動指標を用いた技能習熟過程の評価方法は以下である。量的習熟段階において、動作を繰り返し実施する時の EOG を計測する。その後、EOG 時系列変動の周期および自己相関係数を解析し、日ごとや作業ごとに比較する。EOG 時系列変動周期が安定した場合、作業精度の習熟段階と判断する。作業精度の習熟段階では、EOG 時系列変動の自己相関係数および作業間の相互相関係数を解析し、日ごとや作業ごとに比較する。以上の手順により技能習熟過程を評価することで、相関係数増大とともに習得されてゆく技能素を抽出することができ、また、非熟練者が練習する際に、フィードバック指標として使用することができる。さらに、熟練者が動作を繰り返したときにおける EOG 時系列変動は、非熟練者が見本として活用することができ、また、熟練者の EOG 時系列変動における自己相関係数や相互相関係数を明らかにすることで、非熟練者が熟練者の技能域に達したかどうかの判定に応用することができるのではないかと考える。

EOG は、動作時に視界を妨げず、生体負荷が低く、動作方向、動作タイミング、加速度を 2 次元の時系列変動として簡便に把握することができる。よって、技能を発揮する場において計測する手法としては、実用性が高いのではないかと考える。一方、動作や頭部位置を確認するためには、画像の同時計測が必要であり、また、正確な視線位置は計測できないため、注視点の計測などでは他の計測装置の併用が必要となる。

解析に関し、本研究では 500Hz で計測したデータに、高周波のノイズをカットするため 30Hz のハイカットフィルタおよび 60Hz のノッチフィルタを適用後、100Hz にダウンサンプリングし解析に用いた。瞬目やサッカードの周期は数 Hz 以下であり、データのサンプリング周期を低減することで、相関解析における結果精度が向上する可能性もあるため、解析に適したサンプリング周期の検討は今後の課題である。また、今回は眼球回転角度の校正を行っていなかったため、日程間で電極装着位置が若干ずれ信号に影響している可能性があることを考慮し、日程間の相互相関解析を実施しなかった。今後、眼球回転角度の校正を行うことで、日程間の相互相関解析を実施することができ、EOG 時系列変動の評価指標としての精度が向上すると考える。

2-3 技能習熟過程評価に適した指標の検討；動作の種類による分類

2-3.a 実験 B 方法；手や指による技能系作業

2-3.a.(1) 被験者

健常若年成人男性 7 名（21–22 歳）を対象とし、京都工芸繊維大学内に設置された倫理委員会の承認を得て実験を実施した。全ての被験者に対し、睡眠障害や眠気を伴う薬の使用がないことを確認し、実験の目的・方法を説明した上で、文書による同意を得て、適切な報酬を支払った。

2-3.a.(2) 作業課題

伝統的装飾に使用される組み紐結びを取り上げ、代表的な形状の一つであり、かつ、手指の巧緻さを必要とする総角結び（あげまきむすび、図 2-3-1a）を作業課題として設定した。長さ 60cm の紐を用い、実物見本と手順書を見ることを許可し、見本を忠実に真似て紐を結ぶことを指示した（図 2-3-1b）。

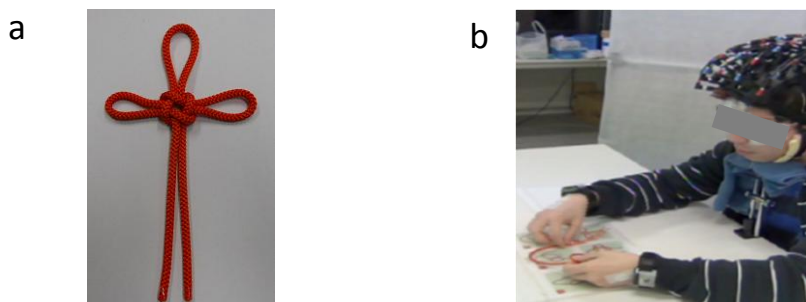


図 2-3-1 作業課題 (a：総角結び形状例、b：作業課題実施状況：石井、2012)

2-3.a.(3) 実験手順

2011 年 11–12 月、京都工芸繊維大学内の実験室において、10–12 時の時間帯に計測を実施した。実験は、計測練習 1 日、本計測 4 日、自宅練習 3 日である（図 2-3-2）。本計測日と自宅練習日は交互に実施した。本計測 1 日目の 7 日前から実験最終日まで、就寝 24 時、起床 7 時を目安に就寝起床時刻をそろえるよう生活統制を課し、睡眠日誌および手首活動量（Actiwatch、Mimi Mitter 製）による就寝起床時刻の記録および確認を行った。

本計測日には、精神生理状態の初期状態を確認するため、言語流暢性課題（Verbal Fluency Task：VFT、例：「あ」から始まる名詞を言ってください）を行い、その後、作業課題（安静 20 秒、紐結び 45 秒、安静 20 秒を 5 回繰り返す）を 3 回繰り返した（図 2-3-2）。生体信号へのノイ

ズ混入を避けるため、課題実施時はあご台にあごを置いた状態で紐結びを実施し、作業課題前後の安静時は、机上の注視点を見ながら、頭のなかで1から10までの数字を繰り返し数えるよう指示した。また、各作業課題前後に主観評価、各紐結び後に紐結びが完成したどうかの自己評価、VFT開始前、作業課題1開始前、作業課題3終了後に覚醒度評価（Alpha Attenuation Test、Stampi et al.、1995）を実施した。本計測前に課題へ習熟することを避けるため、練習日での紐結び実施は1回とした。さらに、自宅練習の3日間は、自宅で1日10回の紐結び練習を行うよう指示した。

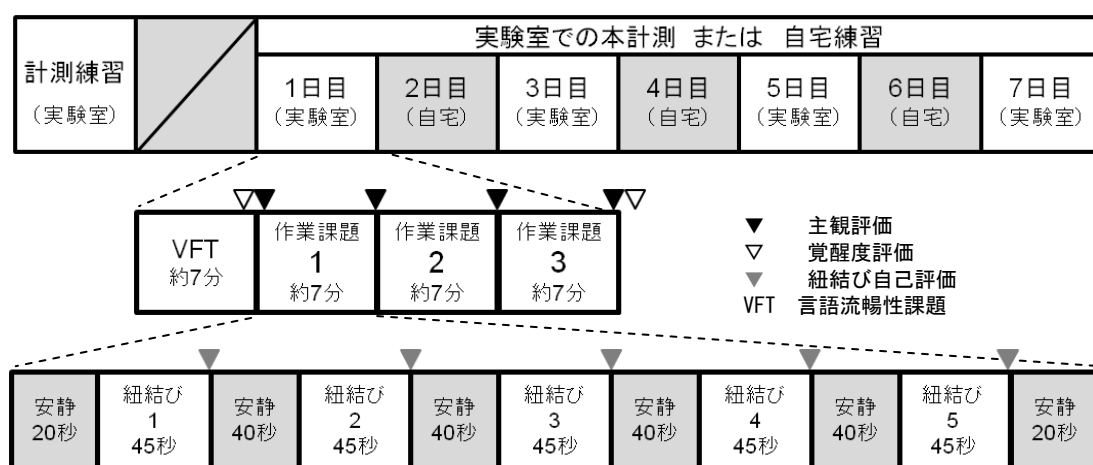


図 2-3-2 実験 B スケジュール (Sawai et al.、2013 をもとに作成)

2-3.a.(4) 解析指標および解析方法

本研究では、一連の研究（実験 A、B）を通して作業時の行動および精神生理状態の評価方法を検討するため、石井（2012）の実験で計測された指標のうち、作業時の行動および精神生理状態に関わる指標について結果を整理した。

作業成績：作業スピードに関わる量的作業成績として、総角結びが完成するまでの手順完了段階を評価した（図 2-3-3、表 2-3-1）。手順が完了した後、見本に近づけるための仕上げ作業が完了したかの判断をするため、紐結び 45 秒終了後に、被験者自身の自己評価を実施した。さらに、作業精度に関わる質的作業成績として、見本と被験者が作成した成果物との寸法差異を求めた。寸法差異は、図 2-3-4 における A-K 各部位の寸法を測定し、部位ごとに寸法が異なるため、各部位における成果物実測寸法と見本寸法との差異比率を求めた。

・寸法差異＝部位ごと寸法差異（|成果物寸法（mm）／見本寸法（mm）－1|）の和

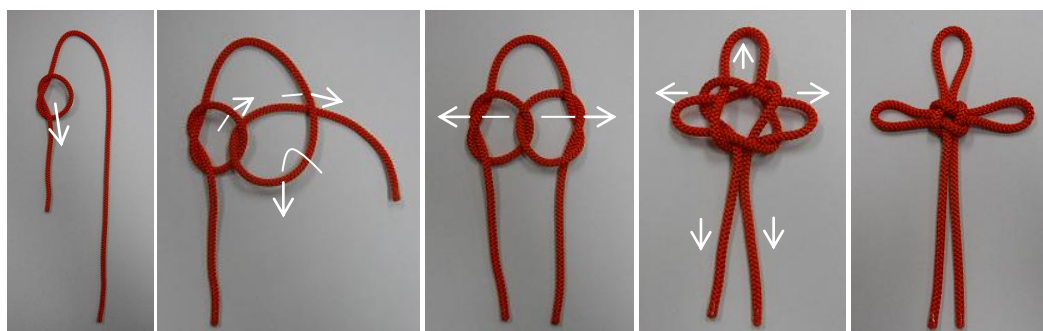


図 2-3-3 紐結び手順

表 2-3-1 手順完了段階（石井、2012）

	完了段階	スコア
未完成	何もできていない	0
	輪を正しく1つ作ることができる	0.2
	輪を正しく2つ作ることができる	0.4
	輪の片方を、正しく中央隙間に通すことができる	0.6
	輪の両方を、正しく中央隙間に通すことができる	0.8
完成	形は完成しているが被験者が未完成と判断した	0.9
	中央隙間なし	1.0
	中央隙間あり	1.2

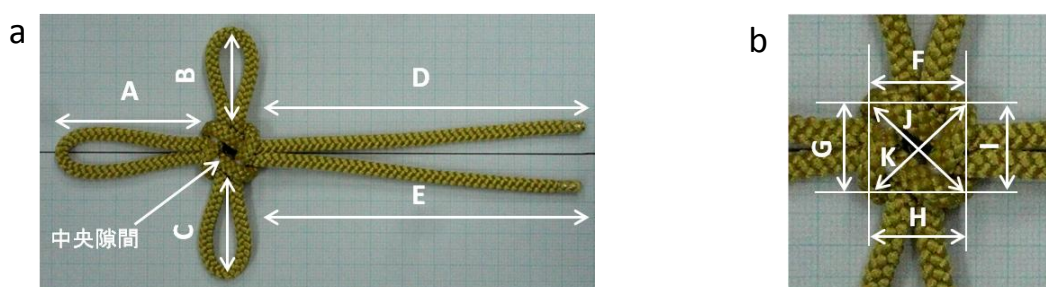


図 2-3-4 寸法測定位置（A-K、a：総角結び全形状、b：中央隙間部、石井、2012）

Near Infrared Spectroscopy signals（NIRS 信号）：大脳皮質酸化ヘモグロビン（oxy-Hb）濃度の相対的変化を反映する NIRS 信号を、Cz（国際 10-20 法に基づく）を基準に前頭部から後頭

部にかけて（47チャンネル）、10Hzで計測した（島津製作所、FOIRE-3000、図2-3-5）。各結び実施前の安静20秒間を基準とし、各結び中のoxy-Hb濃度変動量（NIRS信号値）を求めた。

$$\text{NIRS 信号値} = \frac{\text{結び中 oxy-Hb 濃度平均値} - \text{安静中 oxy-Hb 濃度平均値}}{\text{安静中 oxy-Hb 濃度標準偏差}}$$

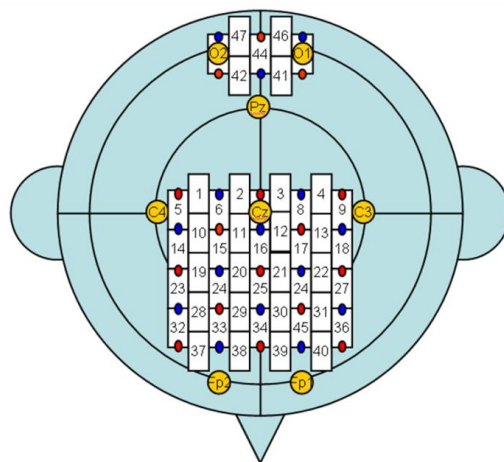


図2-3-5 NIRSプローブ配置図（石井、2012）

：数字はチャンネル番号、アルファベットは脳波電極位置を示す。

皮膚血流：額部皮膚血流を10Hzで計測した（OMEGAWAVE、FLO-C1）。NIRS信号に皮膚血流がノイズとして混入しているかどうかを確認するため、計測した。

心電図：脳波同様の計測装置を用い、RRインターバル²⁸（RRI）を計測した。各結び実施前の安静20秒間を基準とし、結び中のRRI変化量を求めた。さらに、被験者間のRRI変化量がばらついていたため、被験者内でRRI変化量を正規化した値（正規化RRI変化量）を統計解析や相関解析に用いた。

$$\text{RRI 変化量} = \text{結び 45 秒間 RRI 平均値} - \text{安静 20 秒間 RRI 平均値}$$

$$\text{正規化 RRI 変化量} = \frac{\text{各結び時の RRI 変化量} - \text{全結び時の RRI 変化量平均値}}{\text{全結び時の RRI 変化量標準偏差}}$$

²⁸ RR インターバル：心電図 R 波の時間間隔（単位：msec）。

手首活動量:両手首において3軸方向加速度を1Hzで計測し(ActiGraph、ActiSleep Monitor)、活動量として用いた。

$$\cdot \text{手首活動量} = \sqrt{x \text{ 軸}^2 + y \text{ 軸}^2 + z \text{ 軸}^2}$$

主観評価: Visual Analog Scale (VAS) を用い、精神生理状態(目覚め感、眠気、意欲の喪失感、疲労感、幸福感、悲哀感、落ち着き、緊張感)と習熟状況(表 2-3-2、2-3-3)に関して評価を実施した。精神生理状態の各質問項目では、「非常にある」がスコア 100、「まったくない」がスコア 0 とした。

本計測で使用した上記の計測・解析概要をブロック図(図 2-3-6)で示す。

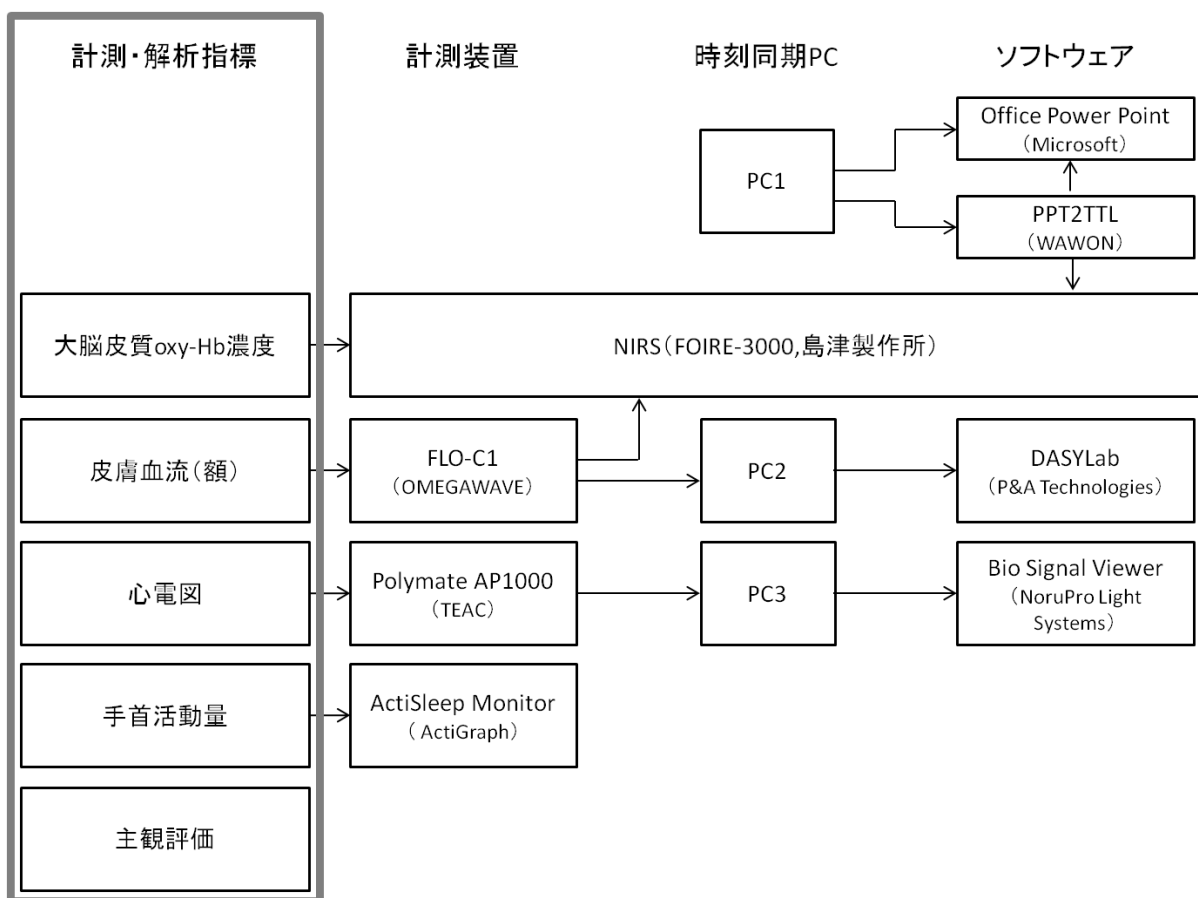


図 2-3-6 実験 B 計測概要ブロック図 (Sawai et al., 2013 をもとに作成)

表 2-3-2 習熟状況に関する作業課題前主観評価（石井、2012）

質問内容 (スコア 0/スコア 100)
これから実施する作業に対して、やる気はありますか？ (まったくない/とてもある)
これから実施する作業に対して、手順書や見本を使わずにつくることができると思いますか？ (まったく思わない/とても思う)
これから実施する作業に対して、一連の動作をスムーズに行うことができますか？ (まったく思わない/とても思う)
これから実施する作業に対して、難しそうに感じますか？ (まったく感じない/とても感じる)
これから実施する作業に対して、見本に忠実に再現することができますか？ (まったく思わない/とても思う)

表 2-3-3 習熟状況に関する作業課題後主観評価（石井、2012）

質問内容 (スコア 0/スコア 100)
5回の試行に対して、どの程度集中して取り組みましたか？ (まったく集中しなかった/とても集中した)
5回の試行に対して、どの程度リラックスして取り組みましたか？ (まったくリラックスしなかった/とてもリラックスした)
5回の試行に対して、どの程度難しいと感じましたか？ (まったく感じなかった/とても感じた)
1回の試行の中で、一連の動作をどの程度スムーズに行うことができましたか？ (まったくできなかった/とてもできた)
1回の試行の中で、ひとつひとつの動作をどの程度リズムカルにこなすことができましたか？ (まったくできなかった/とてもできた)
どの程度手順書を活用しましたか？ (まったく活用しなかった/とても活用した)
どの程度見本を活用しましたか？ (まったく活用しなかった/とても活用した)
回数が進むごとに、どの程度修正を加えましたか？ (まったく加えなかった/とても加えた)
形の崩れを認識したとき、どの程度うまく対処することができましたか？ (まったくできなかった/とてもできた)
形が崩れないよう、どの程度力加減に気を配りましたか？ (まったく気を配らなかった/とても気を配った)
形が崩れないよう、どの程度的確に手指を動かすことができましたか？ (まったくできなかった/とてもできた)
どの程度自分が思い描く通りに動作を実行することができましたか？ (まったくできなかった/とてもできた)

2-3.a.(5) 統計解析

全被験者 7 名について、IBM SPSS Statistics 20 を用い検定を行った。日程間の比較に関し、量的作業成績である手順完了段階には Friedman 検定を、質的作業成績である寸法差異には反復測定一元配置分散分析を用いた。反復測定において自由度が 1 よりも大きい場合は、Huynh-Feldt の ϵ による補正を用いた。Friedman 検定または分散分析で主効果がみとめられた項目に関し（有意水準 5%）、順に Wilcoxon 符号付き順位検定、対応のある t 検定を行い、信頼区間の調整には Bonferroni の方法を適用した。

また、各指標間の関係を調べるため、Pearson の積率相関係数を求めた。

結果図中では、 $p < 0.01$ を **、 $p < 0.05$ を *、 $p < 0.1$ を † と表記した。

2-3.b 実験 B 結果

2-3.b.(1) 作業成績結果

本計測 4 日間における手順完了段階推移を図 2-3-6a に、寸法差異を図 2-3-6b に示す。被験者 1 名において、実験 1 日目に紐結びを完成することができなかつたため、寸法差異の解析から除外した。被験者全体として、手順完了段階 ($n=7$ 、 $p<0.01$ 、図 2-3-6a)、寸法差異 ($n=6$ 、 $F_{3,15}=7.84$ 、 $p<0.05$ 、 $\epsilon=0.50$ 、図 2-3-6b) とともに日による主効果が有意であった。手順完了段階、寸法差異において、1 日目と他の日程間での差は有意ではなかつたが、作業を繰り返すことで量的かつ質的に作業へ習熟した傾向がみとめられた。

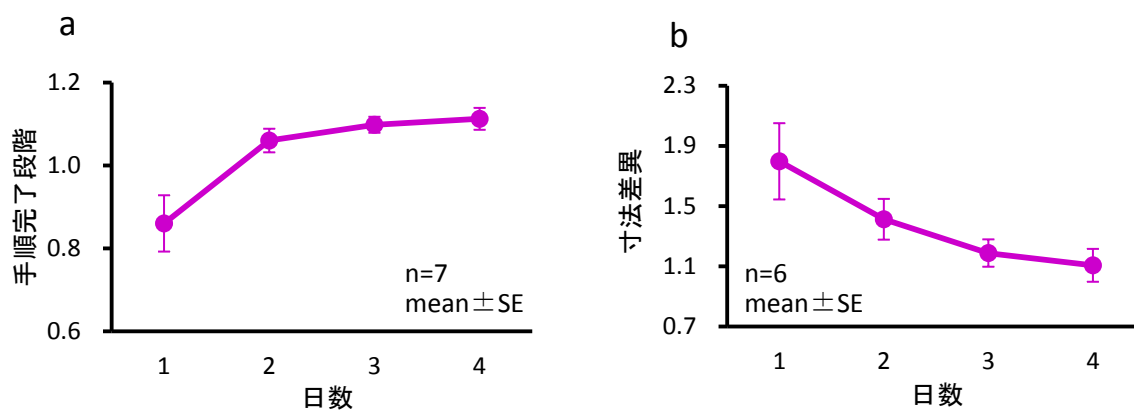


図 2-3-6 作業成績推移 (a: 手順完了段階、b: 寸法差異、Sawai et al., 2013 をもとに作成)

2-3.b.(2) 群分け

作業精度の向上に関わる質的習熟過程に着目するため、全被験者における各紐結び作業を、紐結びが完成したかどうかで群分けを行った。手順完了段階 (表 2-3-4) のスコア 0.9 以下を未完成群、スコア 1.0 以上を完成群とした。そして、完成群は紐結び手順が完了しており、形状を見本に近づけるための精度向上段階であると捉え、完成群 (精度向上群) に着目した。精度向上群に含まれる紐結び回数は、被験者 7 名の紐結び全 420 回のうち 332 回であった。また、精度向上群に含まれる作業回数は、被験者 6 名の作業全 84 回のうち 40 回であった。

2-3.b.(3) 相関解析結果

精度向上群の質的作業成績である寸法差異は、作業前のスムーズな動きの予測スコア(n=38; データ欠損 2 回。r=-0.53、p<0.01、図 2-3-7)、正規化 RRI 変化量 (n = 332、r=-0.19、p<0.01、図 2-3-8a)、両手首活動量 (n = 332、r = 0.11、p <0.05、図 2-3-8b) と相関関係がみられた。精神生理状態やその他の主観評価項目では、寸法差異と有意な相関関係はみられなかった。寸法差異が少ないほど、つまり質的作業成績が高いほど、作業前にスムーズな動きができる予測でき、心拍数と手首活動量が少ない関係であった。

NIRS 信号と他の指標について、ノイズが比較的少なく、運動野付近に位置する Cz 部位 (7 チャンネル部位) の値を用い解析した。NIRS 信号では、寸法差異と有意な相関関係はみられなかったが、正規化 RRI 変化量 (n = 291; データ欠損 41 回。r = 0.21、p<0.001、図 2-3-9a)、両手首活動量 (n = 291、r = -0.18、p<0.01、図 2-3-9b) と相関関係がみられた。このとき、NIRS 信号と額部皮膚血流には有意な相関関係はみられなかった。NIRS 信号は、装置の頭部圧迫負荷により、実験後半で装置を外した被験者がいたため、データ欠損数が 41 となった。

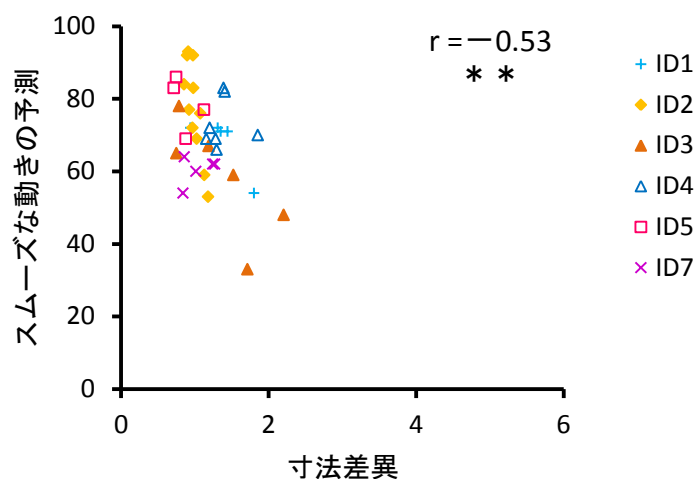


図 2-3-7 質的作業成績と主観評価（スムーズな動きの予測）の関係

(Sawai et al., 2013 をもとに作成)

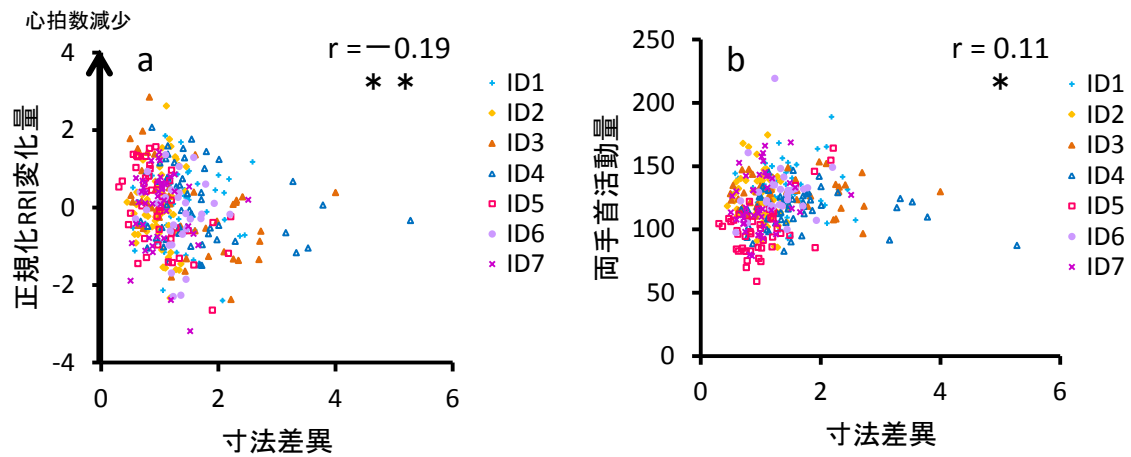


図 2-3-8 質的作業成績との関係

(a : 正規化 RRI 変化量、b : 両手首活動量、Sawai et al、2013 をもとに作成)

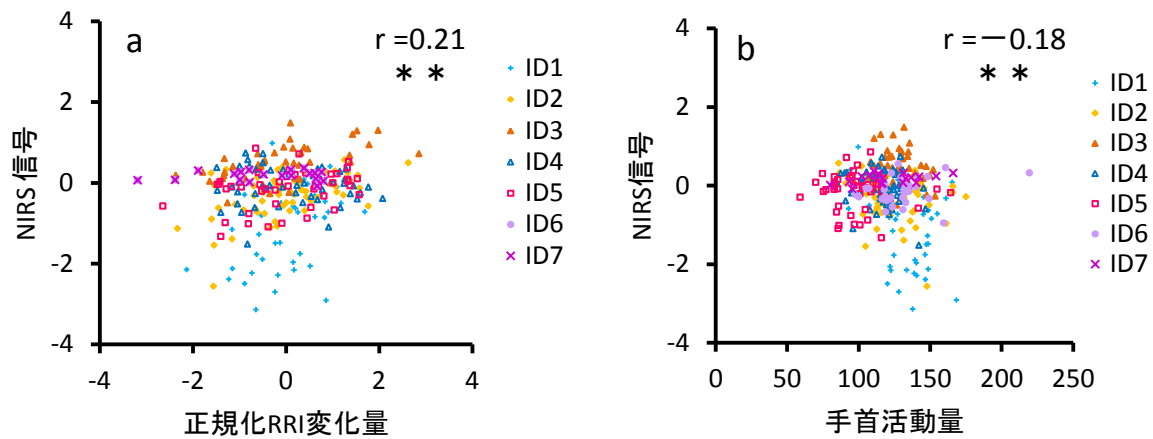


図 2-3-9 質的作業成績との関係

(a : 正規化 RRI 変化量、b : 両手首活動量、Sawai et al、2013 をもとに作成)

2-3.c 技能習熟過程評価に適した指標の検討に関する考察；動作の種類による分類

実験 B の結果より、技能習熟過程の初期段階において、作業時の行動特性や精神生理状態は、質的作業成績と関係があることが示された。紐結び形状の寸法で表される質的作業成績が高いほど、両手首活動量と心拍数は少ない関係がみとめられた。また、質的作業成績が高いときほど、作業前にスムーズな動きができると主観的に予測できていた。さらに、NIRS 信号は作業成績と有意な相関関係はみられなかったが、質的作業成績と相関関係がみとめられた両手首活動量や心拍数と相関関係がみとめられ、両手首活動量や心拍数が少ないほど、NIRS 信号は大きかった。よって、手や指による技能系作業において、質的作業成績の向上に伴い、作業中の不要な動きが減少し、同時に、精神生理状態としては、不要な交感神経活動が抑制されたと考えられる。

実験 A、B では、技能習熟過程の初期段階において、精神生理状態、行動特性、成果物の質を評価した。しかしながら、様々な技能を対象とした習熟過程の評価を想定すると、各評価指標には適、不適がある。

心拍数は交感神経活動や副交感神経活動を反映するが、心拍周期は 1Hz 前後であるため、塗り動作のような数秒単位の動作を評価するには適さない。心拍数は、1 分程度またはそれ以上（本研究では 45 秒）の継続時間がある動作の評価に適していると考えられる。

手首活動量は、手首の動きを反映するが、指のみの動作や精神生理状態は反映しない。手首活動量は、手首が動かない動作や精神生理状態を評価する場合には、他の指標の同時計測が必要である。

NIRS 信号は、大脳皮質の活動を反映するが、心拍数や EOG よりも体動ノイズに弱い。また、装置の頭部圧迫負荷のため、長時間連続計測には適さない。実験は、ノイズの混入を避けるため座位状態であご台を用い、NIRS プローブ装着から取り外しまでを 1 時間程度で終了できるよう計画した。NIRS 信号は、頭部の動きを統制でき、およそ 1 時間以内に計測が終了する動作の評価に適していると考えられる。

主観評価は、作業前に動作について予測することができたが、主観的な精神生理状態と成果物の質との関係は明確にならなかった。また、数秒単位の連続的な評価は困難である。主観評価は、他の精神生理状態の評価指標と同時計測することが推奨され、また、秒単位の時系列解析には適さないと考えられる。

EOG は精神生理状態と行動の両方を反映し、また、心拍数、NIRS 信号、主観評価よりも時間分解能が高い。しかし、EOG 時系列変動を評価するには、動作を繰り返す必要がある。また、長

時間の動作を評価する場合は、動作を短い時間単位で区切り、評価する必要がある。さらに、対象となる動作が眼球運動を伴わない場合は、評価に適さず、頭部の動きを伴う場合は、頭部の動きを把握することができる他の指標の同時計測が推奨される。

以上のことから、動作の種類によって、技能習熟過程に適した時系列評価指標を分類した（表 2-3-4）。成果物の質向上を目指した技能系作業時の精神生理状態マネジメントとして、動作の種類ごとに適した指標を選択し、技能習熟過程を評価することが重要である。

表 2-3-4 時系列評価指標の分類（Sawai et al., 2014 をもとに作成）

○：適する、／：適さない、（）：他の指標との同時計測が推奨される

指標の分類		手首活動量	NIRS 信号	心拍数	EOG
動作の継続時間	約 1 分より短い	○	○	／	○
	約 1 分より長い	○	○ ^{※1}	○	○
動作の種類	眼球運動を伴わない	○	○	○	／
	眼球運動を伴う	○ ^{※2}	○	○	○
	眼球運動と頭部の動きを伴う	○	／	○	(○)
反映する状態	精神生理状態	／	○	○	○
	行動特性	○	／	／	○

※1 1 時間より継続時間が長い場合は、計測指標として適さない

※2 手首の活動を伴わない場合は、計測指標として適さない

2-4 技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法まとめ

第2章における一連の研究結果から導かれた、技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法を以下に示す（図2-4-1）。

非熟練者が技能に習熟し、成果物の質向上を目指す過程において、まず、作業時の精神生理状態、行動特性、成果物の質の関係性を評価する。このとき、対象となる動作の種類に適した指標を選択し、計測する。そして、時系列の計測データから、成果物の質向上に関わる精神生理状態と行動特性を明らかにすることで、技能素を抽出する（例：成果物の質が高いときは、EOGリズムが安定している、心拍数が少ない、など）。次に、複数人の計測データや熟練者の計測データから、フィードバック指標を作成する（例：成果物の質が高いときは、EOGの自己相関係数が $r = 0.0$ 以上、心拍数が安静時 ± 0.0 拍、など）。以上の手順により、非熟練者が新たに技能に習熟し、成果物の質向上を目指す過程において、技能習熟の効率化を図ることができると考えられる。そして、成果物の質向上により、作業の充実感の向上が期待できる。

本研究結果より、継続時間が数秒単位であり、眼球運動を伴う動作を対象とする場合は、精神生理状態かつ行動特性の評価指標として、EOGが適している。成果物の質が高いとき、作業時のEOG時系列変動において、自己相関係数、作業間の相互相関係数が大きい関係がみとめられた。よって、成果物において、ある一定の質基準を設け、その時の相関係数を閾値とすることで、フィードバック指標を設定することができる。また、EOG波形そのものが動作リズムを表しているため、成果物の質が高かったときのEOG波形もフィードバック指標として使用することができる。

一連の研究結果から、技能系作業時の「パフォーマンス向上→作業の充実感向上→至適精神生理状態の達成」という精神生理状態マネジメントにおいて、成果物の質に関わるパフォーマンス向上を導く一手法が明らかとなった。

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(B)課題番号23300037により実施した。

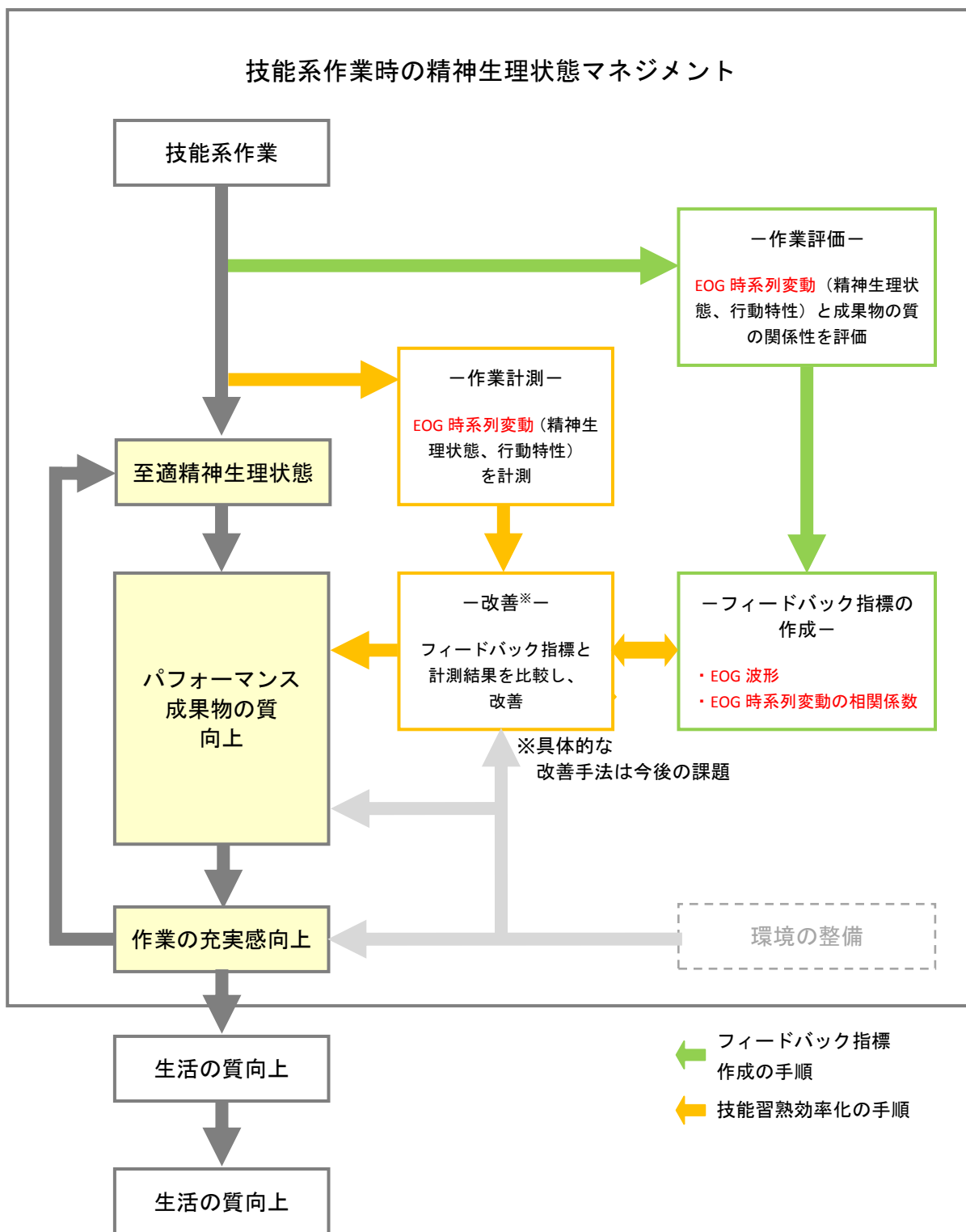


図 2-4-1 EOG を用いた日中技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法

2-5 引用・参考文献

- Fischer B., Breitneyer B.: Mechanisms of visual attention revealed by saccadic eye movements, *Neuropsychology*, 25(1A), pp.73-83, 1987
- Gowen E., Miall C.: Eye-hand interactions in tracing and drawing tasks, *Hum Mov Sci*, 25, pp.568-585, 2006
- 石井康晴：指先の巧緻な動作を伴う作業の習熟過程における精神生理状態の定量的評価についての研究、京都工芸繊維大学デザイン経営工学研究要旨集 2012、pp.16-17、2012
- 伊藤里香、檜山敦、並木秀俊、宮下真理子、谷川智洋、宮廻正明、廣瀬通孝：伝統技法における技能伝達のための暗黙知抽出に関する研究、映像情報メディア学会技術報告、33 (21)、pp.123-127、2009
- Iue M., Ota T., Hamasaki K., Kume M., Yoshida Y., Nakai A., Sasaoka N., Goto A.: Eye motion analysis in chado, the way of tea、京都工芸繊維大学 伝統みらい研究センター 伝統みらい便り'09、pp.221-227、2009
- Johansson R., Westling G., Backstrom A., Flanagan R.: Eye-hand coordination in object manipulation, *J Neurosci*, 21(17), pp.6917-6932, 2001
- 加藤寛子、森本一成：和包丁の研ぎ動作における筋負担の解析からみた技の検討、京都工芸繊維大学 伝統みらい研究センター 伝統みらい便り'06、pp.61-64、2006
- 荻阪良二：眼球運動の種類、荻阪良二、中溝幸夫、古賀一男（編）、眼球運動の実験心理学、名古屋大学出版会、愛知県、pp.18-22、1993
- 澤井浩子、渡守武和音、上野敬介、小山恵美：塗り動作習熟過程の定量的評価方法に関する研究；EOG 時系列変動に着目した解析、時間学研究、6、pp.49-59、2013
- Sawai H., Tomotake K., Ishii Y., Ueno K., Koyama E.: A Study of evaluating the process of mastering skills including pause and adjustment; Psychophysiological and behavioral evaluation using the information of biological signals and subjective scores, Proc of 2nd IIAI Internatinal Conference on Advanced Applied Informatics, pp.355-360, 2013
- Sawai H., Tomotake K., Ishii Y., Ueno K., Koyama E.: Psychophysiological and behavioral evaluation of the process of mastering skills; To select appropriate indices for a target movement, Lee R. (Ed.), *Studies in Computational Intelligence; Applied Computing and Information Technology*, 553, Springer, 2014 (in press)

- Stampi C., Stone P., Michimori A.: A new quantitative method for assessing sleepiness: the alpha attenuation test, *Work and Stress*, 9(2-3), pp.368-376, 1995
- Stern J., Walrath L., Goldstein R.: The endogenous eyeblink, *Psychophysiology*, 21(1), pp.22-32, 1984
- 田中辰憲、大西明宏、久米雅、白土男女幸、辻賢一、仲井朝美、芳田哲也：金網製作時にみる「間」、
京都工芸繊維大学 伝統みらい研究センター 伝統みらい便り'08、pp.62-66、2008
- 渡守武和音：腕の均質な動きを要する作業の習熟過程における作業成績および眼球運動の変動特性に関する研究、
京都工芸繊維大学デザイン経営工学研究要旨集 2013、pp.92-95、2013
- 吉井泉、石垣尚男：EOG を用いた DVA トレーニング効果の解析、*日本体育学会大会号*、54、p.269、2003

第3章 知的作業時の精神生理状態マネジメント； 光環境が精神生理状態に及ぼす影響

3-1 緒言

オフィスワーカーを想定した知的作業において、パフォーマンス向上を目指すためには、序論で述べたように（第1章 1-7）、知的作業そのもののパフォーマンスを定量的に評価することが困難であるため、パフォーマンス向上の基盤となる精神生理状態の管理が重要となる。

近年、光は、イメージ形成や印象といった視覚に関わるだけでなく、生物時計（Khalsa et al., 2003）や自律神経活動（道盛ら、1997、Mukae et al., 1992）などに影響を及ぼすことが報告されている。つまり光環境は、大脳レベルかつ脳幹レベルにおいて、精神生理状態に影響を及ぼす。よって、知的作業に適した精神生理状態を検討するためには、光が生体に及ぼす影響を把握することが重要であると考え、本研究では光環境に着目した。

光環境には、照度、相関色温度、波長、分光分布など様々な特性があり、各特性が生体に及ぼす影響に関して様々な報告がある。照度に関し、光に曝露することで、覚醒度やパフォーマンス（反応時間；Phipps-Nelson et al., 2003）、脳活動（Vandewalle et al., 2006）が向上し、さらに、0-10000 lx の範囲において、照度が高いほど覚醒度（萩原ら、1997）や交感神経活動（道盛ら、1997）が高まったことが報告されている。照度が増大するほど覚醒・緊張方向の影響が強くなるが、照度を増大させ過ぎると、過度の覚醒状態によるパフォーマンスの低下（Yerkes et al., 1908）や、不快グレアの発生、消費電力の増大が懸念される。よって、作業に必要な明るさを確保し、かつ、精神生理状態の観点から、日中作業に適した照度範囲を明らかにする必要がある。

また、実オフィスの照度範囲内で、光曝露による覚醒作用の効率化を図るため、光刺激を間欠的に与える非定常調光制御についての検討がなされている（荒木ら、1997）。先行技術開示において、非定常光によってパフォーマンスが改善されることが示唆されているが、精神生理状態への影響は明らかとなっていない。日中の照度は、太陽と雲の位置関係やヒトの移動によって、時々刻々と変化しており、明るさが非定常になることは自然界では一般的である。よって、本研究の予備的研究として、非定常光が覚醒度を含む精神生理状態に及ぼす影響を評価することで、非定常光の有用性を検討した（澤井、2011）。

非定常光に関する予備的研究では、昼白色蛍光ランプを用い、実オフィスの照度範囲内である

定常 500 lx、定常 1500 lx、非定常調光制御（定常 500 lx 6 分間、その後 1500 lx 6 分間、その後 500 lx に 8 分間かけて緩徐低下させるという 20 分周期の制御を繰り返す、変化条件）が日中の精神生理状態に及ぼす影響を評価した。健常若年成人男性 12 名を対象に、13 時–16 時 30 分において、各条件光での光曝露を行った。その結果、変化条件は 500 lx 条件よりも実験中盤の主観的覚醒度が有意に高く、心拍変動 High Frequency パワー値が有意に小さかった。しかし、1500 lx 条件では、500 lx 条件との有意な覚醒度の差がみとめられなかった。サーカセミディアンリズム²⁹として出現する覚醒度が低くなる午後の時間帯において、変化条件では、500 lx 条件よりも覚醒度を維持できたと考えられる。3 条件における平均照度は 500 lx 条件 < 変化条件（1000 lx 程度） < 1500 lx 条件であるが、変化条件では 500 lx 条件からの照度増大に加え、照度変化という一過性の刺激が覚醒度に影響を及ぼした可能性がある。よって、非定常光により日中の覚醒度低下を防止できる可能性が示唆されたため、日中作業に適した照度範囲を明らかにすることに加え、覚醒度を維持向上することができる照度上昇レベルを明らかにすることは、省電力化の観点から有用であると考えられる。

光環境の照度以外に、白色照明の相関色温度（Mukae et al., 1992、Deguchi et al., 1992、Viola et al., 2008）や単波長光の波長（Vandewalle et al., 2007、李ら、2008、夏ら、2013）によって、精神生理状態への影響が異なることが報告されている。蛍光ランプを用いた研究では、相関色温度が高い光は相関色温度が低い光よりも脳活動（Deguchi et al., 1992）や覚醒度、パフォーマンスの主観評価（Viola et al., 2008）、自律神経活動（Mukae et al., 1992）を高め、また、疲労感増大を防いだことが報告されている（Viola et al., 2008）。よって一般的な蛍光ランプでは、相関色温度が増大すると、つまり短波長成分比率が増大すると、覚醒・緊張方向の影響が強くなると考えられる。

単波長光を用いた研究では、青色相当の単波長光は他の波長域の光よりも視床を含む脳活動（Vandewalle et al., 2007）や覚醒度（李ら、2008）、パフォーマンス（夏ら、2013）を高めたことが報告されている。これらの結果には、メラノプシンを含む神経節細胞（intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: ipRGCs、Berson, 2003）が関与すると考えられている。ipRGCs は、3 錐体の感度ピーク波長とは異なる 480nm 付近の青色光に最も反応し（Berson et al., 2002、Dacey et al., 2005）、生物時計の中核である視交叉上核に信号を伝達する（Berson et al., 2002、Hatter et al., 2002）ためである。一方、光に影響される夜間メラトニン分泌において、青単色光の分泌抑制作用は、他の波長成分を加えると減衰することが報告されている（Figueiro et

²⁹ サーカセミディアンリズム：約半日周期の生体リズム。

al., 2005)。このことより、白色光では、短波長光の影響を弱めるメカニズムの存在が示唆されるが、その波長特性は明らかになっていない。したがって、昨今普及している青色を励起光とする白色 LED は、460nm 付近に励起光の波長ピークを持ち、従来から使用されてきた蛍光灯とは分光分布が異なるため、視覚疲労に関しては差異がないとの報告はあるが(望月 他、2010)、照度や相関色温度が同じでも、精神生理状態への影響強度は異なる可能性がある。しかし、各光源が精神生理状態に及ぼす影響強度は明らかになっていない。

以上のことから、知的作業を対象とし、「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」により精神生理状態をマネジメントするため、以下二つの観点から、日常的にオフィスで使用されている様々な光環境が精神生理状態に及ぼす影響を評価し、精神生理状態の観点から知的作業に適した光環境要件について検討することを目的とした。

1. 実オフィスの照度範囲内において、異なる照度への照度上昇と、その後の光曝露が精神生理状態に及ぼす影響を明らかにする
2. 実オフィスで普及している光源（3 波長形蛍光灯、青色励起白色 LED）において、異なる光源（分光分布）での照度上昇と、その後の光曝露が精神生理状態に及ぼす影響を明らかにする

3-2 方法

3-2.a 被検者

健常若年成人男性 8 名 (23±1 歳、身長 174±5cm、mean±SD) を対象とし、京都工芸繊維大学内に設置された倫理委員会の承認を得て実施した。全ての被験者に対し、睡眠障害や眠気を伴う薬の使用がないことを確認し、実験の目的・方法を説明した上で、文書による同意を得て、適切な報酬を支払った。また、朝型一夜型質問紙³⁰ (石原、1986) により明らかな朝型や夜型でないこと、石原式色覚検査表³¹ (石原、1968) により色覚異常がないことを確認した。

3-2.b 照明条件および装置

照度による影響を評価するため (照度比較)、3 波長形³²昼白色³³蛍光ランプ (FL) を用い、実オフィスを想定した机上面照度 4 条件 (250、500、1000、2000 lx : FL250、FL500、FL1000、FL2000)、および青色励起昼白色 LED を用い、机上面照度 2 条件 (250、500 lx : LED250、LED500) を設定した (表 3-2-1)。全条件において、初期状態は机上面 250 lx とした。机上面照度の最低値は、労働安全衛生規則第 604 条普通の作業の基準値である 150 lx 以上、かつ、事前評価において課題実施に支障がないレベルであると判断した 250 lx とした。最大値は、照度レベルによる精神生理的影響の変化量を確認するため、視作業要件の高照度とし、JISZ9110/2010 超精密な視作業要件の 2000 lx とした。LED では照明装置の調光範囲限界により、500 lx までとした。光源の相関色温度は、一般的に使用されている光色の中で、色に起因する覚醒度低下または上昇を避けるため、中間的な色味である昼白色とした。

また、分光分布形状による影響を比較するため (光源比較)、一般的に使用されている 3 波長形昼白色蛍光ランプ (FL) と青色励起昼白色 LED (LED) 各 250 lx と 500 lx の 4 条件を設定した (表 3-2-1、図 3-2-1)。全条件において、初期状態は机上面 250 lx とした。光源間で、明るさと光色による影響を統制し、分光分布形状による影響を評価するため、机上面照度 (250 lx または 500 lx) と相関色温度 (受光面実測値で白色相当、JISZ9112/2012 : 3800–4500K、コニカミノルタ製 CS-1000) を極力同等レベルに設定した。受光面とは、眼前位置、課題時視線方向の面である。市販光源を使用したため、受光面実測値で条件間の相関色温度は若干異なっていた (表 3-2-1)。

³⁰ 朝型一夜型質問紙：就寝・起床や生体リズムに関する質問によって、生活パターンを「明らかな朝型」から「明らかな夜型」までの 5 段階で評価するための質問紙。

³¹ 石原式色覚検査表：色覚異常があるかどうかを判断するための検査表。

³² 3 波長型蛍光ランプ：主に 3 種類の蛍光体によって白色を構成する蛍光ランプ。

³³ 昼白色：蛍光ランプ、LED とともに 4600–5500K 範囲の光源色を示す (JIS Z9112/2012)。

表 3-2-1 実験条件の概要 (10° 視野、澤井 他、2014 をもとに作成)

条件名	光源 ^{※1}	机上面初期 設定照度 (lx) ^{※2}	机上面 設定照度 (lx) ^{※2}	机上面 照度平均値 (mean±SD lx) ^{※3}	机上面 照度 均斉度 ^{※3}	受光面 ^{※4} 照度 (lx)	受光面 ^{※4} 相関色 温度 (K) ^{※5}
FL250	3 波長形 昼白色 蛍光 ランプ	250	250	237±20	0.80	126	3710
FL500			500	461±46	0.78	213	4100
FL1000			1000	890±104	0.76	459	4080
FL2000			2000	1696±215	0.76	845	4300
LED250	青色励起 昼白色 LED	250	250	222±21	0.76	111	4460
LED500			500	420±56	0.74	208	4460

※1 照度比較として FL250・500・1000・2000、LED250・500 をそれぞれ比較した。光源比較として FL250 と LED250、FL500 と LED500 をそれぞれ比較した。

※2 設定照度とは、机上面の基準点（課題で使用使用する A4 用紙の中央位置）周辺の設定照度である。

※3 机上面全体（奥行き 500×幅 805mm）を 100mm ごとに区切った計測ポイント合計 54 ヶ所から算出した。

※4 受光面実測値として、全被験者の中でおよそ中間の視線位置を示した被験者の眼前位置、課題時視線方向の面での値を示す。

※5 FL では、同一光源を用いたが照度を制御したため、受光面での相関色温度が変化した。

光環境は、局部照明³⁴と全般間接照明³⁵で構成した（図 3-2-2a、b、c）。局部照明として、奥行き 450×幅 850×高さ 150mm の木箱内部に FL または LED を設置し、乳白色の拡散板を取り付けた装置を各 1 台作成した。FL 条件用局部照明には昼白色 FL(Panasonic 製 FLR20S・EX-N/M)4 本を設置し、LED 条件用には昼白色 LED (LedEngin 製 LZC-00MD40) 3 個と放熱板およびファンを設置した。局部照明は、机上面から 760mm 上部に配置した。また全般間接照明として、FL 条件時は昼白色 FL (Panasonic 製 FRT1000EN) 5 本を、LED 条件時は昼白色ライン LED (neo blue 製 NLB-DW-90) 5 本を室内周囲に配置した。昼白色 FL (カタログ値、局部照明：5000K、全般照明：5000K)、昼白色 LED (カタログ値、局部照明：5500K、全般照明：6000K) を用いたが、拡散板を設置し、また照度調整したため、受光面での実測相関色温度は白色相当となっていた（表 3-2-1）。照明装置の構造概要は付録 1 に示す。

各条件の照度は局部照明により調整した。FL 条件の照度調整はパルス制御³⁶とし、LED 条件は高輝度の影響を避けるため電流制御とした（順に NI9472、NI9263、NATIONAL INSTRUMENTS 製使用）。

³⁴ 局部照明：全般照明に付加したり、分離して制御したりする照明の方式（田淵義彦、2003）。

³⁵ 全般間接照明：ある領域全体を均一に照明する方式（田淵義彦、2003）。

³⁶ パルス制御：パルス信号の ON/OFF 比率を変えることで、照明の明るさを制御する手法。

机上面の実測照度分布を図 3-2-3 に示す。

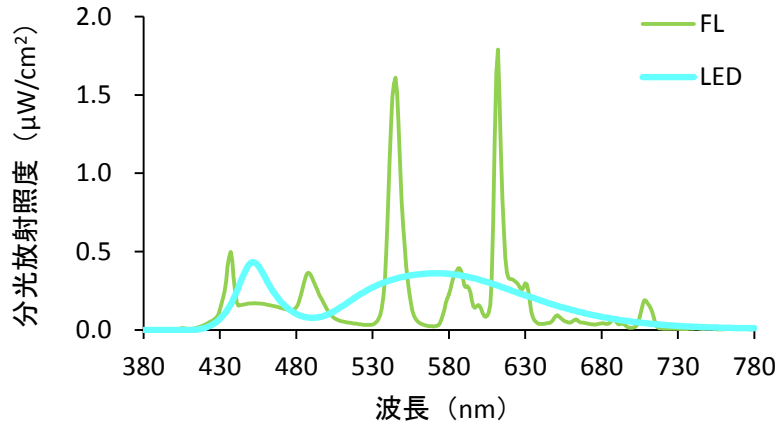


図 3-2-1 受光面分光分布（机上面 500 lx 時、澤井 他、2014）

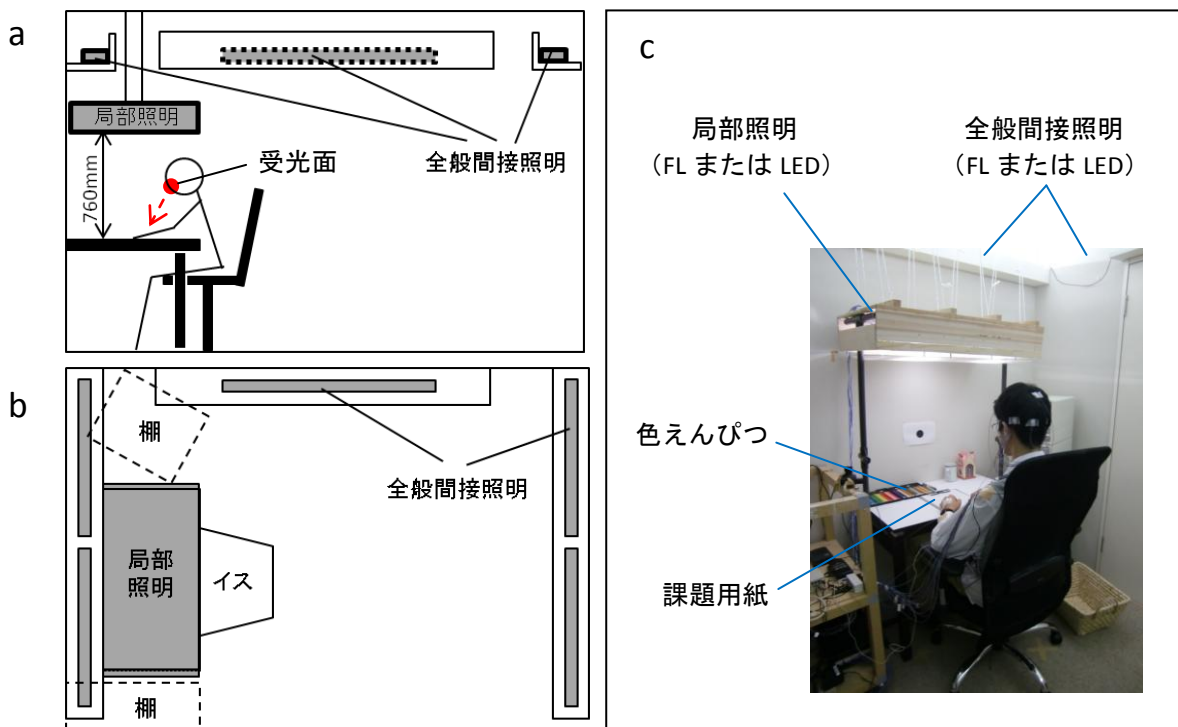


図 3-2-2 照明装置レイアウト

(a : 側面視、b : 上面視、c : 実験状況、澤井 他、2012、2014 をもとに作成)

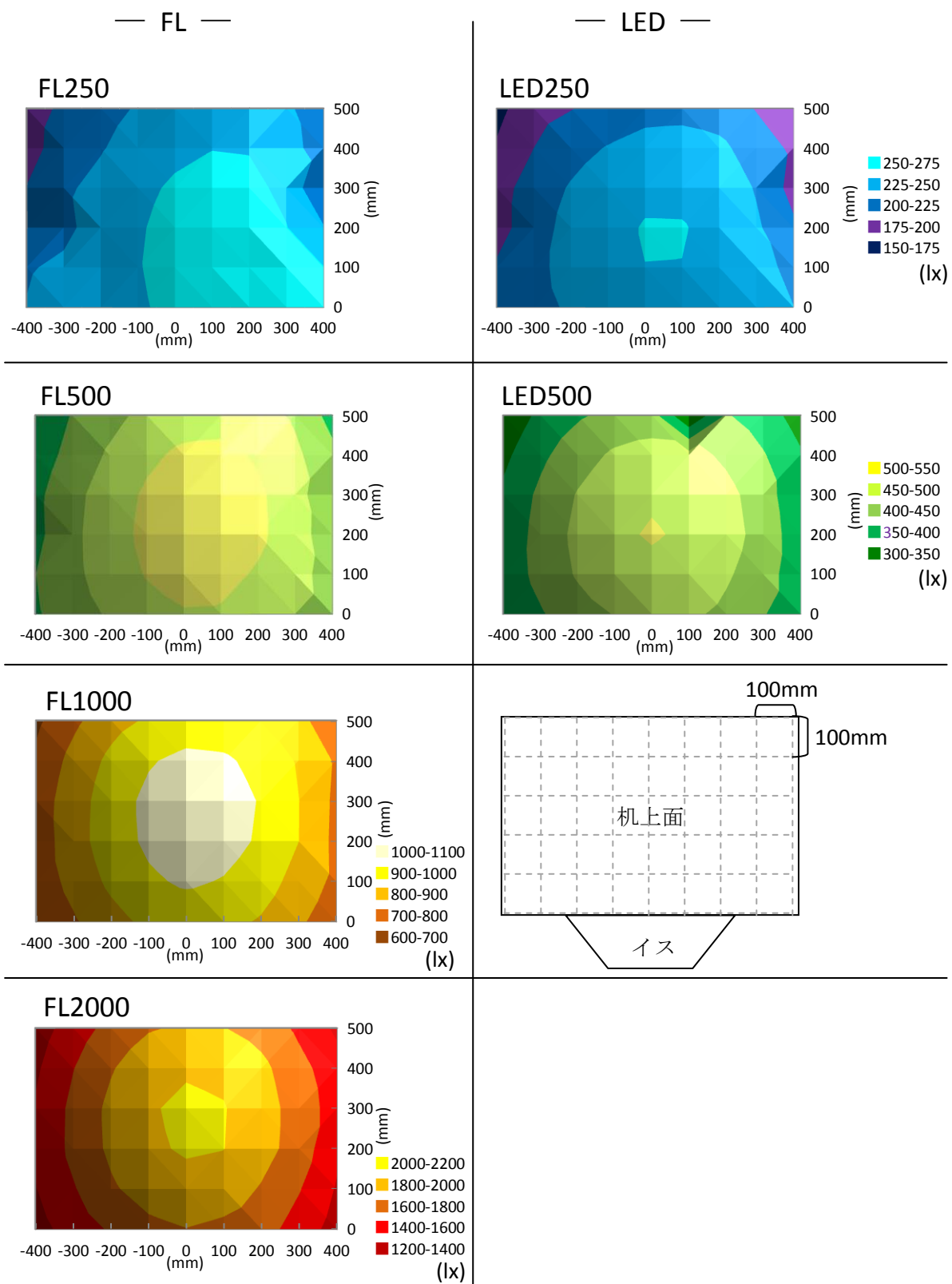


図 3-2-2 机上面照度分布 (上面視)

3-2.c 実験手順

2011年10月－2012年3月、京都工芸繊維大学内の生体計測実験室において、13－17時の時間帯に計測を実施した。各被験者は1日1条件として全条件を実施し、順序効果を避けるため、各条件はランダムとした。実験1日目は練習日として解析から除外している。練習日の1週間前から実験最終日まで、就寝1時、起床8時を目安に就寝起床時刻をそろえるよう生活統制を課し、睡眠日誌および手首活動量(Mimi Mitter 製 Actiwatch または ActiGraph 製 ActiSleep Monitor) による就寝起床時刻の記録および確認を行った。

被験者は実験日の11時30分に実験室に到着し、昼食後、電極類の装着を行った。電極類を装着する実験準備室の照明条件は、電球色蛍光灯を使用し、机上面500 lx程度とした。実験日は、起床後から過度な運動、飲酒、カフェインの摂取を禁止し、実験開始2時間前から喫煙を禁止した。昼食は、実験期間を通して量と内容をそろえるよう指示した。実験中は、無地白色のYシャツを着用した。

計測開始後からの実験スケジュールを図3-2-3に示す。13時10分に実験を開始し、机上面照度250 lx下にて30分区切りの評価Setを1回実施し、その後14時から各条件照度下にて評価Setを6回(Set2－7、合計3時間)繰り返した。Set1の前には、読書10分と主観評価(Visual Analog Scale : VAS、Monk、1987) および覚醒度評価(Alpha Attenuation Test : AAT、Stampi et al.、1995) により、精神生理状態の統制および確認を行った。実験終了時には課題と光環境に関する印象評価を実施した。各Set内容は、安静開眼1分間、知的作業課題(A : 1分間、B : 1分間、C : 15分間)、主観評価、覚醒度評価である。知的作業課題は実務で使用する能力を想定し、A : 文字並び替え課題(収束的思考・問題解決、図3-2-4)、B : 数字記憶課題(短期記憶、図3-2-5)、C : 塗り絵課題(創造性、図3-2-6)とした。課題は全て紙面で実施し、課題AとBは被験者ごとに実施順序を入れ替えた。また、実験条件と課題各問題の組合せは、ランダムとした。

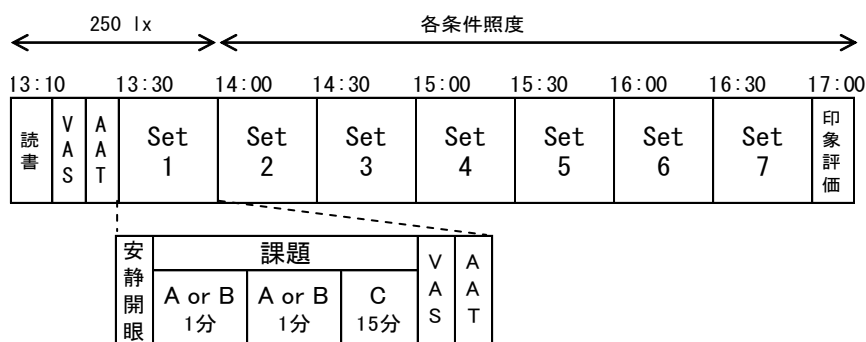
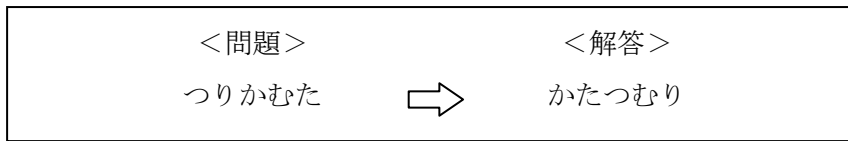
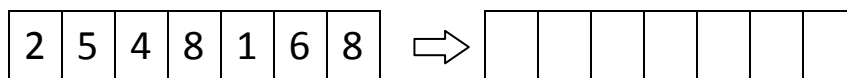


図3-2-3 実験スケジュール (澤井 他、2014)



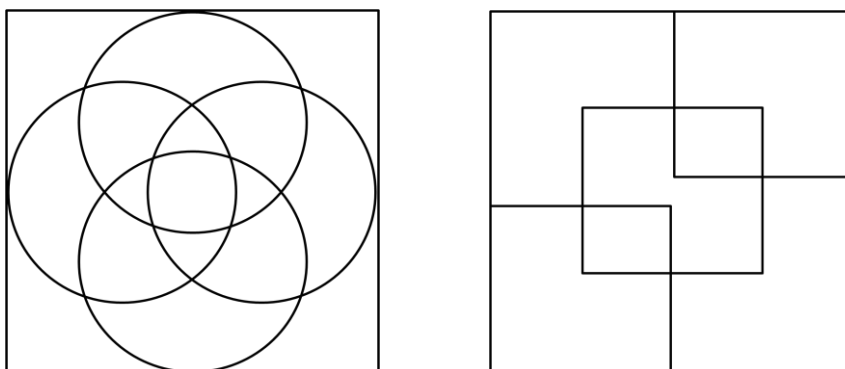
- ◇問題：3-6文字のひらがなを並び替え、意味の通る単語を作る
- ◇指示：「できるだけたくさんの問題に、正確に答えてください」

図 3-2-4 課題 A 問題例



- ◇問題：問題用紙の7桁の数字を一度に覚え、解答用紙に書く
- ◇指示：「できるだけたくさんの問題に、正確に答えてください」

図 3-2-5 課題 B 問題例



- ◇問題：48色の色鉛筆(ベロール製イーグルカラー)を使い、幾何学模様が書かれた500mm四方の枠内に色を塗る
- ◇指示：「デザインテーマを決め、色を塗ってください」

図 3-2-6 課題 C 問題例

3-2.d 解析指標および解析方法

脳波：照度上昇時の覚醒度を評価するため、O1 α 波パワー値（国際 10-20 法に基づく。8.0－12.9Hz）を 20 秒ごとに求めた。また、実験 1 日を通しての覚醒度評価として、AAT を実施し（閉眼、開眼各 1 分を交互に実施。合計 6 分）、O1 α 波パワー値から α 波減衰係数（Alpha Attenuation Coefficient：AAC=閉眼時／開眼時）を求めた。実験 1 日を通しての AAC 変化量が被験者間でばらついていたため、各被験者内で正規化した値を統計解析に用いた。計測にはティアック製多用途生体アンプ Polymate AP1132 と ACT 生体電極を用い、500Hz でサンプリングを行った。周波数解析には NoruPro Light Systems 製の生体信号解析ソフトを用い、512 ポイントごとに高速フーリエ変換で解析した。

心電図：RR インターバルを計測し、副交感神経活動の指標（Franzini、2005）として、心拍変動 High Frequency パワー値（HF、0.15－0.45Hz）を求めた。脳波同様の計測装置と解析ソフトを用い、AAT を実施している安静 6 分間について、20 秒ごとに Complex Demodulation Method で解析した。

主観評価（VAS）：両側に「まったくない」「非常にある」と配置された 100mm 線分を用いた。質問項目は、目覚め感、眠気、意欲の喪失感、疲労感、幸福感、悲哀感、落ち着き、緊張感である。情動に関わる質問項目を総合し全般的情動として、活力に関わる質問項目を総合し全般的活力として算出し、評価した（野田、1999）。各質問項目に対し、「まったくない」がスコア 0、「非常にある」がスコア 100 とした。また、課題 C（塗り絵課題）の自己評価として、色の配置・模様等のデザインを考えられたかどうか（デザイン思考）、出来に満足しているかどうか（デザイン出来）を評価した。

- ・全般的情動＝（幸福感－悲哀感＋落ち着き－緊張感＋200）／4
- ・全般的活力＝（目覚め感－眠気－意欲の喪失感－疲労感＋300）／4

印象評価：7 件法の質問紙を用い、実験終了時に作業課題に対する印象、光環境に対する印象を評価した。質問項目は作業課題に関し、楽しさ、集中度、時間の長さ、面白さ、課題 A・B の出来である。また光環境に関し、明るさ、快適さ、好き嫌い、暖かさ、開放感、鮮やかさ、文字視認性、色の自然さ、眩しさ、煩わしさである。

作業成績：課題 A、B について、Set ごとの解答数、正答数と正答率を求めた。

本計測で使用した上記の計測・解析概要をブロック図（図 3-2-7）で示す。

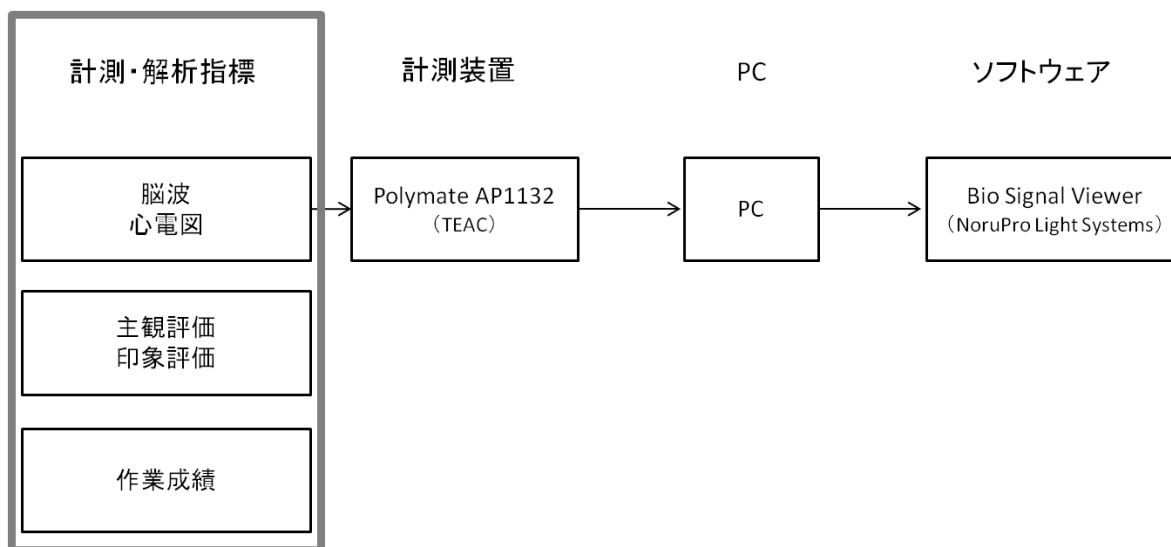


図 3-2-7 計測・解析概要ブロック図

3-2.e 統計解析

被験者 8 名について、照度上昇による影響と 3 時間光曝露による影響を確認するため、IBM SPSS Statistics 20 を用い検定を実施した。

照度上昇による影響を確認するため、条件間比較と条件内時系列比較を実施した（図 3-2-8a）。条件間比較として、脳波 O1 α 波パワー値と心拍変動 HF パワー値について、照度上昇前 20 秒から上昇後 60 秒までにおける 20 秒間ごとの値を用い、照度条件間（FL4 条件間、LED2 条件間）と光源間（FL500 と LED500 間）の比較をした。また、照度上昇前後である Set1 と Set2 での値を用い、各指標について、照度条件間（FL4 条件間、LED2 条件間）と光源間（FL500 と LED500 間）の比較をした。FL4 条件比較では反復測定一元配置分散分析を、その他の 2 条件比較では対応のある t 検定を用いた。分散分析で有意な主効果（有意水準 5%）がみとめられた項目に対し、対応のある t 検定（信頼区間の調整には Bonferroni の方法を適用）を行った。

各条件内時系列比較として、脳波 O1 α 波パワー値と心拍変動 HF パワー値について、照度上昇前 20 秒を基準とし、上昇後 60 秒までにおける 20 秒間ごとの値を対応のある t 検定を用いて比較した。また、各指標について、照度上昇前後である Set1 と Set2 の値を対応のある t 検定を用

いて比較した。

3時間光曝露による影響を確認するため、照度条件間（FL4条件間、LED2条件間）と光源間（FL250とLED250間、FL500とLED500間）で比較した（図3-2-8b）。まず初期状態の確認として、Set1のFL4条件比較では反復測定一元配置分散分析を、その他の2条件比較では対応のあるt検定を各指標で実施した。また、各照度条件光曝露中であるSet2-7について、条件とSet回数を要因とした反復測定二元配置分散分析を各指標で実施した。印象評価は1日に1回の計測であったため、FL4条件比較では反復測定一元配置分散分析、その他の2条件比較では対応のあるt検定とした。FL4条件の反復測定二元配置分散分析で有意な主効果（有意水準5%）がみとめられた項目に対し、2条件ごとに反復測定二元配置分散分析を行った。印象評価の反復測定一元配置分散分析で有意な主効果（有意水準5%）がみとめられた項目に対し、対応のあるt検定（信頼区間の調整にはBonferroniの方法を適用）を行った。

分散分析において自由度が1より大きいF値検定にはHuynh-Feldtの ϵ による補正を用いた。結果には補正前の自由度を記載している。2条件比較では、有意傾向10%未満も考察の対象とした。結果図中では、 $p < 0.01$ を**、 $p < 0.05$ を*、 $p < 0.1$ を†と表記した。

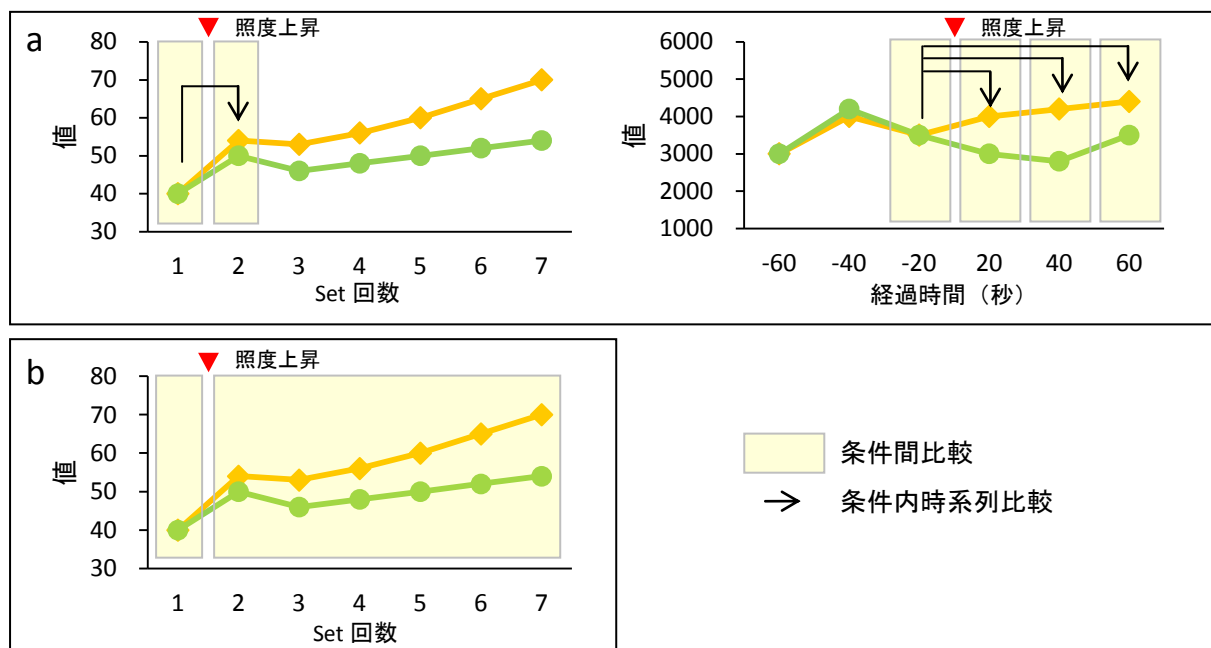


図 3-2-8 解析方法の概略図（a：照度上昇の影響解析、b：3時間光曝露の影響解析）

3-3 照度比較結果

3-3.a 照度上昇による影響

3-3.a.(1) 照度上昇の瞬間；FL4 条件比較

照度条件間比較において、照度上昇後 20 秒の開眼時 O1 α 波パワー値では、照度による主効果が有意であった ($F_{3,21} = 8.6$, $p < 0.01$, $\epsilon = 1.0$)。2 条件ごとに比較すると、FL2000 は FL250 よりも値が有意に小さかった ($p < 0.05$, 図 3-3-1)。心拍変動 HF パワー値では、照度条件間に有意な差はみられなかった (図 3-3-2)。よって、FL2000 は FL250 よりも、照度上昇直後の覚醒度が有意に高かった。

条件内時系列比較において、開眼時 O1 α 波パワー値では、FL1000 で上昇後 20 秒の値が上昇前 20 秒の値よりも有意に減少した ($p < 0.01$, 図 3-3-1)。また、心拍変動 HF パワー値では、FL1000 で上昇後 20 秒の値が上昇前 20 秒の値よりも減少する傾向であり ($p < 0.1$)、FL2000 で上昇後 40 秒間の値が有意に減少した (20 秒: $p < 0.05$, 40 秒: $p < 0.05$, 図 3-3-2)。よって FL1000 では、照度上昇後に覚醒・緊張方向に、FL2000 では緊張方向に状態が変化した。

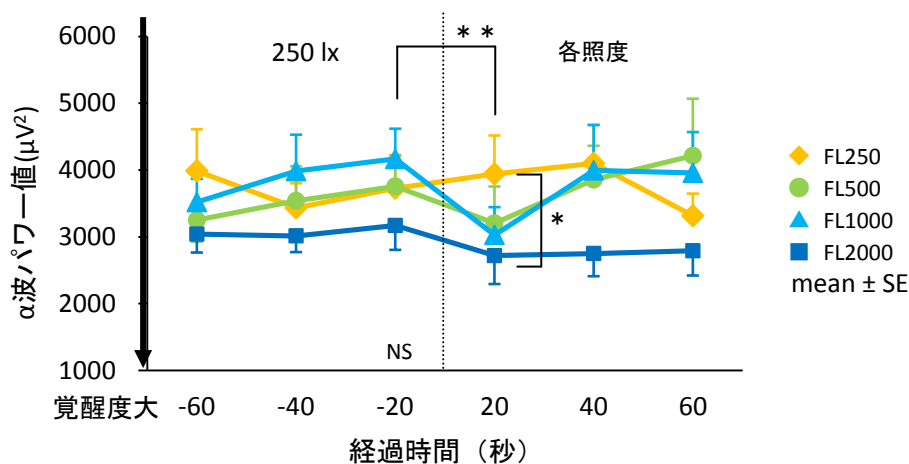


図 3-3-1 照度上昇時の脳波 α 波パワー値 (澤井 他、2012)

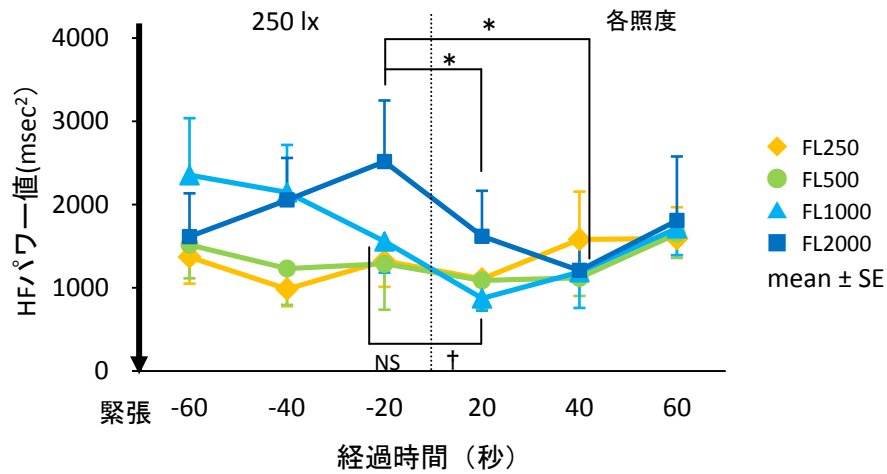


図 3-3-2 照度上昇時の心拍変動 HF パワー値 (澤井 他、2012)

3-3.a.(2) 照度上昇の瞬間 ; LED2 条件比較

照度条件間比較において、開眼時 O1 α 波パワー値、心拍変動 HF パワー値では、照度条件間に有意な差はみられなかった (図 3-3-3、3-3-4)。

条件内時系列比較において、開眼時 O1 α 波パワー値では、LED500 で上昇後 40 秒の値が上昇前 20 秒の値よりも減少する傾向であった ($p < 0.1$ 、図 3-3-3)。心拍変動 HF パワー値では、LED250、LED500 ともに有意な差はみられなかった (図 3-3-3、図 3-3-4)。よって LED500 では、照度上昇後に覚醒度が上昇する傾向であった。

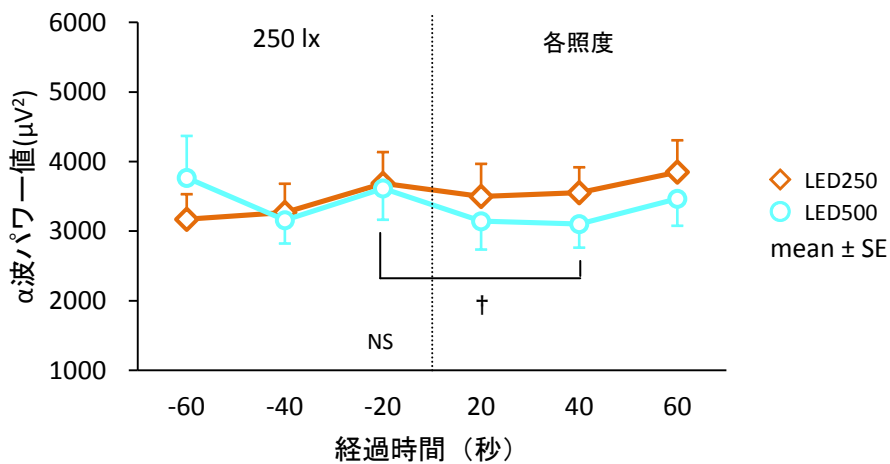


図 3-3-3 照度上昇時の脳波 α 波パワー値

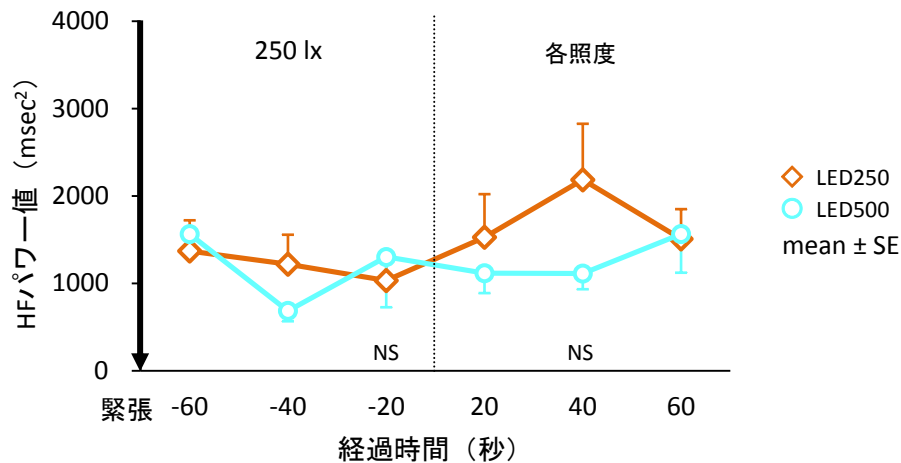


図 3-3-4 照度上昇時の心拍変動 HF パワー値

3-3.a.(3) 照度上昇前後 ; FL4 条件比較

照度条件間比較において、全指標で有意な差はみられなかった。

条件内時系列比較において、主観評価では、照度が上昇した FL500、FL1000、FL2000 で照度上昇後に眠気が減少する傾向であり（順に $p < 0.01$ 、 $p < 0.1$ 、 $p < 0.05$ 、図 3-3-5a）、目覚め感が増大する傾向であった（順に $p < 0.05$ 、 $p < 0.1$ 、 $p < 0.01$ 、図 3-3-5b）。これらは、照度上昇の瞬間における生体信号指標結果（3-3.a.(1)）と矛盾のない結果であった。

また FL500 で、照度上昇後に全般的情動が増大する傾向であり（ $p < 0.1$ 、図 3-3-5c）、FL500、FL2000 で、全般的活力が有意に増大した（順に $p < 0.05$ 、 $p < 0.05$ 、図 3-3-5d）。よって FL500 では、照度上昇後に落ち着きや幸福感が高い、または緊張感や悲哀感が低い状態に変化した。また、FL500 と FL2000 では、照度上昇後に目覚め感が高い、または眠気、意欲の喪失感、疲労感が小さい状態に変化した。

条件内時系列比較において、作業成績では、FL2000 で照度上昇後に課題 B 解答数が有意に増加し（ $p < 0.05$ 、図 3-3-6a）、FL500 で課題 C のデザインをよく考えられるようになった傾向であった（ $p < 0.1$ 、図 3-3-6b）。生体信号指標では、有意な差はみられなかった。

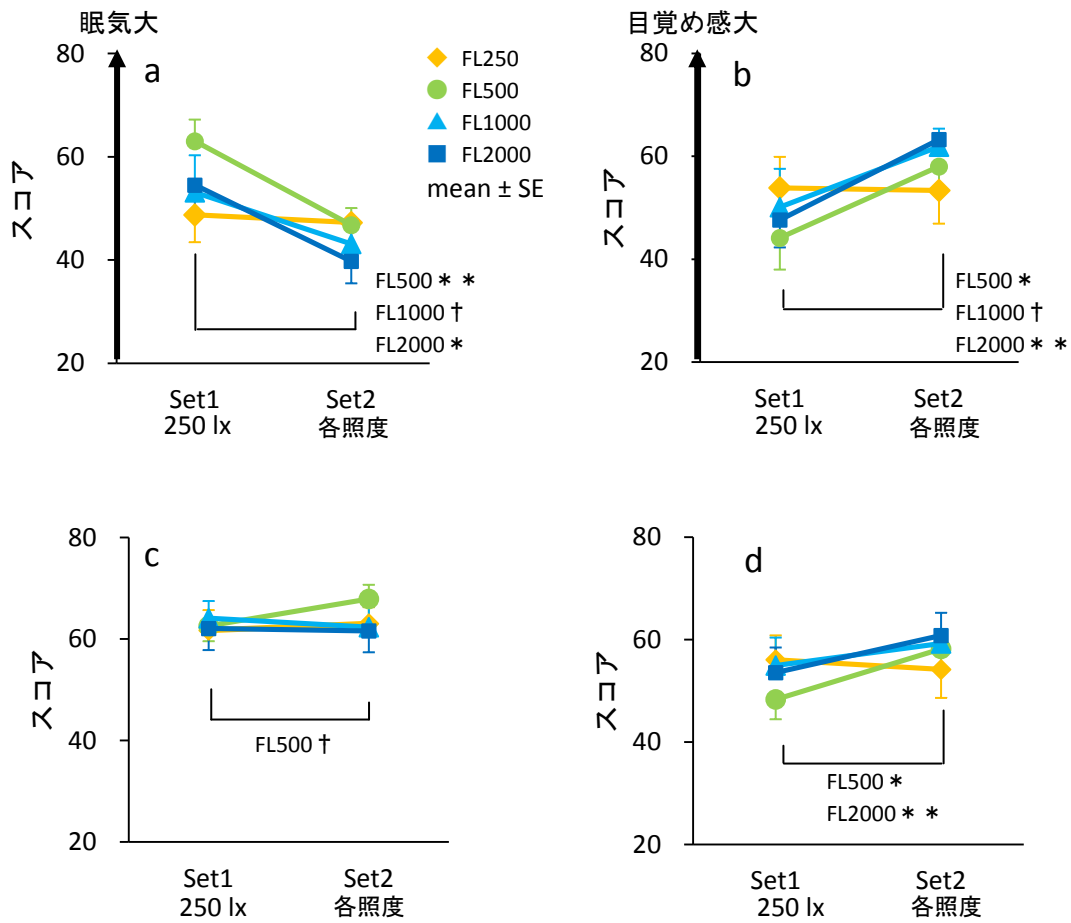


図 3-3-5 照度上昇前後の主観評価

(a : 眠気、b : 目覚め感、c : 全般的活力、d : 全般的情動、a・b ; 澤井 他、2012)

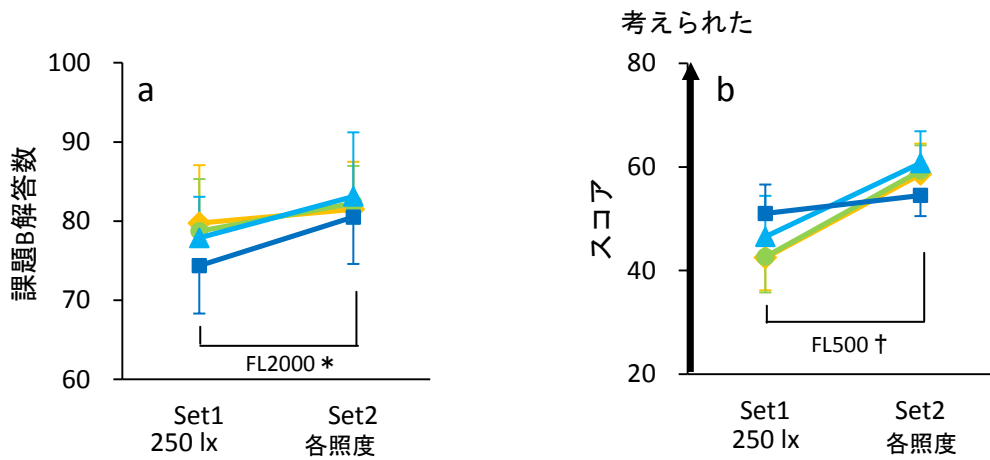


図 3-3-6 照度上昇前後の作業成績

(a : 課題 B 解答数、b : 課題 C デザイン思考、澤井 他、2012)

3-3.a.(4) 照度上昇前後 ; LED2 条件比較

照度条件間比較において、心拍変動 HF パワー値では、LED250 で LED500 よりも、照度上昇前に値が小さい傾向であった ($p < 0.1$ 、図 3-3-7Aa)。また主観評価では、LED250 で LED500 よりも、照度上昇後に落ち着きが低い傾向であった ($p < 0.1$ 、図 3-3-7Ab)。よって、LED250 と LED500 の照度上昇前は同じ条件であるため、照度上昇前 20 秒間において、LED250 を実施した日の方が緊張方向の状態であった。

条件内時系列比較において、主観評価では、LED500 で、照度上昇後に目覚め感が増大する傾向であり ($p < 0.1$ 、図 3-3-7Ac)、照度上昇の瞬間における生体信号指標結果 (3-3.a.(2)) と矛盾のない結果であった。疲労感は、LED500 で照度上昇後に有意に増大し ($p < 0.05$ 、図 3-3-7Ad)、LED250 で増大傾向であった ($p < 0.1$ 、図 3-3-7Ad)。

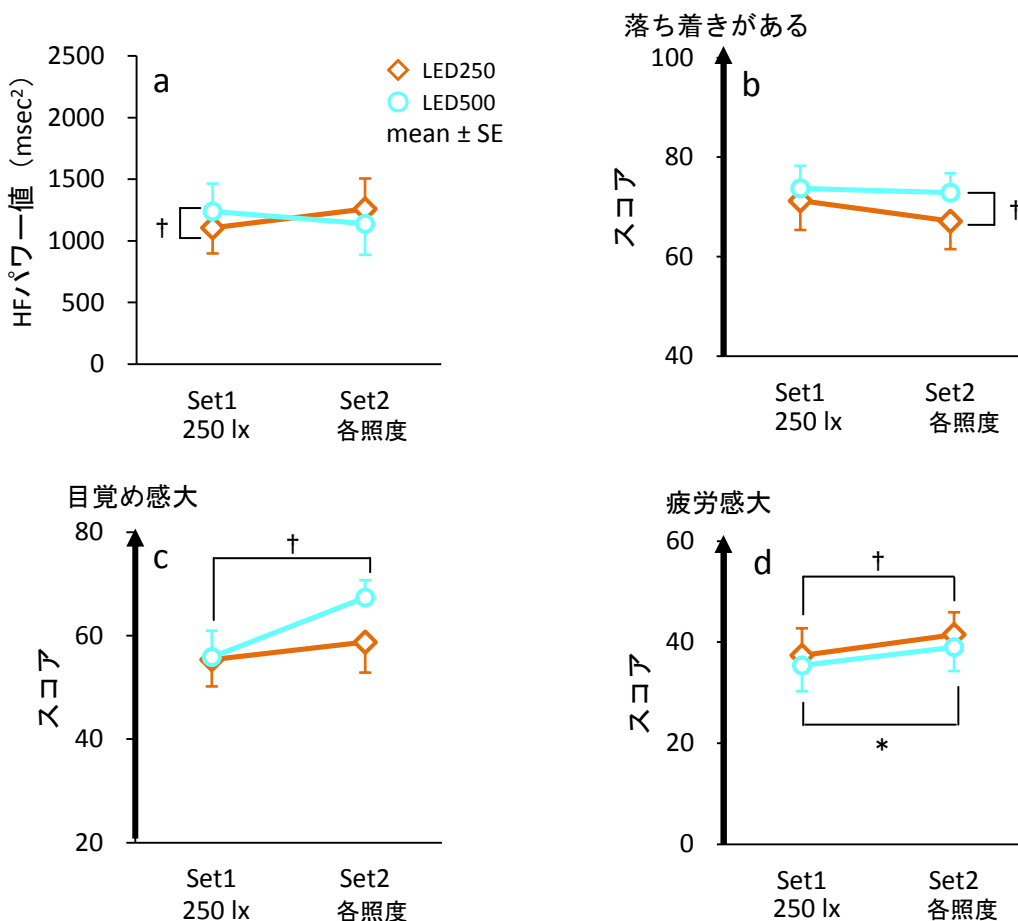


図 3-3-7A 照度上昇前後の生体信号と主観評価

(a : 心拍変動 HF パワー値、b : 落ち着き、c : 目覚め感、d : 疲労感)

条件内時系列比較において、作業成績では、LED500で課題A解答数と正答数が有意に減少し（ともに $p < 0.01$ 、図 3-3-7Ba）、課題B正答率が有意に減少し（ $p < 0.05$ 、図 3-3-7Bb）、課題Cのデザイン出来に対する満足度が有意に上昇した（ $p < 0.05$ 、図 3-3-7Bc）。生体信号指標では、有意な差はみられなかった。

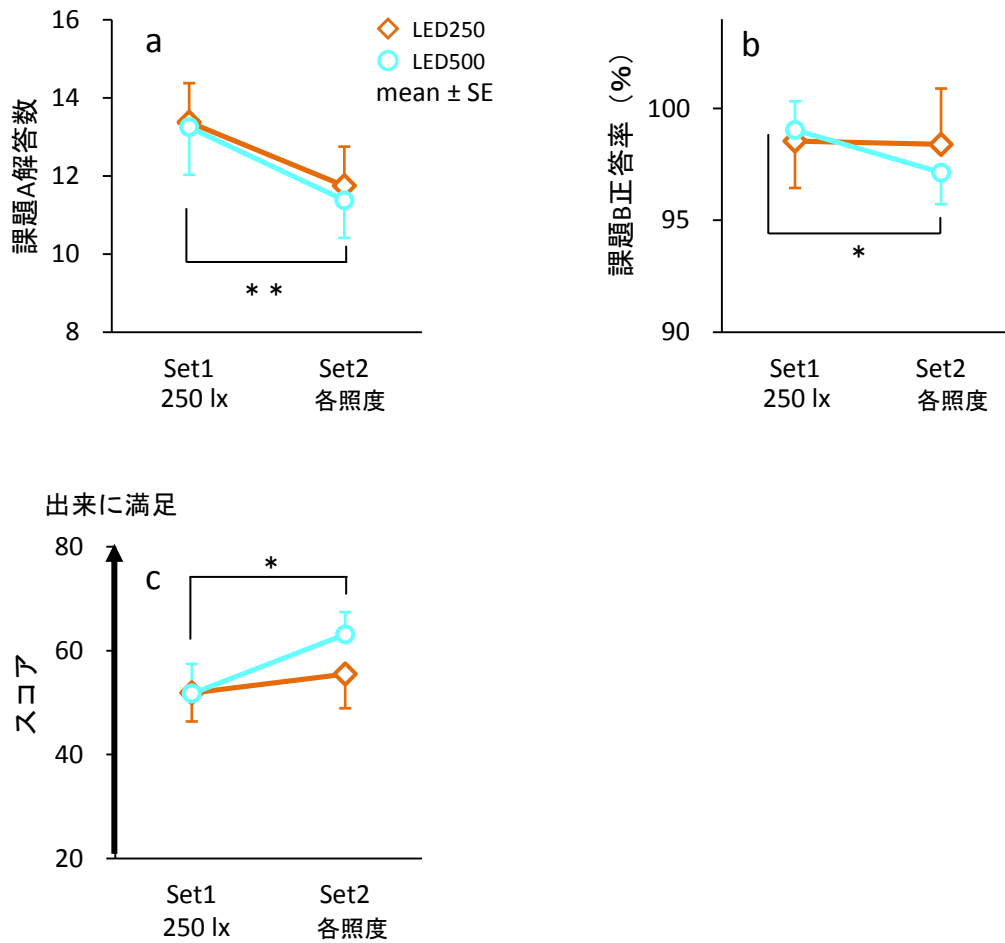


図 3-3-7B 照度上昇前後の作業成績
(a : 課題 A 解答数、b : 課題 B 正答率、c : 課題 C デザイン出来)

3-3.b 3時間光曝露による影響

3-3.b.(1) 3時間光曝露；FL4条件比較

生体信号指標において、AAC（図3-3-8）と心拍変動HFパワー値（図3-3-9）では、照度間に有意な差はみられなかった。

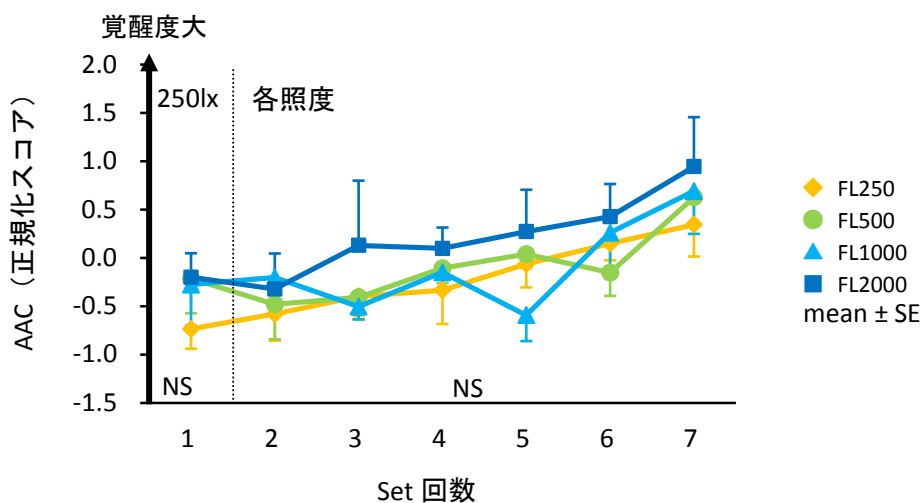


図3-3-8 覚醒度評価 AAC (FL4条件、澤井 他、2014)

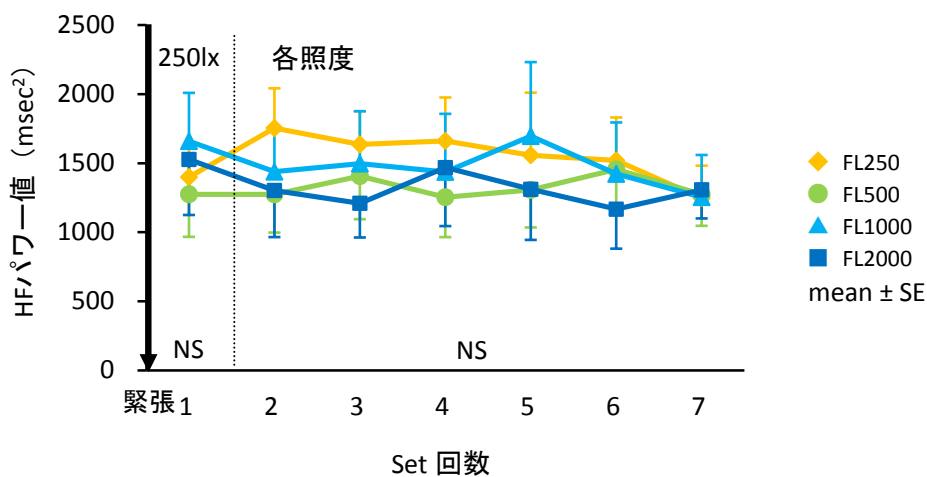


図3-3-9 心拍変動 HF パワー値 (FL4条件、澤井 他、2014)

主観評価において、Set2-7の全般的情動（図3-3-10）では、照度による主効果が有意であった（ $F_{3,21}=4.83$ 、 $p<0.05$ 、 $\epsilon=0.73$ ）。さらに2条件ごとに比較すると、FL500では他の条件よりも全般的情動スコアが有意に高く、落ち着きや幸福感が高い、または緊張感や悲哀感が低い状態であった（vs. FL250: $F_{1,7}=24.83$ 、 $p<0.01$ 、vs. FL1000: $F_{1,7}=6.7$ 、 $p<0.05$ 、vs. FL2000: $F_{1,7}=6.02$ 、 $p<0.05$ ）。各比較において、Set1で照度間に有意差はみられず、Set2-7で交互作用はみとめられなかった。

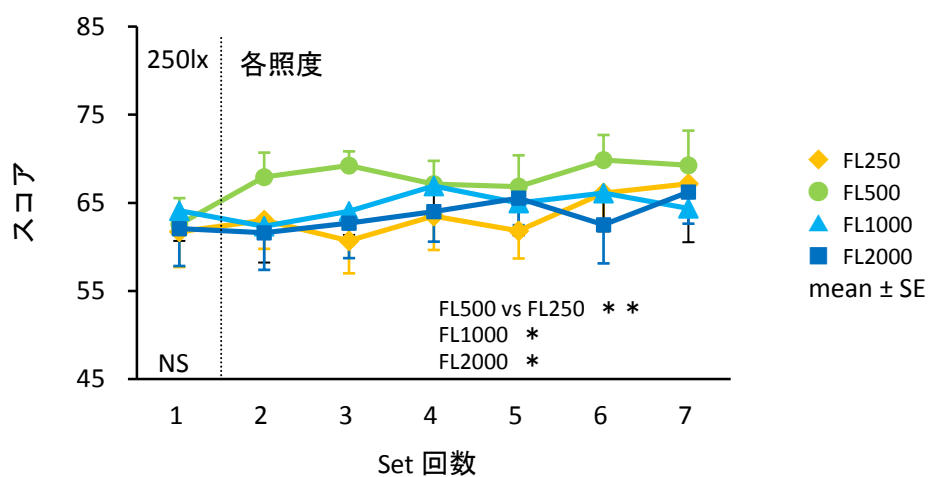


図3-3-10 全般的情動（FL4条件、澤井 他、2014）

課題印象評価（図3-3-11）において、「集中した」「短く感じた」の項目で、照度による主効果が有意であった（順に $F_{3,21}=4.82$ 、 $p<0.05$ 、 $\epsilon=1.0$ 、 $F_{3,21}=4.09$ 、 $p<0.05$ 、 $\epsilon=1.0$ ）。FL500はFL2000よりも、「集中した」「短く感じた」で評価が有意に高かった（ともに $p<0.05$ ）。

光環境印象評価（図3-3-12）において、「明るい」（ $F_{3,21}=32.32$ 、 $p<0.01$ 、 $\epsilon=1.0$ ）、「開放的な」（ $F_{3,21}=3.72$ 、 $p<0.05$ 、 $\epsilon=1.0$ ）、「鮮やかな」（ $F_{3,21}=25.76$ 、 $p<0.01$ 、 $\epsilon=0.93$ ）、「文字・線がはっきりした」（ $F_{3,21}=10.28$ 、 $p<0.01$ 、 $\epsilon=1.0$ ）、「眩しくない」（ $F_{3,21}=18.20$ 、 $p<0.01$ 、 $\epsilon=1.0$ ）、「煩わしくない」（ $F_{3,21}=5.10$ 、 $p<0.05$ 、 $\epsilon=0.68$ ）の項目で、照度による主効果が有意であった。FL250は他の3条件よりも「明るい」、「鮮やかな」で評価が有意に低かった（全て $p<0.01$ ）。またFL250はFL1000、2000よりも「文字・線がはっきりした」（ともに $p<0.05$ ）で評価が有意に低く、「眩しくない」（順に $p<0.05$ 、 $p<0.01$ ）で評価が有意に高かった。FL2000はFL500よりも「明るい」（ $p<0.05$ ）で評価が有意に高く、「眩しくない」（ $p<0.01$ ）、「煩わしくない」（ $p<0.05$ ）で評価が有意に低かった。

他の主観評価項目および印象評価項目、課題成績において、照度間に有意差はみられなかった。

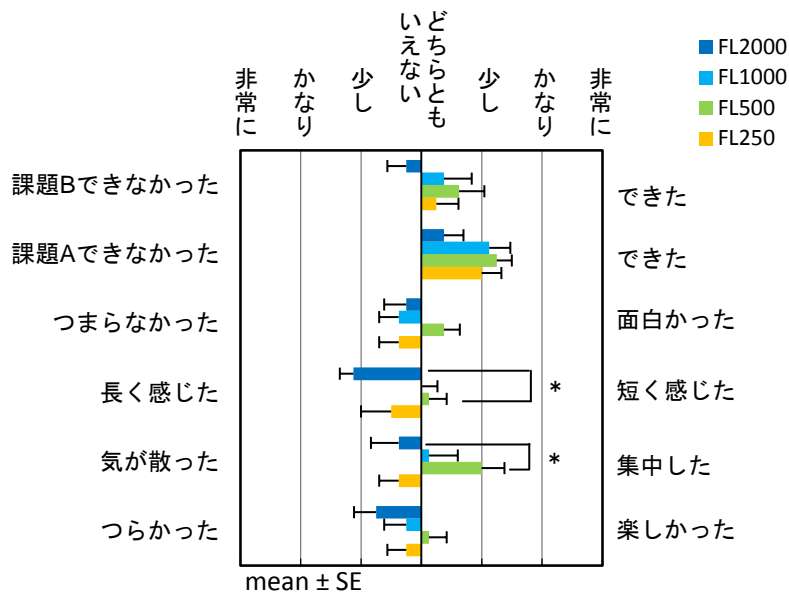


図 3-3-11 課題印象評価 (FL4 条件、澤井 他、2014)

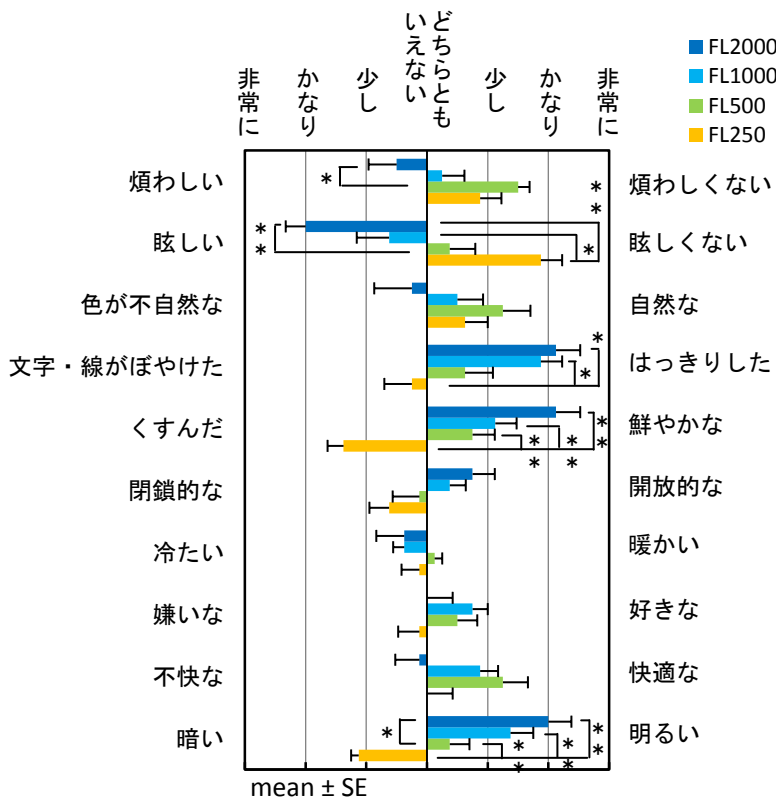


図 3-3-12 光環境印象評価 (FL4 条件、澤井 他、2014)

3-3.b.(2) 3時間光曝露；LED2条件比較

生体信号指標において、AACと心拍変動HFパワー値では、照度間に有意差はみられなかった。

主観評価において、Set2-7の緊張感（図3-3-13）では、LED500はLED250よりも緊張感が有意に高かった（ $F_1, \tau = 6.06, p < 0.05$ ）。緊張感では、Set1で照度間に有意差はみられず、Set2-7で交互作用はみとめられなかった。

光環境印象評価（図3-3-14）において、LED500はLED250よりも、「明るい」（ $p < 0.01$ ）、「鮮やかな」（ $p < 0.01$ ）で評価が有意に高く、「暖かい」（ $p < 0.05$ ）、「眩しくない」（ $p < 0.05$ ）で評価が有意に低かった。また、LED500はLED250よりも「開放的な」（ $p < 0.1$ ）で評価が高い傾向であった。

課題印象評価（図3-3-15）、他の主観評価項目および光環境印象評価項目、課題成績において、照度間に有意差はみとめられなかった。

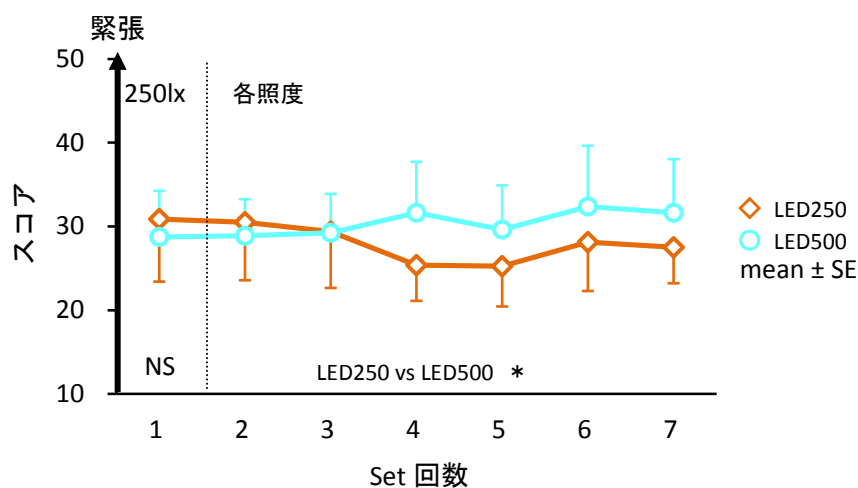


図3-3-13 緊張感（LED2条件、澤井 他、2014）

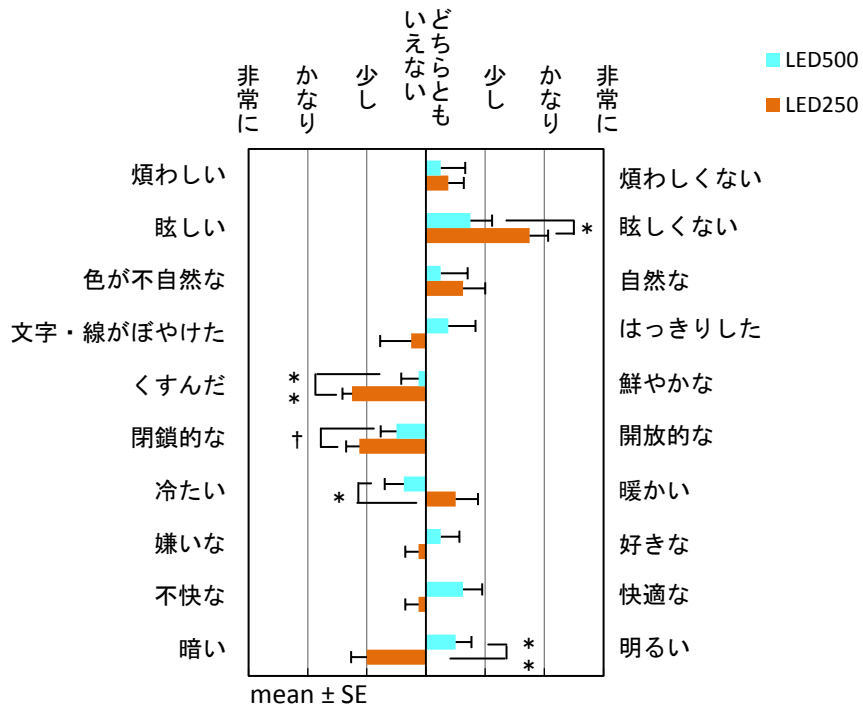


図 3-3-14 光環境印象評価 (LED2 条件、澤井 他、2014)

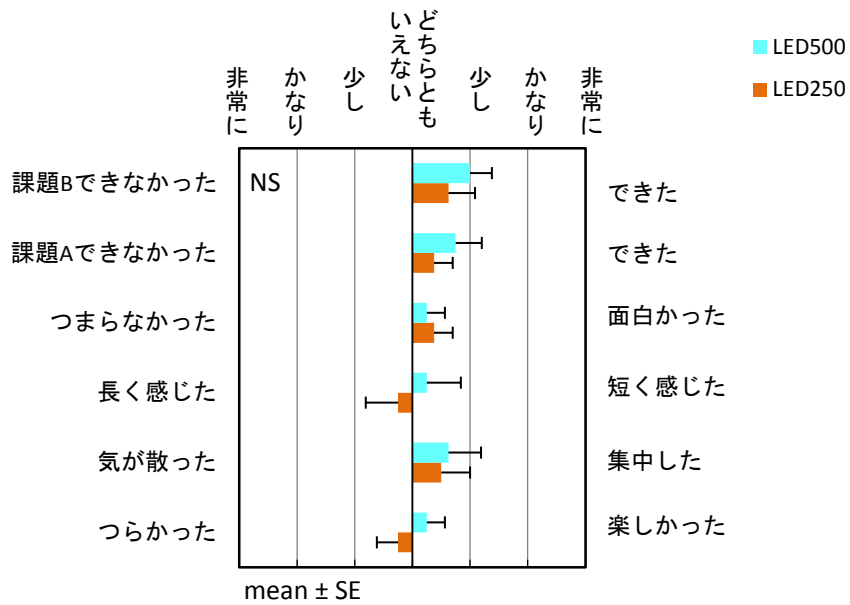


図 3-3-15 課題印象評価 (LED2 条件)

3-4 光源比較結果

3-4.a 照度上昇による影響

3-4.a.(1) 照度上昇の瞬間；FL500、LED500 比較

照度条件間比較において、開眼時 O1 α 波パワー値(図 3-4-1)、心拍変動 HF パワー値(図 3-4-2)では、照度上昇前、照度上昇後ともに有意な差はみられなかった。

条件内時系列比較において、開眼時 O1 α 波パワー値では、LED500 で上昇後 40 秒の値が上昇前 20 秒の値よりも減少する傾向であった ($p < 0.1$ 、図 3-4-1)。心拍変動 HF パワー値では、FL500、LED500 ともに有意な差はみられなかった(図 3-4-2)。よって LED500 では、照度上昇後に覚醒度が上昇する傾向であった。

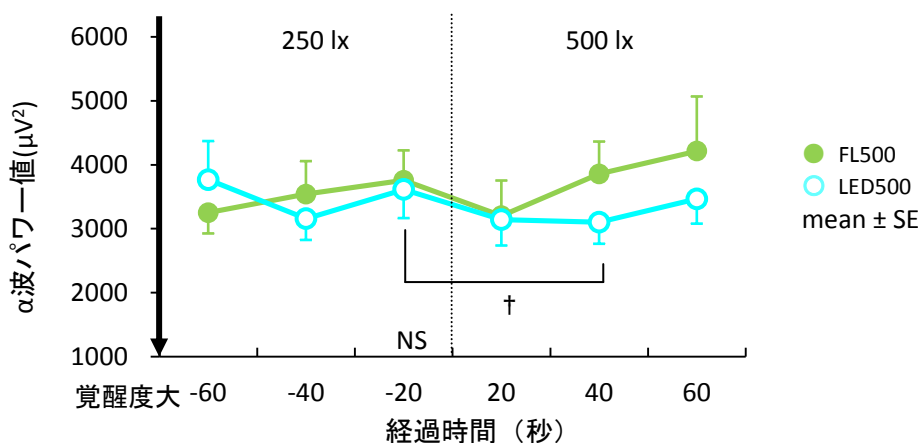


図 3-4-1 照度上昇時の脳波 α 波パワー値 (澤井 他、2012)

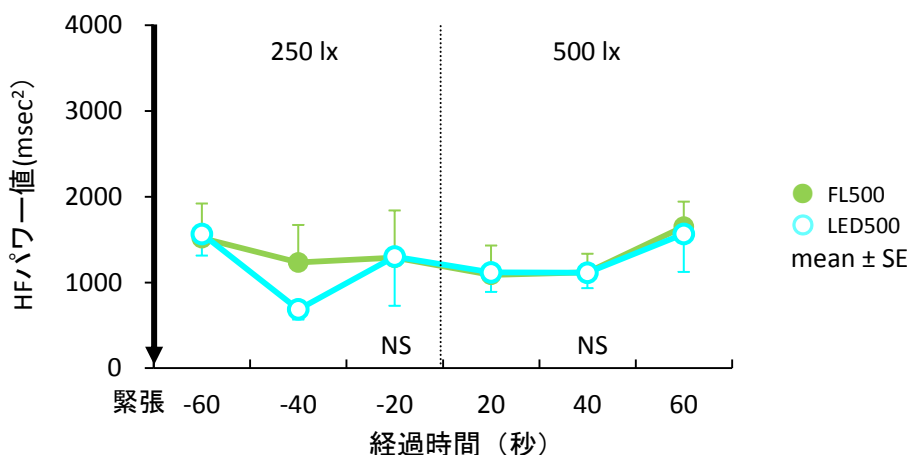


図 3-4-2 照度上昇時の心拍変動 HF パワー値 (澤井 他、2012)

3-4.a.(2) 照度上昇前後 ; FL500、LED500 比較

照度条件間比較において、主観評価では、LED500 で FL500 よりも、照度上昇前、後ともに、眠気が有意に小さく（上昇前 $p < 0.01$ 、上昇後 $p < 0.05$ 、図 3-4-3a）、目覚め感が大きい傾向であった（上昇前 $p < 0.1$ 、上昇後 $p < 0.05$ 、図 3-4-3b）。よって、主観的覚醒度は、照度上昇前（250 lx）の時点で光源間の差が現れていた。また、LED500 は FL500 よりも、照度上昇前の全般的活力が有意に大きく（ $p < 0.05$ 、図 3-4-3c）、照度上昇後の緊張感が有意に大きかった（ $p < 0.05$ 、図 3-4-3d）。

条件内時系列比較において、主観評価では、FL500 で照度上昇後に眠気が有意に減少し（ $p < 0.01$ 、図 3-4-3A）、FL500、LED500 ともに、照度上昇後に目覚め感が増大する傾向であった（順に $p < 0.05$ 、 $p < 0.1$ 、図 3-4-3b）。これらは、照度上昇の瞬間における生体信号指標結果（3-4.a.(1)）と矛盾のない結果であった。また FL500 で、照度上昇後に全般的情動が増大する傾向であり（ $p < 0.1$ 、図 3-4-3e）、全般的活力が有意に増大した（ $p < 0.05$ 、図 3-4-3c）。一方、LED500 で、照度上昇後に疲労感が有意に増大した（ $p < 0.05$ 、図 3-4-3f）。

条件内時系列比較において、作業成績では、FL500 で照度上昇後に課題 C のデザインをよく考えられるようになった傾向であり（ $p < 0.1$ 、図 3-3-4b）、LED500 で課題 A 解答数と正答数が有意に減少し（ともに $p < 0.01$ 、図 3-4-4a）、課題 C のデザイン出来に対する満足度が有意に上昇した（ $p < 0.05$ 、図 3-4-4b）。生体信号指標では、有意な差はみられなかった。

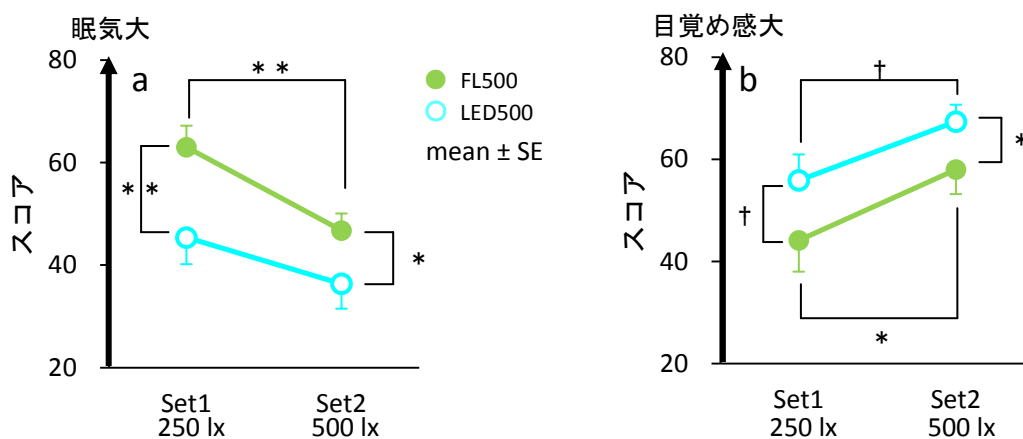


図 3-4-3A 照度上昇前後の主観評価
(a : 眠気、b : 目覚め感、澤井 他、2012)

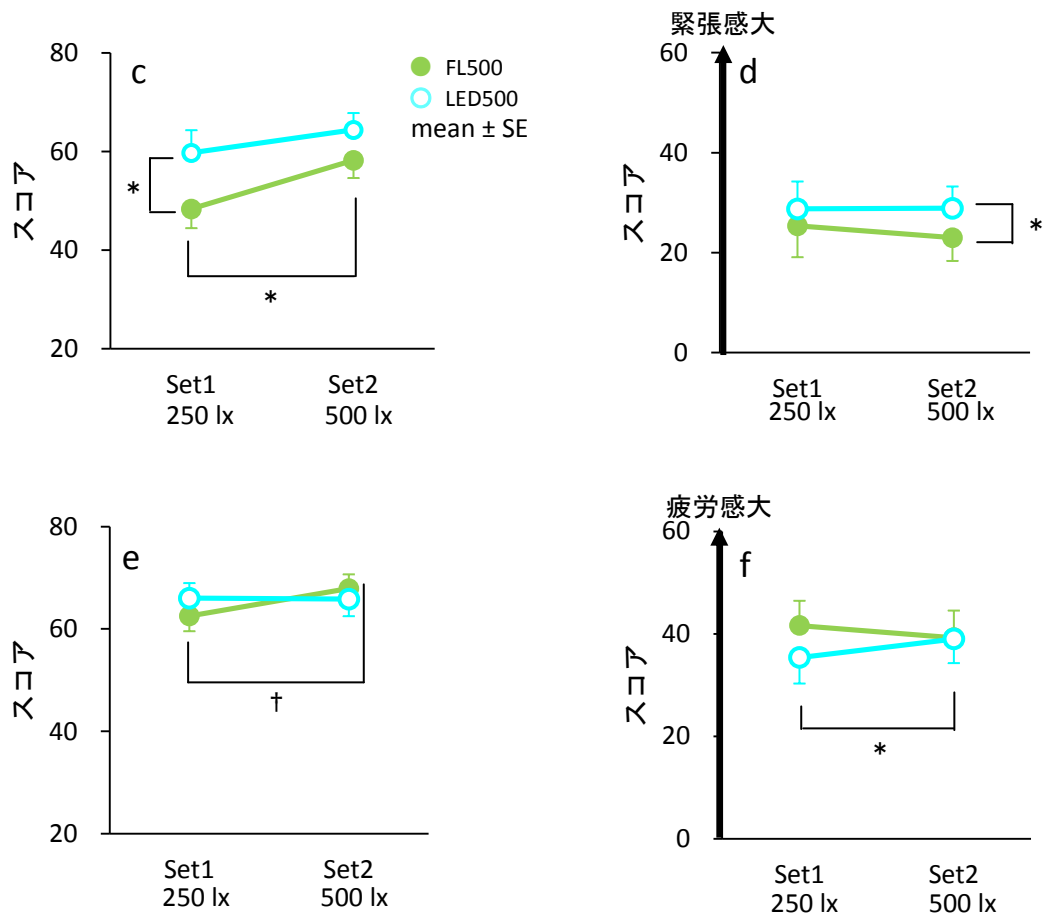


図 3-4-3B 照度上昇前後の主観評価

(c : 全般的活力、d : 緊張感、e : 全般的情動、f : 疲労感、d・f ; 澤井 他、2012)

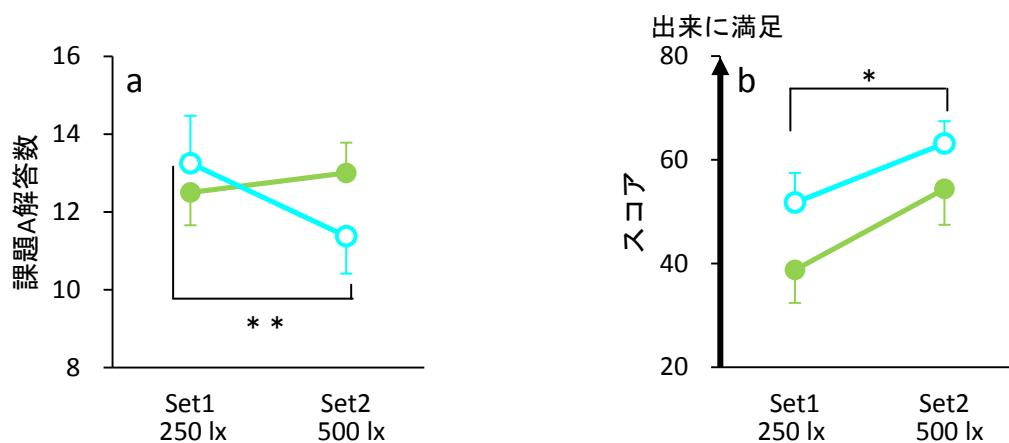


図 3-4-4 照度上昇前後の作業成績

(a : 課題 A 解答数、b : 課題 C デザイン出来、澤井 他、2012)

3-4.b 3時間光曝露による影響

3-4.b.(1) 3時間光曝露；FL250、LED250 比較

生体信号指標において、LED250はFL250よりもSet2-7のAACが有意に大きく、($F_{1,7}=8.63$ 、 $p<0.01$ 、図 3-4-5)、心拍変動 HF パワー値が有意に小さかった ($F_{1,7}=8.63$ 、 $p<0.01$ 、図 3-4-6)。各比較において、Set1 で光源間に有意差はみられず、Set2-7 で交互作用はみとめられなかった。よって、LED250 は FL250 よりも有意に覚醒度が高く、緊張方向の状態であった。

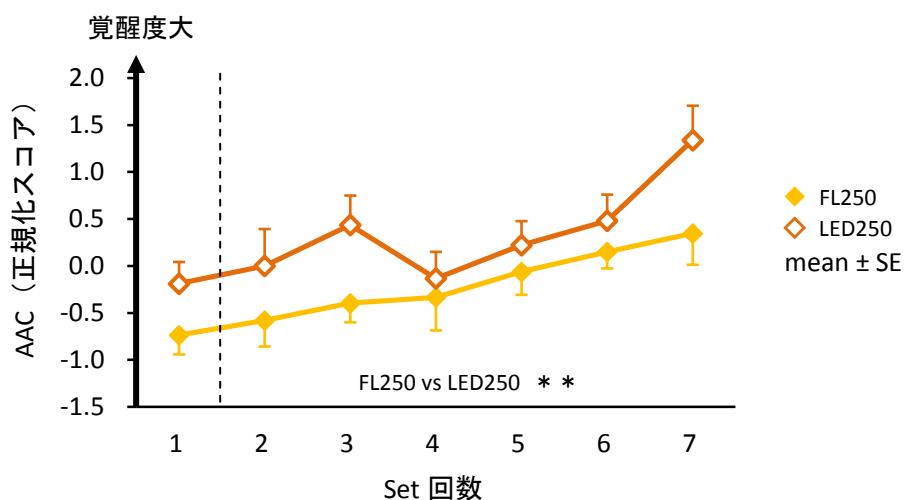


図 3-4-5 AAC (250 lx 2 条件、澤井 他、2014)

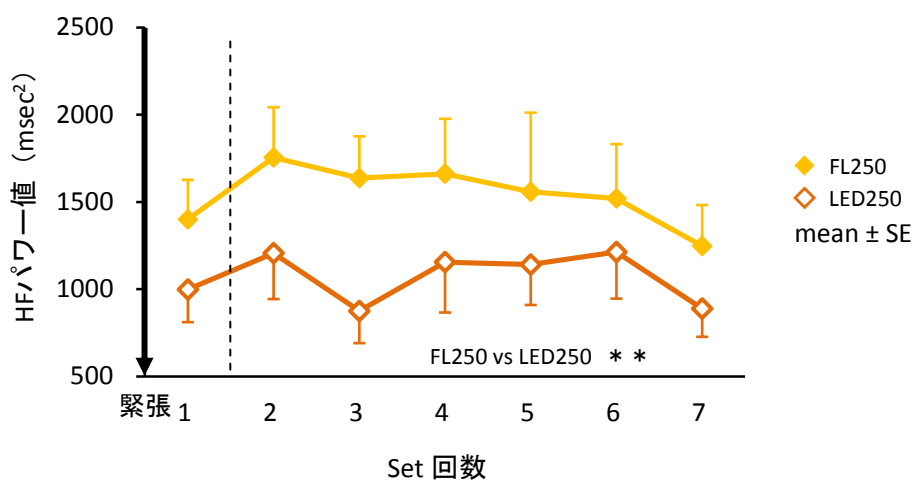


図 3-4-6 心拍変動 HF パワー値 (250 lx 2 条件、澤井 他、2014)

課題成績において、課題 C デザイン出来の自己評価（図 3-4-7）では、LED250 は FL250 よりも Set2-7 のデザイン出来に満足した傾向であった（ $F_1, \tau=5.02, p<0.1$ ）。デザイン出来では、Set1 で光源間に有意差はみられず、Set2-7 で交互作用はみとめられなかった。

光環境印象評価（図 3-4-8）において、LED250 は FL250 よりも、「暖かい」（ $p<0.1$ ）で評価が高い傾向であった。

主観評価項目、課題印象評価（図 3-4-9）、その他の光環境印象評価および作業成績において、光源間に有意差はみとめられなかった。

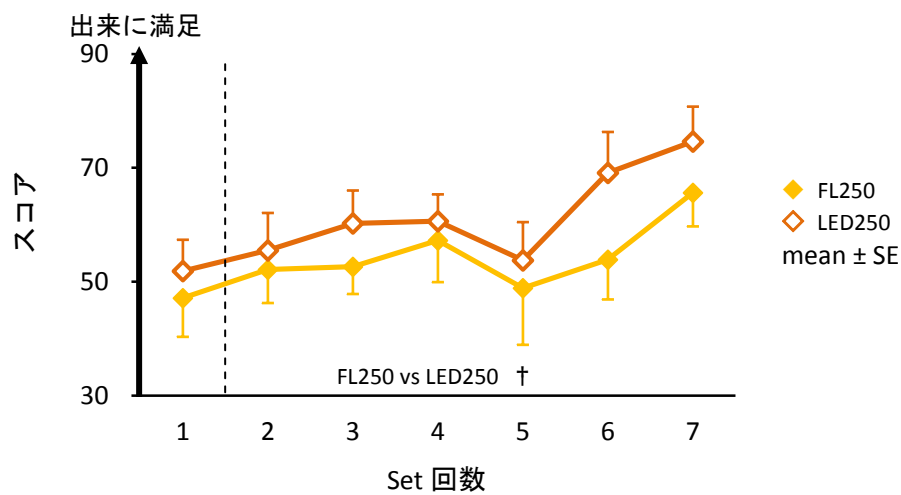


図 3-4-7 課題 C デザイン出来（250 lx 2 条件、澤井 他、2014）

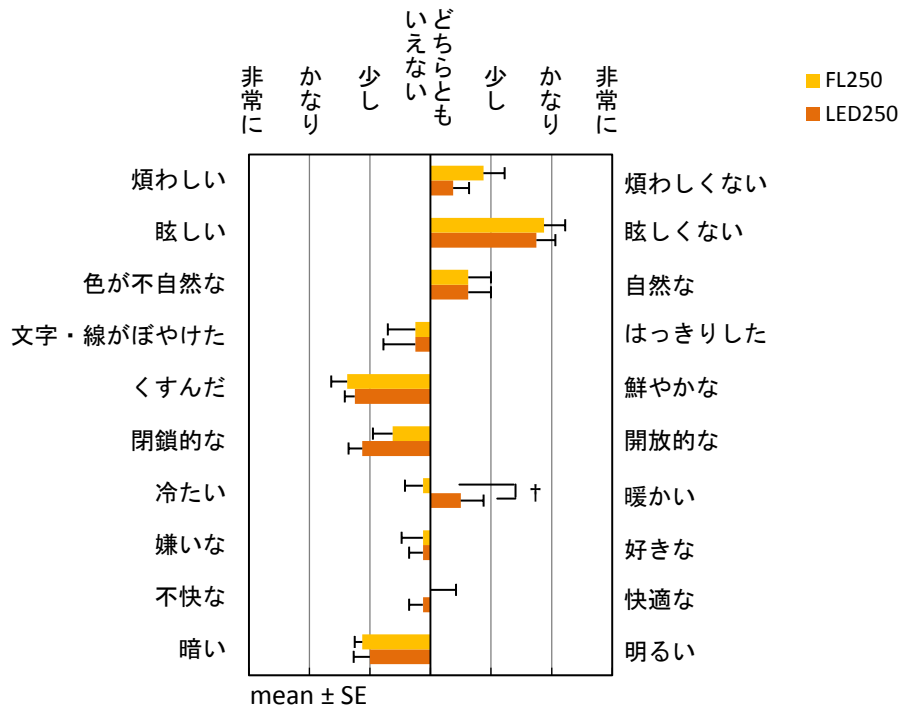


図 3-4-8 光環境印象評価 (250 lx 2 条件)

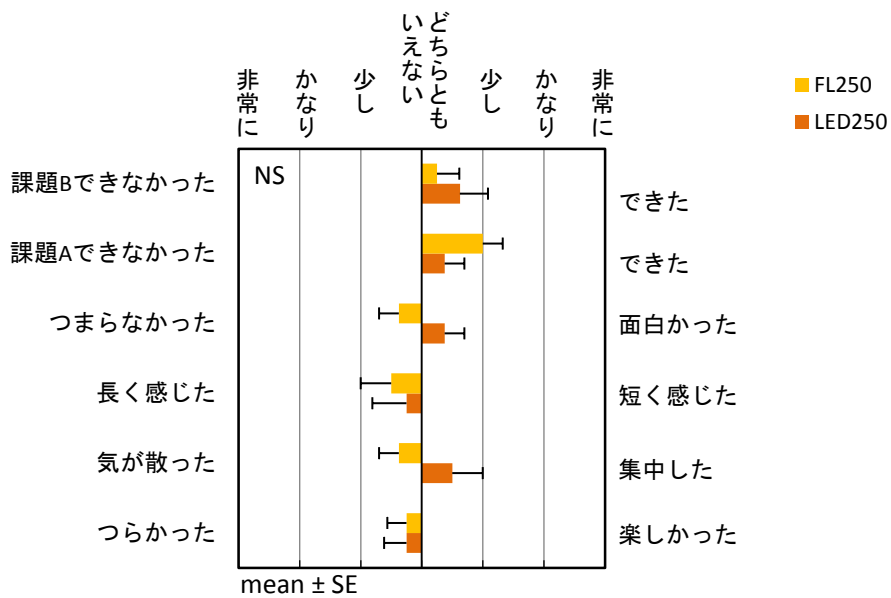


図 3-4-9 課題印象評価 (250 lx 2 条件)

3-4.b.(2) 3時間光曝露 ; FL500、LED500 比較

生体信号指標において、LED500はFL500よりもSet2-7のAACが大きく($F_{1,7}=5.24, p<0.1$ 、図3-4-11)、心拍変動HFパワー値が小さい傾向であった($F_{1,7}=4.1, p<0.1$ 、図3-4-12)。よって、LED500はFL500よりも覚醒度が高く、緊張方向の傾向であった。

主観評価において、LED500はFL500よりもSet2-7の全般的情動スコアが有意に低く($F_{1,7}=7.46, p<0.05$ 、図3-4-13)、また、緊張感は有意に高かった($F_{1,7}=7.35, p<0.05$ 、図3-4-14)。

AAC、HFパワー値、全般的情動、緊張感において、Set1で光源間に有意差はみられず、Set2-7で交互作用はみとめられなかった。

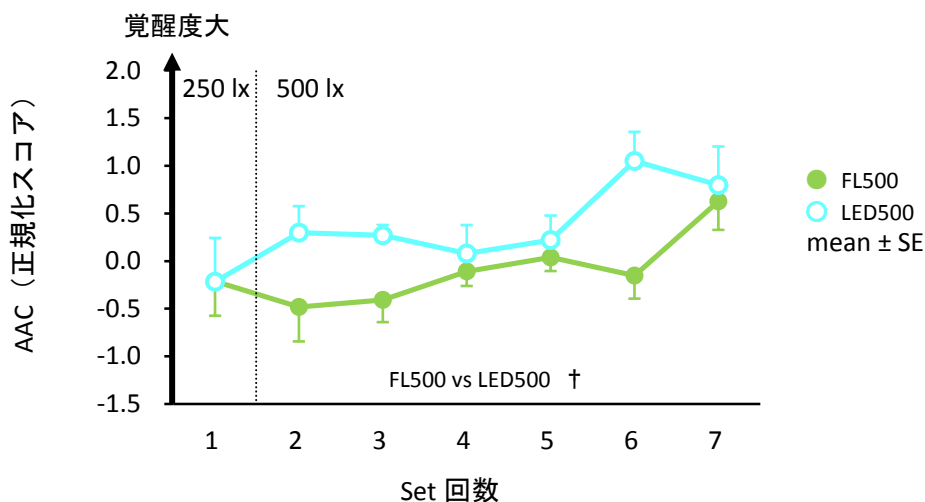


図 3-4-11 AAC (500 lx 2 条件、澤井 他、2014)

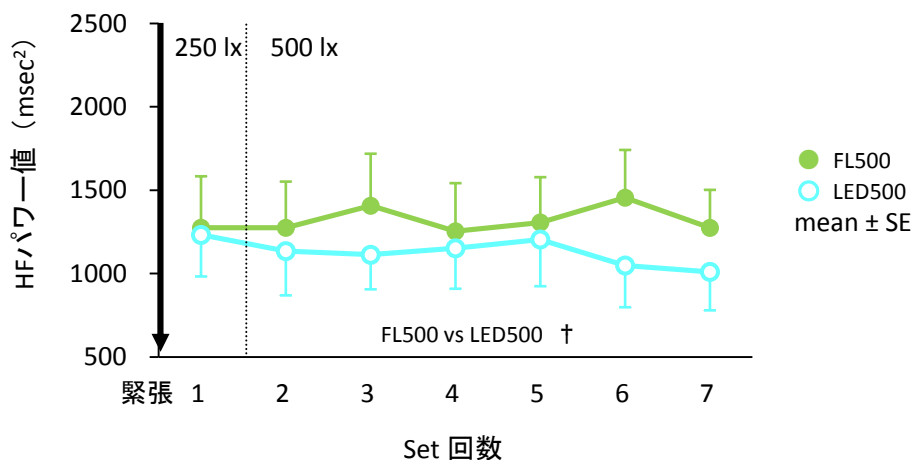


図 3-4-12 心拍変動 HF パワー値 (500 lx 2 条件、澤井 他、2014)

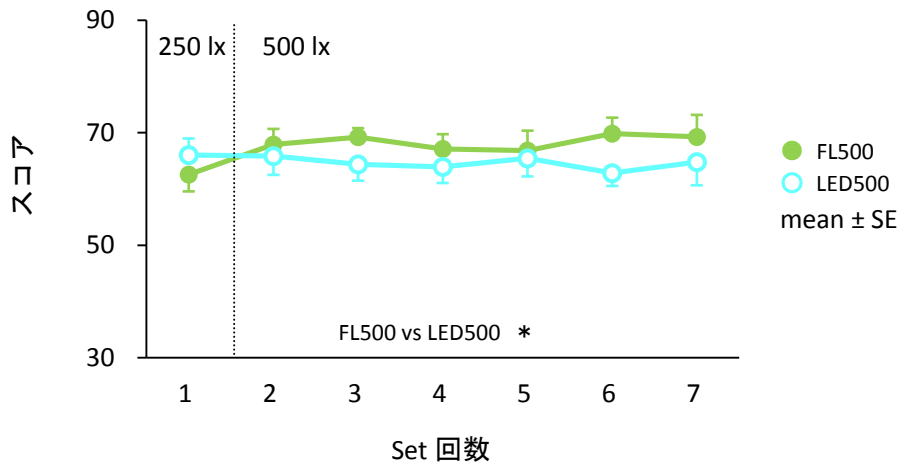


図 3-4-13 全般的情動 (500 lx 2 条件、澤井 他、2014)

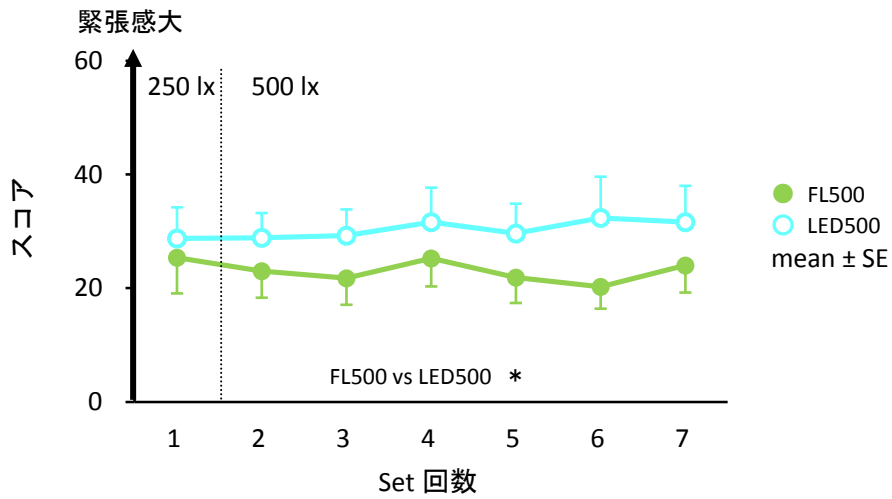


図 3-4-14 緊張感 (500 lx 2 条件)

課題成績において、課題 B 正答率（図 3-4-15）では、LED500 は FL500 よりも Set2-7 の正答率が高い傾向であった（ $F_{1,7}=4.11$ 、 $p<0.1$ ）。課題 B 正答率では、Set1 で光源間に有意差はみられず、Set2-7 で交互作用はみとめられなかった。

光環境印象評価（図 3-4-16）において、LED500 は FL500 よりも、「煩わしくない」（ $p<0.05$ ）で評価が有意に低く、「色が自然な」（ $p<0.1$ ）で評価が低い傾向であった。

課題印象評価（図 3-4-17）、光環境印象評価、他の主観評価項目および作業成績において、光源間に有意差はみとめられなかった。

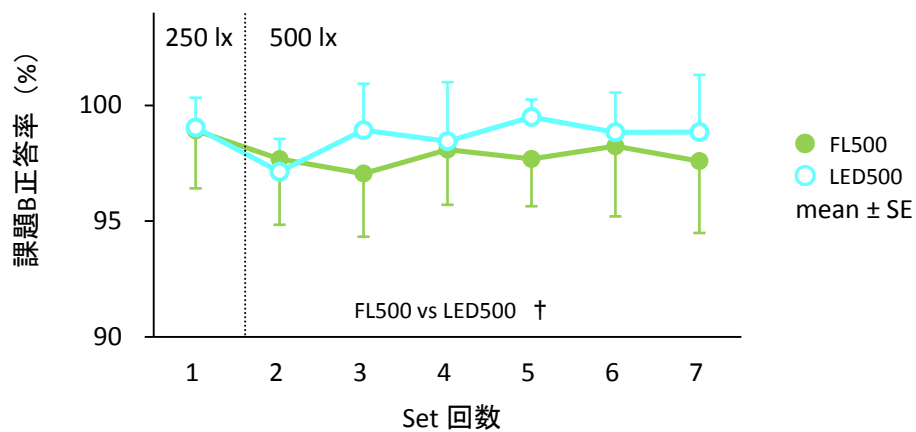


図 3-4-15 課題 B 正答率（500 lx 2 条件、澤井 他、2014）

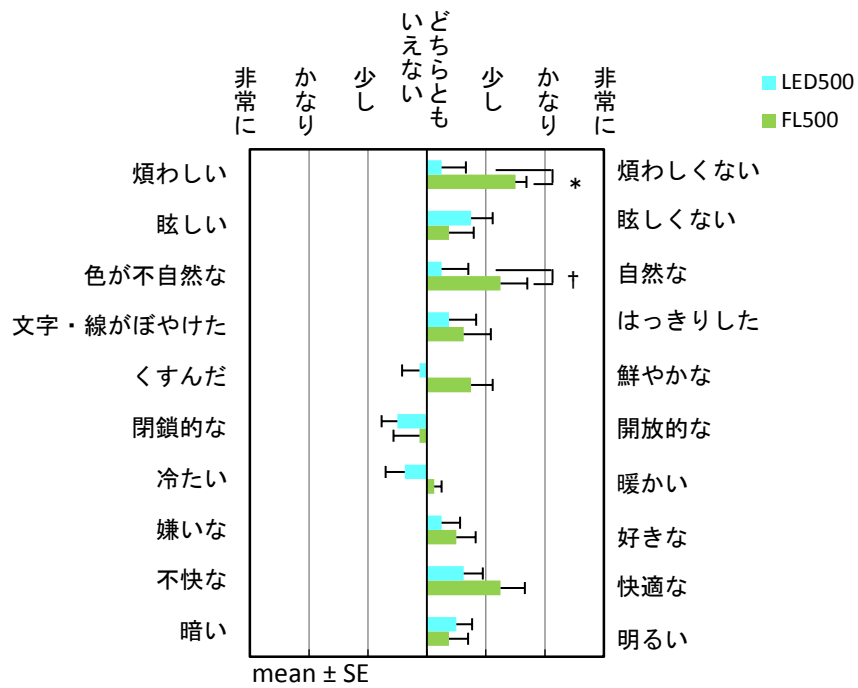


図 3-4-16 光環境印象評価 (500 lx 2 条件、澤井 他、2014)

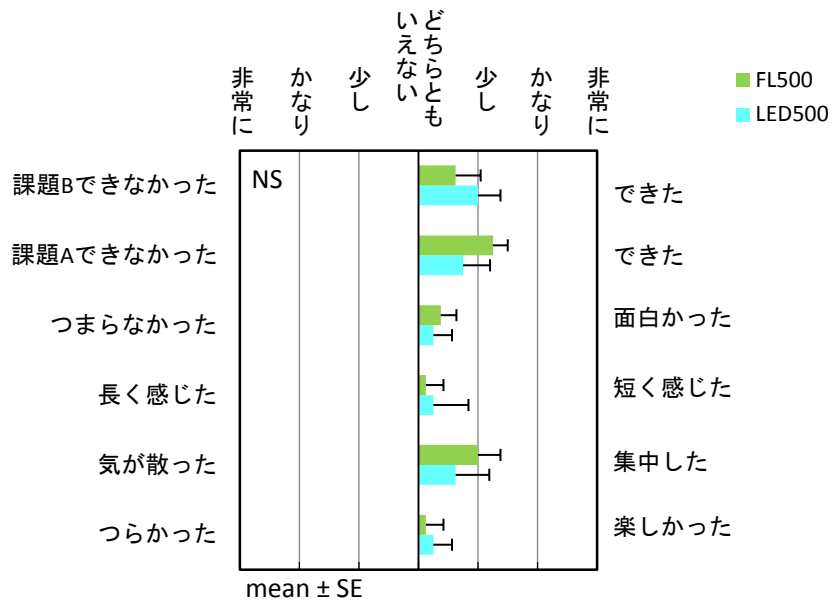


図 3-4-17 課題境印象評価 (500 lx 2 条件)

3-5 考察

3-5.a 異なる照度への照度上昇と、その後の光曝露が精神生理状態に及ぼす影響

照度上昇の影響に関し、FL1000 では照度上昇後に安静開眼中の α 波および HF パワー値が減少し(図 3-3-1、3-3-2)、覚醒・緊張方向に変化した。FL2000 では、照度上昇直後において、FL250 よりも α 波パワー値が小さく(図 3-3-1)、上昇後に HF パワー値が減少したため(図 3-3-2)、覚醒度は維持され、緊張方向に変化した。また、FL2000 は FL1000 よりも HF パワー値を抑制した時間が長く(図 3-3-2)、光の影響強度が FL1000 よりも大きかったと考えられる。さらに、照度が上昇する全条件(FL500、FL1000、FL2000)で、照度上昇後に主観的覚醒度が上昇した(図 3-3-3)。

以上のことから、昼白色蛍光灯机上面 250 lx (受光面で白色相当、126 lx) をベース照度とした場合、1000 lx (受光面で 459 lx) への照度増大により、生体信号指標かつ主観評価による精神生理状態が一時的に覚醒・緊張方向に変化することが示された。そして、精神生理状態に影響を及ぼす照度上昇範囲は、500 lx を超え 1000 lx 以下にあると考えられる。また、今後ベース照度を上げる際には、ウェーバー比³⁷の考え方をを用いると(鈴木、2004)、本結果におけるベース照度と照度上昇量の比により、ベース照度に応じた照度上昇量を設定できると考える。

作業成績に関して、FL2000 では照度上昇後に課題 B 解答数が有意に増加し(図 3-3-6a)、FL500 では課題 C のデザインをよく考えられるようになった傾向であった(図 3-3-6b)。しかし、生体信号指標や主観評価による精神生理状態と作業成績間に共通した傾向はみとめられず、精神生理状態と作業成績の関係性は明確にならなかった。

3時間光曝露の影響に関し、FL250、500、1000、2000 において、主観評価における全般的情動スコアでは、FL500 で他の照度条件よりも有意に高く、最も落ち着きや幸福感が高い、または緊張感や悲哀感が低い状態であった(図 3-3-10)。また印象評価では、FL250 は他の条件よりも、「明るい」「鮮やかな」の評価が有意に低く、スコアとして、少し暗い、少しくすんだ印象であった(図 3-3-12)。FL2000 は FL500 よりも「集中できた」「短く感じた」「眩しくない」「煩わしくない」の評価が有意に低く、スコアとして、かなり眩しい印象であった(図 3-3-11、3-3-12)。FL1000 では FL500 と比較して、好ましくない評価はみられなかった。

よって、日常の使用を想定した昼白色蛍光灯机上面 250、500、1000、2000 lx の照度条件

³⁷ ウェーバー比：感覚の大きさ閾値は、刺激強度に対する刺激増加量の比に対応する。

(受光面では白色相当、126–845 lx) では、主観的な精神生理状態の観点から、机上面 500 lx が知的作業に最も適していると考えられる。そして、主観的精神生理状態の観点から知的作業に適した照度範囲は、500 lx 以上 2000 lx 未満にあると考えられる。昨今、省電力化の観点から照度低下の検討がされているが、印象評価による知的作業時の視認性や、主観的精神生理状態の観点からは、蛍光灯机上面 250 lx では低いと考える。また、日中に曝露する光の量が不足すると、夜間睡眠の質低下など生体リズムのメリハリ低下につながることで懸念されるため、生体リズム維持に必要な最低照度や光曝露時間の検討も、今後必要であるとする。

3-5.b 異なる光源での照度上昇と、その後の光曝露が精神生理状態に及ぼす影響

照度上昇の影響に関し、FL500 で照度上昇後に α 波パワー値の減少はみとめられなかったが、LED500 で減少がみとめられた (図 3-4-1)。250 lx の光に約 1 時間曝露した状態である照度上昇前において、LED500 は FL500 よりも主観的覚醒度が有意に高かった (図 3-4-3A)。また LED500 は、FL500 よりも照度上昇後の緊張感が高く、照度上昇後に疲労感が増大し (図 3-4-3B)、必ずしも課題成績が良好ではなかった (図 3-4-4)。

以上のことから、約 1 時間の机上面 250 lx 光曝露でも、LED では FL よりも主観的な覚醒度が高くなることが示された。さらに、机上面 250 lx をベース照度として 500 lx へ照度を増大させる場合、LED は FL よりも、緊張感や疲労感が一時的に維持・増大する可能性が示唆された。したがって、LED では FL よりも緊張方向の状態になるが、課題成績は必ずしも良好ではなく、LED 机上面 250 lx から 500 lx に照度を上昇させる制御では、作業に適した精神生理状態を達成できていなかったと考えられる。

3 時間光曝露の影響に関し、250 lx では、LED で FL よりも課題実施間の安静時に (AAT 中)、有意に覚醒・緊張方向の状態 (図 3-4-5、3-4-6) であり、500 lx では、LED で FL よりも覚醒・緊張方向の傾向 (図 3-4-11、3-4-12) を示した。主観評価においても、500 lx では、LED は FL よりも有意に緊張感が高く、生体信号指標の結果と傾向が一致していた。よって、照度、相関色温度が同程度でも、LED は FL よりも覚醒・緊張傾向になることが示された。

主観評価、印象評価において、500 lx では、LED は FL よりも、全般的情動スコア (図 3-4-13) と「煩わしくない」で評価が有意に低く、「色が自然な」で評価が低い傾向を示した (図 3-4-16)。光源間の差異には、日常生活において FL の光環境に慣れていることや、LED は FL よりも演色性が劣っていること (詳細は第 4 章で述べる) が反映された可能性がある。一方、250 lx の光源

間では、「暖かい」のみで光源間に差異傾向がみられたが、他の項目では有意差はみとめられなかった（図 3-4-8）。また、LED、FL とも 250 lx では 500 lx よりも「明るい」「鮮やかな」で評価が有意に低く、スコアとして、少し暗く、くすんだ印象であった（図 3-3-8、3-3-10）。よって 250 lx では、両光源ともに少し暗く、くすんだ印象であったため、光源間の演色性差異など見え方の差異が目立たず、印象評価には有意な差が現れなかったと考えられる。

課題成績結果より、250 lx において、LED は FL よりも課題 C デザイン出来の満足度が高い傾向（図 3-4-7）、500 lx において、LED は FL よりも短期記憶課題の正答率が高い傾向（図 3-4-15）を示した。また、LED は同照度の FL よりも、覚醒・緊張方向の傾向であった（図 3-4-5、3-4-6）。しかしながら、500 lx においては、LED は FL よりも全般的情動スコア（図 3-4-13）と「煩わしくない」（図 3-4-16）で評価が有意に劣っていた。よって、LED で FL よりも覚醒・緊張状態であり、かつ課題成績が高い傾向であるときに、「煩わしくない」の印象評価がより良くはならず、精神生理状態の観点から、LED においては FL と比較して作業に適した照明条件は明確にならなかった。

3-5.c 考察まとめ

照度に関し、昼白色蛍光ランプを用いた場合、机上面 250 lx から 1000 lx への照度増大により、一時的に精神生理状態が覚醒・緊張方向に変化することが示された。しかし 3 時間の光曝露では、机上面 250-2000 lx の範囲（受光面で白色相当、126- 845 lx）において、主観的精神生理状態の観点から、机上面 500 lx（受光面で 213 lx）が知的作業に最も適していることが示された。以上のことから、昼白色蛍光ランプ机上面 500 lx をベースとし、覚醒度が低下する時間帯においては、一時的に照度上昇（ベース照度の 4 倍程度）を組合せることで、覚醒度を維持でき、作業に適した精神生理状態を保つことができると考えられる。

光源に関し、分光分布が異なる昼白色蛍光ランプ（受光面で白色相当）と青色励起昼白色 LED（受光面で白色相当）では、照度、相関色温度が同程度でも、日中知的作業時の精神生理状態に及ぼす影響が異なり、LED の方が覚醒・緊張傾向になることが示された。一方、500 lx において、青色励起昼白色 LED は蛍光ランプよりも主観的精神生理状態が良好にはならず、青色励起昼白色 LED においては、知的作業に適した光環境要件は明らかにはならなかった。これらのことから、様々な白色照明を選択することができる現在、精神生理状態の観点から日中知的作業に適した光環境を整備するためには、照度や相関色温度だけでなく、分光分布にも着目した多面的評価手法の確立が必要であると考えられる。

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)課題番号 22615023 により実施した。

3-6 引用・参考文献

荒木和典、萩原啓、道盛章弘ら：照明装置、公開特許公報、特開平 9-63322、1997

Berson D., Dunn F., Takao M.: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, *Science*, 295, pp.1070-1073, 2002

Berson D.: Strange vision; ganglion cells as circadian photoreceptors, *TRENDS in Neurosci*, 26(6), pp.314-320, 2003

Dacey D., Liao H., Peterson B., Robinson F., Smith V., Pokorny J., Yau K., Gamlin P.: Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN, *Nature*, 433, pp.749-754, 2005

Deguchi T., Sato M.: The effect of color temperature of lighting sources on mental activity level, *Ann Physiol Anthropol*, 11(1), pp.37-43, 1992

Figueiro M., Bullough J., Bierman A., Rea M.: Demonstration of additivity failure in human circadian phototransduction, *Neuro Endocrinol Lett*, 26(5), 2005

Franzini C.: Cardiovascular physiology; The peripheral circulation, Kryger M., Roth T., Dement W. (Ed.), *Principles and practice of sleep medicine fourth edition*, Elsevier Saunders, USA, pp.203-212, 2005

萩原啓、荒木和典、道盛章弘、斎藤正己：脳波を用いた覚醒度定量化の試みとその応用、*BME*, 11(1)、pp.86-92、1997

Hattar S., Liao H., Takao M., Berson D., Yau K.: Melanopsin-containing retinal ganglion cells; architecture, projections, and intrinsic photosensitivity, *Science*, 295, pp.1065-1070, 2002

石原金由：日本語版朝型-夜型 (Morningness-Eveningness) 質問紙による調査結果、*心理学研究*, 57(2)、pp.87-91、1986

石原忍：学校用色覚検査表、半田屋商店、東京都、1968

Khalsa S., Jewett M., Cajochen C., Czeisler C.: A phase response curve to single bright light pulses in human subjects, *J Physiol*, 549(3), pp.945-952, 2003

李花子、勝浦哲夫、岩永光一、下村義弘、東洋邦、一條隆：単波長の光曝露に対する生理反応、*日本生理人類学会誌*, 13(2)、pp.75-83、2008

道盛章弘、荒木和典、萩原啓、阪口敏彦：照度の覚醒度、自律神経活動に及ぼす影響、*照明学会誌*, 81、p.185、1997

- 望月悦子、木村洋：分光分布の違いが視覚疲労に与える影響；LED と蛍光ランプ下の VDT 作業による視覚疲労の比較、日本建築学会環境系論文集、75(647)、pp.35-41、2010
- Monk T.: Subjective ratings of sleepiness; the underlying circadian mechanisms, *Sleep*, 10(4), pp.343-353, 1987
- Mukae H., Sato M.: The effects of color temperature of lighting sources on the autonomic nervous functions, *Ann Physiol Anthropol*, 11(5), pp.533-538, 1992
- 野田明子：眠気の自覚的（主観的）評価法、太田龍朗、大川匡子、塩澤全司（編）、臨床睡眠医学、朝倉書店、東京都、pp.98-102、1999
- Phipps-Nelson J., Redman J., Dijk D., Rajaratnam S.: Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance, *Sleep*, 26(6), pp.695-700, 2003
- 澤井浩子、塩尻佳子、八田和洋、渡守武和音、上野敬介、小山恵美：実務中の光環境制御が覚醒度およびパフォーマンスに及ぼす影響の予備的研究、第 34 回情報・システム・利用・技術シンポジウム、pp.31-36、2011
- 澤井浩子、松田恵里、松原明央、渡守武和音、宮井早希、塩尻佳子、小山恵美：実務中の光環境制御が覚醒度およびパフォーマンスに及ぼす影響；ステップ状の照度上昇変化が及ぼす影響の照度間および光源間比較、第 35 回情報・システム・利用・技術シンポジウム、pp.97-102、2012
- 澤井浩子、松田恵里、松原明央、渡守武和音、塩尻佳子、小山恵美：日中実務課題時における白色照明光環境の精神生理的影響；照度と分光分布に着目した比較、人間生活工学、15(1)、2014 (in press)
- Stampi C., Stone P., Michimori A.: A new quantitative method for assessing sleepiness; the alpha attenuation test, *Work and Stress*, 9(2-3), pp.368-376, 1995
- 鈴木恒男：感覚・知覚・認知の測定法、日本色彩学会（編）、カラーサイエンス、朝倉書店、東京都、pp.59-86、2004
- 田淵義彦：視環境と照明、照明学会（編）、照明ハンドブック第 2 版、オーム社、東京都、pp.200-209、2003
- Vandewalle G., Balteau E., Phillips C., Degueldre C., Moreau V., Sterpenich V. et al.: Daytime light exposure dynamically enhances brain responses, *Current Biology*, 16, pp.1616-1621, 2006

- Vandewalle G., Schmidt C., Albouy G., Sterpenich V., Darsaud A., Rauchs G., et al.: Brain responses to violet, blue, and green monochromatic light exposures in humans; prominent role of blue light and the brainstem, PLoS ONE, 2(11):e1247, 2007
- Viola A., James L., Schlangen L., Dijk D.: Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality, Scan J Work Environ Health, 34(4), pp.297-306, 2008
- 夏亜麗、下村義弘、勝浦哲夫：短波長光の波長および強度の違いが日中における中枢神経活動に及ぼす影響、人間生活工学、14(1)、pp.31-36、2013
- Yerkes R., Dodson J.: The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation, J Comp Neurol Psychol, 18(5), pp.459-482, 1908

第4章 知的作業時の精神生理状態に影響を及ぼす光環境要件 の検討

4-1 緒言

第3章において、分光分布が異なる蛍光灯と青色励起白色LEDの光源間では、照度、相関色温度が同程度でも、日中の精神生理状態に及ぼす影響強度が異なることが示された。室内照明光源としてLEDが急速に普及しているが、LEDは様々な方式により、白色を作ることができる。現在普及している一般的なものは、青色励起光で黄色蛍光体を発光させ、励起光の青と蛍光体の黄色により白色を構成している（第3章で用いたLEDも同様）。その他には、赤、青、緑のLEDを組み合わせたものや、紫（近紫外）の励起光により赤、青、緑の蛍光体を発光させ、蛍光体のみで白色を構成するものなどがある。よって、様々な分光分布の白色照明を選択することができる現在、照度、相関色温度だけでなく、分光分布にも着目した多面的評価方法により、白色照明光環境が日中知的作業時の精神生理状態に及ぼす影響強度を予測し、作業に適した光環境を整備する必要があると考えられる。

光曝露が生体に及ぼす影響に関して、ドイツ規格協会（DIN）やアメリカ Lighting Research Center（LRC）、高橋ら（2009）により、分光分布に着目した予測式が提案されている（高橋、2012）。これらの予測式は、夜間メラトニン分泌に関する先行研究をもとに、主に短波長成分に着目し構築されており、睡眠・覚醒機能や自律神経活動への影響にも応用できるのかは明らかになっていない。特に日中知的作業時は、単に光に曝露するだけでなく、文字の視認性、色の見え方、空間の印象といった主観的な影響も加わるため、現在提案されている予測式が適用できないことが予測される。よって本章では、日中知的作業時において、白色照明光環境が精神生理状態に及ぼす影響を予測する手法を検討した。そのため、提案されている予測式による影響度を含む各種光学特性と、第3章での精神生理状態に関する実測値とを比較し、条件間で精神生理状態への影響強度差異が生じた要因を検証した。

4-2 方法

第3章で評価した蛍光灯照度4条件とLED照度2条件の全6条件について(表3-2-1)、提案されている予測式による影響度など各種光学特性を求めた。また、精神生理状態に関する実測値として、光源間で差異がみられた生体信号であるAAC(覚醒度)、心拍変動HFパワー値(副交感神経活動)のSet2-7までの平均値を用いた。

光曝露が生体に及ぼす影響について、分光分布に着目し、ドイツ規格協会(DIN)は生物学的作用係数、アメリカLighting Research Center(LRC)と高橋ら(2009)は夜間メラトニン分泌抑制率を求める予測式を提案している(高橋、2012)。その中で、広帯域光³⁸による光の影響減衰メカニズムを考慮し、また、瞳孔反射の影響も考慮している高橋らの予測式を用い、受光面で実測した分光分布から、夜間メラトニン分泌抑制率予測値を求めた(表4-4-1A)。日中の光曝露が生体に及ぼす影響の予測式は確立されていないため、夜間メラトニン分泌抑制を引き起こす光の伝達経路と、日中の精神生理状態に影響を及ぼす光の伝達経路は同じであると仮定した場合に、各条件における影響強度の序列を比較する参考として算出した。

その他の各種光学特性として、受光面で実測した分光分布から、演色評価数³⁹(JIS Z8726-1990、表4-4-2)、光子密度、相関色温度、Duv⁴⁰、放射エネルギー、照度、3錐体(Stockman et al.2000、図4-2-1)とipRGCs(Dartnall, 1953、Tsumimura et al., 2013、CIE, 2006)の受光量予測値、3刺激値XYZ⁴¹(JIS Z8724-1997、図4-2-2)、色度座標⁴²(吉田ら、1995)を求めた(表4-4-1A、B)。ipRGCs受光量計算では、CIE(2006)およびTsumimura et al.(2013)の計算方法に従い、ピーク波長480nm、レンズ⁴³と10°視野⁴⁴黄斑色素⁴⁵の影響を考慮した分光感度を用いた(図4-2-1)。

まず、第3章ではFL、LED各光源内で照度条件を設定したため、精神生理状態の実測値と夜間メラトニン分泌抑制率予測値について、照度による作用量反応を比較した。さらに、光源、照度の異なる各条件間で精神生理状態への影響強度差異が生じた要因を検証するため、精神生理状態の実測値と各条件の各種光学特性を比較した。

³⁸ 広帯域光：白色光のような、様々な波長の光を含む光。

³⁹ 演色評価数：基準光(完全放射体=黒体またはCIE昼光)で試験色を照明したときの色を基準とし、試験光で試験色を照明したときの色のずれを数値で表したもの(JIS Z8726/1990)。

⁴⁰ Duv：色度座標上における黒体軌跡からの距離。

⁴¹ 3刺激値：対象となる色を、3色表色系における3つの原刺激量で表したもの。

⁴² 色度座標：3刺激値から求めた色の性質を、2つの変数で表したもの。

⁴³ レンズ：ここでは、角膜から網膜に至るまでに存在する細胞を含む。

⁴⁴ 10°視野：本実験ではA4紙面を広く見ながら作業を実施したため、視野を10°とした。Stockman et al., 2000により、2°視野と10°視野の黄斑色素濃度データが提供されている。

⁴⁵ 黄斑色素：中心窩(網膜側の眼の中心)付近にある黄色い色素。

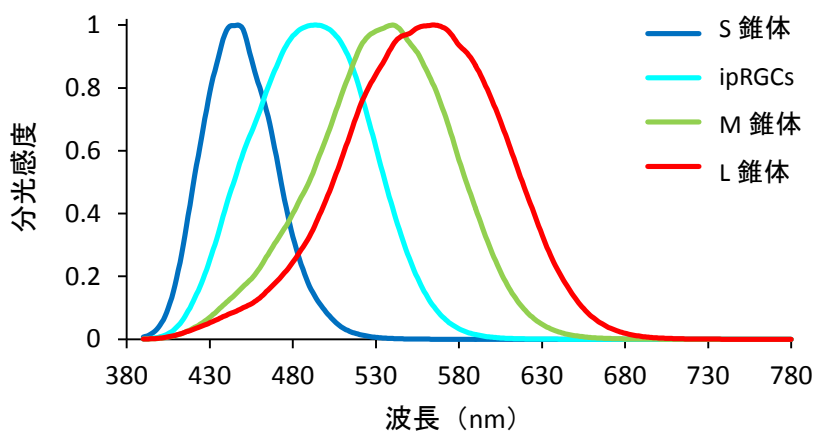


図 4-2-1 光学特性の計算に用いた分光感度

(10° 視野、3 錐体 : Stockman et al.2000、ipRGCs : Dartnal、1953、Tsuji-mura et al.、2013)

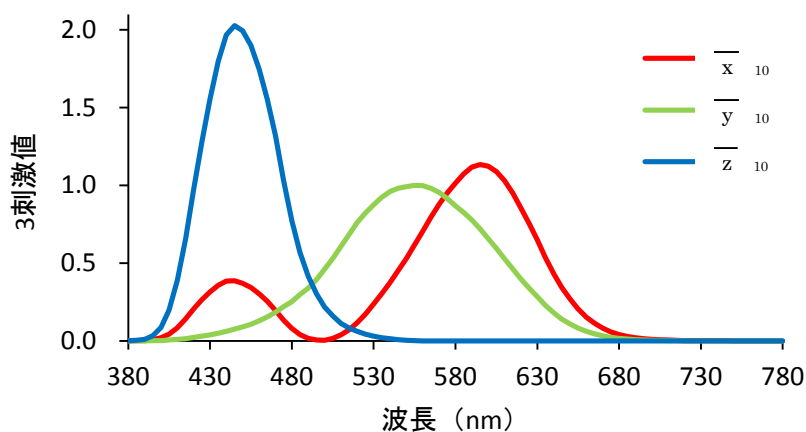


図 4-2-2 光学特性の計算に用いた XYZ 表色系の等色関数

(10° 視野、JIS Z8724-1997)

4-3 統計解析

精神生理状態の実測値と夜間メラトニン分泌抑制率予測値について、照度による作用量反応を直線回帰により比較した。また、各条件間で精神生理状態への影響強度差異が生じた要因を検証するため、精神生理状態の実測値と各条件の各種光学特性について、Pearson の積率相関係数を求めた。結果図中では、 $p < 0.01$ を**、 $p < 0.05$ を*、 $p < 0.1$ を†と表記した。

4-4 結果

演色評価数を表 4-4-1 に、各種光学特性を表 4-4-2A、B に示す。

平均演色評価数 Ra と特殊演色評価数 R1-15 において、R3 と R14 を除く全ての項目で、LED は FL よりも値が低く、演色性が劣っていた(表 4-4-1)。夜間メラトニン分泌抑制率予測値、ipRGCs と 3 錐体の受光量(表 4-4-2A、B) は、照度が高いほど値が大きく、照度が同じ FL と LED 間では、同程度の値であった。

Set2-7 の AAC (覚醒度)、心拍変動 HF パワー (副交感神経活動) 平均値において、FL 照度 4 条件では、照度間に有意な差はみられなかったが(図 3-3-4、3-3-5)、先行研究同様に、照度が高いほど覚醒度上昇、心拍変動 HF パワー値減少という作用量反応の傾向がみられた(図 4-4-1a、b、表 4-4-3)。一方、LED を含む全 6 条件では、覚醒度と心拍変動 HF パワー値において、照度による作用量反応はみられなくなった(図 4-4-1a、b、表 4-4-3)。また LED2 条件では、FL2000 よりも、覚醒・緊張方向の序列を示した。夜間メラトニン分泌抑制率予測値は、FL と LED を含む全 6 条件において、照度増大により値が増大する傾向がみられた(図 4-4-1c、表 4-4-3)。

さらに、各種光学特性と Set2-7 の AAC、心拍変動 HF パワー平均値の関係性を確認した結果、AAC と相関色温度 ($r=0.91$, $p<0.05$)、x 座標 ($r=-0.87$, $p<0.05$)、y 座標 ($r=-0.89$, $p<0.05$)、v 座標 ($r=-0.90$, $p<0.05$)、v'座標 ($r=-0.88$, $p<0.05$) 間に有意な相関関係がみとめられた(図 4-4-2)。また、心拍変動 HF パワー値と相関色温度 ($r=-0.95$, $p<0.01$)、x 座標 ($r=0.90$, $p<0.05$)、y 座標 ($r=0.93$, $p<0.01$)、v 座標 ($r=0.92$, $p<0.01$)、v'座標 ($r=0.92$, $p<0.01$) 間に有意な相関関係が、また u 座標 ($r=0.74$, $p<0.1$) 間で有意傾向の相関関係がみとめられた(図 4-4-3)。AAC、心拍変動 HF パワー値と、その他の光学特性との間に、有意な相関関係はみられなかった。

表 4-4-1 演色評価数 (机上面 500 lx 時、澤井 他、2014 をもとに一部追加)

条件	Ra ※1	R1 ※2	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
FL	86	98	95	55	93	90	81	93	84	34	54	76	56	95	70	97
LED	73	70	80	86	69	68	70	84	57	-20	50	61	39	72	92	65

※1 平均演色評価数 Ra は R1-8 の平均値

※2 演色評価数の計算に用いられる試験色の目安の色を示す

表 4-4-2A 光学特性

(受光面での実測分光分布より求めた値、10° 視野、澤井 他、2014 をもとに一部追加)

条件	光子密度 380-780nm (photons/cm ² /s)	相関 色温度 (K)	Duv	放射エネルギー (μW/cm ²)				メラトニン 分泌抑制率 予測値 (%)
				400-499 nm	500-599 nm	600-699 nm	380-780 nm	
FL250	1.02×10 ¹⁴	3710	3.6	8	15	12	36	3.1
FL500	1.73×10 ¹⁴	4100	4.3	15	25	19	62	12.0
FL1000	3.74×10 ¹⁴	4080	2.4	35	54	41	134	36.1
FL2000	6.86×10 ¹⁴	4300	4.7	64	99	74	245	51.1
LED250	0.91×10 ¹⁴	4460	3.7	8	16	8	32	2.8
LED500	1.77×10 ¹⁴	4460	-4.7	15	29	17	63	12.6

表 4-4-2B 光学特性

(受光面での実測分光分布より求めた値、10° 視野、澤井 他、2014 をもとに一部追加)

条件	照度 (lx)	受光量比率 ^{※1}			3 刺激値 ^{※2}			色度座標 ^{※3}		
		ipRGCs	S 錐体	M 錐体	L 錐体	Z	Y	X	u'	v'
FL250	126	57	52	58	59	66	126	128	0.231	0.512
FL500	213	100	100	100	100	128	213	215	0.227	0.505
FL1000	459	220	226	217	215	289	459	460	0.224	0.503
FL2000	845	406	419	401	395	535	844	842	0.223	0.503
LED250	111	53	51	54	53	80	112	113	0.223	0.496
LED500	208	101	121	99	97	155	209	214	0.224	0.493

※1 受光量比率は、各細胞で FL500 の値を 100 として条件間の比率を求めた。

※2 3 刺激値は、各条件の Y 値がおおよそ受光面照度になるよう全条件を同一倍して算出した。

※3 色度座標は、u'v'の他、xy と uv も求めた。

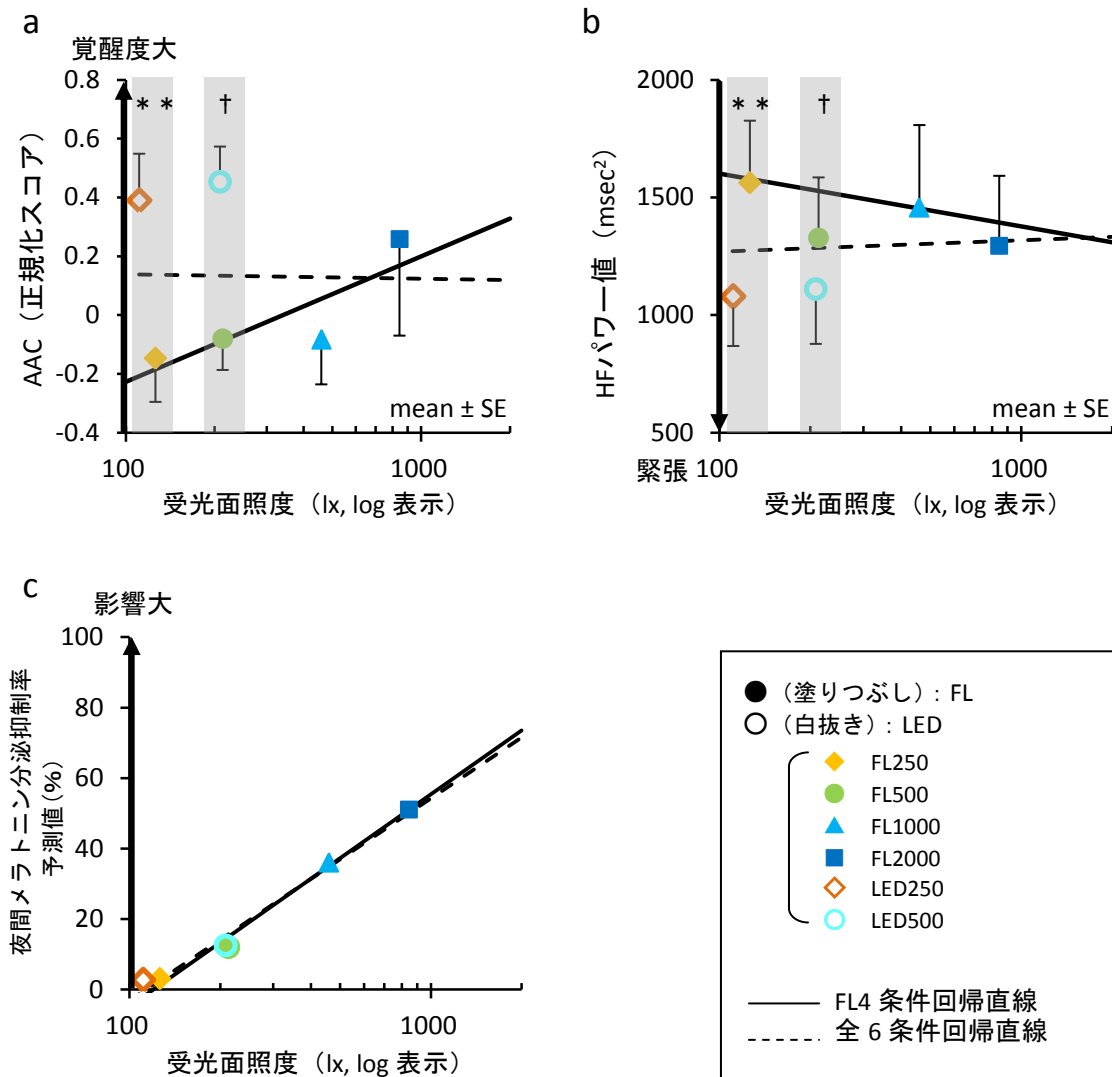


図 4-4-1 照度による作用量反応の比較

(a: AAC、b: 心拍変動 HF パワー値、c: 夜間メラトニン分泌抑制率予測値、澤井 他、2014)

表 4-4-3 照度による作用量反応の直線回帰結果 (澤井 他、2014)

指標	プロット数	直線回帰式	R ²
AAC (正規化スコア)	FL4 条件	$y = 0.427x - 1.08$	0.716
	全 6 条件	$y = -0.015x + 0.169$	<0.001
HF パワー値	FL4 条件	$y = 24.7x + 2051$	0.501
	全 6 条件	$y = 47.7x + 2274$	0.008
夜間メラトニン分泌 抑制率予測値 (%)	FL4 条件	$y = 60.1x - 125$	0.991
	全 6 条件	$y = 57.4x - 118$	0.982

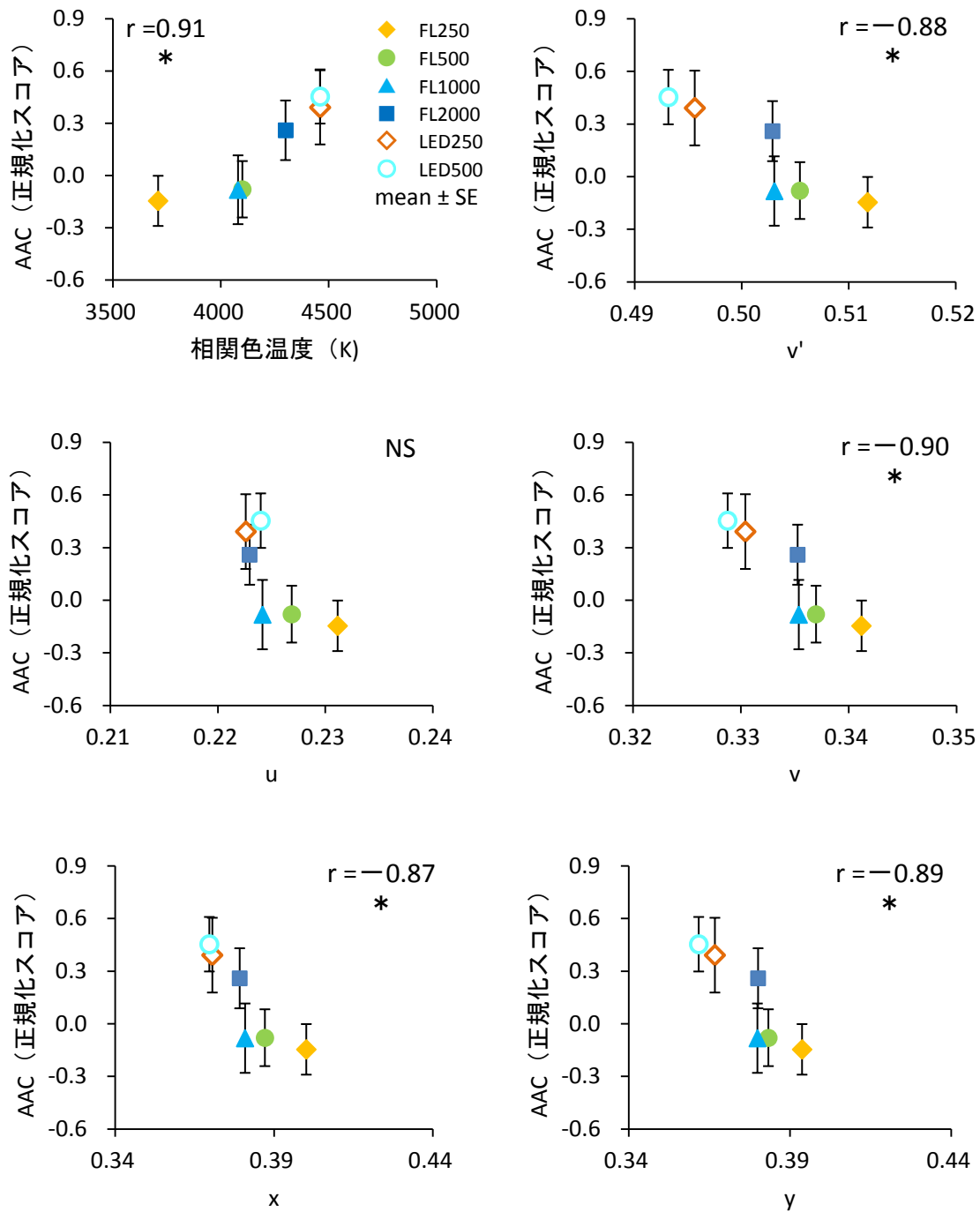


図 4-4-2 AAC と光学特性の関係

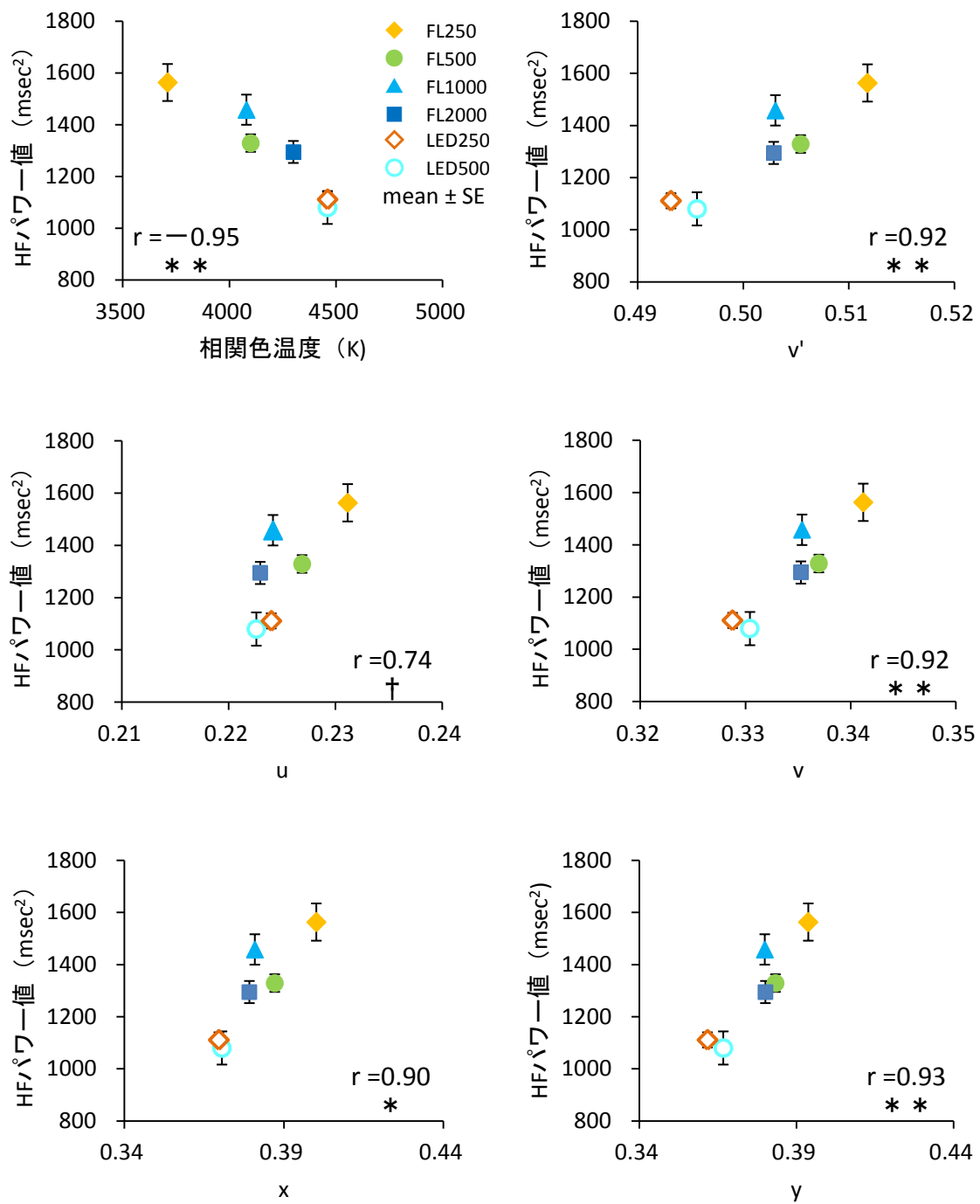


図 4-4-3 心拍変動 HF パワー値と光学特性の関係

4-5 考察

第3章の結果から、照度、相関色温度が同程度でも、分光分布の異なるLEDとFLでは精神生理状態への影響強度が異なり、LEDでは覚醒・緊張傾向になることが示唆された。また、光源間の影響強度に差異があることは、本章において、FL4条件では照度が高いほど覚醒度上昇、副交感神経活動抑制という作用量反応の可能性がみられたのに対し、FLとLEDを含む全6条件では、夜間メラトニン分泌抑制率予測値のような作用量反応はみとめられなかったことから支持される。つまり、FLの照度間では、照度増大による影響強度増大（覚醒・緊張増大）の関係性が成立するが、分光分布が異なるLEDを含めると、照度や相関色温度が同程度でも光源間に影響強度差異が生じるため、照度と影響強度の関係性が成立しなくなったと考えられる。そして、日中知的作業時における光源間の影響差異は、夜間メラトニン分泌抑制率予測値だけでは説明できないことが示された。

さらに、各種光源特性と覚醒度、副交感神経活動における実測値を比較し、光源間に差異がみとめられた要因を調査した結果、わずかな相関色温度や色度の差異が影響を及ぼした可能性がみとめられた。しかし、本研究で用いた各条件の相関色温度は、受光面で白色相当であり、LED250とFL250間で750K、LED500とFL500間では360Kとわずかな差異であった。また、FLは同一光源を用いたが、照度調整によって、照度が高い条件ほど相関色温度も高くなっていた。よって、相関色温度や色度以外の要因によって、光源間の影響度差異が生じたことが考えられる。そのため、条件間の相関色温度差異をさらに小さくし、分光分布の異なるLEDを用いて、追試の実験を行った。

追試実験では、成人若年男女15名(22±1歳)を対象とし、第3章と概ね同様の実験スケジュール、解析方法とした(付録2)。光源として、第3章同様にFL、青色励起LED(B-LED)、追加の条件として、蛍光体のみで白色を構成する紫励起LEDの高演色性タイプ(P-LED-H)と低演色性タイプ(P-LED-L)を用い、相関色温度は昼白色(受光面で白色相当)、机上面照度は700lxとして、全4条件を比較した(表4-5-1、図4-5-1)。演色評価数を表4-5-2に、各種光学特性を表4-5-3A、Bに、照度分布を付録3に示す(本実験結果の一部は、平成25年度照明学会全国大会で口頭発表した、澤井、2013)。

その結果、光曝露3時間(Set-2-7)の覚醒度(AAC絶対値)では、条件による主効果が有意傾向であり($F_{3,42}=2.67$, $p<0.1$)、第3章同様に、青色励起LEDはFLよりも覚醒度が高い序列であった(図4-5-2)。心拍変動HFパワー値では、条件間に有意な傾向はみられなかった。Set2-7

の AAC 平均値では条件による主効果（有意傾向）がみられたが、4 条件間の相関色温度は最大 190K とわずかであり（表 4-5-1）、なおかつ、相関色温度が高いほど、覚醒度も高い（AAC 大きい）という関係はみられなかった。以上のことから、相関色温度以外に、条件差異を生じさせた要因があると考えられる。

表 4-5-1 追試実験の条件概要（机上面 700 lx 時、10° 視野）

条件名	光源	机上面 照度平均値 (mean±SD lx) ※1,2	机上面 照度 均斉度※2	受光面※3 照度 (lx)	受光面※3 相関色温度 (K)
FL	3 波長形昼白色蛍光ランプ	614±62	0.80	323	4110
B-LED	青色励起昼白色 LED	608±60	0.78	331	4050
P-LED-H	紫色励起昼白色 LED（演色性高）	599±62	0.77	320	4180
P-LED-L	紫色励起昼白色 LED（演色性低）	601±57	0.77	326	3990

※1 3 時間光曝露時の机上面照度は、第 3 章結果より、FL における主観的精神生理状態の観点から知的作業に適した照度の範囲内であると考えられ、かつ、照度上昇の一時的影響が出現する可能性のある 700 lx とした。

※2 机上面全体（奥行き 500×幅 805mm）を 100mm ごとに区切った計測ポイント合計 54 ヶ所から算出した。

※3 受光面実測値として、第 3 章実験の全被験者の中でおよそ中間の視線位置を示した被験者の眼前位置、課題時視線方向の面での値を示す。

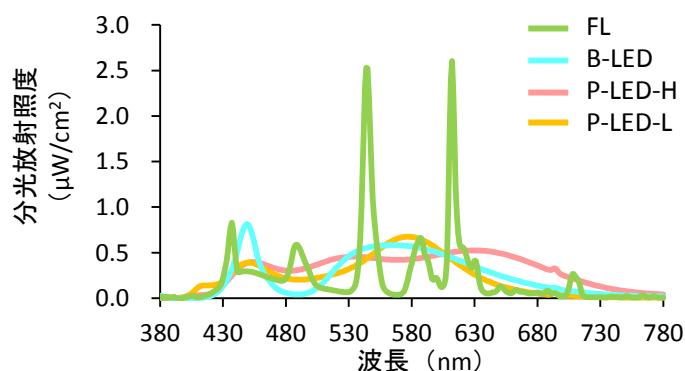


図 4-5-1 追試実験条件の受光面分光分布（机上面 700 lx 時）

表 4-5-2 追試実験条件の演色評価数（机上面 700 lx 時）

条件	Ra ^{※1}	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
		※2														
FL	88	99	96	63	93	90	83	94	84	43	60	75	63	97	75	98
B-LED	68	67	73	73	66	63	59	82	58	-20	30	57	16	67	84	65
P-LED-H	97	97	99	96	97	98	98	97	96	94	98	97	81	98	97	96
P-LED-L	66	59	79	91	58	61	71	75	35	-75	50	50	48	64	95	49

※1 平均演色評価数 Ra は R1-8 の平均値

※2 演色評価数の計算に用いられる試験色の目安の色を示す

表 4-5-3A 追試実験条件の光学特性（受光面での実測分光分布より求めた値、10° 視野）

条件	光子密度 380-780nm (photons/cm ² /s)	相関 色温度 (K)	Duv	放射エネルギー（μW/cm ² ）				メラトニン 分泌抑制率 予測値（%）
				400- 499nm	500- 599nm	600- 699nm	380- 780nm	
FL	2.65×10 ¹⁴	4110	1.0	8	15	12	36	24.1
B-LED	2.76×10 ¹⁴	4050	-4.9	7	18	12	38	20.0
P-LED-H	3.56×10 ¹⁴	4180	2.1	8	17	19	49	27.7
P-LED-L	2.50×10 ¹⁴	3990	0.0	8	18	8	35	21.6

表 4-5-3B 追試実験条件の光学特性（受光面での実測分光分布より求めた値、10° 視野）

条件	照度 (lx)	受光量比率 ^{※1}			3 刺激値 ^{※2}			色度座標		
		ipRGCs	S 錐体	M 錐体	L 錐体	Z	Y	X	u'	v'
FL	323	100	100	100	100	212	324	327	0.225	0.501
B-LED	331	86	112	100	101	236	328	342	0.229	0.494
P-LED-H	320	115	99	101	100	212	326	325	0.223	0.501
P-LED-L	326	91	97	100	101	208	327	333	0.227	0.502

※1 受光量比率は、各細胞で FL の値を 100 として条件間の比率を求めた。

※2 3 刺激値は、各条件の Y 値がおおよそ受光面照度になるよう全条件を同一倍して算出した。

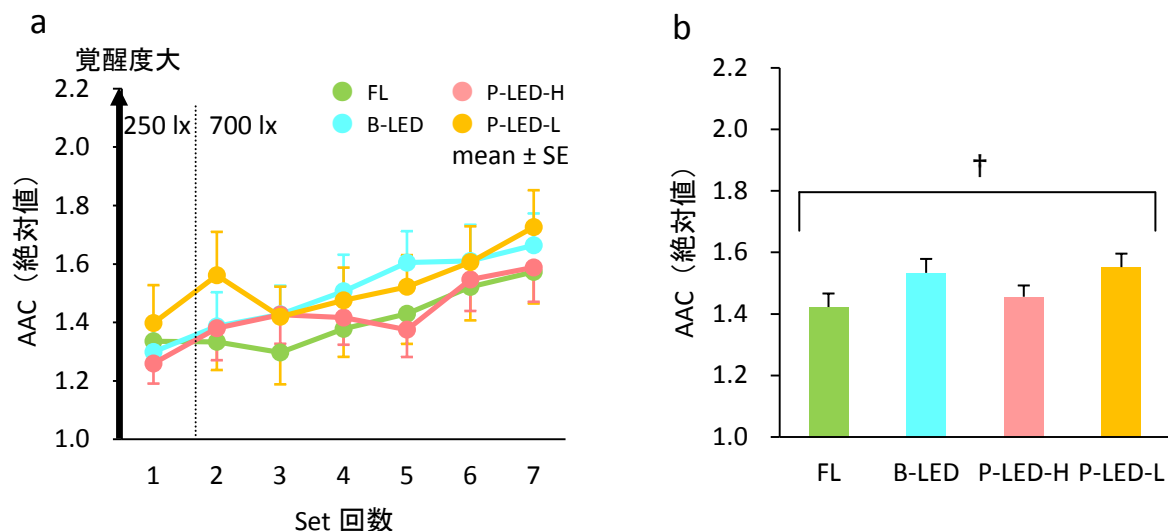


図 4-5-2 追試実験の AAC (光源 4 条件比較、a : 推移、b : Set2-7 平均値)

追試実験における Set2-7 の AAC 平均値を比較すると、演色性の低い 2 条件 (B-LED、P-LED-L) は、演色性の高い 2 条件 (FL、P-LED-H) よりも、覚醒度が高い序列であった (図 4-5-2)。また第 3 章において、3 時間の光曝露により明順応、色順応したと考えられる状況下であっても、FL と LED の光源間で、作業時の印象に差異がみられた (図 3-4-16)。以上のことから、視覚野を經由した信号が、主観的精神生理状態に影響を及ぼし、さらには覚醒度や自律神経活動に影響が波及したため、光源間の精神生理状態に差異が生じた可能性が考えられる。一方、光が角膜を通り、大脳視覚野や視交叉上核に信号が伝達されるまでには、様々な細胞を經由し、光の伝達経路には複雑なメカニズムが存在する。また、Figueiro et al. (2005) が報告しているように、短波長光が生体に及ぼす影響は、他の波長域の光を加えることで減衰する。以上のことから、ipRGCs や錐体の各受光量差異がわずかでも、異なる光源間では、分光分布差異による受光波長パターンが異なることで、または、空間的・時間的配光が異なることで、脳へ伝達される刺激量が異なった可能性も考えられる。これら光源間で精神生理状態に差異が生じた原因の解明については、今後の課題である。

これまで、オフィス照明として 3 波長形蛍光ランプが普及してきた。しかし昨今、省電力化の観点から、3 波長形蛍光ランプから青色励起白色 LED に照明を変更する状況が増えてきている。この場合、低照度でも、本研究で用いた LED 相当照明の連日使用により、従来の FL 使用時よりも緊張した状態が続くと、疲労感増大に伴い、パフォーマンス低下が起こる可能性も考えられる。したがって、知的作業に適した光環境要件を構築するには、長期的な光曝露により、光環境への

慣れや影響の蓄積が現れた状況下において、パフォーマンス向上に寄与する精神生理状態（覚醒・緊張状態、主観状態、印象）を、今後評価する必要があると考える。

以上のことから、分光分布の異なる光源間では、照度、相関色温度、短波長成分量が同程度でも、白色照明が日中の精神生理状態に及ぼす影響強度が異なり、青色励起白色 LED では FL よりも覚醒・緊張傾向になることが示された。一方、青色励起昼白色 LED では、蛍光ランプよりも主観的精神生理状態が良好にはならなかった。よって、様々な照明を選択することができる現代社会において、知的作業に適した光環境を整備するためには、照度や相関色温度だけでなく、分光分布にも着目した新たな光環境評価手法が必要であると考えます。そして、精神生理状態の観点から、白色照明光環境が生体に及ぼす影響を予測し、作業に適した光環境を整備することで、知的作業のパフォーマンス向上だけでなく、作業の充実感向上、さらには心身の健康促進および生活の質向上につながると考える。

一連の光環境に関する研究結果から、知的作業時の「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」という精神生理状態マネジメントにおいて、日常的にオフィスで使用されている照度範囲および光源において、光環境が精神生理状態に及ぼす影響を評価するためには、照度、相関色温度、短波長成分量だけでなく、分光分布に着目した新たな多面的評価手法が必要であることが明らかとなった。

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究（C）課題番号 22615023 により実施した。

追試実験で使用した LED 光源 3 種の提供元：京セラ株式会社

4-6 日中知的作業時の精神生理状態マネジメント手法まとめ

第3、4章における一連の研究結果から導かれた、知的作業時の精神生理状態マネジメント手法を以下に示す（図4-6-1）。

一連の研究結果から、知的作業時の「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」という精神生理状態マネジメントにおいて、至適精神生理状態の達成に関わる光環境要件の一部が新たに明らかとなった。

蛍光灯においては、机上面250-2000 lxの範囲（受光面で白色相当、126-845 lx）において、主観的精神生理状態の観点から、机上面500 lx（受光面で213 lx）が知的作業に最も適していることが示された。また、覚醒度低下の時間帯では、照度を一時的に上昇させる制御により、覚醒度を維持できる可能性が示された。さらに、照度、相関色温度、短波長成分量が同程度でも、分光分布が異なる蛍光灯と青色励起白色LEDにおいて、青色励起白色LEDは蛍光灯よりも覚醒・緊張方向の状態となるが、主観的精神生理状態がより良くはならず、様々な分光分布の光源が精神生理状態に及ぼす影響を予測するには、分光分布に着目した新たな多面的評価方法が必要であることが導かれた。

本研究の成果として、光環境要件に関わる条件を以下にまとめる。

- ・ 蛍光灯机上面250-2000 lxでは500 lxが主観的精神生理状態の観点から最も適する。
- ・ 覚醒度低下の時間帯では、一時的な照度上昇が覚醒度維持に有効。
- ・ 従来から指標とされてきた照度、相関色温度、短波長成分量だけでは、青色励起白色LEDと蛍光灯間にみられるような、分光分布パターンが異なる光源間の精神生理状態への影響強度は予測できない。

→分光分布に着目した新たな多面的評価手法の確立が必要

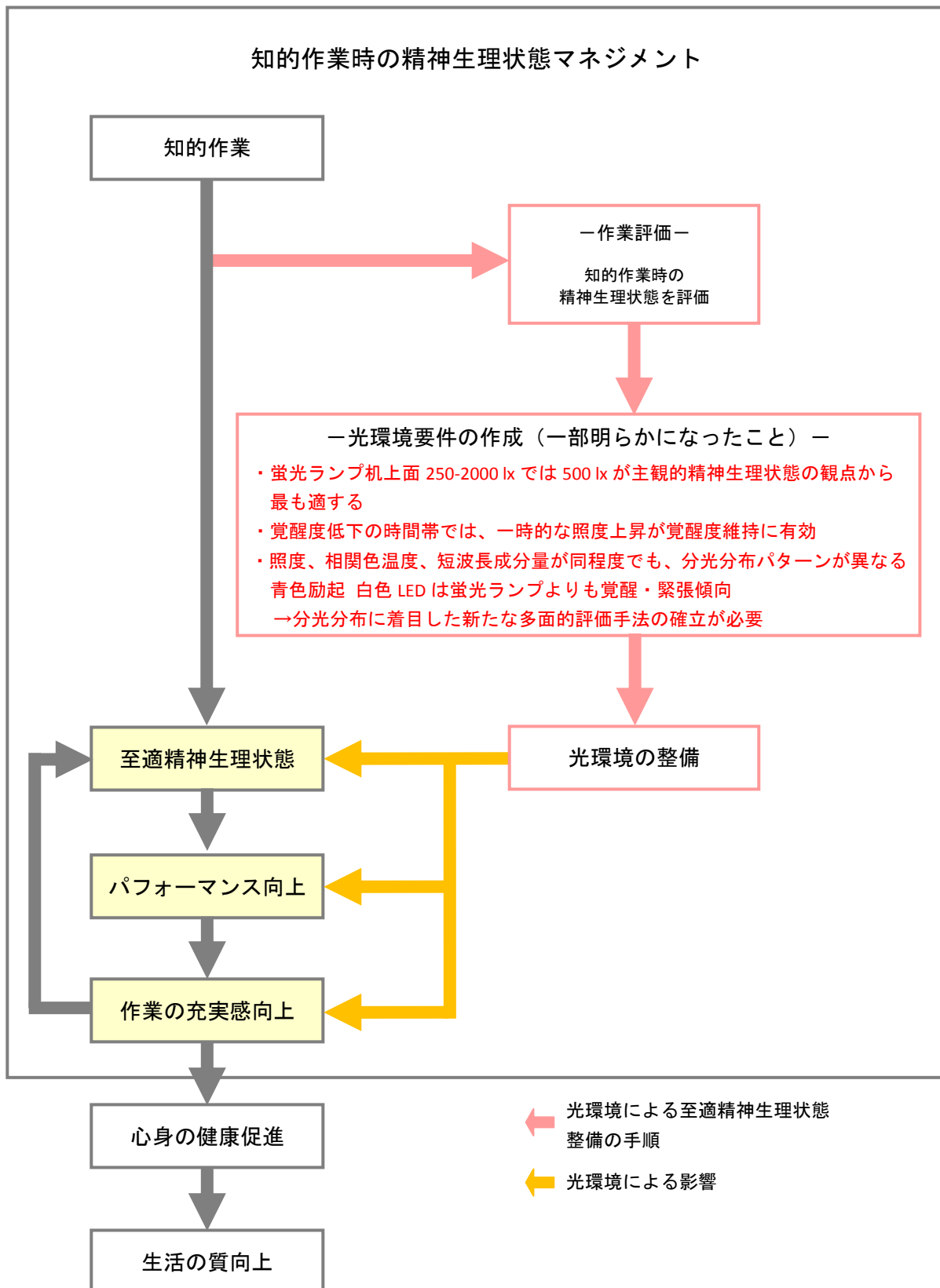


図 4-6-1 光環境による日中知的作業時の精神生理状態マネジメント手法

4-7 引用・参考文献

- Commission International de L'eclairage: Fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part1, CIE Technical Report 170-1, pp.4-14, 2006
- Dartnall H.: The interpretation of spectral sensitivity curves, Brit med Bull, 9(1), pp.24-30, 1953
- Figueiro M., Bullough J., Bierman A., Rea M.: Demonstration of additivity failure in human circadian phototransduction, Neuro Endocrinol Lett, 26(5), pp.493-498, 2005
- 澤井浩子、古川僚一、石井康晴、稲生楽、松田恵里、小山恵美：実務課題中の光環境が精神生理状態に及ぼす影響；ブロードLED、2峰性LED、3波長形蛍光ランプの比較、平成25年度（第46回）照明学会全国大会講演論文集、講演番号8-7、2013
- Stockman A., Sharpe L.: The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derives from measurements in observers of known genotype, Vision Research, 40, pp.1711-1737, 2000
- 高橋良香、勝浦哲夫、下村義弘、岩永光一：光曝露によるメラトニン分泌抑制率の推定、照明学会誌、94(2)、pp.124-134、2009
- 高橋良香：生物時計機構への作用の定量化に関する研究動向、照明学会誌、96(10)、pp.713-716、2012
- Tsujimura S., Hamazono N., Saito Y., Okajima K.: Rod, cone and melanopsin interactions in color perception, Proc of 12th Congress of International Colour Association 13, 4, pp.1621-1624, 2013
- 吉田茂、佐藤賢：色の測定、佐藤愛子、利島保、大石正、井深信男（編）、光と人間の生活ハンドブック、朝倉書店、東京都、pp.175-183、1995

第5章 総括

一連の研究において、心身の健康促進および生活の質向上を目指し、日中作業時の精神生理状態をマネジメントする手法について、2種類の手順により検討した。そして、以下のことが明らかとなった。

技能系作業において、「パフォーマンス向上→作業の充実感向上→至適精神生理状態の達成」という手順により精神生理状態をマネジメントすることで、心身の健康促進および生活の質向上を図るため、パフォーマンス向上について検討をした。成果物の質に関わるパフォーマンスに着目し、パフォーマンス向上に寄与する精神生理状態を明らかにするため、技能習熟過程における成果物の質と精神生理状態、行動特性を同時に時系列評価した。その結果、数秒程度の継続時間であり、かつ、眼球運動を伴う動作の評価には、眼電図（Electrooculogram、EOG）時系列変動指標を用いることで、その他の場合は手首の活動量や心拍数を用いることで、成果物の質を反映する精神生理状態または行動特性を定量的に捉えることができることが示された。そして、技能習熟過程における精神生理状態および行動特性を定量的に評価することで、技能のこつである技能素を抽出し、技能練習時のフィードバック指標を作成でき、技能習熟の効率化を図ることができる可能性がみとめられた。また、評価対象となる動作の継続時間や動作特性によって、評価指標の適・不適がみられたため、評価指標の実使用時は、動作の特性から、適した評価指標を選択することも重要であることが示された。

以上の作業評価、技能素の抽出、フィードバック指標の作成および活用を通し、成果物の質に関わるパフォーマンス向上および作業の充実感向上を図るという精神生理状態マネジメントを行うことで、心身の健康促進、生活の質向上につながると考えられる（図 5-1）。そして、パフォーマンス向上をきっかけとした精神生理状態マネジメントを実用化するためには、高難易度作業や熟練者を対象とした評価を実施し、フィードバック指標の精度を向上させること、また、フィードバック指標を用いた具体的な改善実施や効果確認を実施し、技能習熟の効率化を図ることが今後の課題である。

今後の展望として、上記の技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法を用いることで、技能習熟の効率化を図り、かつ、パフォーマンスの向上によって作業の充実感が向上し、仕事以外の時間を楽しむ心身のゆとりが生まれることにつながると考える。また、伝統技能においては、

後継者不足や高齢化が進んでいるため、技能そのものを保存する必要性もある。本研究で導かれた技能素抽出手法を用いることで、技能を定量的に保存し、かつ技能習熟の効率化を図ることに貢献できると考える。

以上のことから、本研究の成果として、技能系作業時の「パフォーマンス向上→作業の充実感向上→至適精神生理状態の達成」という精神生理状態マネジメントにおいて、成果物の質に関わるパフォーマンス向上を導く一手法（EOG 時系列変動評価）が新規に明らかとなった。

知的作業において、「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」という手順により精神生理状態をマネジメントすることで、心身の健康促進および生活の質向上を図るため、至適精神生理状態を達成するための光環境要件について検討をした。実オフィスでの使用を想定した白色照明の照度と光源（分光分布）に着目し、白色照明の照度と分光分布が日中知的作業時の精神生理状態に及ぼす影響を評価した。その結果、蛍光ランプ机上面 250、500、1000、2000 lx では、先行研究同様、照度が高いほど覚醒・緊張方向になる作用量反応が示唆された。一方、主観的精神生理状態も考慮すると、500 lx が 4 条件で最も知的作業に適していることが示された。また、覚醒度が低下する時間帯においては、一時的に照度上昇（ベース照度の 4 倍程度）を組合せることで、覚醒度を維持でき、作業に適した精神生理状態を保つことができる可能性が示唆された。

さらに、照度、相関色温度、短波長成分量が同程度でも、分光分布差異により、覚醒・緊張状態への影響強度が異なることが示唆され、青色励起白色 LED は蛍光ランプよりも、覚醒・緊張傾向になることが示された。しかし、500 lx において、青色励起白色 LED は蛍光ランプよりも主観的精神生理状態が良好にはならず、青色励起白色 LED においては、知的作業に適した光環境要件は明らかにはならなかった。したがって、知的作業に適した光環境を構築するには、単に覚醒・緊張方向の影響強度を評価するだけでなく、長期的な光曝露により、光環境への慣れや影響の蓄積が現れた状況下において、主観的な精神生理状態の観点からも評価する必要性がある。さらに、様々な光環境を選択できる今日、白色照明が日中の精神生理状態に及ぼす影響を予測するには、照度、相関色温度、短波長成分量といった従来からの指標だけでなく、分光分布に着目した多面的評価方法が必要であることが導かれた。

以上のことから、分光分布の異なる光源間において、白色照明光環境が精神生理状態に及ぼす影響を予測する手法を確立した後、精神生理状態の観点から知的作業に適した光環境を整備し、パフォーマンス向上および作業の充実感向上を図るという精神生理状態マネジメントを行うこと

によって、心身の健康促進、生活の質向上につながると考えられる（図 5-2）。そして、至適精神生理状態の達成をきっかけとした精神生理状態マネジメントを実用化するためには、長期的な光曝露や本研究で用いていない種類の知的作業、技能系作業を対象とした評価を実施し、光環境要件の精度を向上させること、また、実社会でのフィールド評価を実施し、至適精神生理状態を達成することができる光環境要件の有効性を実証することが今後の課題である。

今後の展望として、LED はコンパクト形状、長寿命、省電力などの利点があり、様々な LED が今後さらに普及すると考えられる。そのため、これまでの照明基準に光の精神生理的影響の観点による知見を加え、LED 照明を設計、選択することで、パフォーマンス維持向上や心身の健康促進を図ることができると思う。

以上のことから、本研究の成果として、知的作業時の「至適精神生理状態の達成→パフォーマンス向上→作業の充実感向上」という精神生理状態マネジメントにおいて、日常的にオフィスで使用されている照度範囲および光源（分光分布）において、至適精神生理状態の達成に関わる光環境要件の一部が新規に明らかとなった。

以上の技能系作業、知的作業における精神生理状態マネジメントでは、作業者が自身の精神生理状態をマネジメントすることで、至適精神生理状態の達成またはパフォーマンス向上をきっかけとし、作業の充実感を得ることが重要である。パフォーマンス向上だけを追究するのではなく、同時に、総合的な精神生理状態を考慮し、作業に対する充実感や満足感を得ることで、精神面の健康状態が向上すると考えられる。しかしながら、実社会でのマネジメント実施を想定すると、訓練設備や光環境の整備は、企業や団体の施設管理者に依るところが大きい。そのため、各作業者だけでなく施設管理者も、精神生理状態マネジメントの重要性を認識し、行動に移すことも重要となる。

1 日 24 時間のうち、ほとんどが仕事と睡眠に費やされ、残りの時間が余暇の生活時間となる。日中作業時の精神生理状態マネジメントにより仕事の充実感を得ることで、余暇の時間を楽しむことができ、なおかつ睡眠が阻害されず、ワーク・ライフ・バランスを実現した好循環の生活をおくることができるのではないかと考える。

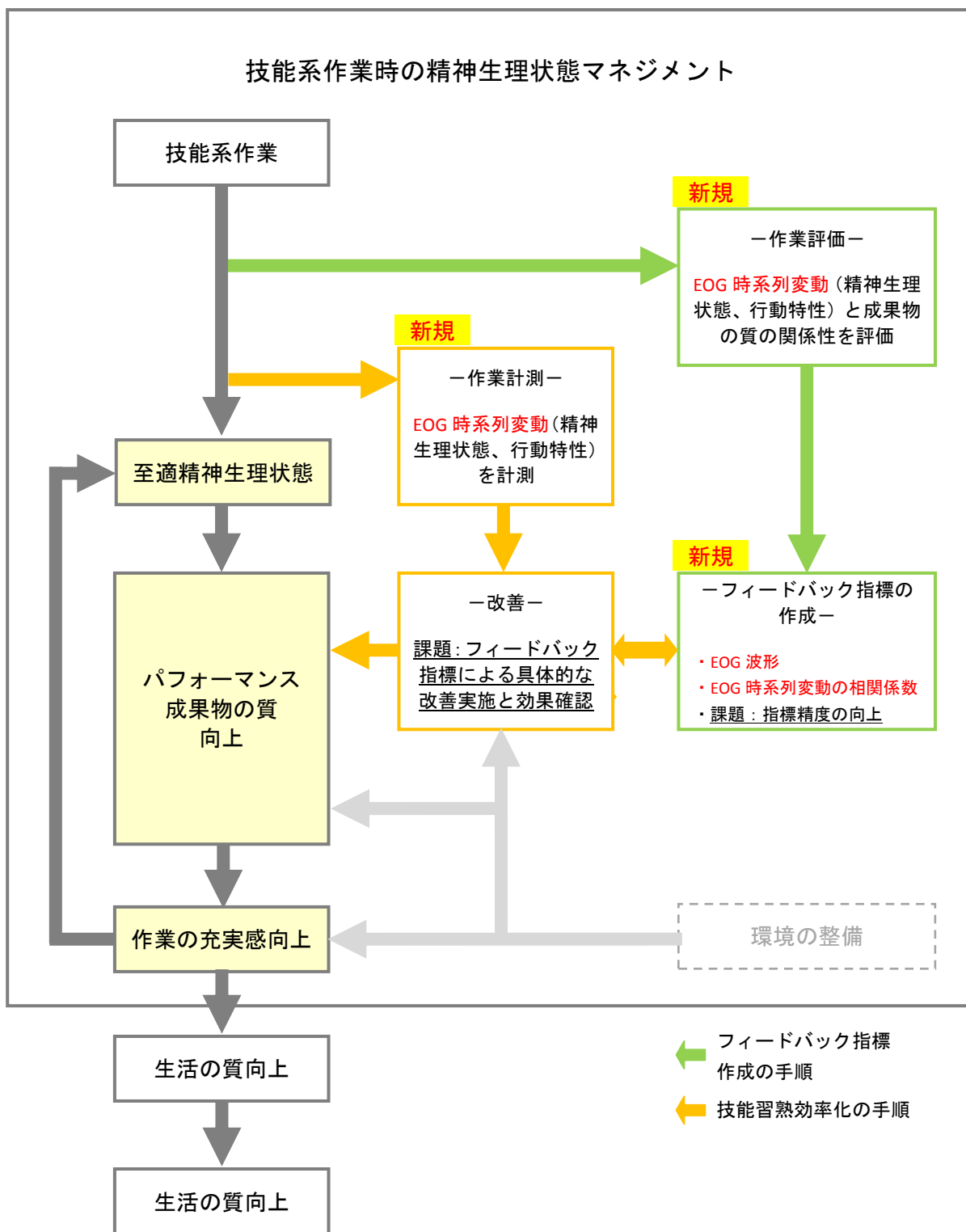


図 5-1 技能系作業時の精神生理状態マネジメント手法まとめ

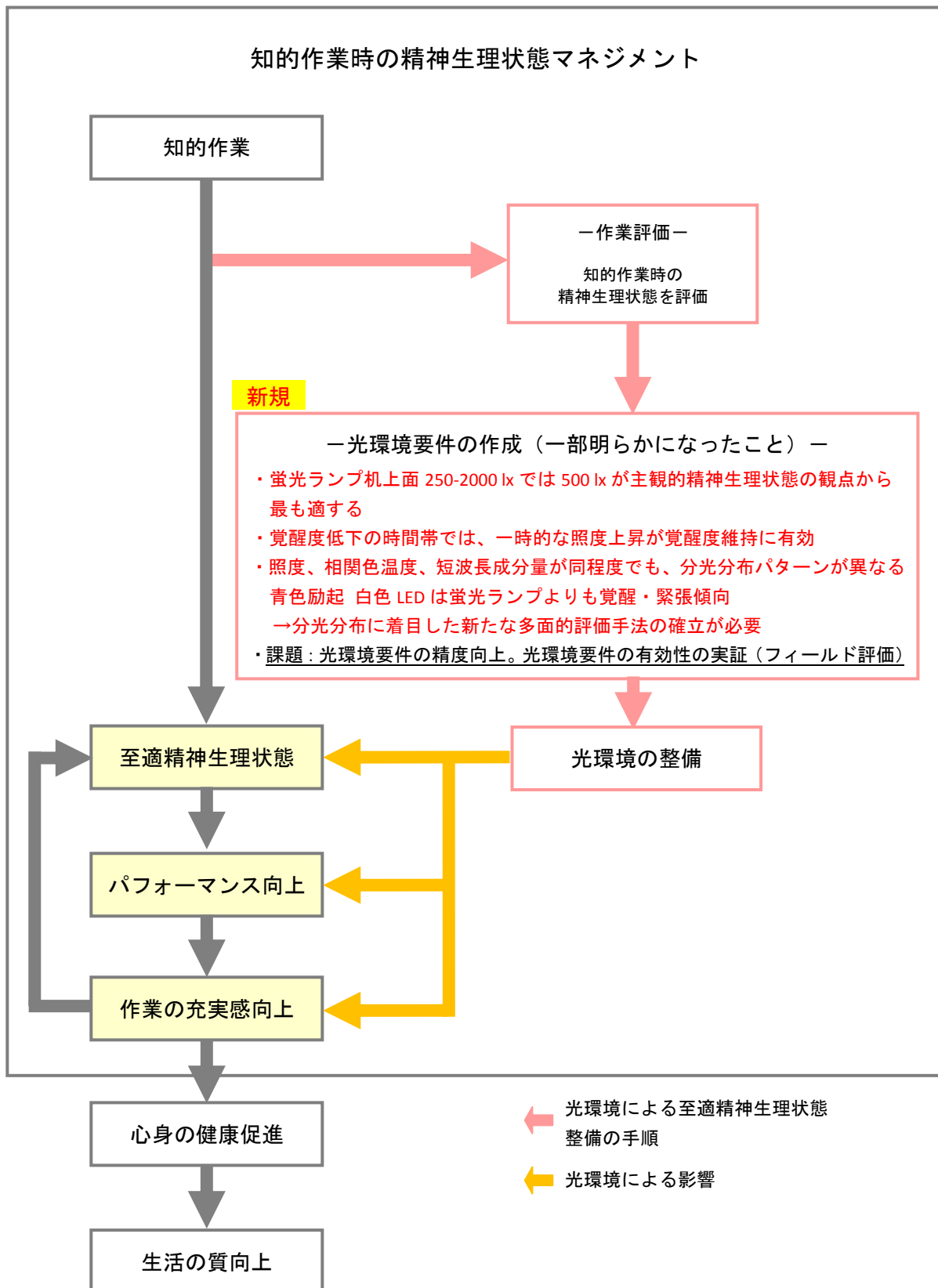


図 5-2 知的作業時の精神生理状態マネジメント手法まとめ

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(B)課題番号 23300037、科学研究費補助金基盤研究(C)課題番号 22615023 により実施した。また、第 4 章追試実験で使用した LED 光源 3 種は、京セラ株式会社からご提供いただいた。

本論文に関わる研究を遂行し、まとめるにあたって、多大なご指導をいただきました小山恵美先生に厚く感謝の意を表します。小山恵美先生には、学部、修士、博士に至る 7 年間半にわたって、ご指導をいただきました。また、研究者になりたいと思い、博士後期課程での研究を再開するにあたって、研究者として生きていくための心構えや今後の生活についてなど、貴重なご助言、ご配慮をいただきました。深く感謝申し上げます。

第 2 章の研究では、森本一成先生、宝珍輝尚先生をはじめ、技能素に関わる研究グループの先生方には、研究に参加させていただき、またご助言、ご支援をいただきました。深く感謝申し上げます。また、渡守武和音氏、石井康晴氏には、実験データをご提供いただき、また、一緒に研究に取り組みました。深く感謝いたします。

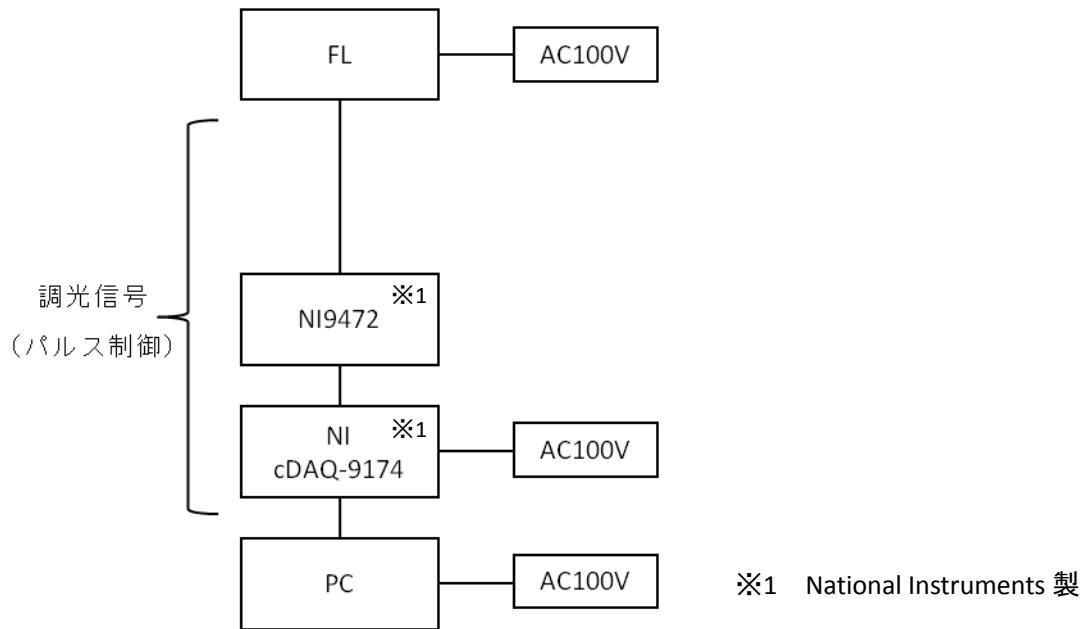
第 3 章の研究では、塩尻佳子氏が基盤を築いた研究を引き継ぎ、松田恵理氏とともに研究に取り組みました。ご協力いただいたお二人に感謝申し上げます。特に松田恵理氏とは、実験・解析を数ヶ月間ほぼ毎日一緒に実施し、松田恵理氏の行動力や努力する姿を見て、私も頑張ろうと思うことができました。

第 4 章の光環境追試実験では、LED 光源をご提供いただくだけでなく、光源の仕組みや照明に関する市場動向など多大なご助言をいただきました、京セラ株式会社の柳澤美津夫氏、草野民男氏、池田雅敏氏に感謝申し上げます。

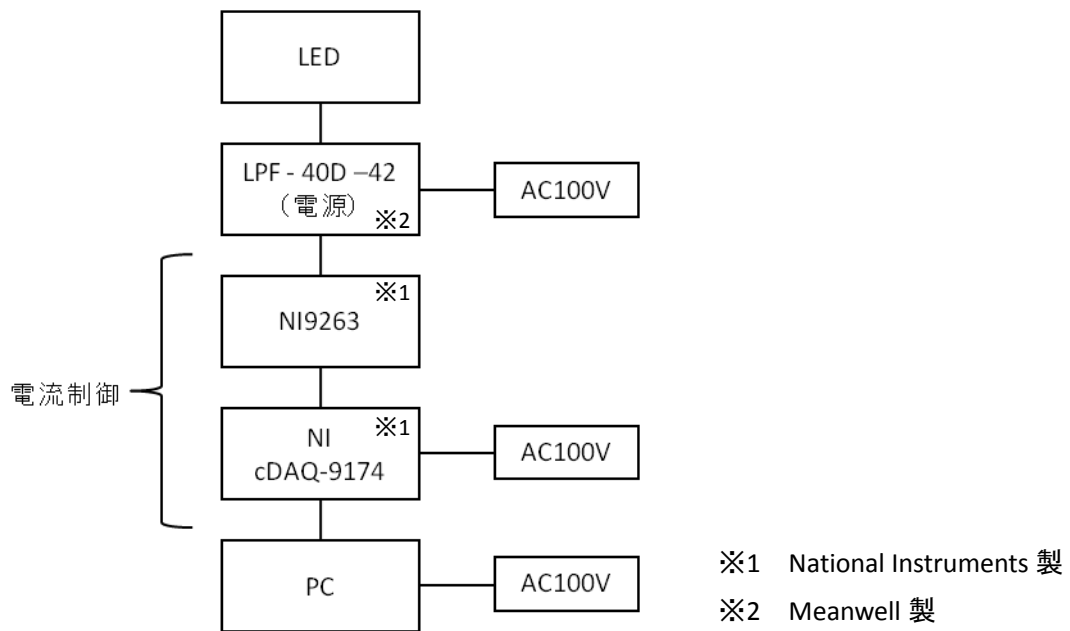
全ての実験は一人では実施することができず、上野敬介氏、松原明央氏、渡守武和音氏、石井康晴氏、稲生楽氏、古川僚一氏、宮井早希氏をはじめ、研究室の方々のご協力を得て、実施することができました。また、生活統制があり、日中の実験実施にも関わらず、実験に参加していただいた被験者の皆様方に、深く感謝申し上げます。

最後に、退職しご迷惑をお掛けすることになりましたが、在職中での研究再開に賛成していただき、ご協力いただいた日野自動車株式会社車両実験室の方々、研究再開に賛成し、支えてくれた家族、いつも励ましてくれた友人に厚く感謝いたします。今後も、社会に貢献できる研究に取り組み、結果を社会に還元できる研究者になれるよう努力していきたいと思いをします。

付録 1



付録図 1-1 第 3 章で使用した FL 照明装置の構造概要



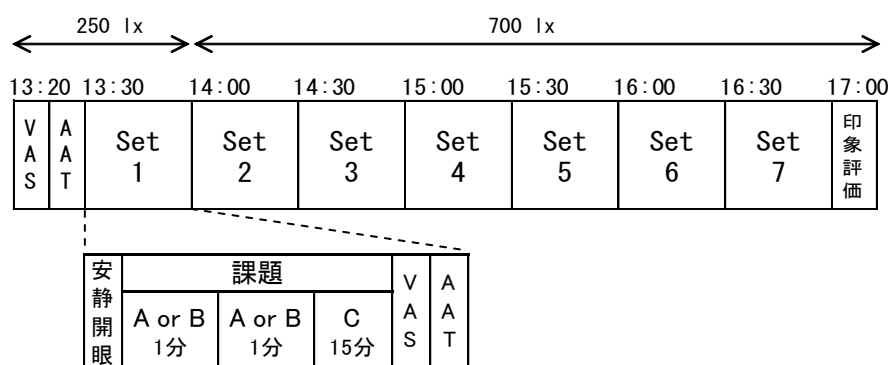
付録図 1-2 第 3 章で使用した LED 照明装置の構造概要

付録 2

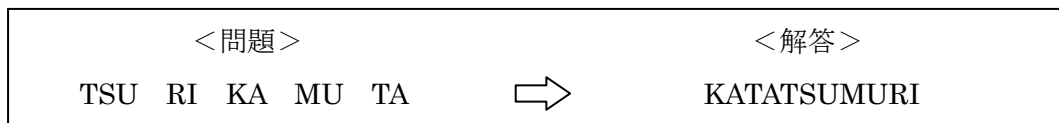
追試実験の手順

2012年11月–2013年8月、京都工芸繊維大学内の生体計測実験室において、13–17時の時間帯に計測を実施した。実験は、京都工芸繊維大学内に設置された倫理委員会の承認を得て行った。全ての被験者に対し、睡眠障害や眠気を伴う薬の使用がないことを確認し、実験の目的・方法を説明した上で、文書による同意を得て、適切な報酬を支払った。また、朝型–夜型質問紙により明らかな朝型や夜型でないこと、石原式色覚検査表により色覚異常がないことを確認した。

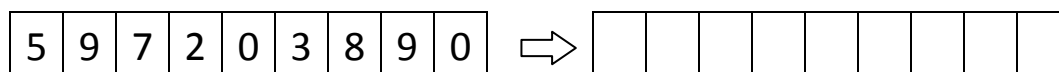
実験手順は、第3章（図3-2-3）と概ね同様である（付録図2-1）。変更点は、実験開始直後の読書10分を取りやめ、実験開始時刻を13時20分に変更し、課題A、Bの難易度を上昇させた。第3章結果より、初期状態の机上面250 lxでも光源間で影響が異なることが示唆されたため、読書10分を取りやめ、250 lxでの光曝露時間を減らし、実験準備中に精神生理状態の統制を行うようにした。また第3章結果より、知的作業課題での正答率が高かったため、難易度が上昇するよう、課題A（文字並び替え課題、付録図2-2）では問題をひらがなからローマ字に、課題B（数字記憶課題、付録図2-3）では記憶する数字を7桁から9桁に変更した。



付録図 2-1 追試実験の実験スケジュール

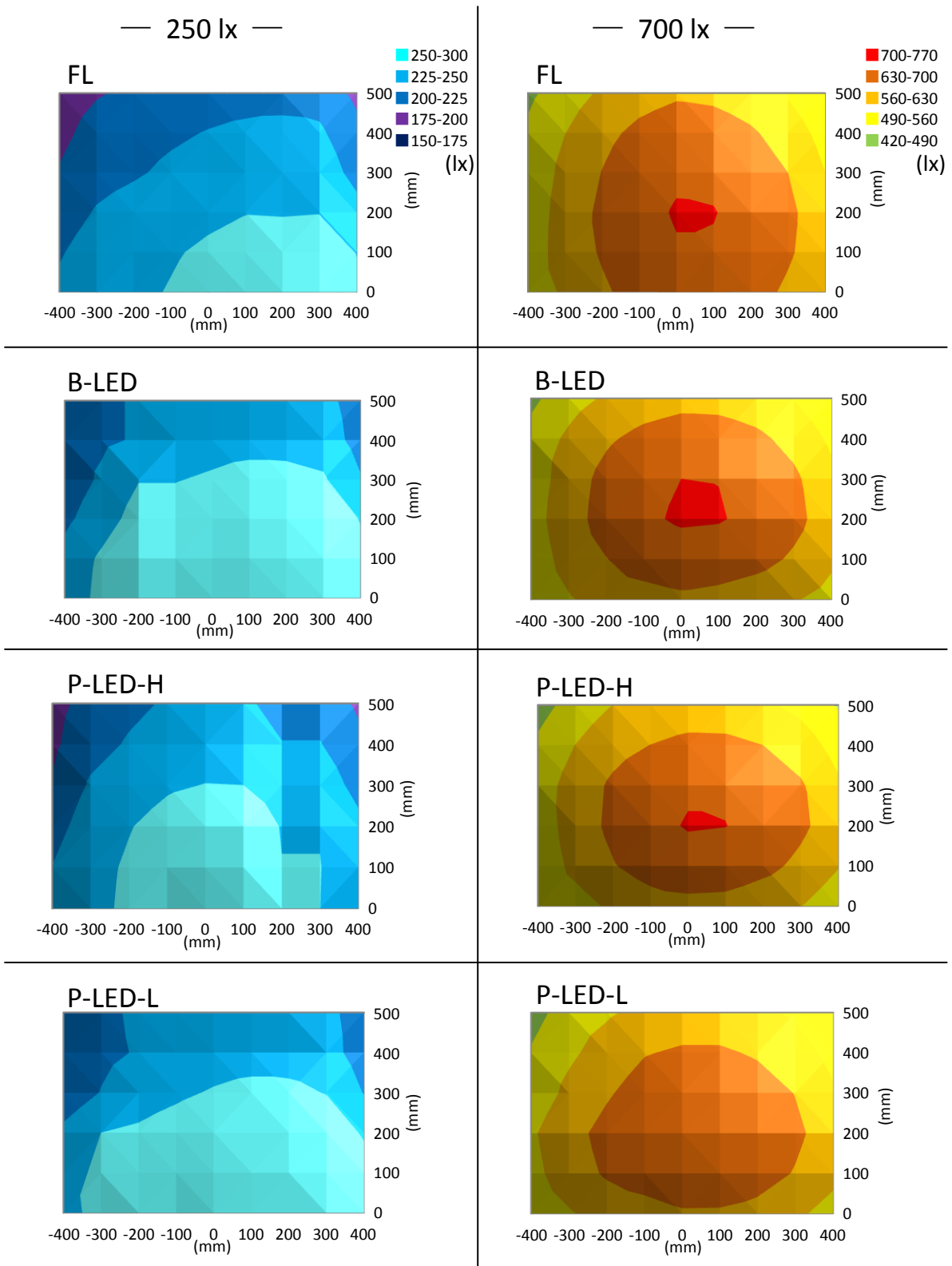


付録図 2-2 追試実験の課題 A 問題例



付録図 2-3 追試実験の課題 B 問題例

付録 3



付録図 3-1 追試実験の机上面照度分布（上面視）