

# ヒト脳内における 顔色処理メカニズムの解明

2014 年 1 月

博士 (工学)

中 島 加 恵  
豊橋技術科学大学



# ヒト脳内における顔色処理メカニズムの解明

## 論文要旨

顔色は健康状態や感情状態を反映して変化する。故に、顔色はその人物の状態を示す重要なシグナルであるといえる。ヒトを含む霊長類の色覚は、同種の「肌の色」の変化を識別するために最適に選択されている可能性があると言われており、顔色は人類の進化にまで影響を与える程、重要な社会的シグナルといえる。したがって、顔色は他者の顔から情報を読み取る際に、重要な手がかりとなっており、顔の年齢や性別、健康状態、魅力などの知覚に影響を及ぼす。脳活動計測技術の発達に伴い、顔研究にも広く神経科学的手法が取り入れられ、ヒト脳内で行われる顔認知処理メカニズムは着々と解き明かされている。しかし、顔色の知覚に対する脳活動計測によるアプローチはほとんど行われていない。したがって、顔色が様々な顔情報の知覚に影響を与えるという現象は確認されているが、その脳内処理メカニズムについては未知である。本論文は、こうした背景のもと、心理物理的手法、脳波計測手法、脳画像法による多角的アプローチにより、ヒト脳内における顔色処理メカニズムの解明を目指したものである。

本論文ではまず、物体の記憶色の強さ（物体色の定着の強さ）を顔と他の物体とで比較することにより、顔における色情報の重要性を検討した。記憶色と異なる色で着色した顔（青い顔）に対して、不自然さを反映する脳波成分 P3 が増大し、ヒトは特に顔上の色の違いに敏感に反応することを脳活動レベルで示した。次に、顔処理を反映する脳波成分 N170 に着目した脳波実験により、顔色の処理は顔呈示後約 170ms に生じることを示し、さらに顔処理に関係する領域に着目した fMRI 実験により、その処理が左半球の紡錘状回顔領域（FFA）で行われることを示唆した。このように本論文は、顔色の処理が生じる時間過程と脳領域の特定に成功した。

さらに本論文では、ヒト対ヒトの対面コミュニケーションで非常に重要な情報源である表情の知覚に与える顔色の影響についても検討した。恐怖表情は、周囲の危険を表すシグナルであり、その危険を迅速に回避するために、恐怖表情に対して無意識的な処理が発生する。本研究は、この恐怖表情に対する無意識的な処理の駆動に顔色が関係することを示した。また、顔色には表情知覚を促進させる効果がある（例えば、赤い顔は怒っているように見える）という明確な証拠を示すことに成功し、表情を読み取る際に顔色が影響することを証明した。

以上、本論文はヒト脳内で行われる顔色処理メカニズムの解明に向けたいくつかの研究成果を示した。将来的には、本研究で明らかにしたヒトの顔処理メカニズムを応用することによって、ヒト対ヒトさらには、ヒト対コンピュータのコミュニケーションを円滑にすることが可能となると考えられる。





# Human brain mechanisms for processing of facial color

## ABSTRACT

Facial color is varied with the person's mental or physical condition. Thus, facial color provides useful clues for estimation of mental or physical condition of another person. Changizi et al. (2006) have claimed that color vision in primates was selected for discriminating skin color modulations, presumably for the purpose of discriminating emotional states, socio-sexual signals, and threat displays. Therefore, color information on the face is important in the standpoint of development. Moreover, facial skin color is related to the perception of age, sex, health condition, and attractiveness of the face. Thus, facial color is important facial information to facilitate social communication. With the development of neuroimaging techniques, many cognitive neuroscience studies about the face processing in the human brain have been conducted. In event-related potential (ERP) studies, the N170 component, a negative ERP component recorded between 140 and 200 ms from stimulus onset, with a peak around 170 ms at the occipito-temporal sites, clearly distinguishes faces from other objects. Functional MRI (fMRI) studies have demonstrated that some brain area such as the fusiform face area (FFA) and the occipital face area (OFA) are related to face processing. In this way, the mechanisms of face processing have been steadily unveiling. However, there are few studies focusing on the facial color. The thesis aims to investigate the mechanisms of facial color processing in the human brain through a multiple approach such as psychophysical and neuroimaging studies.

First, the thesis discusses the effect of facial color by comparing the strength of memory color between face with other objects. The unnaturalness-related ERP component (P3) was enhanced for the atypical-colored face (blue face) different from its memory color (flesh color), suggesting that the human is sensitive to the color difference on the faces. In the next step, the study investigated facial color effect for face-selective ERP component such as N170 and VPP (vertex positive potential). In the result, face-selective N170 observed at the left occipito-temporal site was modulated by facial color. Moreover, the study attempted to identify brain area involving processing of facial color using fMRI. In the result, the left FFA showed selectivity for facial color. These results suggest that the facial color is processed at around 170 ms after seeing the face, and in the left FFA. In this way, this thesis succeeded to

identify when and where facial color is processed in the brain.

Moreover, the thesis discusses facial color effect on the perception of facial expression. Because facial color is especially sufficiently suggestive of emotional states as in the phrases: “flushed with anger” and “pale with fear” . Previous ERP studies have shown that fearful faces are processed even in the absence of conscious awareness to shirk looming threat or danger rapidly. Against the backdrop, this study investigated the effects of facial color on the supraliminal and subliminal processing of fearful faces in the ERP experiment. In the result, facial color influenced subliminal processing of facial expression: automatic processing of fearful expressions was suppressed by the bluish color. The result suggests that the facial color is related to the drive of unconscious processing of the fearful expression. In addition, the psychological study investigated between facial color and expression on face perception. As a result, the experiment demonstrated that perception of facial expression is clearly influenced by facial color. For example, reddish faces were perceived as more anger. In contrast, perception of facial color is slightly affected by facial expression: sad faces were perceived as more bluish color. These results suggest interactive relationship between facial color and expression. The study provided unequivocal psychophysical evidence for facial color effect on the perception of facial expression.

This study marks an essential first step toward to reveal the mechanisms of facial color processing in the human brain. We identified timing and areas associated with facial color processing in the brain. In addition, we provided neural and psychophysical evidence for facial color effect on the perception of facial expression. In the future, the findings of the study might be of use to smoother person-to-person communication or even person-to-computer communication.

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	本論文の構成	3
第 2 章	顔知覚処理に関する先行研究	5
2.1	はじめに	5
2.2	顔の特異性	5
2.3	顔認識モデル	5
2.4	顔研究に利用される主な脳活動計測手法	7
2.4.1	脳波	9
2.4.2	機能的核磁気共鳴画像法	12
2.5	顔表情処理	12
2.6	顔色に関する先行知見	14
2.6.1	顔色の変化	14
2.6.2	顔知覚に与える顔色の影響	14
2.6.3	N170 に見られる顔色の効果	16
2.7	本章の総括	17
第 3 章	顔色の重要 -記憶色/反対色 P3 非対称性による検討-	19
3.1	はじめに	19
3.2	記憶色と P3 非対称性	19
3.3	実験方法	21
3.3.1	被験者	21
3.3.2	記憶色測定実験	21
3.3.3	脳波計測実験	22
3.4	結果	25
3.4.1	記憶色測定実験	25

3.4.2	脳波計測実験 . . . . .	25
3.5	考察 . . . . .	30
3.6	本章の総括 . . . . .	31
第 4 章	顔選択的脳波成分 N170 に見られる顔色の効果	33
4.1	はじめに . . . . .	33
4.2	実験方法 . . . . .	33
4.2.1	被験者 . . . . .	33
4.2.2	実験刺激 . . . . .	34
4.2.3	脳波計測実験 . . . . .	34
4.2.4	不自然さ評価実験 . . . . .	35
4.2.5	統計解析 . . . . .	37
4.3	結果 . . . . .	37
4.3.1	脳波実験 . . . . .	37
4.3.2	顔色による N170 振幅変調のモデル化 . . . . .	41
4.3.3	不自然さ評価実験 . . . . .	42
4.3.4	不自然さと脳波成分の関係 . . . . .	42
4.3.5	不自然度のシミュレーション . . . . .	43
4.4	考察 . . . . .	44
4.5	本章の総括 . . . . .	46
第 5 章	顔色処理に関わる脳部位の fMRI による特定	47
5.1	はじめに . . . . .	47
5.2	実験方法 . . . . .	48
5.2.1	被験者 . . . . .	48
5.2.2	実験刺激 . . . . .	48
5.2.3	実験手続き . . . . .	48
5.2.4	fMRI 撮像とデータ解析 . . . . .	49
5.3	結果 . . . . .	51
5.4	考察 . . . . .	52
5.5	本章の総括 . . . . .	54
第 6 章	閾下/閾上の恐怖表情処理に与える顔色の影響	55
6.1	はじめに . . . . .	55
6.2	実験方法 . . . . .	56
6.2.1	被験者 . . . . .	56

6.2.2	実験刺激	56
6.2.3	実験手続き	58
6.2.4	脳波の記録と解析	59
6.3	結果	59
6.3.1	行動データ	59
6.3.2	脳波データ	60
6.4	考察	67
6.5	本章の統括	68
第 7 章	顔知覚処理における表情と顔色の関係	69
7.1	はじめに	69
7.2	実験 1：表情知覚に与える顔色の影響	70
7.2.1	実験方法	70
7.2.2	結果	74
7.3	実験 2：顔色知覚に与える表情の影響	80
7.3.1	実験方法	80
7.3.2	結果	83
7.4	考察	84
7.4.1	表情知覚における顔色の効果	84
7.4.2	顔色知覚における表情の効果	86
7.5	本章の統括	87
第 8 章	総括	89
謝辞		103
研究業績目録		105



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

ある人物について思い浮かべてください。そう言われたとき、誰しものが最初に思い浮かべるのは、その人物の「顔」であろう。顔は各個人を表す最大の特徴であり、一人ひとりに与えられたシンボルとも言える。もちろん、体格や声、話し方、歩き方、服装など、個人を特徴付ける要素は、顔以外にも様々あるが、顔ほど質・量ともに情報に富んだものはない。なぜならば、我々は個人の特定のみならず、性別や年齢、魅力、健康状態や感情までも顔から読み取ることができるからである。「顔が物言う」ということわざが示すように、ときには本人が意図しないような内面的な情報までも、顔から読み取とることが可能である。このように、「顔」は我々人間が他者とともに社会生活をおくるうえで、極めて重要な視覚刺激であり、故に顔に対する卓越した認識能力が存在するのである。

では、こうしたヒトの顔認識能力はどのようにして獲得されたのだろうか。ヒトの顔認識能力には生得性があると言われている。つまり、生まれたばかりの乳児でも顔に興味を示すというのだ。これは、生後 46 時間～5, 6 ヶ月の乳児を対象に、様々な図形パターンに対する注視時間を計測した実験により証明されたものであり、乳児は顔模式図をよく見ると報告されている [1, 2, 3, 4]。生後 7 ヶ月ごろには、表情を知覚する仕組みがおおまかに完成し、生後 8 ヶ月ごろには、男女の違いを区別できるようになる [5]。ここで興味深いのが、父親と母親のどちらに多く接したかによって、男女の識別能力の獲得時期に違いが生じるという点である。母親と多く接した乳児は、生後 6 ヶ月ごろに女性を識別できるようになり、生後 8 ヶ月で男性を識別できるようになる。父親と多く接した乳児は男性を先に識別できるようになる [6]。このように、生得的に獲得されたヒトの顔認識能力は、生まれた後の社会環境に適応して発達していくのである。

顔に関する研究は多岐にわたる。先に述べた乳児の顔認識能力については、発達心理学によって証明されたものである。認知心理学では、顔を認識するために顔からどの情報を

抽出し、その情報を如何に使用しているかというように、情報処理問題として顔処理が研究されている。社会心理学の分野では、人同士の交流に与える性別や人種、魅力などの顔の特徴の影響が調査されている。神経科学、神経心理学では、主に顔処理に携わる脳構造と過程を突き止めようと研究を重ねている。情報工学の分野では、高い顔処理能力を持つヒトの視覚系の機能を実現するコンピュータシステム構築への取り組みが盛んに行われている [7]。

取り分け、神経科学的な顔研究は、機能的 MRI (fMRI: functional magnetic resonance imaging), 脳磁図 (MEG: magnetoencephalography), 脳波 (EEG: electroencephalography) などの脳計測技術の目覚ましい発展に伴い、近年の多くの成果を挙げている。時間分解の高い脳波や MEG 研究は、顔に対して敏感に応答する脳波成分 (VPP: vertex positive potential[8], N170[9]) が存在することを示し、顔を見てわずか 170ms 足らずで、脳が顔を検出していることを発見した。fMRI に代表される空間分解能に優れたニューロイメージング研究では、顔認識処理の中核となる脳領域が、後側頭皮質に存在することが示された [10, 11]。それらは主に、紡錘状回中央に位置する紡錘状回顔領域 (FFA: fusiform face area) [12], 下後頭回に位置する後頭顔領域 (OFA: occipital face area) [13], 上側頭溝 (STS: superior temporal sulcus) [14, 15] の 3 つの領域である。FFA は人物の同定に必要な顔の静的情報を処理し、STS は視線や表情、口の動きなどの動的な情報を処理する。OFA は顔特徴の早期知覚処理に関係し、FFA と STS に入力情報を与えると考えられている。このように、ヒト脳内で行われる顔認識処理メカニズムは着々と解明されつつある。

顔は目、鼻、口などの顔を構成するパーツや、それらの形状や布置情報、肌の色や質感などの様々な構成要素から成る。なかでも、顔色は健康状態や感情などに応じて変化し、その人物の心身の状態を表すシグナルである。顔色が赤いと発熱や高血圧などの可能性があり、黄色い場合は肝臓や胆のうの機能の低下、青白い場合は貧血、黒っぽい場合は肝硬変の可能性があり、顔色はヒトの健康状態を表すバロメータであるといえる。また、感情状態の変化に伴い、心拍、血圧などが変化し、それに伴い顔色も変化する。怒り [16, 17, 18, 19] や喜び [17] の感情状態では、顔の赤みが増す (紅潮する)。発作的な激しい怒り [20] や恐怖と怒りが入り混じった場合 [21] には顔面蒼白が生じる。顔の紅潮は、交感神経系の興奮による血管の拡張により生じ [22, 23], 顔面蒼白は交感神経の興奮による血管の収縮により生じる。ある程度、演じることが可能な表情とは異なり、顔色は自分自身の意思でコントロールすることが困難である。したがって、顔色はその人物の状態を偽りなく示す顔の貴重な情報であると言える。ヒトを含む霊長類の色覚は、感情状態や社会性的シグナル、危険信号を識別することを目的として、「肌の色」の変化を識別するために最適に選択されている可能性がある [24] とも言われている。Tan ら [25] は、パッチ上では見分けられない色の差を、顔上では識別可能であることから、ヒトは顔の色変化を非常に敏感に知覚できると報告している。さらに、数々の行動



研究が、顔色が顔の年齢や性別、健康状態、魅力などの知覚に関係すると報告している [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32]. したがって、顔色は社会的なコミュニケーションを手助けする重要な顔情報であるといえる.

このように、顔色が様々な顔情報の顔知覚に影響を及ぼすことが多く研究によって報告されている. しかし、これらの報告は心理学的実験手法の範囲にとどまり、脳活動計測による神経科学的なアプローチはほとんど行われていない. したがって、顔色に関する脳内処理メカニズムの解明はいまだ手付かずの状態にある. 本研究は、この未開拓な顔色に関する脳内処理メカニズムに対し、解明を試みたものであり、顔を介したヒト同士のコミュニケーションの理解をさらに深めるものとなるであろう.

## 1.2 本論文の構成

図 1.1 に示すように、本論文は全 8 章で構成される. 第 2 章では、ヒトの顔認知に関するこれまでの知見と、顔認知研究で用いられる主な脳計測手法について、そして顔色に関する知見について述べる. 第 3 章では、物体の記憶色に焦点を当てた脳波実験から顔色の重要性について検討する. 第 4, 5 章では、脳波と fMRI の 2 つの脳活動計測手法を用いて、顔知覚処理における顔色の扱いについて検討する. 第 6, 7 章では、脳波実験と心理物理実験により、表情知覚に与える顔色の影響について検討する. 最後に、第 8 章において本論文を総括する.



図 1.1 本論文の構成

## 第 2 章

# 顔知覚処理に関する先行研究

### 2.1 はじめに

本章では，これまでに行われてきた数々の顔研究の成果をもとに構築された顔認知モデルおよび顔研究で利用される脳活動計測手法について述べる．また，顔研究のなかでも盛んに研究されている顔表情処理について述べ，本研究の主題である顔色に関する先行研究を示すとともに，問題点を指摘する．

### 2.2 顔の特異性

一生を通してみれば，ほとんどのヒトは，他の何よりも顔を見ている時間が長く，社会生活を送る上で顔が重要であることは言うまでもない．我々は顔を見ることで，即座にそれが誰であることを認識し，顔からその人物の性別や，およそその年齢を推測することや，表情を読むことで感情や心の状態を認識する事も可能である．このように，ヒトは顔から非常に多くの情報を瞬時に読み取る事ができるという卓越した顔認識能力を持っている [33]．生まれたばかりの乳児でさえ，顔を注視することが実験的に示されており [1, 2, 3, 4, 34]，顔認識能力の生得性も示唆されている．このような社会的刺激としての重要性から，顔を対象とした認知研究の数は，他の多くの視覚的刺激についての研究の数を圧倒し，またその認知の特異性を示す知見も報告されている．

### 2.3 顔認識モデル

1986 年に Bruce & Young によって，顔から得られる多様な情報の処理過程の機能的モデルが提案された [33] (図 2.1)．このモデルは，顔認識に関する古い機能的モデルであり，その詳細の妥当性についての議論は続いているものの，いまなお，顔認知の基本的な

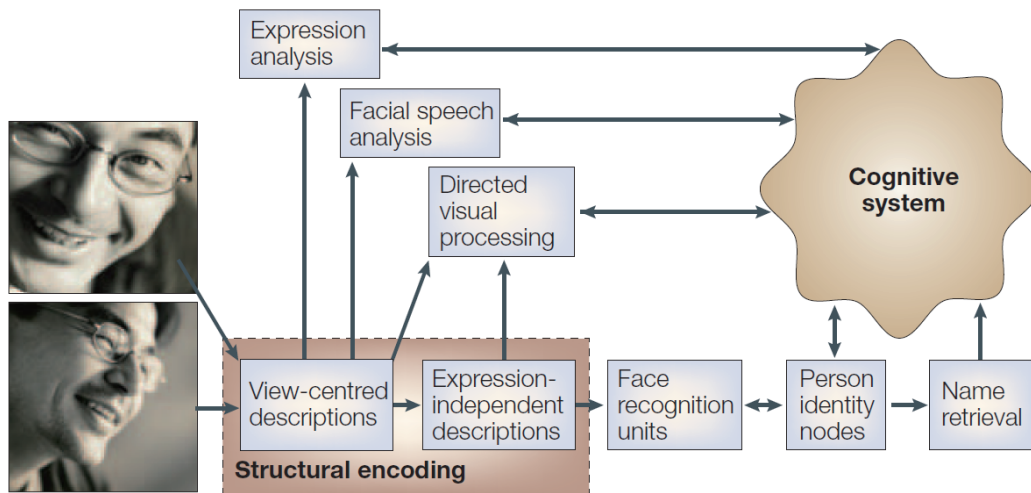


図 2.1 Bruce & Young (1986) の顔認識モデル [33] (Calder & Young (2005) [35] から引用)

プロセスについての説明力の高いモデルとして広く引用されている。

このモデルでは顔を知覚してから最終的に名前を探索し終えるまでは、継続的な処理経路をたどると仮定し、その処理過程を以下の4つに分類している。

1. 顔の形態的な特徴を記述する構造的符号化過程
2. 知っている顔か否かの判断（既知性判断）をする顔認識ユニットの活性化過程
3. 個人の意味情報にアクセスする人物同定ノードの過程
4. 名前の生成過程

顔が知覚されると、まず画像的な分析が行われる。ここで行われる記述は、表情の認識や発話行動の認識などに用いられる情報についての分析の他、個人を同定するために用いられる「表情とは独立の記述」も行われる。顔は時間や状況とともに表情や顔向きが変化しても、その人であると認識できることが重要であり、構造的符号化仮定を経て形成される「表情とは独立の記述」が、この認知行動を支えていると考えられている。次の顔認識ユニットの活性化過程では、知覚した情報と顔の記憶表象の照合が行われる。前の構造的符号化過程で形成された記述は顔認識ユニットに貯蔵されると仮定されており、ここで貯蔵された情報と知覚した情報の類似度を判断することによって、知っている顔か否かの判断（既知性判断）が行われる。続いて、人物同定ノードの過程では、職業や住んでいる場所、その人との間柄などの個人を特定する情報を貯蔵している「個人情報ノード」にアクセスされる。そして、名前の生成過程で最終的にそれが誰であるかを判断することができる。

さらに、Haxby ら [10] は Bruce & Young[33] のモデルを、神経科学的に検証したモデルを提案している。彼らは、顔の認知システムを後頭側頭領域に存在し視覚的分析を行うコアシステムと、注意、感情、人物同定などのより高次の認知過程を担う拡張システムとに分けてモデル化している。

コアシステムは2つの処理システムから成る。1つは顔の輪郭や目鼻立ちなど、人物の同定に必要な顔の「静的な情報」を捉えるシステムであり、もう1つが、表情、視線、口の動きなどの、常に変化している不安定な顔の「動的な情報」を捉えるシステムである。後者の処理システムでは、顔の可動的な情報により活性化するものとして、刺激が静止画であっても起動される。

両システムを担う脳領域は、次のようなものである（図 2.2, 2.3）。初めに、下後頭回（inferior occipital gyri）などにおいて、顔の輪郭やエッジが符号化され、その個々の情報が統合されつつ「静的な情報」については両側の紡錘状回（lateral fusiform gyrus）へ、「動的な情報」については上側頭溝（superior temporal sulcus）へ入力され処理される。これらの領域の機能は、Bruce & Young[33] の顔認識モデルにおける構造的符号化過程の処理に相当し、同機能により顔や表情の形態的な特徴が符号化され、以降の拡張システム（extended system）での処理が可能となるように適切な表象が生成される。

このように、従来からの顔認識モデルに加え、近年発達した脳計測技術により得られた神経科学的な証拠により、顔の認識処理のメカニズムは徐々に明らかされつつある。

## 2.4 顔研究に利用される主な脳活動計測手法

前節で述べた Haxby の神経科学的な顔認識モデルは、さまざまな脳活動計測実験の結果を反映させたものである。脳活動計測には、外科手術を必要とする侵襲的な方法と、ヒトを傷つけることなく計測が可能な非侵襲的な方法がある。侵襲的な計測方法は、ヒト以外の動物実験に主に使用され、ヒトでは脳損傷やてんかんなど外科的治療を必要とする患者で使用される。健常者を対象とする場合には、非侵襲的な計測手法を用いる。代表的な非侵襲的な計測手法を表 2.4 に示す。脳活動計測手法の特性として主に比較されるのが、時間分解能と空間分解能である。時間分解能の高い計測手法として挙げられるのが脳波や MEG（脳磁図: Magnetoencephalography）で、ミリ秒単位での計測が可能である。空間分解能に優れた計測手法の代表格は fMRI（機能的核磁気共鳴画像法: functional magnetic resonance imaging）で、1~2mm の分解能を持つ。表 2.4 に示すように、時間分解能と空間分解能の両立は難しく、顔処理過程を時空間的に明らかにするためには様々な手法を用いた多角的なアプローチが必要となる。以下に、時間分解能に優れた脳波と、空間分解能に優れた fMRI について詳しく記述する。

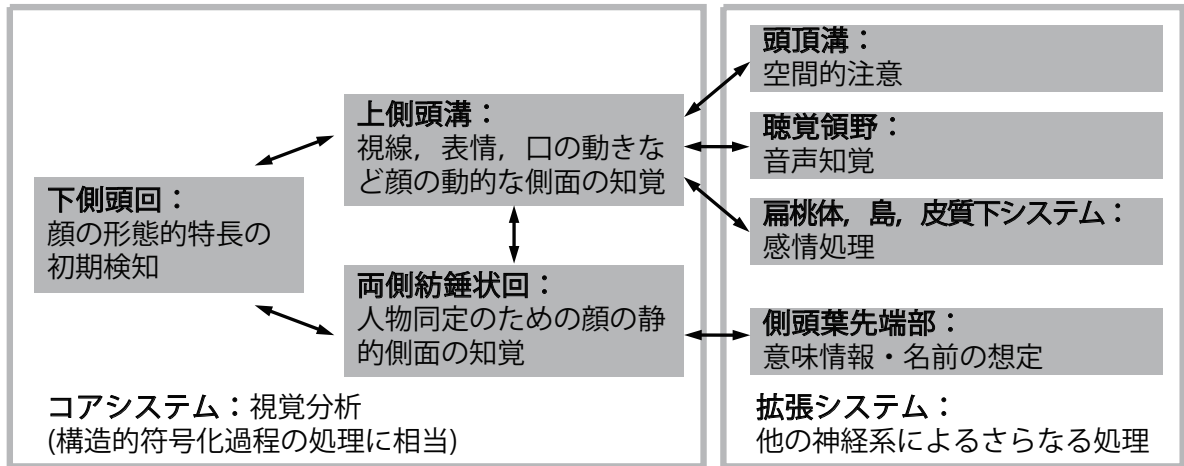


図 2.2 Haxby らの顔認識モデル [10] (Calder & Young (2005) [35] の図を日本語へ改変)

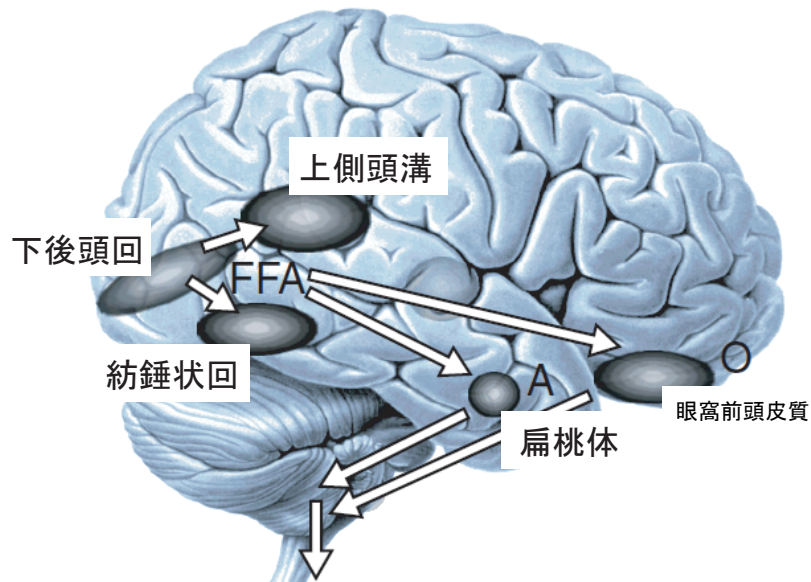


図 2.3 顔認知に関わる脳領域 (Adolphs, 2002[36] の図を改変)

### 2.4.1 脳波

脳波（EEG: Electroencephalogram）は脳から生じる電気活動を頭皮上に設置した電極で記録したものである。脳波はきわめて不規則な波であるが、ある特定の事象に対しては、ニューロンの集団活動を反映して特有の波形を示すことがある。この事象を何度も繰り返し、その時点で脳波を加算平均すると、不規則な波の中に埋もれていた意味のある信号を取り出すことができる。このようにして検出された脳波を、事象関連電位（ERP: event-related potential）と呼び、1951年に Dawson によってこの解析方法が提案された。

顔処理を反映する代表的な ERP 成分が存在する。それは、Jeffreys[8] や Botzel & Grusser[9] によって報告された正中線上中心部・頭頂部で生じる陽性成分（VPP: vertex positive potential）と、Bentin ら [37] によって報告された左右後側頭部で生じる陰性成分（N170）である。これらの成分は、観測される部位や極性は異なるものの、どちらも刺激呈示後約 170ms という早い時間帯で生じ、物や風景などの顔以外の刺激を呈示した場合に比べ、顔刺激を呈示した場合に振幅は増大し [37]、潜時は短くなる [38, 39]（図 2.4）。これらの成分には、顔の倒立効果が現れることが広く知られている。顔を倒立呈示した場合、正立呈示した場合に比べて、振幅が増大し、潜時が遅くなる [37, 40, 41, 42, 43]。顔以外の物体に対しては、これらの成分に倒立効果が生じないことが報告されている [41, 44]。また、目、鼻、口などの顔のパーツが欠如した顔や輪郭が欠如した顔、パーツの配置をスクランブル化した顔に対して、潜時が遅くなる [45, 8, 46]（振幅は減衰/増大の両方の報告がある）。これらの研究報告から、N170・VPP は顔の構造情報や布置情報の変化を反映するとされている。しかし、これらの成分は、顔の既知/未知 [47, 48, 49]、性別 [50, 51]、人種 [52] などには影響されないことから、顔認識・顔同定には関与しないと考えられている。これらの理由から、N170・VPP は Bruce & Young の顔認識モデルにおける最初の処理過程である構造的符号化過程（顔の視覚的特長と顔表象構造を抽出が行われる）に関係するという考えが主流となっている [37, 48]。

N170 の発生源は、fMRI 研究 [12, 53] において顔刺激に対して活発に活動することが示されている紡錘状回 [54, 55] や後頭葉下部外側 [54]、上側頭溝近傍 [56] であると報告されている。これらの部位は Haxby らのモデル [10] のコアシステムに相当する部位でもあり、そのモデルが示す役割とも一致している。

VPP, N170 以外にも、顔処理に関係する ERP 成分が存在することが報告されている。顔刺激呈示後約 100ms に後頭領域で生じる陽性電位 P100（P1）は、輝度やコントラストなど視覚処理の低次特徴顔を反映し、顔全体としての処理に関わる [39]。250 330ms に側頭・後頭で生じる陰性電位 N250 は、個人認識処理を反映し、300 600ms に中央頭頂にて生じる N400 は、顔に関する意味的情報の処理を反映すると言われている [7, 57]。

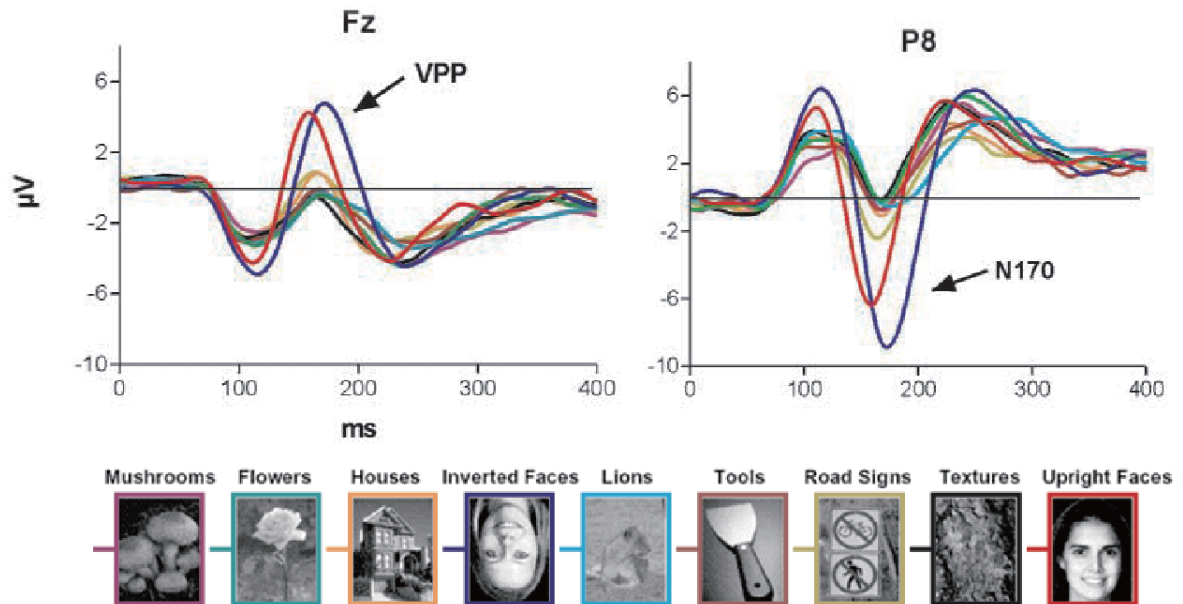
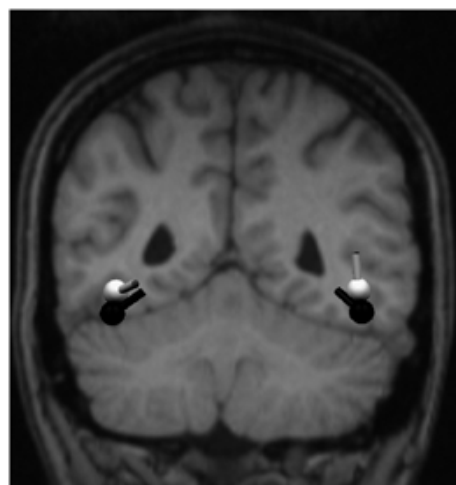


図 2.4 顔に敏感な ERP 成分, N170 と VPP[39]

顔を呈示したときに、前頭（Fz）では VPP が、右後側頭（P8）で N170 が、顔を呈示した場合（正立顔/倒立顔）に、他の刺激を呈示した場合に比べて大きな振幅となっている。また、倒立顔では、正立顔よりも振幅が大きく潜時が遅れている。



y = -67 mm

**N170 (black): Lateral fusiform gyri**

**Talairach coordinates:**

x =  $\pm 39.8$ , y = -66.1, z = -5.0

**M170 (white): Lateral fusiform gyri**

**Talairach coordinates:**

x =  $\pm 38.7$ , y = -58.7, z = 0.1

図 2.5 N170 と M170 の発生源 [55]

Deffke らによる N170・M170（MEG 研究において顔選択的とされる N170 と同等の成分）のダイポール推定結果。黒い球が N170 白い球が M170 の推定位置。N170・M170 どちらも紡錘状回に位置している。球に付いている線はダイポールの電流フローの方向を示す。



表 2.1 非侵襲的脳波計測手法の比較

計測手法	測定の概要	時間分解能	空間分解能
脳波 (EEG)	脳から生じる電気活動を頭皮上で計測	◎ (ミリ秒)	× (数以上)
脳磁図 (MEG)	脳内の電氣的活動に伴って発生する磁場を記録	◎ (ミリ秒)	△ (mm～cm)
PET	体内に投与した放射性物質の陽電子を検出し、血流量・血液量を測定	×	○ (数 mm 以上)
fMRI	水素原子からの電磁波を検出し、血流量・血液量を測定	△ (秒)	◎ (mm)
NIRS	近赤外線照射・検出し、血流量を測定	○ (数十ミリ秒)	△ (mm～cm)

### 2.4.2 機能的核磁気共鳴画像法

機能的核磁気共鳴画像法（fMRI: functional magnetic resonance imaging）は、脳の血流量の変化を計測する手法であり、脳機能を可視化するニューロイメージング手法のひとつである。fMRI は、BOLD（Blood oxygenation level dependent）効果と呼ばれる現象を利用して、脳が活動した部位を検出する。ニューロンが活動すると酸素消費量が増加し、酸素化ヘモグロビンが酸素を解離した脱酸素化ヘモグロビンに変化する。つまり、ニューロン周辺の酸素濃度が一時的に低下し、その直後に脳血流量が急激に増大する。この血流量の増加により、ニューロン周辺の酸素化ヘモグロビン濃度が急激に増大する。酸素化ヘモグロビンは反磁性であるが、脱酸素化ヘモグロビンは常磁性であるため、MRI 信号の減少（脱酸素化ヘモグロビンの増加時）、増加（酸素化ヘモグロビンの増加時）が生じる [58]。同じニューロイメージング手法である PET（Positron Emission Tomography: 陽電子断層装置）は放射線被曝のリスクがあるのに対して、fMRI は被曝の危険性はない。さらに、非侵襲的脳活動計測手法の中では、最も空間分解能が高く（1～2mm）、深部を含めた脳全体の活動を計測することが可能である。

空間分解能に優れたニューロイメージングを用いた研究により、顔認識処理の中核となる脳領域が、後側頭皮質に存在することが示されている [10, 11]。それらは主に、紡錘状回中央に位置する紡錘状回顔領域（FFA: fusiform face area）[12]、下後頭回に位置する後頭顔領域（OFA: occipital face area）[13]、上側頭溝（STS: superior temporal sulcus）[14, 15] の3つの領域である。先でも述べたように、Haxby の顔認識モデルでは、これらの領域が顔知覚処理の中核を担い、それぞれが異なる機能を持つとされている [10]。FFA は人物の同定に必要な顔の静的情報を処理し、STS は視線や表情、口の動きなどの動的な情報を処理する。OFA は顔特徴の早期知覚処理に関係し、FFA と STS に入力情報を与えると考えられている。

## 2.5 顔表情処理

表情は、取り巻く環境や特定の対象に関する価値判断、または他者とのコミュニケーションをとるうえで相手の感情判断のソースとなっている。例えば、恐怖表情は差し迫った何らかの脅威を示すシグナルであり、迅速な検出と処理が必要とされる。

表情（感情）の処理と深い関係があるといわれているのが扁桃体（図 2.6）である。扁桃体は側頭領野深部の左右に位置し、前頭前野腹内側部や視床下部、中脳水道灰白質などとの神経連結のもと、知覚された刺激が自己にとって安全なのか、あるいは脅威なのかをすばやく評価する。扁桃体が特に恐怖表情の処理に関与することが、動物実験や脳損傷研

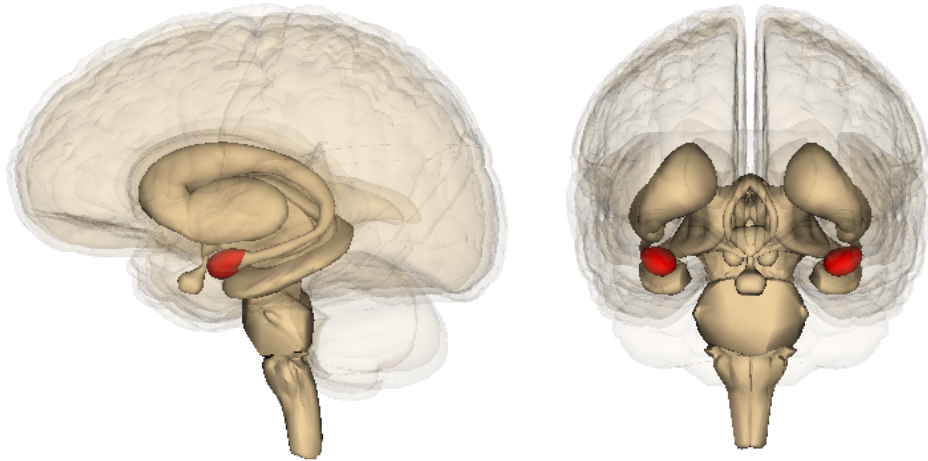


図 2.6 扁桃体 (Life Science Databases (LSDB) の Anatomography のサイトより)

ヒトの脳における扁桃体の位置。赤い部分が扁桃体。左は左側面から見た図。右は正面から見た図。

究 [59, 60], 神経脳画像研究 [61] の結果より明らかにされてきた。さらに, 扁桃体での恐怖表情処理は, 閾下刺激 (意識に上らない刺激) に対しても行われることが示されている [62]。このことから, 閾上と閾下では異なる処理ルートにより扁桃体へ入力情報が伝播され则认为られている。意識的な知覚を伴う (閾上) 場合は, 後頭葉の視覚野を経る通常の視覚処理経路を通して, 網膜に入力された刺激が扁桃体に入力され, 無意識的な知覚 (閾下) の場合は, 上丘・視床を経て, 視覚野を介さず直接扁桃体に入力されとされている。

最近の脳波研究においても, 恐怖表情処理が閾下刺激に対しても行われることが示されている。Liddell らは, 恐怖表情と普通表情の顔刺激を閾上と閾下で呈示したときの事象関連電位を調査した [63]。彼らの実験において, 閾下条件では普通表情と比べて恐怖表情に対して, 自動的な顔の外観処理を反映するとされる前頭中央での N2 成分が増大した。一方, 閾上条件では, 恐怖表情に対して, 感情処理の統合が行われるといわれている P3 成分が増大した。この結果から, 恐怖知覚の時間的経過は, 自動的で無意識な早期の処理段階と, より制御された意識的な後期の処理段階に分かれることが示唆されている。また, Kiss らは [64] (図 2.7), 閾下呈示された恐怖表情の効果は, 前頭での 140~180ms のより早い段階で生じることを報告している。P3 成分に関しては, 閾上条件でのみ普通表情に比べ, 恐怖表情で振幅が増大するという Liddell らの結果と一致する結果を示している。これらの研究では, N170 成分の変調が見られる後頭電極では表情の効果はないと報告している。しかし, Pegna ら [65] は, 閾下呈示された普通表情に比べ, 恐怖表情に対し

て後側頭部での N170 振幅が増加したと報告している。この N170 に見られる恐怖表情の効果は、閾上呈示の場合にも見られた。N2 成分に関しては、閾上呈示の場合にのみ、前頭と後頭で恐怖表情の効果が生じた。P3 成分 (LPC) に関しては、閾上呈示の場合にのみ、恐怖表情に対して振幅が増大するという Liddell ら Kiss らと一致する結果を示している。

これらの研究は、閾上呈示された恐怖表情に関しては、後期成分である P3 振幅が増大するという一致した結果を示している。一方、閾下呈示された恐怖表情に関しては、必ずしも同じ成分ではないにせよ、どの研究においても閾下呈示の場合には、早期の ERP 成分 (140~180ms の成分, N170, N2) に恐怖表情の効果が生じることを報告している。

## 2.6 顔色に関する先行知見

### 2.6.1 顔色の変化

顔色は、健康状態と関係する血液酸素化状態に影響される。血液酸素化の増加は運動の増加と関係し [66]、血液酸素化の減少は低酸素症と関係し、心臓発作と呼吸器疾患を暗示するチアノーゼ（青紫色の肌色）の原因となる [67]。その他にも、顔色が赤いと発熱や高血圧などの可能性があり、黄色い場合は肝臓や胆のうの機能の低下、青白い場合は貧血、黒っぽい場合は肝硬変の可能性があるとされており、顔色はヒトの健康状態を表すバロメータであるといえる。

顔色は感情状態によっても変化する。感情状態の変化に伴い、心拍、血圧などの生理的応答が変化し、それに伴い顔色も変化する。怒りの感情状態では、多く場合で顔の赤みが増す（紅潮する）[16, 17, 18, 19]。しかし、発作的な激しい怒り [20] や恐怖と怒りが入り混じった場合 [21] など、場合によっては顔面蒼白が生じることある。顔の紅潮は、交感神経系の興奮による血管の拡張により生じ [22, 23]、顔面蒼白は交感神経の興奮による血管の収縮により生じる。黒田らは、喜びの情動下でも顔の赤みが増すと報告している [17]。このように、顔色はヒトの感情状態を反映して変化する。

### 2.6.2 顔知覚に与える顔色の影響

顔色はヒトの健康状態や感情を読み取る際に、重要な手がかりとなる。ヒトを含む霊長類の色覚が、感情状態や社会性的シグナル、危険信号を識別することを目的として、「肌の色」の変化を識別するために最適に選択されている可能性がある [24] とも言われている。Tan ら [25] は、パッチ上では見分けられない色の差を、顔上であれば識別可能であることから、ヒトは顔の色変化を非常に敏感に知覚できると報告している。さらに、数々の行動研究が、顔色が顔の年齢や性別、健康状態、魅力などの知覚に関係すると報告している [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32]。顔の形状に関する特徴とは無関係に、顔の色分

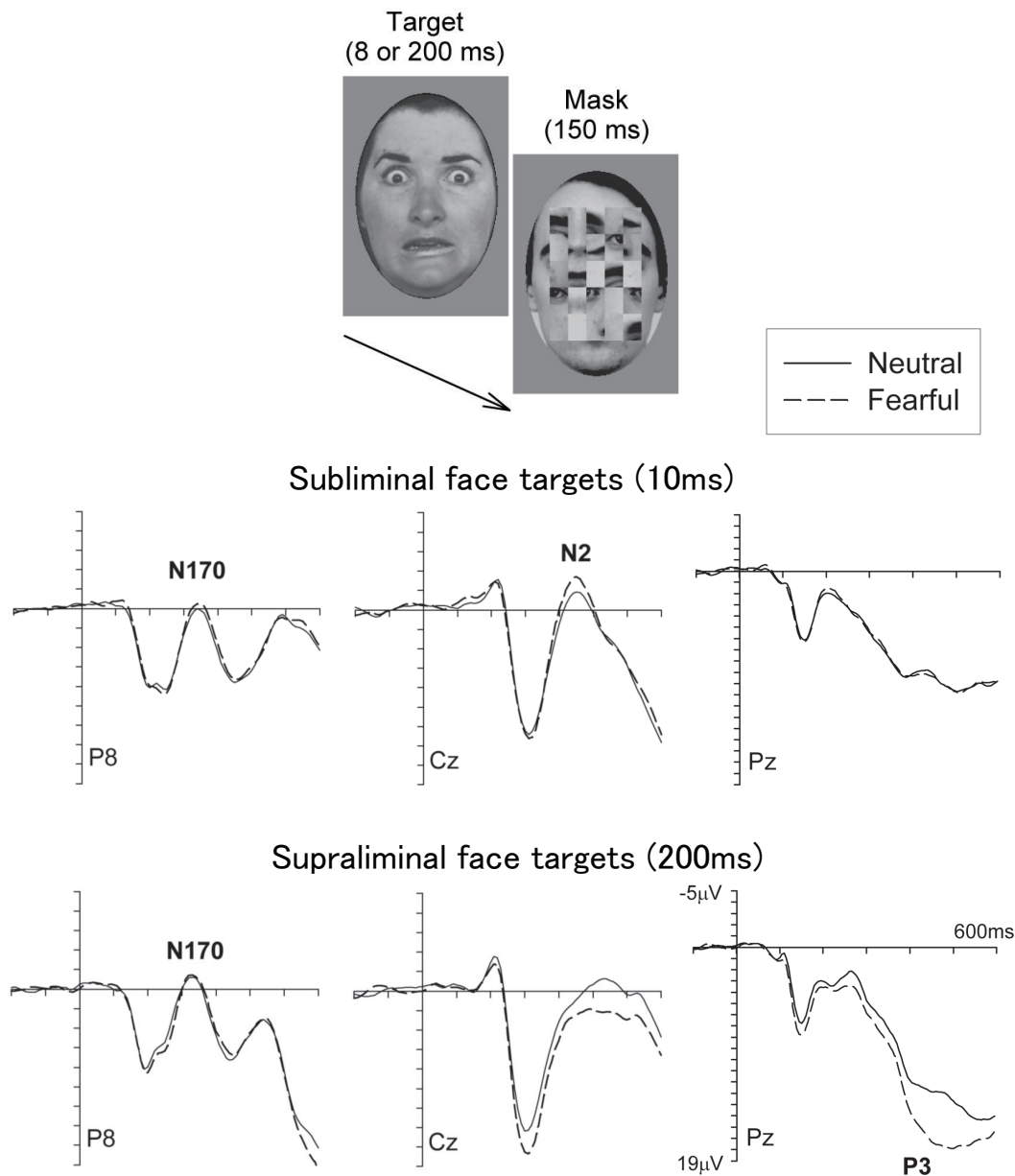


図 2.7 閾上/閾下知覚の恐怖表情に対する ERP[64]

恐怖表情と普通表情を閾下（呈示時間 10ms）/閾上（呈示時間 200ms）で呈示した場合の後側頭（P8）、頭頂（Cz）、頭頂後頭（Pz）での ERP 波形。閾下/閾上どちらの場合も、N170 に表情の違いは反映されない。閾下の場合のみ、恐怖表情に対して N2 振幅の増加が見られた。閾上の場合のみに、恐怖表情に対して P3 振幅の増加が見られた。

布は、女性の顔の年齢や魅力、健康状態の知覚に影響する [28]。Stephen ら [31] は、健康状態がよく見えるように、被験者に顔画像の顔色を調整させる実験を行った。その結果、健康状態をよくするために顔色の赤みが増えるよう色が調節され、顔色が健康状態の伝達に関係することを示した。また、男性の顔の赤さを増加させると、女性はその男性の支配力や攻撃性、魅力を増して知覚することから、顔の赤さが男性的特徴と同様の情報を伝え

るものとして知覚されることが示唆された [68]。このように、顔色は社会的なコミュニケーションを手助けする重要な顔情報である。

感情状態により顔色が変化することや、日常的に「真っ赤になって怒る」、「恐怖で顔が青ざめる」という表現を使うことから、表情の知覚にも顔色が影響すると推測される。Drummond[21] は、顔色と感情に関するアンケート調査を行い、紅潮は怒り、蒼白は恐怖と関連付けられたと報告しており、顔色と感情との間に経験則的な関係性があることを示している。鈴木らの研究 [69] は、喜びの表情の場合、顔の赤みを増加させると喜び評定値が増加し、悲しみの表情の場合、顔の青みを増加させると悲しみ評定値が増加すると報告しており、知覚的にも顔色が表情に影響を与えることを示唆している。しかし、鈴木らの評価実験は非常に複雑であり、脳活動計測実験への応用は困難である。

このように、顔色が様々な顔情報の顔知覚に影響を及ぼすことが行動実験、心理物理実験により数多く示されている。しかし、脳活動計測によるアプローチはほとんど行われておらず、顔色が顔知覚に影響を与える脳内処理メカニズムはいまだわかっていない。

### 2.6.3 N170に見られる顔色の効果

N170に関する研究は、顔の構造（形状や布置情報など）に着目したものがほとんどであった。しかし、最近の Balas ら [70] や Minami ら [71] の研究によって、顔に対して敏感に応答するとされている ERP 成分 N170 が、肌の色・顔色によって変調されることが報告されている。

Balas らは、他人種効果（自分の属する人種の顔は弁別できるが、他の人種の顔の弁別が困難であること）における顔の形状と色の役割を調査した [70]。彼らの研究では、白人と黒人の顔の形状と肌色を組み合わせた4種類の画像を用い（図 2.8）、白人の被験者を対象に行われた。被験者と同じ人種（白人）と異なる人種（黒人）の顔画像を呈示した場合、異なる人種の顔画像に対して N170 振幅が増大すること示した。また、この顔の色による N170 振幅の変調は顔の形状とは独立して生じることが示されている（図 2.8）。

Minami ら [71] の研究では、自然な顔色（肌色）画像と不自然な顔色（青色）画像を呈示した場合、不自然な顔色画像に対して N170 振幅が増大することを示した（図 2.9）。彼らの研究では、自然な肌色の顔画像と実際にはありえない青色の不自然な顔画像、そしてコントロール刺激として自然/不自然の顔色画像の位相をランダム化した画像（色情報は保ったまま顔の形状をなくした刺激）が使用された。その結果、自然色顔画像、青色顔画像とそれらのランダム位相画像を呈示した時、顔画像で明らかに大きい N170 が見られた。顔色画像間では青色画像が自然色画像よりも有意に大きい N170 振幅が見られた。一方、位相ランダム画像間では有意差は見られなかった。このことから、色の違いだけでは N170 振幅に差は生じず、顔と色の関係性（不自然さ）を反映して N170 振幅が変調する

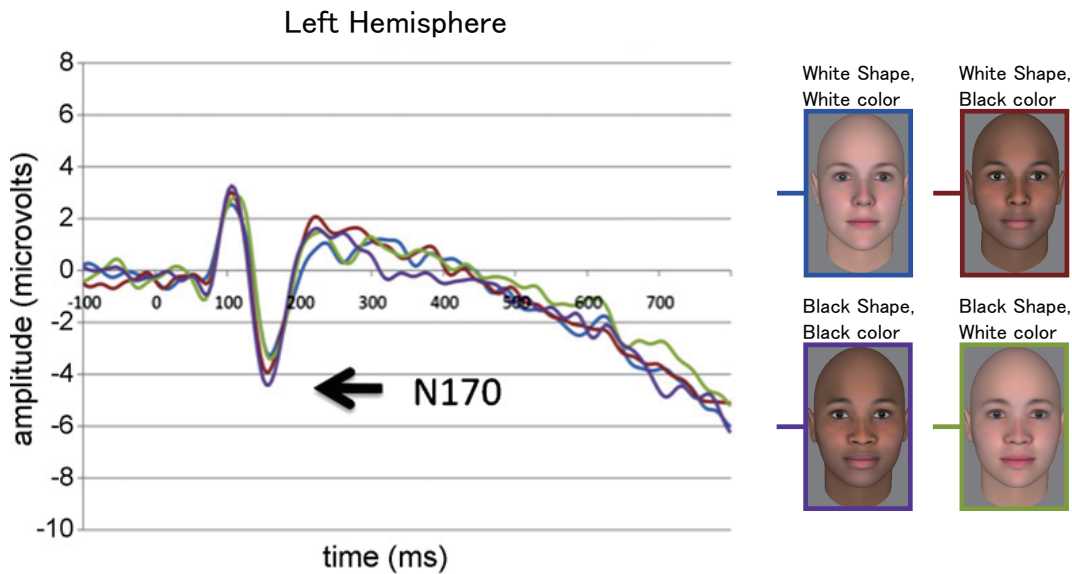


図 2.8 N170 に現れる顔色の違い [70]

被験者と同じ人種（白人）と異なる人種（黒人）の顔画像を呈示した場合，異なる人種の顔画像に対して顔の形状とは独立に N170 振幅が増大する．

ことが示された．

Balas らと Minami らの実験で使用された顔色刺激は，見慣れた顔色（被験者と同じ人種の顔色，自然な顔色）と見慣れない顔色（異なる人種の顔色，不自然な顔色）と表現することができ，両者の結果から，見慣れない顔色に対し，N170 振幅が増大すると捉えることができる．彼らの実験で見られた顔色による N170 の変調は，単に見慣れた顔色/見慣れない顔色というカテゴリーカルな顔色の分類を反映したものなのか，それとも顔色の違いを敏感に反映したものなのかは定かではない．

## 2.7 本章の総括

本章では，これまでに行われてきた数々の顔研究の成果をもとに構築された顔認知モデルについて述べ，顔研究で利用される脳活動計測手法について説明した．さらに，ヒト脳内で行われる顔処理メカニズムが盛んに研究されている一方で，顔色に関しては脳活動計測による神経科学的アプローチは少なく，その処理メカニズムは未知であるという現状を論じた．



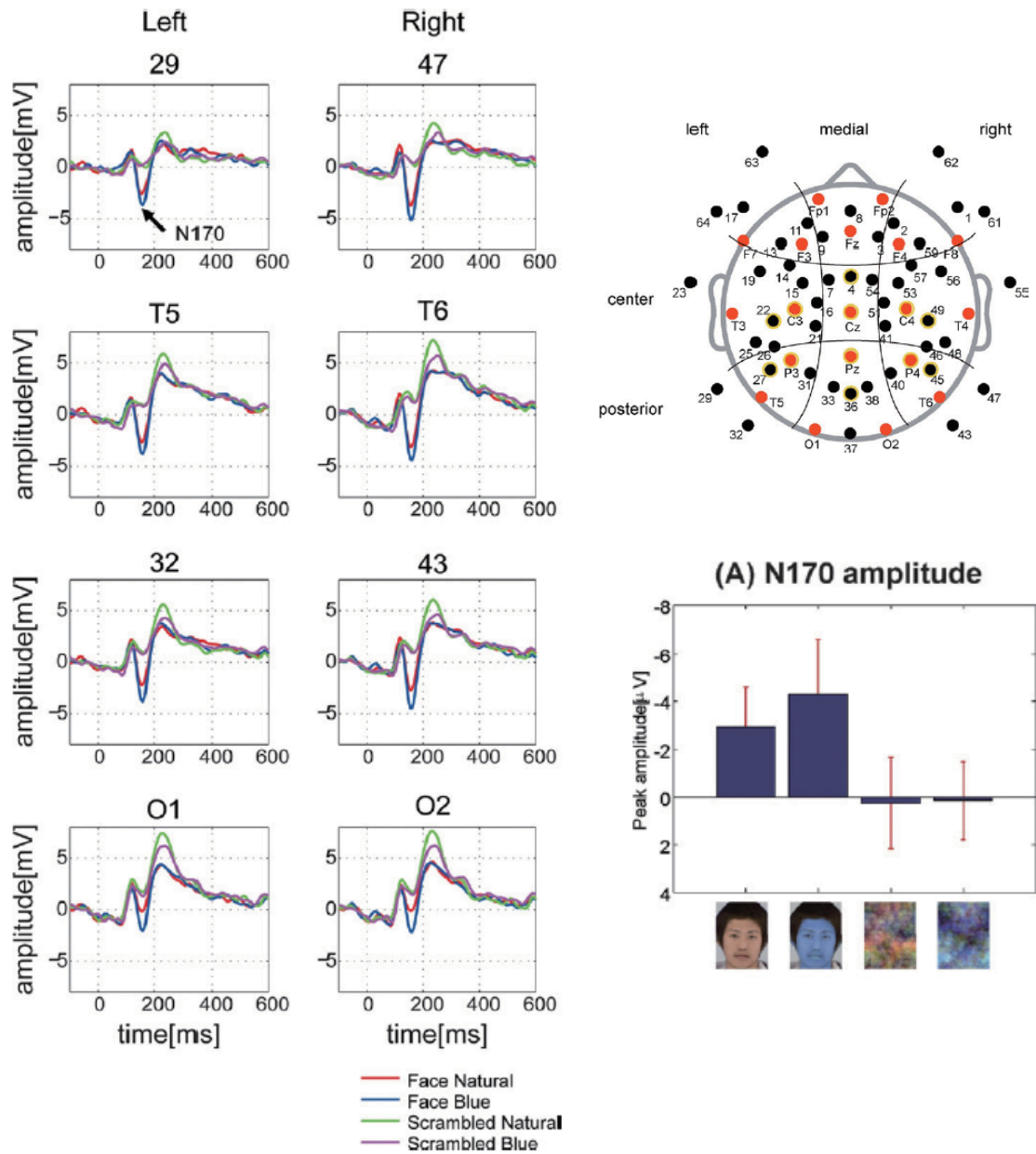


図 2.9 N170 に現れる顔色の不自然さ [71]

顔画像の場合は自然色画像に比べ、青色顔画像で大きな N170 振幅が生じるが、ランダム位相化した画像の場合、両者の N170 振幅に差が見られない。



## 第 3 章

# 顔色の重要性

## -記憶色/反対色 P3 非対称性による検討-

### 3.1 はじめに

本章では，物体の記憶色の強さと P3 非対称性の関係から，顔における色情報の重要性を検討した．まず，顔を含む 4 種類の物体に対する記憶色をそれぞれ測定し（例えば，顔画像の色を顔に最適な色に調整させる），各物体に対して，記憶色画像と反対色画像を作成した．作成した各物体に対する記憶色/反対色画像を用いたオドボール課題中の脳波を計測し，記憶色/反対色に対する P3 非対称性を物体間で比較した．

### 3.2 記憶色と P3 非対称性

りんごは赤，バナナは黄色というように，我々人間は具体的事物と結び付けて色を記憶している．この色のことを記憶色（Memory Color）という [72]．記憶色は，視覚情報の知覚や認知に大きく影響を及ぼす [73, 74, 75, 76, 77, 78, 79]．例えば，日本人の肌の色の記憶色は実際よりも白く，テレビでは記憶色に合わせて実際よりも白く再現されている．また，日本のある地域では，記憶色の影響といえる理由から，トイレのマークの色が変更されている．日本では男性は青色，女性は赤色というイメージが強く，トイレのマークも，色で男女を区別して表されることが多い．しかし，この地域では男女でトイレのマークの色が違うのは男女差別になるという理由から，男女同じ色のマークを採用したところ，男性用と女性用を間違えるとの苦情が多く寄せられ，もとの色使いに戻すことになったのだ [80]．

記憶色が物体の色の見えに影響を及ぼすことは，実験的にも実証されている．Hansen ら [76, 79] は被験者にディスプレイ上に呈示された果物画像の色を無彩色に調整させた．すると，調整された色は，実際の無彩色点から典型色（記憶している物体本来の色）の反

対色側にずれていた。つまり、実際には無彩色であるはずの色が、記憶色の影響で色づいて見え (例えば、無彩色のバナナが黄色がかって見える)、その影響を打ち消すために、無彩色マッチングが反対色側にずれものと考えられる。このように、物体の色の見えは、視覚的な色情報だけでなく、記憶された色情報にも大きく影響を受ける。

いくつかの脳波研究が、物体色と記憶色の一致/不一致が脳活動にも影響を及ぼすことを報告している [81, 82, 83, 84, 85]。不自然さと ERP 成分 P3 の関係を調査した Minami らの研究では、物体の色が記憶色と異なることに対して感じると不自然さが、オドボール課題中の P3 成分に反映される可能性が示されている [85]。オドボール課題とは、2 種類以上の刺激事象を異なる出現頻度で呈示し、被験者に出現頻度の低い刺激事象の出現回数をカウントさせる ERP 測定によく用いられる刺激分類課題である。オドボール課題で使用する出現頻度の高い刺激をスタンダード刺激、低い刺激をターゲット刺激と呼び、オドボール題中のターゲット刺激によって、大きな P3 振幅が誘発されることが知られている。P3 は頭頂電極で刺激呈示後 250~500ms に観測される陽性成分で、注意や認知に関係するといわれている。

Minami ら [85] は、オドボール課題中の P3 非対称性は、日常生活における不自然さと出現頻度を反映するという仮説のもとに、2 つの刺激の役割 (スタンダード/ターゲット) を入れ替えて、オドボール課題を 2 回行った (2 つの刺激を A, B とした場合、1 回目のオドボール課題では、A をスタンダード刺激、B をターゲット刺激とし、2 回目では、B をスタンダード刺激、A をターゲット刺激とする)。その結果、自然な画像と不自然な画像を刺激として使用した場合、自然画像ターゲットに比べ、不自然画像ターゲットに対して、より大きな P3 振幅が生じた。彼らの実験では、不自然さのひとつとして、物体色の記憶色からの逸脱 (例えば、青い顔) も検討されており、顔には大きな P3 非対称性が生じたが、オレンジには生じなかった。

彼らの結果で示された顔とオレンジに対する P3 非対称性の違いは、物体に対する記憶色の強さ (定着性) が顔とオレンジで異なることによって生じたのではないか。つまり、顔はオレンジに比べ、色の記憶が定着している (顔は肌色であると強く記憶されている) ために、記憶色と異なる色に着色された場合に、より強く不自然さを感じ、大きな P3 非対称性が生じたのではないか。

本章では、オドボール課題中の P3 非対称性は記憶色の強さ (記憶における物体と色の結びつきの強さ) が反映されるという仮説を立て、その仮説を検証した。

### 3.3 実験方法

#### 3.3.1 被験者

被験者として 7 名の健康な豊橋技術科学大学の関係者（女性 3 名，平均 22.3 歳）が，実験に参加した．すべての被験者は正常もしくは矯正正常視力を持ち，右利きであった．すべての被験者は，タスクについての十分な説明を受け，参加を同意したうえで実験を行った．この際，著者を除く被験者は，実験の目的については知らされていなかった．なお，本実験は国立大学法人豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする研究」審査会の承認を受け行われた．

#### 3.3.2 記憶色測定実験

##### 実験刺激

マスカット，バナナ，男性の顔，コカ・コーラロゴの 4 種類の画像と均一色ディスク，ランダム（ピンクノイズ）ディスクの 2 種類のコントロール刺激を実験刺激として使用した（図 3.1）．刺激の色は CIE 1976  $u'$   $v'$  色度図上で定義した．CIE 1976  $u'$   $v'$  色度図は，色度図上のすべての点において，知覚された色差が色度図上の距離におおよそ比例するように定められた均等色度図である [86]．マスカット，バナナ，顔画像の平均輝度は  $29\text{cd}/\text{m}^2$ ，コカ・コーラロゴの輝度は  $30.8\text{cd}/\text{m}^2$  とした．また，コントロール刺激として使用する均一色ディスクの輝度は  $30.8\text{cd}/\text{m}^2$ ，ランダムディスクの平均輝度は  $29\text{cd}/\text{m}^2$  とした．コントロールディスクのサイズと 4 刺激の平均サイズは視野角  $2 \times 2^\circ$  とした．

刺激の色の操作は，Olkkonen らの画像の色分布を回転，拡大縮小する方法 [79] を採用し，次のように行った．無彩色点（D65 光源の無彩色点:  $x = 0.3127, y = 0.3290$ ）を中心とする極座標系の等輝度平面上で，画像の初期色分布の最大彩度点を基準点  $\mathbf{c} = (r, \theta)$ ，色調整後の基準点の位置を  $\mathbf{c}' = (r', \theta')$  と定義した．調整後の全ピクセルの色度  $\mathbf{c}_i = (r_i, \theta_i)$  は，下記の式に示す新たな色度位置に調整された．

$$\mathbf{c}_i' = \left( r_i \frac{r'}{r}, \theta_i - \theta + \theta' \right) \quad (3.1)$$

ここで， $\mathbf{c}_i'$  は色分布内の回転された  $i$  番目の点， $r_i$  は初期分布内の  $i$  番目の点の大きさ， $r'$  は色調整後の大きさ， $r$  は基準点の大きさ， $\theta_i$  は色分布内の  $i$  番目の方位角， $\theta$  は基準方位角， $\theta'$  は色調整後の方位角を示す．

刺激の全ピクセルの輝度分布は，色操作手続き中，常に固定であった．背景色は常にグレー（輝度  $29\text{cd}/\text{m}^2$ ，色度  $x = 0.3127, y = 0.3290$ ）であった．

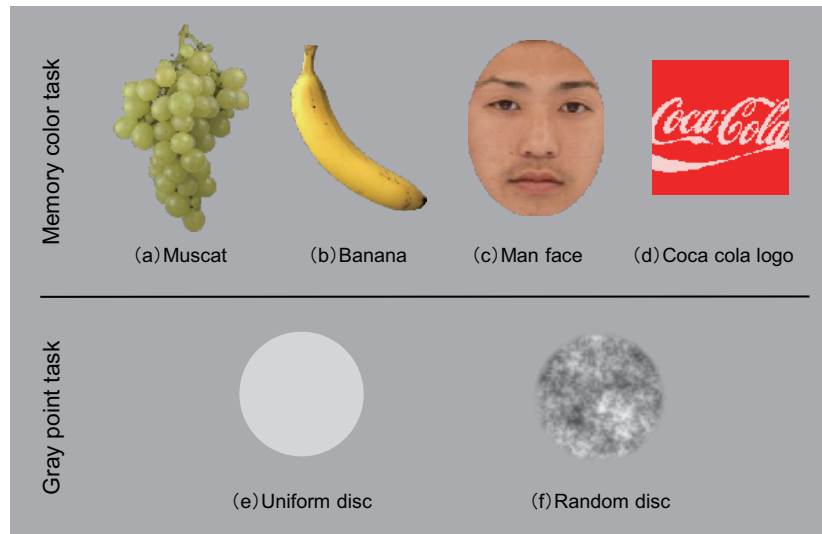


図 3.1 記憶色測定実験の実験刺激

上段：記憶色タスク用刺激（4種類：マスカット，バナナ，顔，コカコーラロゴ）下段：無彩色タスク用刺激（2種類：均一色ディスク，ランダムディスク）

### 実験手続き

各刺激に対する被験者の記憶色を定義するために，2つのタスクを行った．記憶色タスクでは，被験者はマスカット，バナナ，顔，コカ・コーラロゴの4種類の刺激画像（図3.1）の色を，物体の本来の色である典型色（記憶色）になるように調整した．無彩色点タスクでは，被験者は均一色ディスク，ランダム（ピンクノイズ）ディスクの2種類のコントロール刺激（図3.1）の色が，無彩色になるように調整した．どちらのタスクでも，各刺激に対してランダムな呈示順番で5試行ずつ色の調整が行われた．刺激呈示時の刺激の色（初期色度）は，試行毎にランダムな色とした．被験者は色軸に対応する4つのボタンを押すことによって色を調整した．

刺激呈示は，VSG2/5（Cambridge Research System, Rochester, UK）によって制御され，ディスプレイ（CV921X，TOTOKU 製，解像度  $800 \times 600$  pixel，Frame Rate 100 Hz）を使用して暗室（シールドルーム）の中で行われた．被験者は，75 cm の観察距離から顎台によって頭部を固定され，両眼にて刺激を観察した．

### 3.3.3 脳波計測実験

#### 実験刺激

記憶色測定実験で被験者ごとに色を定義したマスカット，バナナ，顔，コカ・コーラロゴの記憶色画像と反対色画像を使用した（記憶色/反対色画像の作成方法については，次節

に記述)。刺激のサイズは横幅を視野角  $3.6^\circ$  とし、グレー背景の中央に配置した。

### 実験手続き

マスカット、バナナ、顔、コカ・コーラロゴの各刺激に対して、刺激の役割を入れ替えた 2 度のオドボール課題が行われた（合計 8 回のオドボール課題）。例えば、バナナの場合、まず反対色画像（青いバナナ）をスタンダード刺激、記憶色画像（黄色いバナナ）をターゲット刺激としてオドボール課題を行い、次に記憶色画像（黄色いバナナ）をスタンダード刺激、反対色画像（青いバナナ）をターゲット刺激として、もう一度オドボール課題を行った（図 3.2 A）。

各オドボール課題において、刺激はブランク画像と交互に、次々と呈示された（図 3.2B）。呈示時間は刺激画像、ブランク画像ともに 500 ms とした。スタンダード刺激とターゲット刺激を合わせた試行数は、約 100~150 回であった。その内、スタンダード刺激の割合は 80 %、ターゲット刺激の割合は 20 % であった。刺激の呈示順はランダムな順番とした。被験者は、呈示頻度の低いターゲット刺激の呈示回数を数え、タスク終了後にその回数を実験者に報告するように教示された。

### 脳波の記録と解析

脳波の計測は、センサーネット 64 電極（図 3.5 E）の Geodesic EEG System 300（サンプリング周波数 20,000Hz まで測定可能、Electrical Geodesics, Inc 製）を使用し、サンプリング周波数 200 Hz で行った。なお、センサーネット電極と頭皮の間の接触抵抗は電解溶剤（塩化カリウム KCl）水溶液によって低減させ 50 k  $\Omega$  以下とした。

計測された脳波データは、EEGLAB[87] を使用して、以下に示す前処理を行った。両乳様突起（電極 29, 47）で再基準化し、1-30 Hz のバンドパスフィルタをかけた。時系列の脳波データは、刺激呈示をオンセットとして -100 ms から 800 ms の波形観測区間で切り分けられた。-100 ms から 0 ms をベースライン区間とし、ベースライン処理を行った。 $\pm 70 \mu V$  以上を含む試行は、眼球運動等のアーチファクトとして除いた。

前処理を施した各刺激に対する脳波データから、P3 ピーク振幅を頭頂電極 Pz での刺激呈示後 250-500 ms の区間の最大振幅として求めた。各刺激の記憶色/反対色 P3 非対称性を調査するために、P3 ピーク振幅に対して、刺激の役割（ターゲット、スタンダード）とタスク（反対色ターゲット、記憶色ターゲット）を要因とした 2 要因反復測定分散分析を行った。

さらに、刺激間で記憶色/反対色 P3 非対称性の大きさを比較するために、反対色－記憶色間差分  $D_{diff}$  を求めた。

$$D_{diff} = D_{opponent} - D_{memory} \quad (3.2)$$

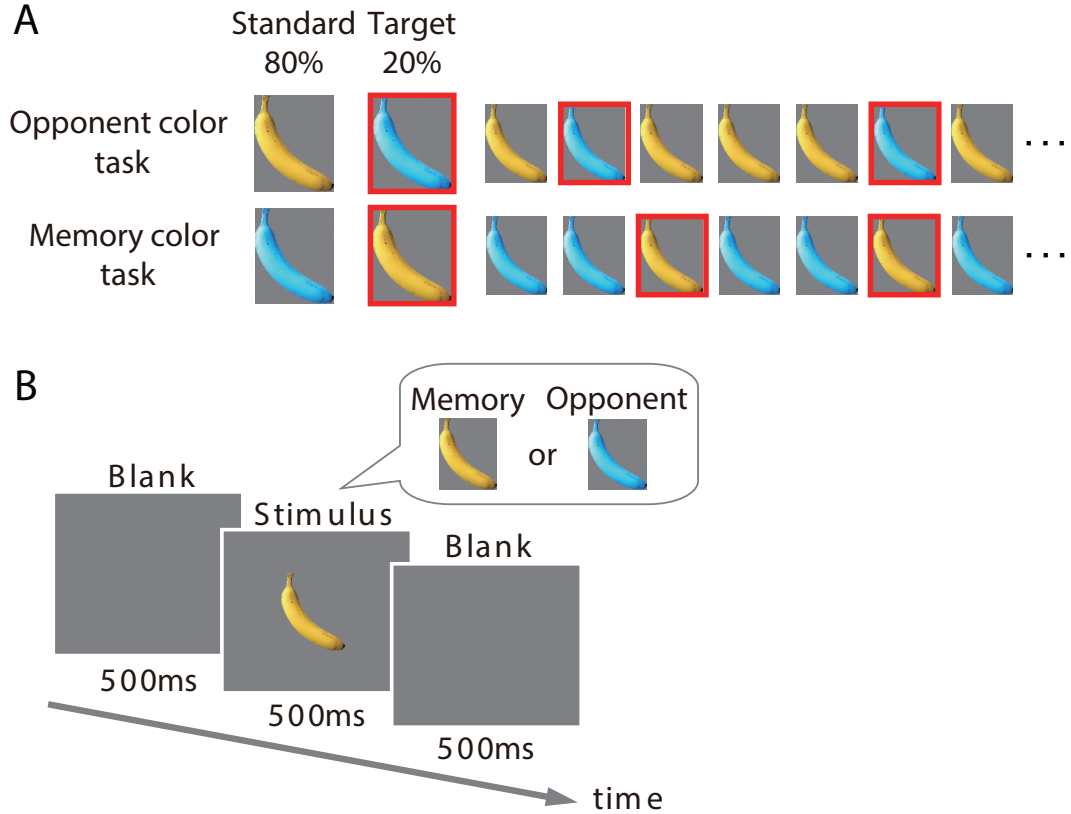


図 3.2 脳波計測実験の実験手続き

A : 刺激の役割を入れ替えた 2 度のオドボール課題の刺激呈示の流れ。反対色タスクでは、反対色画像をターゲット刺激とし、記憶色タスクでは記憶色画像をターゲット刺激とした。B : 刺激呈示時間。刺激（記憶色または反対色）とブランク画像がそれぞれ 500ms 間、交互に次々と呈示された。

ここで、 $D_{opponent}$  は反対色ターゲットタスク時のターゲット刺激とスタンダード刺激に対する P3 差分、 $D_{memory}$  は記憶色ターゲットタスク時のターゲット刺激とスタンダード刺激に対する P3 差分を表す。 $D_{opponent}$ 、 $D_{memory}$  は次式によって求められた。

$$D_{opponent} = A_{opp\ target} - A_{mem\ standard} \quad (3.3)$$

$$D_{memory} = A_{mem\ target} - A_{opp\ standard} \quad (3.4)$$

$A_{opp\ target}$  は反対色ターゲットタスク時の反対色ターゲット刺激に対する P3 ピーク振幅、 $A_{mem\ standard}$  は反対色ターゲットタスク時の記憶色スタンダード刺激に対する P3 ピーク振幅を表し、 $A_{mem\ target}$  は記憶色ターゲットタスク時の記憶色ターゲット刺激に対する P3 ピーク振幅、 $A_{opp\ standard}$  は記憶色ターゲットタスク時の反対色スタンダード刺激に対する P3 ピーク振幅を表す。

反対色－記憶色間差分  $D_{diff}$  に対して、刺激の種類を要因として 1 要因反復測定分散分析を行った。事後検定の多重比較には Holm-Sidak 法を用いた。

## 3.4 結果

### 3.4.1 記憶色測定実験

各刺激に対する各被験者の色調整結果を図 3.3 に示す。図 3.3 におけるデータ点は、各被験者によって色調整された刺激の背景色を除く全ピクセルの色度点の平均値の 5 試行の平均値である。

結果の記憶色度分布を用いて、脳計測実験で使用する記憶色刺激と反対色刺激を、4 種類の画像それぞれに対して作成した（図 3.4）。記憶色刺激は、色調整された色分布の 5 試行の平均分布とした。反対色刺激は、無彩色に調整された 2 種類のディスクの平均値を原点として、記憶色刺激の色分布を  $u'$   $v'$  色度図上で方位角（色相）を  $180^\circ$  回転させた色分布とした。刺激は被験者ごとに作成した。

### 3.4.2 脳波計測実験

マスカット、バナナ、顔、コカ・コーラロゴの 4 種類の画像に対する頭頂電極 Pz の ERP 波形の被験者間総平均値（実験者を除く 6 名）を図 3.5 に示す。なお、実験者は反対色画像を見慣れており、他の被験者と同じ条件とはいえないため解析から除外した。4 種類すべての画像において、出現頻度の低いターゲット刺激呈示に対して、明らかな P3 反応が現れた。

各刺激に対する記憶色/反対色 P3 非対称性を図 3.6 に示す。4 つの刺激それぞれに対して、刺激の役割（ターゲット、スタンダード）とタスク（反対色ターゲット、記憶色ターゲット）を要因とした 2 要因反復測定分散分析を行ったところ、顔画像では、刺激の役割の主効果 [ $F(1, 5) = 57.734, p < 0.01$ ]、および刺激の役割とタスクの交互作用 [ $F(1, 5) = 8.503, p < 0.05$ ] があり、記憶色/反対色 P3 非対称性が生じた。他の 3 種類の刺激では、刺激の役割による主効果 [マスカット :  $F(1, 5) = 53.598, p < 0.01$ , バナナ :  $F(1, 5) = 57.000, p < 0.01$ , コカ・コーラ :  $F(1, 5) = 30.216, p < 0.01$ ] は認められたが、刺激の役割とタスク間の交互作用 [マスカット :  $F(1, 5) = 0.409, p = 0.5505$ , バナナ :  $F(1, 5) = 1.191, p = 0.3250$ , コカ・コーラ :  $F(1, 5) = 1.317, p = 0.3031$ ] は認められず、P3 非対称性は見られなかった。

図 3.7 に反対色－典型色間差分を示す。反対色－典型色間差分に対して、刺激の種類を要因として 1 要因反復測定分散分析を行ったところ、刺激の種類の主効果が認められた [ $F(3, 5) = 4.380, p < 0.05$ ]。多重比較の結果、コカ・コーラロゴとマスカットに比べて、顔に対して大きな反対色－典型色間差分が得られたことがわかった [どちらも  $p < 0.01$ ]。

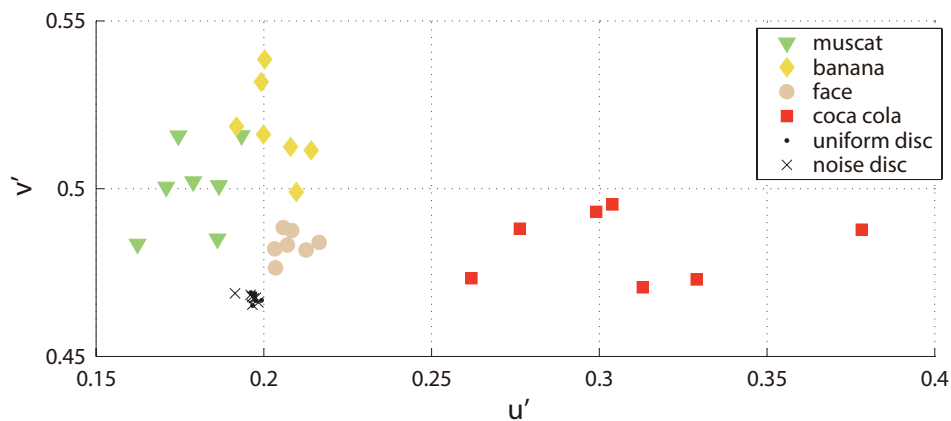


図 3.3 記憶色分布の平均値

$u'$   $v'$  色度図上に各刺激に対する被験者の色調整結果をプロットした図。各データ点は、各被験者（7名）が調整した刺激の背景色を除く全ピクセルの色度点の平均値の5試行平均。緑逆三角はマスカット、黄色菱形はバナナ、肌色丸は顔、赤色四角はコカ・コーラロゴ、黒点は均一色ディスク、黒十字はランダムディスクのデータ点。

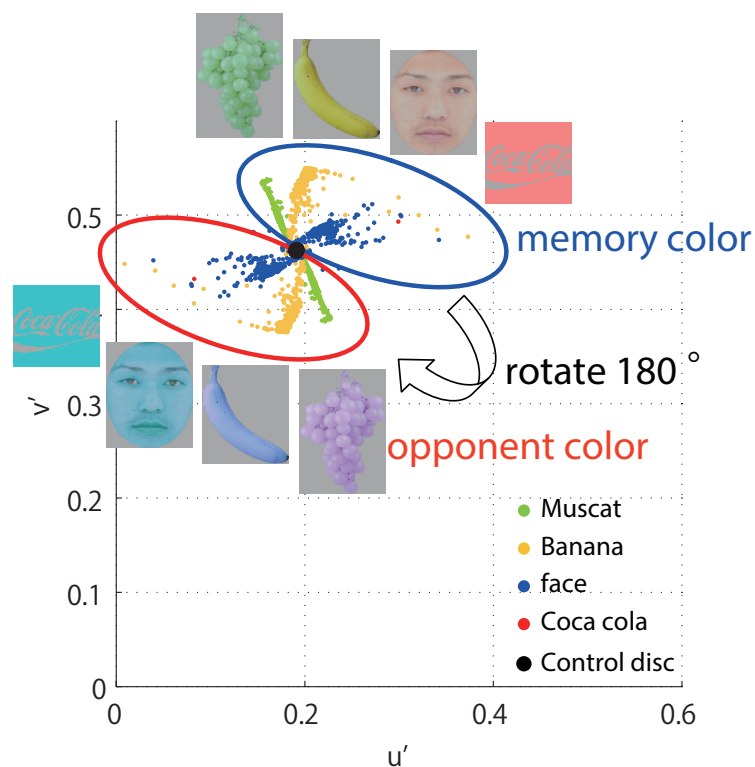


図 3.4 脳波実験用刺激の作成方法

ある被験者の刺激色作成例。色調整された色分布の5試行平均分布を、記憶色刺激の色分布とし、その分布を無彩色に調整された2種類のディスクの平均値（図中黒丸）を原点として、 $u'$   $v'$  色度図上で方位角（色相）を  $180^\circ$  回転させた色分布を反対色刺激とした。



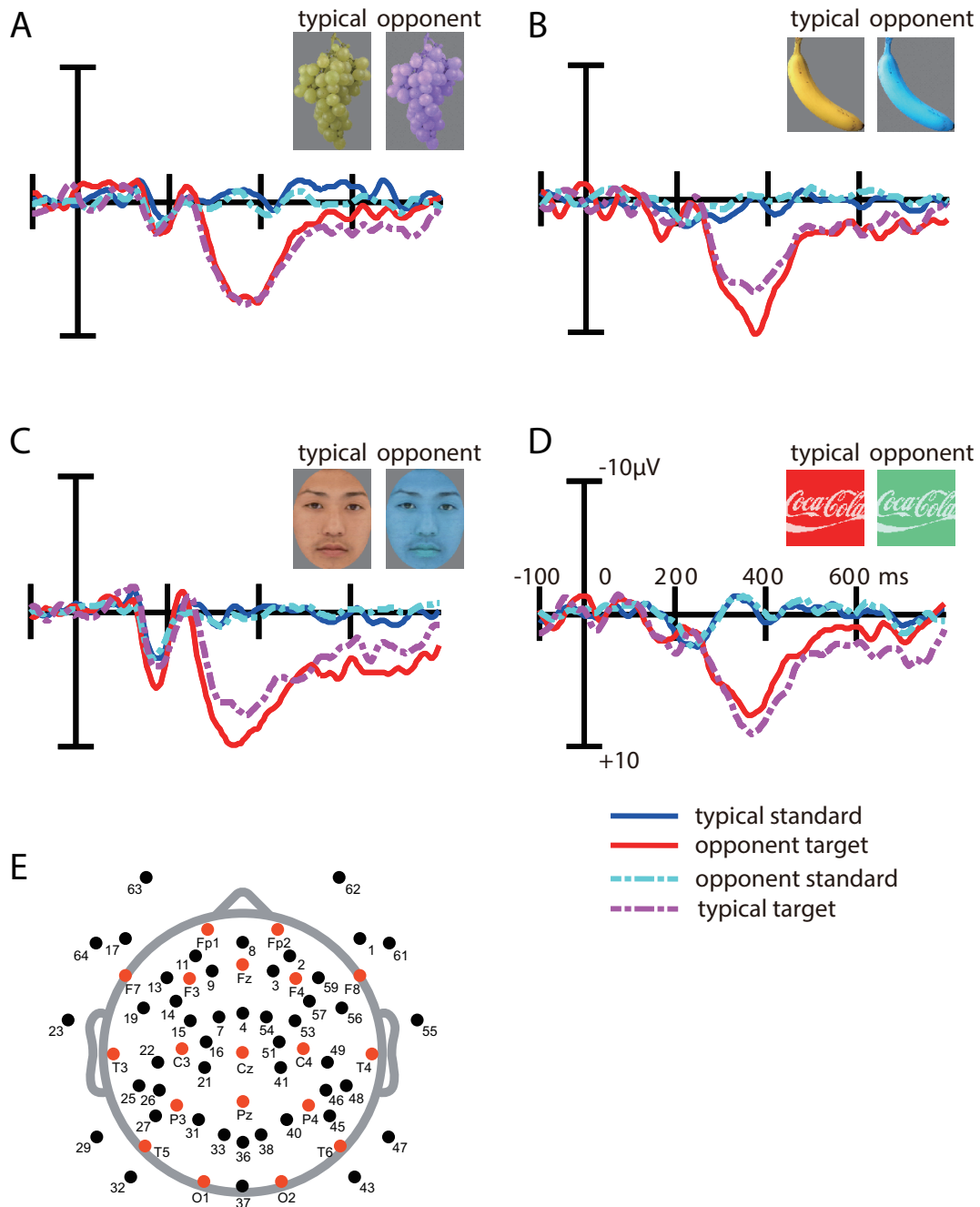


図 3.5 頭頂電極 Pz での ERP 波形

A-D : 頭頂電極 Pz での被験者間総加算平均波形 (N=6)。横軸は潜時, 縦軸は P 振幅。青い実線は典型色スタンダード, 赤色実線は反対色ターゲット, 水色 1 点破線は反対色スタンダード, ピンク色 1 点破線は典型色ターゲットを呈示したときの ERP 総加算平均波形。A はマスコット, B はバナナ, C は顔, D はコカ・コーラロゴ刺激呈示時の波形を示す。E : Pz の電極位置。

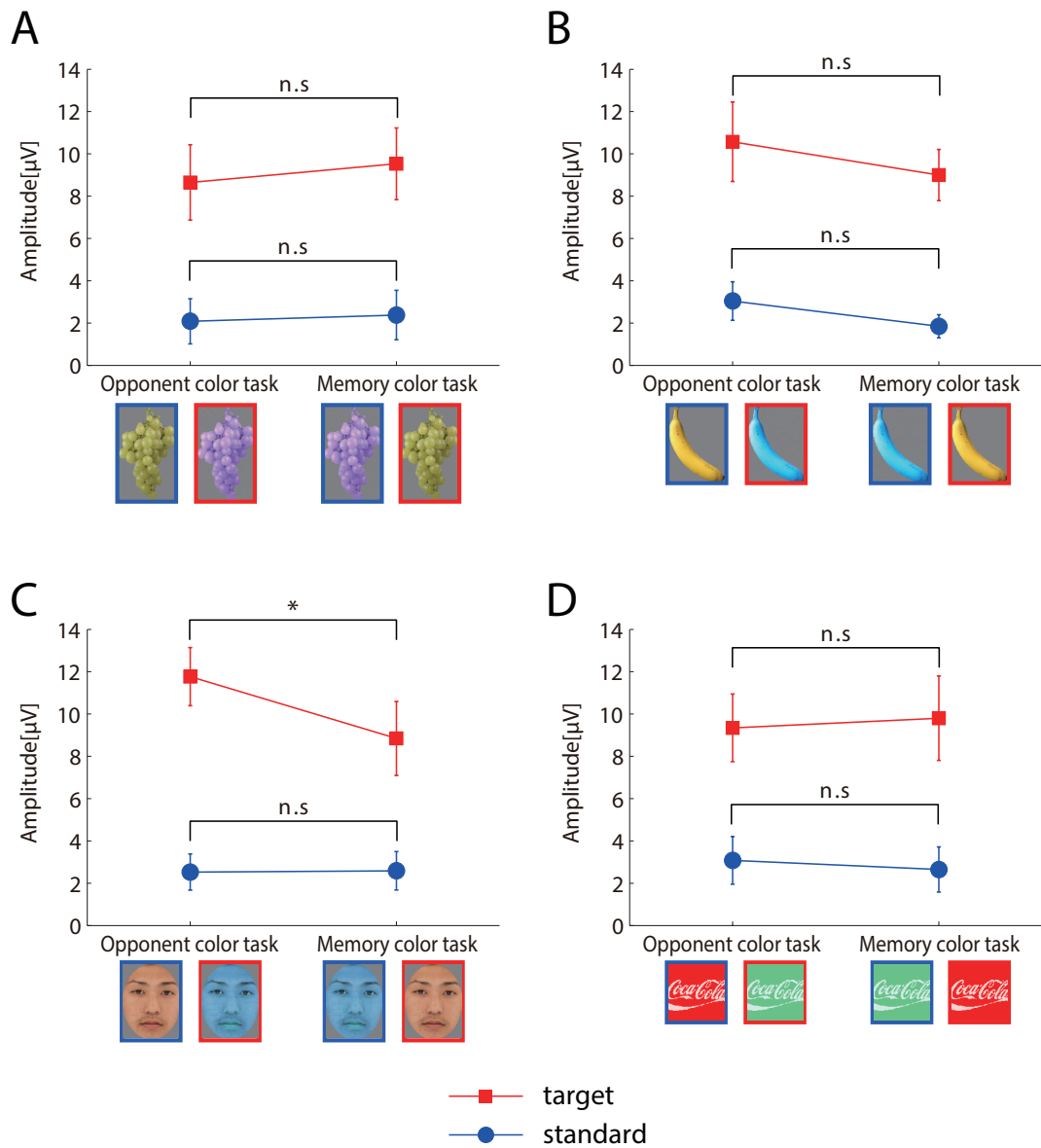


図 3.6 記憶色/反対色 P3 非対称性

2つのタスクのP3ピーク振幅に対し、タスクと画像の役割を要因として2要因反復測定分散分析を行った結果、横軸がタスクの種類、縦軸がP3振幅。丸のデータ点がP3ピーク振幅値、エラーバーは標準誤差を示す。赤色はターゲット刺激、青色はスタンダード刺激。\*は刺激の役割とタスク間の交互作用 [ $p < 0.05$ ] が見られたことを示す。n.s.は交互作用が見られなかったことを示す。Aはマスコット、Bはバナナ、Cは顔、Dはコカ・コーラロゴのP3非対称性。

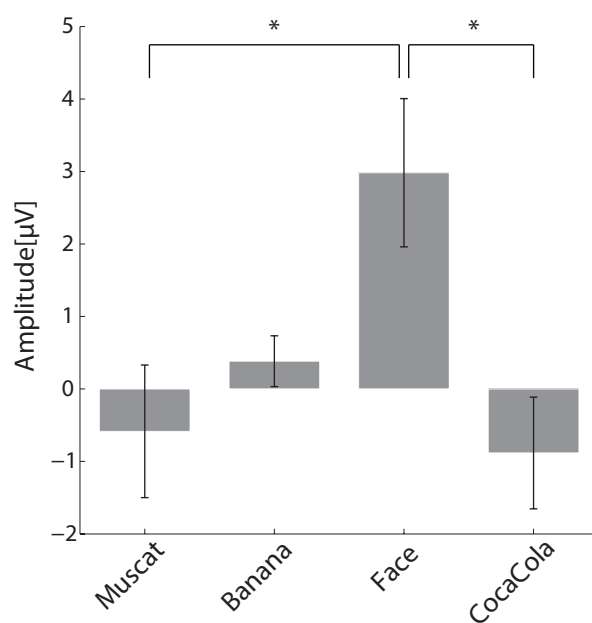


図 3.7 反対色－典型色間差分

反対色ターゲットと記憶色スタンダードの P3 差分と記憶色ターゲットと反対色スタンダードの P3 差分の間の差。横軸が刺激の種類，縦軸が P3 振幅。エラーバーは標準誤差を示す。\* は刺激の種類の主効果が認められ，多重比較を行ったとき，その刺激間で有意差 [ $p < 0.05$ ] が見られたことを示す。

### 3.5 考察

本章では、オドボール課題中の P3 非対称性が記憶色の強さ（記憶における物体と色の結びつきの強さ）を反映するという仮説を検証するため、記憶色測定実験と脳波計測実験を行った。

記憶色測定実験の結果から、物体に対する記憶色には個人差があることがわかった。しかし、顔に対する記憶色の被験者間のばらつきは、他の物体（マスカット、バナナ、コカ・コーラロゴ）に比べて小さい傾向にあった（図 3.3）。このことから、他の物体と比べて、顔は色の記憶が被験者をわたりある程度一貫しているといえ、顔と顔色との結びつきが強いことが予測される。

脳波計測実験においても、顔に突出した結果が見られた。オドボール課題の刺激の役割の効果（スタンダード刺激に比べ、ターゲット刺激に対して大きな P3 が生じる）は、4 つの刺激すべてにおいて生じたが、記憶色/反対色 P3 非対称性は顔に対してのみ有意であった。さらに、反対色－典型色間 P3 振幅差分は、顔刺激において最も大きく、色が記憶色と異なることに対して感じる不自然さは、顔に対して顕著であることが明らかとなった。

また、マスカットとバナナについては、反対色－典型色間差分に有意な差は見られなかったものの、“マスカット<バナナ”という関係は、Olkkonen ら [79] の行動実験による記憶色の指標（MCI : Memory Color Index）のマスカットとバナナの関係と一致する。普段の生活において、マスカットよりもバナナを目にする機会が多く、バナナに対する色の記憶はマスカットよりも明確であると考えられる。また、コカ・コーラロゴに関しては、他の 3 種類の刺激が自然物であるのに対して、コカコーラロゴは人工物であり、このことが結果に影響したのではないだろうか。人工物の場合、自然物と異なり、実際にその物体を記憶色に反する色に着色することが可能であるため、色を反対色にしたときに感じる不自然さの度合いが低いと考えられる。

このように本研究の結果は、オドボール課題中の P3 非対称が、物体の記憶色の強さを反映することを示唆した。顔に対して、最も大きな反対色/典型色 P3 非対称が生じたことから、物体のなかでも顔は特に色情報が重要であることが示唆された。我々が日常生活をおくるなかで最も頻繁に目にする視覚情報は、ヒトの顔であると言っても過言ではなく、それ故に顔は最も重要な意味を持つ社会刺激と言える [88]。霊長類の色覚は「肌の色」の変化を識別するために最適に設計されている可能性がある [24] とも言われており、このことから顔と顔色との結び付きは強いものと推測される。

## 3.6 本章の総括

本章では，物体の色の記憶色からの逸脱から感じる不自然さに着目し，刺激の不自然さを反映するとされるオドボール課題中の P3 非対称性を調査した．その結果，他の物体に比べ顔に対して顕著な P3 非対称性が見られた．このことから，顔と顔色との結びつきが強く，顔において色情報が重要であることが示唆された．



## 第 4 章

# 顔選択的脳波成分 N170 に 見られる顔色の効果

### 4.1 はじめに

2 章で述べたように，これまでに Balas ら [70] や後藤ら [89] によって，顔に対して敏感に応答するとされている ERP 成分 N170 が，顔色によって変調されることが報告されている．しかし，これらの研究は見慣れた顔色と見慣れない顔色の両極の刺激に対してのみ調査したに過ぎず，顔色による N170 の変調は，見慣れた顔色/見慣れない顔色というカテゴリカルな顔色の分類を反映するのか，それとも顔色の違いを敏感に反映するのかは明らかでない．

そこで本研究では，顔色の色相を段階的に変化させた顔色刺激に対する顔選択的脳波成分（N170 と VPP）の変調と，それらの顔色刺激に対して感じる不自然さの関係を調査した．顔色の色相が異なる 8 色の顔色刺激を用いて，脳波計測実験と不自然さ評価させる不自然さ評価実験を行った．脳波計測実験では，被験者に顔画像順列中に出現するダミーターゲットをカウントする課題を与え，不自然さ評価実験においては，呈示された顔画像に対して被験者が感じる不自然さを応答させた．

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 被験者

健康な成人 15 名（女性 5 名，平均 22.5 歳）が被験者として，不自然さ評価実験と脳波計測実験の両方に参加した．すべての被験者は正常もしくは矯正正常視力を持ち，14 名は右利きであった．すべての被験者は，タスクについての十分な説明を受け，参加を同意

したうえで実験に参加した。なお、本実験は国立大学法人豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする研究」審査会の承認を受け行われた。

#### 4.2.2 実験刺激

公益財団法人ソフトピアジャパンが提供する顔画像データベースから10名（女性5名）のアジア人の顔画像（中性表情）を取得し、実験刺激として使用した。顔以外の成分を除外するため、すべての顔画像はPhotoshop CS2を用いて、楕円形に加工された。Minamiらの顔画像と位相ランダム刺激（顔の色成分は残したまま、顔の形状情報をなくした画像）を研究で、N170成分は単なる色の違いには変調されず、顔色の違いによって変調されることが示されている[71]。したがって、本実験では顔刺激のみを使用した。

以下の手順により、顔色の異なる8種類の顔色画像を作成した（図3.1）。取得した顔画像の元々の色分布を、CIE 1976  $u'v'$  均等色度図上で、色相  $0^\circ$  分布と定義した。白色点  $[(u', v') = (0.1978, 0.4683)]$  を原点として、色相  $0^\circ$  分布を  $45^\circ$  ずつ  $360^\circ$  回転させ、顔色の異なる8色相の顔刺激（色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ ）を作成した。合計で80枚の顔画像（10名の顔  $\times$  8色相）を、不自然さ評価実験と脳波計測実験の両方で使用した。

脳波計測実験では、80枚のヒト顔画像に加え、ダミーターゲット刺激として、Fotolia 画像データベース (<http://fotolia.com/>) から取得したサルの顔画像を使用した。サルの顔画像は、顔色刺激との色の類似性をなくすためにグレースケール化された。

すべての刺激は、視野角  $5.8 \times 7.5^\circ$  の大きさでグレー背景の中央に呈示された。各画像の平均輝度はすべて等しくなるように統制された。刺激呈示は、VSG2/5 (Cambridge Research System, Rochester, UK) によって制御され、CRT ディスプレイ (TOTOKU, CV921X, 解像度  $800 \times 600 \text{ pixel}$  Frame Rate 100 Hz) を使用して暗室（シールドルーム）の中で行われた。

#### 4.2.3 脳波計測実験

被験者が8色相の顔色刺激を知覚したときの脳波を計測する実験を行った。各ブロックで、80枚の顔色刺激がランダムな順番で呈示され、そのなかに稀にサルの顔画像（呈示回数1~3回）が呈示された。刺激の呈示時間は500msとし、固視点を呈示する刺激間時間間隔 (ISI: inter stimulus interval) は1100-1500ms間で可変とした（図4.2）。被験者はサルの顔画像の出現回数を数えるよう指示された。ブロック間で休憩を挟みながら、合計で10ブロック行い、8色相の顔画像それぞれの試行回数は100試行であった。なお、サルの顔画像は被験者を実験に集中させるために用いたダミーターゲットであるため、後の



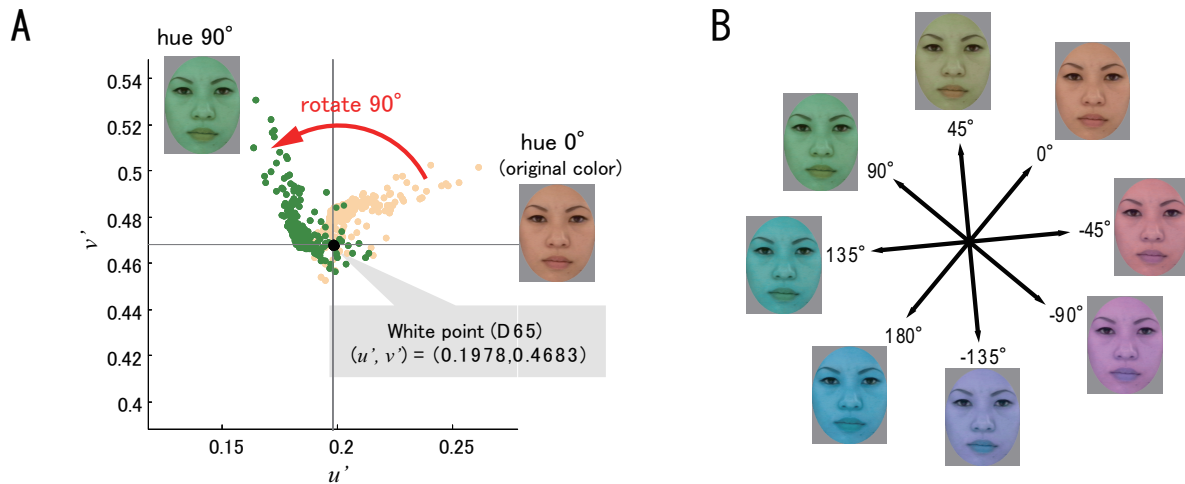


図 4.1 顔色刺激の作成方法と刺激の例

A : 顔画像の元々の色である色相  $0^\circ$  色分布から色相  $90^\circ$  色分布を作成した例. B : ある顔画像に対する 8 色相の顔色刺激.

解析からは除外した.

脳波の計測は、センサーネット 64 電極（図 4.3）の Geodesic EEG System 300（サンプリング周波数 20,000Hz まで測定可能, Electrical Geodesics, Inc 製）を使用し、サンプリング周波数 200 Hz で行った. なお、センサーネット電極と頭皮の間の接触抵抗は電解溶剤（塩化カリウム KCl）水溶液によって低減させ 50 k  $\Omega$  以下とした.

計測された脳波データは、EEGLAB[87] を使用して、以下に示す前処理を行った. 1-30 Hz のバンドパスフィルタをかけ、アベレージリファレンスで再基準化した. 時系列の脳波データは、刺激呈示をオンセットとして -100 ms から 800 ms の波形観測区間で切り分けられた. -100 ms から 0 ms をベースライン区間とし、ベースライン処理を行った.  $\pm 70 \mu V$  以上を含む試行は、眼球運動等のアーチファクトとして除いた. 1 名の被験者の脳波データは、アーチファクト過多のため以降の解析から除外した.

顔色による顔選択的 ERP 成分の変調を調査するために、N170 と VPP に関してピーク振幅とピーク潜時を求めた. ピーク振幅と潜時を求める時間窓は 150-200ms とし、観測電極は N170 に対して左右後側頭電極（左: 29, T5, 32; 右: 43, T6, 47）、VPP に対して中央電極（Cz）とした（図 4.3, 4.4）.

5

#### 4.2.4 不自然さ評価実験

顔色の異なる 8 色相の顔色刺激に対して、被験者が感じる不自然さを評定する実験を行った. 各試行は、500ms 間の固視点の呈示で始まり、その後に顔色刺激が呈示された.

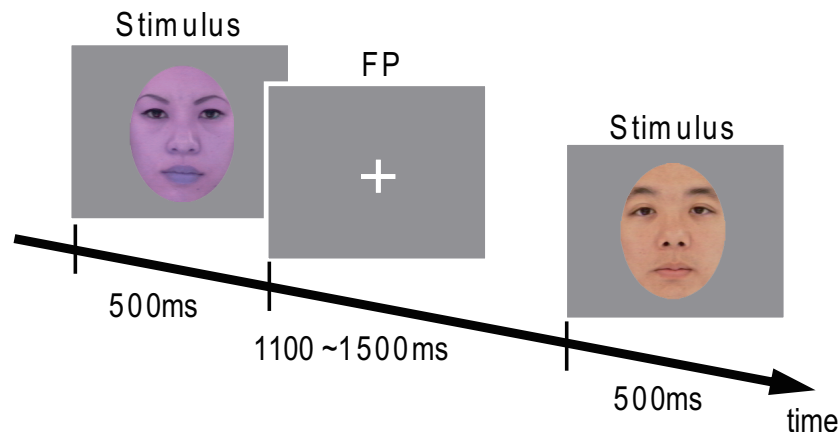


図 4.2 脳波計測実験での刺激呈示

各顔刺激の呈示時間は 500ms，刺激間時間間隔は 1100-1500ms 間のランダムな値とした．被験者は稀に呈示されるサルの顔画像の出現回数を数えた．

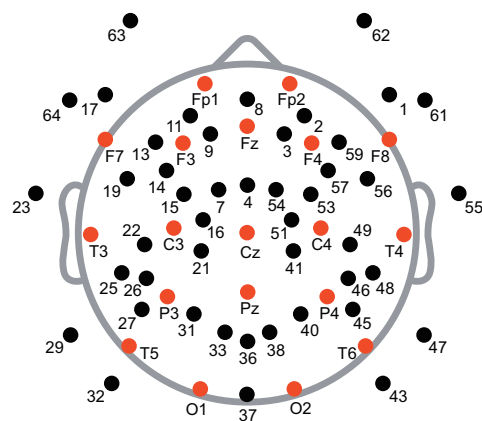


図 4.3 64 電極配置

赤色の電極は 10/20 法に対応する電極である．

被験者は，呈示された顔色刺激に対して感じる不自然さの強さを 3 段階（1：不自然，2：やや不自然，3：自然）で評価した．不自然さの評価は，対応する 3 つのボタンを押すことによって行われ，被験者は可能な限り早く応答するよう指示された．被験者の応答後，次の試行開始まで再び固視点が 1000ms 間呈示された．

各実験ブロックで，80 枚の刺激が完全にランダムな順番で呈示された．ブロック間には休憩を挟んで，合計で 3 ブロック行われた．被験者は，刺激呈示モニタから 75 cm の位置に座り，顎台によって頭部を固定され，両眼にて刺激を観察した．

不自然さ評価実験は，不自然さの評価が顔色に対する脳波に影響しないように，脳波計速実験の後に行われた．

### 4.2.5 統計解析

N170 を検討した多くの顔研究で N170 が顕著に生じる電極とされる T5, T6 と、その周辺の後側頭電極を加えた左右それぞれ 3 電極平均（左: 29, T5, 32; 右: 43, T6, 47）の N170 のピーク振幅とピーク潜時に対して、顔色（色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ ）と電極の側性（左, 右）を要因とする 2 要因反復測定分散分析を行った。

VPP については、観測電極が中央電極（Cz）であり側性がないため、顔色（色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ ）を要因とする 1 要因反復測定分散分析を行った。

不自然さ評価実験で得た顔色刺激に対する不自然度と応答時間それぞれに対して、顔色（色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ ）を要因とする 1 要因反復測定分散分析を行った。

反復測定分散分析において、Mauchly の球面性の仮定が成り立たない場合は、Greenhouse-Geisser のイプシロンを利用して自由度の補正を行った。事後検定の多重比較には LSD 法を用いた。統計解析には SPSS を用いた。

## 4.3 結果

### 4.3.1 脳波実験

後側頭電極および中央電極で観測された、すべての顔色刺激に対する ERP 波形を図 4.4 に示す。すべての顔色刺激に対して、刺激呈示後約 170ms に両側の後側電極で N170 成分が、中央電極では VPP 成分が生じた。N170 と VPP が含まれる刺激呈示後 150-200ms の時間窓で、ピーク解析を行った（図 4.5）。

#### N170

N170 振幅に対して、顔色（色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ ）と側性（左右）を要因とする 2 要因分散分析を行なったところ、顔色の主効果が認められた [ $F(7, 91) = 2.142; p < 0.05$ ]。側性の主効果、顔色と側性の交互作用は共に認められなかった。左右半球別々に顔色（色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ ）を要因とする 1 要因分散分析を行ったところ、左後側頭での N170 振幅に顔色の主効果があり [ $F(7, 91) = 2.543; p < 0.05$ ]、色相  $180^\circ$  は色相  $-45, 0, 90^\circ$  より大きく、色相  $-90, 135^\circ$  は色相  $0^\circ$  より大きかった [すべて、 $p < 0.05$ ]。それに対し、右後側頭電極では顔色の主効果は認められなかった [ $F(7, 91) = 1.003; p = 0.434$ ]。

N170 潜時に対して、顔色（色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ ）と側性（左右）を要因とする 2 要因分散分析を行なったところ、顔色と側性の交互作用があり

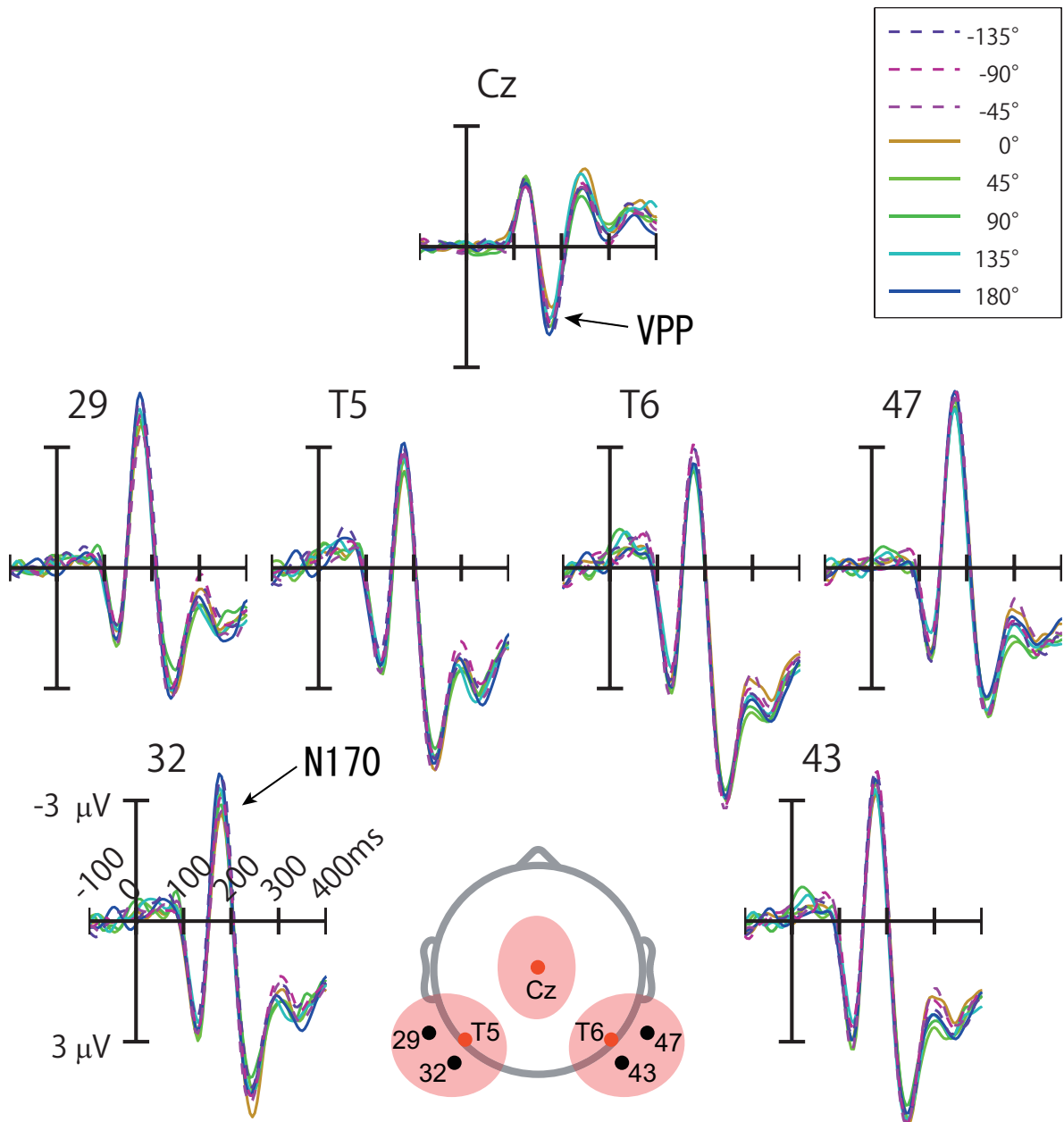


図 4.4 後側頭電極と中央電極で観測された ERP 波形

すべての顔色刺激に対して、後側頭電極（左: 29,T5,32; 右: 43,T6,47）で N170 成分，中央電極（Cz）で VPP 成分が観測された

$[F(2.9567, 38.436) = 2.892; p < 0.05]$ , 色相  $180^\circ$  に比べ, 色相  $-45^\circ$  に対して N170 潜時が遅れた  $[p < 0.05]$ . 左右半球別々に顔色 (色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ ) を要因とする 1 要因分散分析を行ったところ, 左後側頭での N170 潜時に顔色の主効果があり  $[F(2.181, 28.359) = 3.764; p < 0.05]$ , 色相  $-135, -90, -45, 45^\circ$  は色相  $135, 180^\circ$  に比べて潜時が遅延し, 色相  $0^\circ$  は色相  $180^\circ$  に比べて遅延, 色相  $-45^\circ$  は色相  $45^\circ$  に比べて遅延した [すべて,  $p < 0.05$ ]. 右後側頭での N170 潜時に対しては, 顔色の主効果は認められなかった  $[F(3.392, 44.102) = 1.003; p = 0.379]$ .

なお, 上記の結果は後側頭電極左右半球それぞれ 3 電極の平均の結果であるが, それらの電極の個別の結果でも, 3 電極平均と同様の結果が得られた. つまり, 左後側頭に位置する 3 電極 (29, T5, 32) で観測された N170 は, いずれも顔色による変調傾向があり, 右後側頭電極 (43, T6, 47) での N170 にはそのような変調傾向は見られなかった.

## VPP

VPP ピーク振幅に対し, 顔色 (色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ ) を要因とする 1 要因分散分析を行ったところ, 有意な顔色の主効果はなかった  $[F(7, 91) = 1.927; p < 0.074]$ . ピーク潜時に対しても顔色の主効果は認められなかった  $[F(2.364, 30.728) = 1.945; p = 0.154]$ .

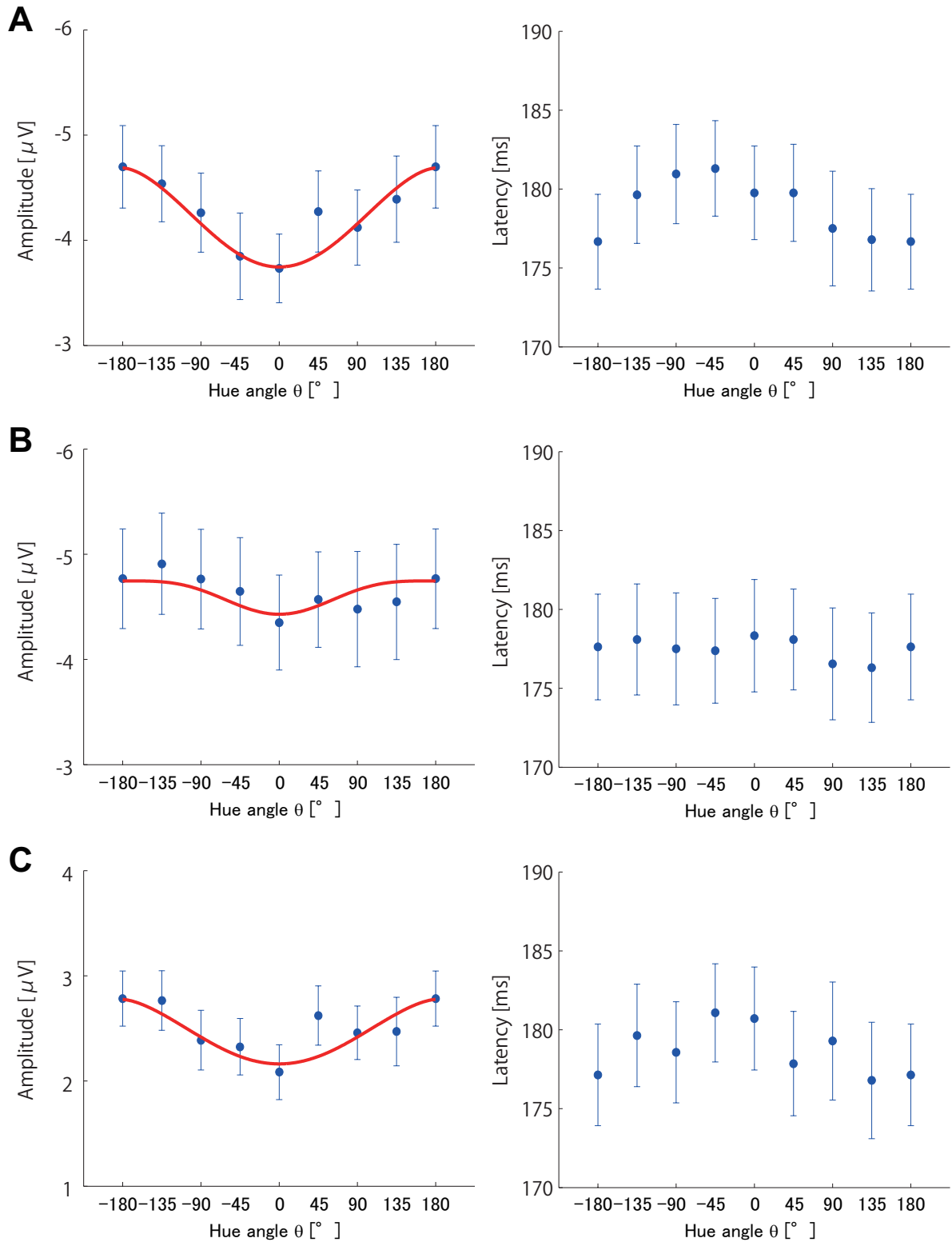


図 4.5 N170 と VPP に対するピーク解析

A : 左後側頭 3 電極 (29,T5,32) 平均の N170 ピーク振幅 (左) と潜時 (右). B : 右後側頭 3 電極 (43,T6,47) 平均の N170 ピーク振幅 (左) と潜時 (右). C : 中央電極 (Cz) の VPP ピーク振幅 (左) と潜時 (右).  $-180^{\circ}$  と  $180^{\circ}$  は同じ値である. 各図のエラーバーは標準誤差を示す. 左列 (ピーク振幅) 中の赤線は, 最適化モデルの結果.

### 4.3.2 顔色による N170 振幅変調のモデル化

顔色の効果が見られた N170 振幅に対して、顔色の色相によるチューニング特性のモデル化を行った。モデルの概念を図 4.6 に示す。通常の色に対して敏感に応答するニューロンの応答ベクトルを  $C_s$ 、入力として与えた顔刺激の色分布ベクトルを  $C_i$  と定義し、入力顔刺激に対するニューロン応答が錐体応答の線形結合で記述できるとすれば、入力顔刺激に対するニューロン応答  $= C_s \cdot C_i \propto \cos\theta$  と表すことができる。N170 振幅がこの入力顔刺激に対するニューロン応答によって変調されると考え N170 振幅  $N170(\theta)$  を、

$$N170(\theta) = A \left\{ \frac{1}{2}(1 + \cos\theta) \right\}^n + B \quad (4.1)$$

で表現する。ここで、本実験において通常の色は色相  $0^\circ$  の顔色であるため、 $\theta$  は入力顔刺激の顔色の色相角である（図 4.6）。このモデルにおいて、パラメータ  $n$  が 1 に近いほど、N170 振幅が顔色ニューロン応答と線形の関係、つまり錐体応答とも線形の関係にあるといえる。

N170 と VPP のピーク振幅（図 4.5 の左列）に対して、このモデルを最適化した場合（計測データとモデル出力の平均二乗誤差が最小となる場合）の各パラメータの値を表 4.1 に示す。ただし、左後側頭部での色相  $-45^\circ$  の N170 振幅（図 4.5 A 左）と色相  $45^\circ$  の VPP 振幅（図 4.5 C 左）は、他の色相の振幅から大きく逸脱しているため、除外してモデルパラメータの推定を行った。

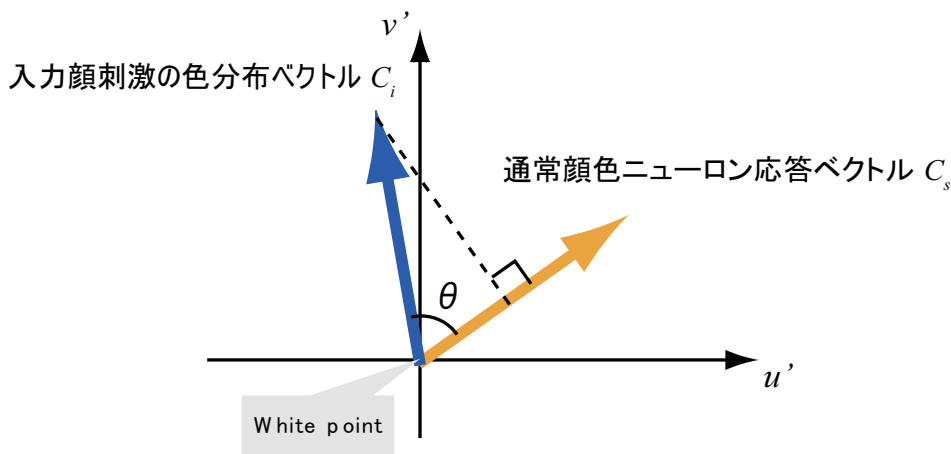


図 4.6 N170 振幅モデルの概念図

式 4.1 の概念図。通常の色に対して敏感に応答するニューロンの応答ベクトル  $C_s$  と、入力として与えた顔刺激の色分布ベクトル  $C_i$  の  $u'v'$  色度図上での関係を示す。

表 4.1 N170 振幅モデルの最適化パラメータ値

N170 と VPP ピーク振幅に対して、式 4.1 のモデルを最適化したときの (計測データとモデル出力の平均二乗誤差が最小となる場合) の各パラメータの値.  $n$  が 1 に近いほど、顔色ニューロン応答と線形の関係、つまり錐体応答とも線形の関係にあるといえる.

パラメータ	N170		VPP
	Left (29,T5,32)	Right (43,T6,47)	(Cz)
$A$	0.9409	0.3171	-0.6128
$B$	-4.687	-4.7466	2.7754
$n$	0.8295	1.8736	0.777

### 4.3.3 不自然さ評価実験

被験者が応答した不自然さを評価するため、被験者の不自然応答を 1、やや不自然を 0.5、自然を 0 とし、不自然度として定義した. 不自然度と応答時間の被験者間平均を図 4.7 に示す.

不自然度に対して、顔色を要因として分散分析を行ったところ、顔色の主効果が認められた [ $F(3.14, 43.96) = 130.72; p < 0.001$ ]. 多重比較の結果、色相  $0, -45^\circ$  は色相  $-135, -90, 45, 90, 145, 180^\circ$  に比べ不自然度が低く、色相  $45, -90^\circ$  は色相  $-135, 90, 145, 180^\circ$  に比べ不自然度が低く、色相  $-135, 90, 135, 180^\circ$  は色相  $-90, -45, 0, 45^\circ$  に比べて不自然度が高く [すべて,  $p < 0.05$ ], 色相角が大きな顔色刺激に対して大きな不自然度が得られた.

応答時間に対して、顔色を要因として分散分析を行ったところ、顔色の主効果が認められた [ $F(2.41, 33.71) = 8.17; p < 0.001$ ]. 多重比較の結果、色相  $180^\circ$  は色相  $-135, -90, -45, 0, 45, 90^\circ$  に比べて応答時間が短く、色相  $90, 135^\circ$  は色相  $-90, -45, 0, 45^\circ$  に比べて応答時間が短く、色相  $-135^\circ$  は色相  $-45, 45^\circ$  に比べて応答時間が短く [すべて,  $p < 0.05$ ], 不自然度が高いほど応答時間が短いという傾向がみられた.

### 4.3.4 不自然さと脳波成分の関係

不自然さと脳波成分との関係を明らかにするために、まずは行動データと脳波データとの相関関係を調査した. 不自然度の応答時間とピーク潜時では、応答時間と左後側頭 N170 潜時に強い正の相関が見られたが [ $r = 0.89, p < 0.005$ ], VPP 潜時とではそのような相関は見られなかった [ $r = 0.59, p < 0.122$ ]. 不自然度とピーク振幅では、不自然度と左後側頭 N170 振幅に正の相関傾向が見られ [ $r = 0.69, p = 0.056$ ], VPP 振幅とではそのような相関は見られなかった [ $r = 0.53, p = 0.176$ ].



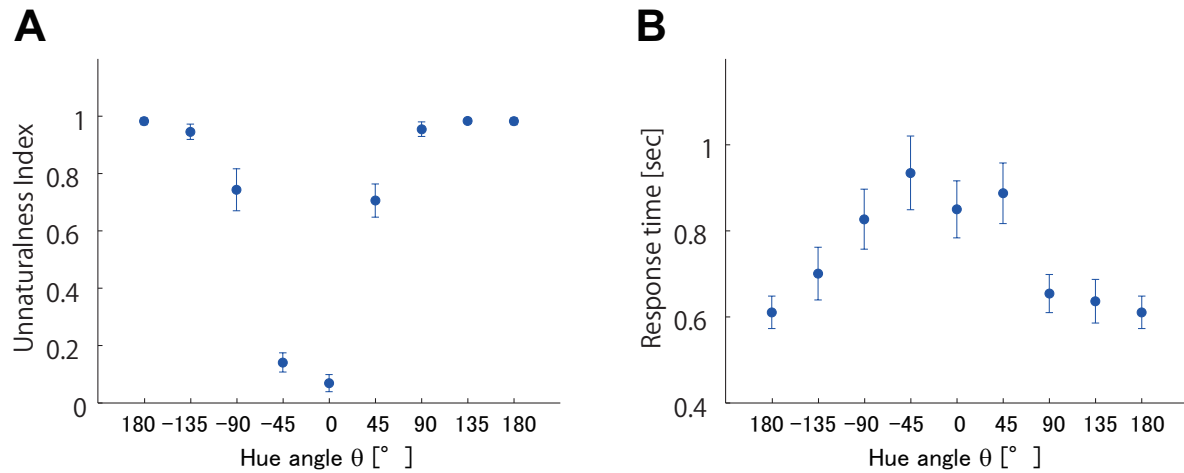


図 4.7 不自然度と応答時間

色相  $-180^\circ$  と色相  $180^\circ$  は同じ値である。エラーバーは被験者間平均の標準誤差を示す。

顔色による変調が見られた左後側頭 N170 振幅と不自然度の関係を、SDT（信号検出理論）を用いて検討した。N170 振幅に基づいた 2 値判別過程によって不自然度が決定されると仮定すると、不自然度（UI : Unnatural Index）は次式のように表すことができる。

$$UI = \int_0^\theta \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(N170(\theta) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} d\theta \quad (4.2)$$

ここで、 $N170(\theta)$  は色相  $\theta^\circ$  の顔色刺激に対す N170 振幅を表す。顔色による変調が見られた左後側頭 N170 振幅と、顔色変調傾向が見られた VPP 振幅に対して、最小二乗法によるモデル最適化を行った。表 4.2 に得られた最適化パラメータの値を示す。

#### 4.3.5 不自然度のシミュレーション

上記の 2 つのモデル（式 4.1, 4.2）を用いて、顔色刺激入力から ERP 成分を経て、不自然度を出力にするまでをシミュレーションした結果を図 4.8 に示す。具体的には、式 4.1 モデルに表 4.1 のパラメータを適用し、 $-180 \sim 180^\circ$  を入力として ERP 振幅を求め、そ

表 4.2 不自然度モデルの最適化パラメータ値

左後側頭の N170 と VPP ピーク振幅に対して、式 4.2 のモデルを最適化した場合（計測データとモデル出力の平均二乗誤差が最小となる場合）の各パラメータの値。

パラメータ	N170 (Left: 29,T5,32)	VPP (Cz)
$\mu$	-4.0114	2.3647
$\sigma$	0.2172	0.037

の ERP 振幅を表 4.2 のパラメータを適用した式 4.2 モデルの入力として、不自然度を求めた。VPP 振幅を経由したモデルよりも、左後側頭 N170 振幅を経由したモデルの方が、不自然度を良く再現できていることがわかる (図 4.8)。

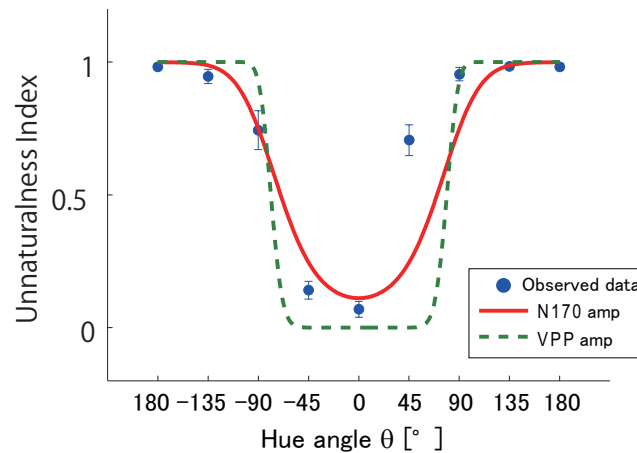


図 4.8 N170 振幅モデルと不自然度モデルによる不自然度のシミュレート結果

式 4.1, 4.2 の 2 つのモデルを繋ぎ、最適化パラメータを適用して、不自然をシミュレートした結果。実線は左後側頭での N170 振幅のパラメータによるシミュレート結果。破線は VPP 振幅のパラメータによるシミュレート結果。

## 4.4 考察

本研究では、顔色の色相を段階的に変化させた顔色刺激に対する顔選択的脳波成分 (N170 と VPP) の変調と、それらの顔色刺激に対して感じる不自然さの関係を調査した。顔色の色相が異なる 8 色の顔色刺激を用いて、脳波計測実験と不自然さ評価させる不自然さ評価実験を行った。脳波計測実験では、被験者に顔画像順列中に出現するダミーターゲットをカウントする課題を与え、不自然さ評価実験においては、呈示された顔画像に対して被験者が感じる不自然さを応答させた。

脳波計測実験の結果、どの色相の顔色刺激に対しても、刺激呈示後約 170ms に左右後側頭部で強い陰性電位 (N170) が、中央電極では強い陽性電位 (VPP) が生じた (図 4.4)。このことより、顔色が自然な色でない場合でも、顔に敏感に応答するといわれている N170 と VPP が発生することが確認できた。もっとも重要な点は、左後側頭での N170 成分が振幅・潜時ともに顔色によって変調されたことである。N170 振幅は、色相 0° の顔色刺激に対して最も小さく、色相が大きくなるに連れ N170 振幅も大きくなり、色相 180° の顔刺激に対して最大となった。一方、不自然さ評価は、色相 0° の顔刺激に対して不自然度が最も低く、色相 180(= -180)° の顔刺激に対して不自然度が最大であった。これらの結果は、不自然な顔色に対して N170 振幅が増大するという Minami ら [71] の結果と一致

する。

左後側頭 N170 振幅と不自然度は、色相  $0^\circ$  に対して最小、色相  $180^\circ$  に対して最大という点では一致しているが、両者の色相による変調パターンは同じとはいえない（左後側頭 N170 振幅と不自然度の相関  $r = 0.69, p = 0.056$ ）。左後側頭 N170 振幅は、色相が色相  $0^\circ$  から離れるに従って徐々に増加する段階的な増加傾向であるのに対して、不自然度は色相  $0^\circ$  付近は自然、色相  $180(= -180)^\circ$  付近は不自然というように二値応答に近い。両者に対するモデル化の結果からも、その傾向が伺える。左後側頭 N170 振幅は、入力となる顔色刺激の色相の線形モデルで表現することができ、不自然度は左後側頭 N170 振幅を入力とする二値応答モデルで表現することができた。本研究の評定実験では、被験者に顔色に対する不自然さを評定させたが、自然な顔色との色差を評定させるようなタスクを課した場合、行動データでも左後側頭 N170 振幅で見られたような顔色による変調パターンが得られるかもしれない。左後側頭 N170 振幅の顔色変調パターンが、そのような色差評定タスクと今回の実験で行った不自然な評定タスクのどちらの結果とより高い相関を持つかを検討することによって、本実験で得られた左後側頭 N170 の変調が顔色の違いを反映したものかどうかのさらなる検証が可能となるであろう。

顔色による変調が見られた左後側頭 N170 潜時は、色相  $0^\circ$  付近を中心に色相が離れるに従って徐々に減少する傾向が見られた。つまり、不自然な顔色刺激に対して、早く N170 成分が生じたのだ。同様の傾向が不自然度の応答時間にも見られ、左後側頭 N170 潜時と不自然度応答時間は強い相関関係にあった。この相関関係は、N170 振幅が顔色の違いを反映するというよりも、顔色を典型的な顔から逸脱させたことによって生じる不自然さを反映することを示すように見える。しかし、本研究で得られた N170 潜時と応答時間の関係は、顔色以外の特徴を典型的な顔から逸脱させた場合（倒立化）の結果と異なる。顔の倒立効果では、正立顔（典型的な顔）に比べて倒立顔（逸脱顔）に対して N170 潜時は遅延し、課題（顔同定など）に対する応答時間も遅くなる [90]。これに対して、本研究の顔色の効果は、自然な顔色（典型的な顔）に比べ、不自然な顔色（逸脱顔）に対して、N170 潜時は短く、課題に対する応答時間も短くなった。倒立化により顔認識は困難となり、顔色の不自然さ判断は自然な顔色に近い顔色に対して困難となるため、倒立化と顔色に対する応答時間の遅延は、どちらも課題の難度を反映したものと考えられる。しかし、倒立顔に対しては遅延する N170 潜時は、不自然な顔色に対しては遅延せず、典型顔（自然な顔色）に比べて短くなった。このように、本研究で観測された N170 潜時の顔色による変調は、典型的な顔からの逸脱（倒立化）による変調と傾向が異なる。また、他人種効果を検討した [70] の研究において、本研究で得られた N170 潜時と似た結果が示されている。彼らの研究では、白人被験者において、白人顔に比べて黒人顔に対して短い N170 潜時が生じることが示されている。従って、この研究で観測された N170 変調は典型的な顔からの逸脱を反映しているというよりも、顔色の違いを反映していると考えられる。

顔色の効果は、左後側頭で得られた N170 成分にのみ生じ、右後側頭部での N170 成分には生じなかった。N170 の顔に対する選択性は、右半球優位であると言われており、左後側頭部に比べて右後側頭部で顔に対してより大きな N170 成分が生じる [37, 54]。一方で、左右半球で異なる顔処理が行われるという研究結果も示されている。例えば、左後側頭領域は顔の特徴情報の処理に関与し、右後側頭領域は顔の布置情報の処理に関与することが示唆されている [91, 92]。さらに、Proverbio らの物体認識における形状と色の処理を調査した脳波研究 [81] では、色と形状の情報が左半球の後側頭領域で統合されることが示唆されている。脳波に比べ空間分解能の高い機能的 MRI を用いた研究では、右半球の顔選択的領域は顔の形状情報の処理に関与し、左半球の顔選択的領域は形状と色の両方の処理に関与することが示唆されている [93]。これらの知見と本研究の結果から、左後側頭領域が顔色の処理に関与すると考えられる。

他人種効果を調査した脳波研究において、顔の肌の色が N170 成分に影響することが示されている [70, 94]。彼らの研究では、同人種の肌の色の顔に比べて、他人種の肌の色の顔に対して大きな N170 振幅が生じ、この効果は顔の形状情報に影響されず、形状情報が同人種、他人種に関わらず色の違いで N170 振幅が変調された。N170 は顔検出処理を反映する成分だと言われており [37, 45]、本研究の結果は顔検出に顔色の情報が寄与することを示唆する。さらに、本研究は不自然な顔色の検出だけでなく、健康状態や感情の認識に影響を与えるわずかな顔色の変化を捉えるような処理が、顔処理の早い段階で行われる可能性を示した。

## 4.5 本章の統括

本研究は、N170 が顔色の情報によって変調されることを示し、N170 が典型的な顔からの逸脱の検出のみならず、顔色の処理も反映することを示唆した。N170 の顔選択性は右半球有意と言われているが、本研究において顔色による N170 の変調は振幅・潜時ともに左半球でのみ生じ、左後側頭部において顔色の処理が行われることを示唆した。

## 第 5 章

# 顔色処理に関わる脳部位の fMRI による特定

### 5.1 はじめに

4 章では脳波研究によって、顔色の処理が顔の早期処理段階で行われ、左後側頭領域がその処理に携わることを示唆した。脳波よりも空間分解能に優れたニューロイメージングを用いた研究では、顔以外の物体に比べて顔に対して高い活動を示す顔選択的領域が、後側頭皮質に存在することが示されている [10, 11]。それらは主に、紡錘状回中央に位置する紡錘状回顔領域（FFA: fusiform face area）[12]、下後頭回に位置する後頭顔領域（OFA: occipital face area）[13]、上側頭溝（STS: superior temporal sulcus）[14, 15] の 3 つの領域である。顔知覚の神経モデルでは、これらの領域が顔知覚処理の中核を担い、それぞれが異なる機能を持つとされている [10]。FFA は人物の同定に必要な顔の静的情報を処理し、STS は視線や表情、口の動きなどの動的な情報を処理する。OFA は顔特徴の早期知覚処理に関係し、FFA と STS に入力情報を与える。

4 章の脳波研究の結果から、（特に左の）後側頭皮質内のこれらの領域が顔色の処理に関わると予想される。そこで本章では、空間分解能に優れた fMRI を用いて、後側頭皮質内のどの顔選択的領域が顔色の処理に携わるかを特定することを目的とした。自然色顔と青色顔、それらのスクランブル画像に対する顔選択的領域の応答を fMRI で計測し、顔色による応答の違いを検討した。

## 5.2 実験方法

### 5.2.1 被験者

健康な成人 25 名（女性 5 名，平均 25.24 歳）が被験者として実験に参加した．すべての被験者は正常もしくは矯正正常視力を持ち，Edinburgh handedness inventory（Oldfield, 1971）により 23 名は右利き，3 名が左利きと判定された．どの被験者も神経学的疾患または精神病の既往歴はなかった．実験手続きは，生理学研究所の倫理委員会と国立大学法人豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする研究」審査会によって承認を受けた．すべての被験者は，実験についての十分な説明を受け，参加を同意したうえで実験に参加した．

### 5.2.2 実験刺激

刺激は 2 顔色（自然色，青色） $\times$ 2 形状（顔，顔スクランブル）の 4 カテゴリで構成された（図 5.1A）．各カテゴリの顔刺激は，公益財団法人ソフトピアジャパンが提供する顔画像データベースから取得したアジア人の顔画像（中性表情）20 名分（女性 10 名）をもとに作成された．自然色顔画像は，データベースから取得した顔画像を楕円形に加工（顔以外の成分を除外するため）し，作成した．青色顔画像は，自然色顔画像の顔色を反対色にすることによって作成した．自然色/青色顔画像に対してフーリエ位相ランダム化手続き [95, 96] を施し，顔画像の全体的な低次元特徴（色情報）は保ち，顔の形状情報をなくした自然色/青色顔スクランブル画像を作成した．実験には，80 枚（4 カテゴリ  $\times$  20 名の顔）の実験刺激に加え，ダミーターゲットである 1 枚のサル顔画像を使用した．サル顔画像は実験刺激であるヒト顔画像との色の類似性をなくすために，グレースケール化した．

各画像の平均輝度と RMS 輝度コントラストは，すべての画像間で等しくなるように統制した．すべての刺激の大きさは  $158 \times 205$  pixels（視野角  $2.9 \times 3.8^\circ$ ）とした．刺激はニュートラルグレー背景の中央に呈示された．

### 5.2.3 実験手続き

1 セッションは 200 枚の刺激呈示で構成された．呈示刺激の内訳は，5 種類の刺激（自然色顔刺激，青色顔刺激，自然色位相スクランブル刺激，青色位相スクランブル刺激，サル刺激）がそれぞれ約 40 であった．刺激の呈示時間は 1500ms で，刺激間間隔（ISI）も 1500ms であった（図 5.1B）．実験に集中させるために，被験者には呈示された画像刺激

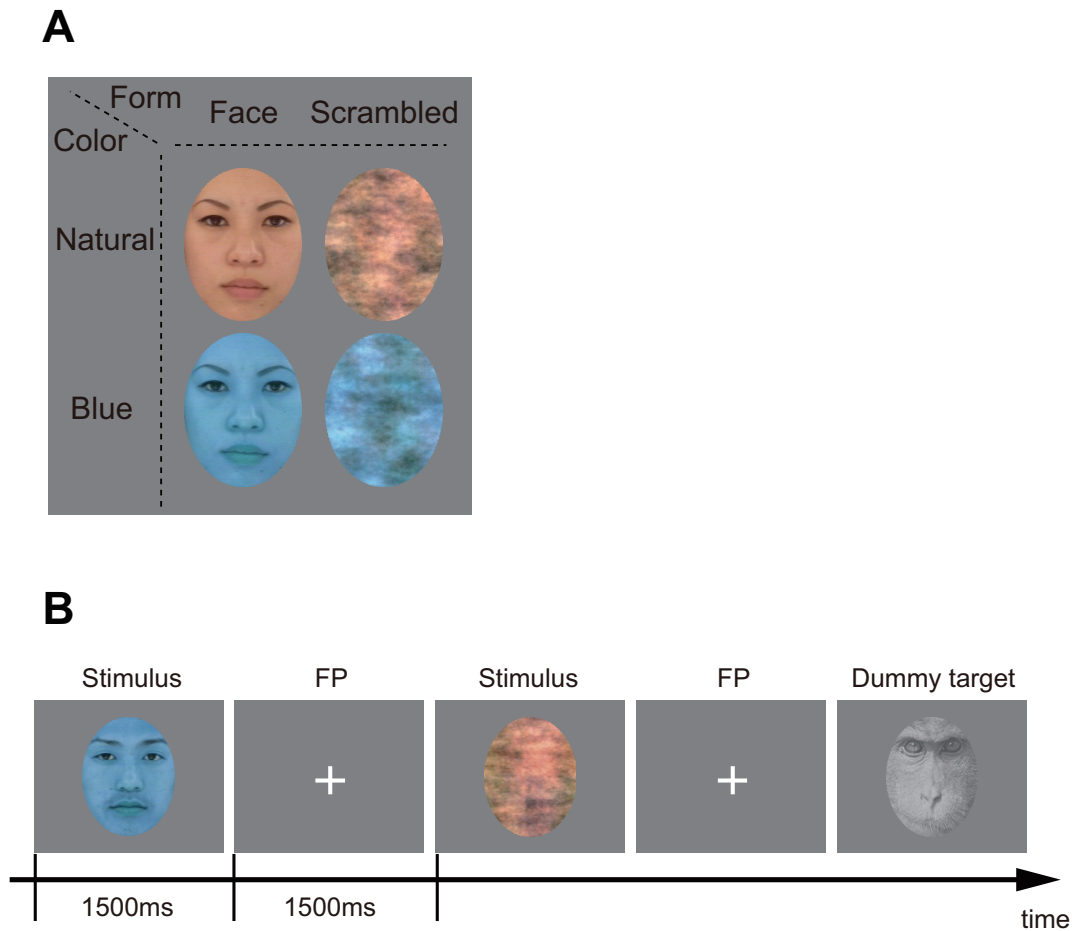


図 5.1 実験刺激と実験手続き

A: 2 形状 (顔, スクランブル)  $\times$  2 顔色 (自然色, 青色) で構成される実験刺激の例. B: 各セッションは, 約 200 試行 (自然色/青色顔, 自然色/青色スクランブル: 各 20 回; サル画像: 26~31 回) で構成された. 各刺激の呈示時間と刺激呈示間隔はどちらも 1500ms であった. 被験者はサル呈示時にボタン応答とサルの出現回数をカウントする課題を行った.

がサルであった場合, ボタンを押すとともに, サルの出現回数を数えるオドボール課題を与えた. 初めに練習セッションを行い, その後, 実験セッションを 4 セッション行った. セッション間には休憩を挟んだ. 刺激の呈示順は, 遺伝的アルゴリズム [97] によってコントラスト検出効率が最大となる順序とした. 刺激呈示には, Presentation-Software (Neurobehavioral Systems; <https://nbs.neuro-bs.com>) を用いた.

#### 5.2.4 fMRI 撮像とデータ解析

##### 脳画像データの撮像

3 テスラ MR スキャナ (Allegra; Siemens, Erlangen, Germany) を用いて, 脳の機能画像と構造画像を取得した. 約 10 分 (200 試行) のセッションを 4 回行い, その間の機能画像

を取得した (repetition time (TR), 3000 ms; echo time (TE), 30 ms; 21 flip angle, 83°; field of view, 192 mm; slice thickness, 3 mm; 64×64 matrix; voxel dimensions, 3.0×3.0×3.0 mm; number of slices, 45). 構造画像として, MP-RAGE (magnetization prepared rapid acquisition with gradient echo) を用いて, 各被験者の高解像度 T1 強調 3 次元画像を取得した (TR, 2500 ms; TE, 4.38 ms; flip angle, 8°; field of view, 256 mm; slice thickness, 1 mm; voxel dimensions, 1.0×1.0×1.0 mm).

### 前処理

fMRI データの前処理と統計解析は, MATLAB 2011b 上で SPM8 version 4290 (Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK, <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>) を用いて行った. 機能画像に対して, 頭の動きの補正 (Realignment), 各ボリウム内でのスライスタイミング補正 (Slice timing correction) を行った. 全体脳構造画像ボリウムをセッション 1 の平均 EPI ボリウムに位置合わせした (Coregister). 非線形基底関数を用いて, 全体脳画像ボリウムを Montreal Neurological Institute T1 画像テンプレートに標準化した (Normalize). すべての EPI ボリウムに同じパラメータを適合し, 半値全幅 8mm のガウスカーネルを用いた空間的平滑化を行った (Smoothing).

### ROI 解析

ROI (region of interest) 解析のために, 被験者ごとの顔選択的 ROI を以下の手順で定義した. まず, 集団解析 (自然色顔 vs. 自然色スクランブル;  $p < 10^{-3}$ , uncorrected) によりグループレベルでの顔選択的領域を特定した. 次に, グループレベル顔選択領域内の最大活動座標を中心とする半径 10mm の球状の領域を, MarsBaR toolbox version 0.43 (<http://marsbar.sourceforge.net/>) を用いて求め, グループ ROI として定義した. 最後に, グループ ROI でマスクした各被験者の顔選択的活動 (自然色顔 vs. 自然色スクランブル;  $p < 0.05$ , uncorrected) 内の最大活動座標を中心とする半径 10mm の球状の領域を個人 ROI として定義した. グループ ROI 内で顔に対する活動が見られず個人 ROI を定義できなかった被験者は, ROI 解析にてグループ ROI を使用した.

ROI 解析のために, MarsBaR toolbox を用いて各 ROI の Percent signal change データを抽出した. 顔色の処理に関係する脳領域を特定するために, 各 ROI の Percent signal change データに対して, 形状 (顔, スクランブル) と色 (自然色, 青色) を要因とした 2 要因反復測定分散分析を行った. 反復測定分散分析には SPSS (IBM, Armonk, NY, USA) を用いた.



## 5.3 結果

集団解析の結果，グループレベルの顔選択領域として，両側の FFA と OFA が見つかった（表 5.3，図 5.2）．右 FFA は 23 名の被験者で見つかり，左 FFA は 22 名，右 OFA は 23 名，左 OFA は 21 名の被験者で発見された．STS に関しては，非常に緩い統計的閾値（ $p < 0.05$ , uncorrected）でグループレベルの右 STS が発見されが，個人レベルでは半数以下の被験者（12/25 名）でしか右 STS は特定されなかった．左 STS はグループレベルでも発見されなかった（ $p < 0.05$ , uncorrected）．したがって，両側の STS は ROI 解析から除外した．他のグループレベルの顔選択的領域は見つからなかった．

顔選択的領域として特定された両側の FFA と OFA の 4 つの ROI に対して，percent signal change を求め（図 5.3），ROI 解析を行った．2 要因（形状，色）分散分析の結果，すべての顔選択的 ROI において形状の主効果（顔 > スクランブル）が認められた

表 5.1 グループレベルの顔選択的領域の MNI 座標

集団解析（自然色顔 vs. 自然色スクランブル）で発見されたグループレベルの顔選択的領域．これらの座標を基準に顔選択的 ROI を定義した．

Brain area	MNI coordinates			Cluster size (mm <sup>3</sup> )	t max
	x	y	z		
Left Fusiform Gyrus (left FFA)	-44	-56	-20	768	6.6
Right Fusiform Gyrus (right FFA)	44	-54	-20	728	5.87
Right Inferior Occipital Gyrus (right OFA)	42	-72	-12	144	5.27
Left Inferior Occipital Gyrus (left OFA)	-42	-74	-14	88	5.07

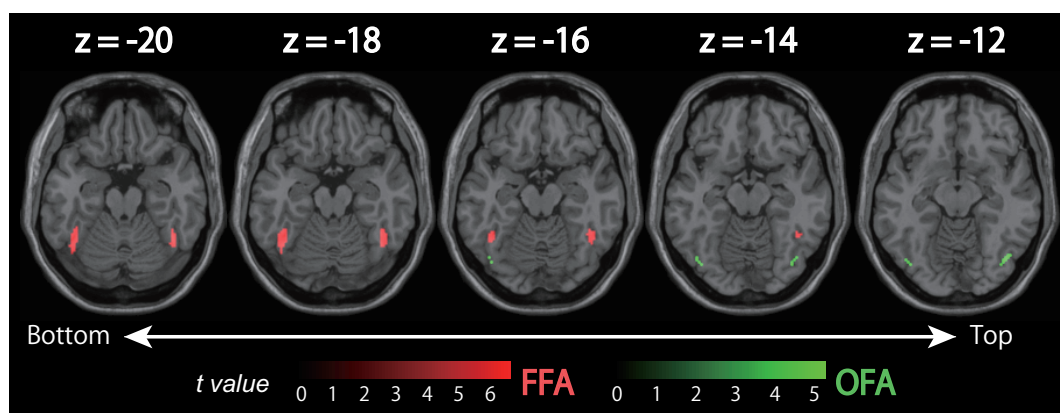


図 5.2 グループレベルの顔選択的領域

集団解析（自然色顔 vs. 自然色スクランブル;  $p < 10^{-3}$ , uncorrected）によって特定された顔選択的領域．赤色は FFA を，青色は OFA を示す．

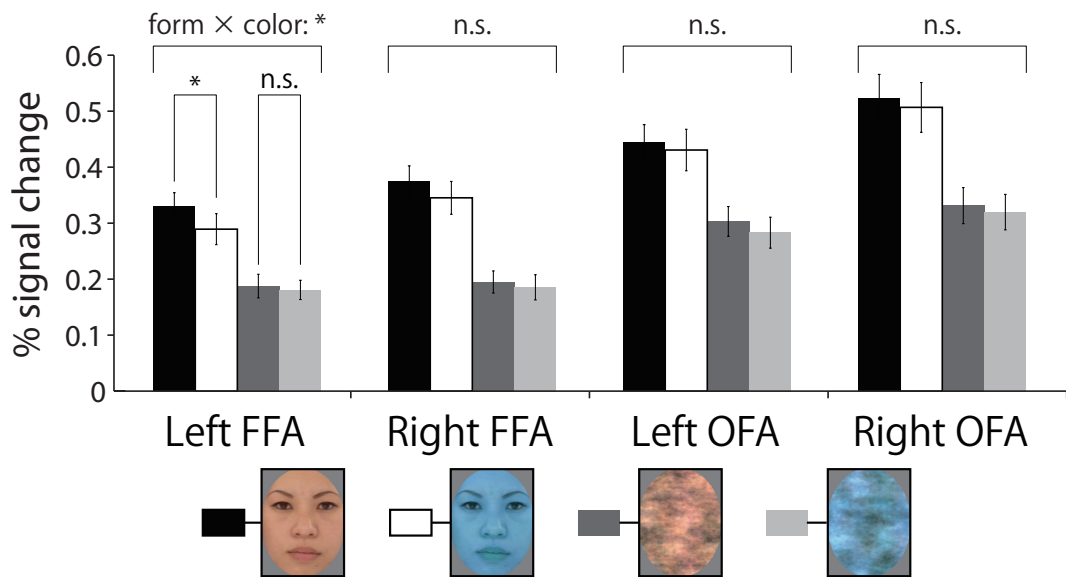


図 5.3 左右 FFA, OFA での ROI 解析結果

左右 FFA, 左右 OFA における各実験条件の Percent signal change. エラーバーは標準誤差を, 図中\*は形状と色の交互作用が有意 ( $p < 0.05$ ) であることを示す. 形状と色の交互作用が左 FFA でのみ認められ, 顔の場合のみ青色顔に比べ自然色顔に対して大きな活動が生じた.

[right FFA:  $F(1, 24) = 98.876, p < 10^{-4}$ ; left FFA:  $F(1, 24) = 74.035, p < 10^{-4}$ ; right OFA:  $F(1, 24) = 80.705, p < 10^{-4}$ ; left OFA:  $F(1, 24) = 55.701, p < 10^{-4}$ ]. 両側の FFA において, 顔色の主効果 (自然色 > 青色) が認められた [right FFA:  $F(1, 24) = 5.543, p < 0.05$ ; left FFA:  $F(1, 24) = 14.868, p < 0.001$ ]. 両側の OFA においては, 顔色の主効果は有意ではなかった [right OFA:  $F(1, 24) = 1.749, p > 0.1$ ; left OFA:  $F(1, 24) = 4.164, p > 0.05$ ]. 本研究で最も重要な形状と色の交互作用は, 左 FFA でのみ有意であった [ $F(1, 24) = 5.577, p < 0.05$ ]. 事後検定の結果, 顔に対してのみ色の単純主効果があり, 青色顔に比べ自然色顔に対して大きな活動が生じた [顔:  $p < 0.05$ ; スクランブル:  $p > 0.4$ ]. 右 FFA および左右 OFA では, 有意な形状と色の交互作用は認められなかった [right FFA:  $F(1, 24) = 2.133, p > 0.1$ ; right OFA:  $F(1, 24) = 0.063, p > 0.8$ ; left OFA:  $F(1, 24) = 0.193, p > 0.6$ ].

## 5.4 考察

本章では fMRI を用いて, 顔処理に関係する脳領域 (FFA と OFA) のなかで, 顔色の処理に携わる脳領域はどこかを調査した. その結果, 両側の FFA は色によって応答が異なり, 色に対する選択性を示した. 一方, 両側の OFA では色選択性は見られなかった. 本章で最も重要な点は, 形状と色の交互作用が左 FFA で見られたことである. この左 FFA での交互作用は, 青色顔に比べ自然色顔に対して, 大きな活動が左 FFA で生じたことに

よるものであった。この結果は、左 FFA は単なる色の違いというよりも、顔色の違いを反映することを示唆する。

4 章の脳波研究で、左後側頭電極で観測された顔選択的 N170 成分は顔色により変調されたのに対して、右後側頭での N170 は変調されなかった。ERP 信号源推定解析を行った研究により、N170 の信号源は紡錘状回に位置することが示唆されている [55, 54]。さらに、ERP-fMRI 同時計測を行った最近の研究 [98] は、FFA と STS の顔選択的応答が、顔選択的 N170 成分と高い相関があると報告した。彼らの研究において、OFA での応答は N170 とは相関がなく、刺激呈示後約 110ms での早期 ERP と相関関係があったと報告している。我々の脳波研究（4 章）と fMRI 研究は ERP-fMRI 同時計測ではなく、それぞれ独立した実験であるものの、これらの知見より、左後側頭 N170 で見られた顔色による変調は、左 FFA で行われた顔色処理を反映したものと考えられる。

本研究では、左右半球の FFA のうち左 FFA でのみ顔色に対する選択性が見られた。いくつかの研究でも、左右半球の FFA が顔処理において異なる役割を担うことが示唆されている。顔の全体処理とパーツ処理では、右 FFA は顔の布置情報の処理に関係し、左 FFA は顔のパーツ処理に関与する [99, 100]。自己顔認識では、自己顔の物理的特性などの低次処理に左 FFA が重要な役割を担い、自己顔の同定に右 FFA が関与する [101]。人種に関する研究は、左 FFA での同人種顔と他人種顔に対する活動差が、同人種顔と他人種顔に対する人種分類精度の差と相関があると報告している [102]。一般的に、顔に対する顔選択的領域の応答は左半球よりも右半球で大きく、顔処理は右半球優位であると言われている [12, 103]。Yovel らは、この顔処理に対する右半球優位性が、顔認識における左視野優性（右視野よりも左視野に顔が呈示され方が、顔が認識し易い）と関係すると報告している [104]。本研究では、顔色の分布は顔の左半分、右半分のどちらかに偏ることなく平等であり、顔を含むすべての刺激画像は被験者に対して中央呈示された。従って、顔色の情報が右視野に偏っていたために左半球の FFA で活動差が生じた、とは考え難い。本研究で左右視野に平等な顔色の情報を与えて、左 FFA で顔色の効果が得られたことから、右視野に入った顔色の情報が顔色の認識に強く作用する可能性が考えられる。

本研究では、FFA での応答は色に対する選択性を示したが、OFA では色の選択性はなかった。Jiang ら [93] の研究は、右半球の顔選択的領域（FFA と OFA）は顔の形状情報に敏感であり、左半球のそれらの領域は顔の形状・表面の両方の処理に関わることを示唆している。顔色は顔の表面情報のひとつであることから、顔色の処理も左半球の顔選択的領域で処理される可能性が高い。脳損傷研究においても、顔処理における FFA と OFA の役割の違いが検討されている [105]。両側 OFA を損傷した患者は、顔の同定や性別、表情の認識などの高次顔処理には機能障害があった。しかし、その患者は、顔に対する高い FFA 活動を示し、テクスチャ情報を用いて顔と顔以外を区別することはできた。加えて、その患者は色を適切に識別することもできた [106]。色覚研究では、紡錘状回内に色の判別に

関係する領域が存在すると言われている [107]. これらの知見より, 色やテクスチャを含む顔の表面情報の処理は主に左 FFA で行われ, 左 OFA はそれらの処理に関与するが, 必要不可欠な領域というわけではないと推測される.

感情処理を担うと言われている偏桃体とともに, 左紡錘状回も感情的刺激の処理に関与するという報告もある [108, 109]. 左偏桃体は怯えた目に対して大きな応答を示し, 左紡錘状回でも同様の応答が生じる [108]. 左紡錘状回と左偏桃体は, 感情的画像処理のための機能的ネットワークを形成し, 左紡錘状回は感情情報依存の画像に対する注意の処理に関与する [109]. 一方, バーチャル顔画像合成に関する研究では, 顔の感情表現に顔色が効果的に作用することが示されている [110, 18]. 「真っ赤になって怒る」, 「恐怖で顔が青ざめる」というような顔色を感情と関連付けた表現を日常的に使用することからも, 表情処理に対する顔色の関与が伺える. 本研究は, 左 FFA において自然な色の顔と青色顔に対して異なる応答が生じることを示した. 本研究で得られた左 FFA での応答の違いは, 青い顔色によって恐怖や悲しみといったネガティブな感情が誘発されたことによって生じた可能性も考えられる.

## 5.5 本章の統括

本章では, 顔色の処理に携わる脳領域を特定することを目的とし, 自然色/青色顔と自然色/青色スクランブル画像に対する脳活動を fMRI により計測した. その結果, 左 FFA での活動が顔色の違いを反映し, 社会性や感情などの処理への関与が予想される顔色の情報を左 FFA が処理する可能性を示した.

## 第 6 章

# 閾下/閾上の恐怖表情処理に 与える顔色の影響

### 6.1 はじめに

3, 4 章では, 顔色を操作した顔刺激を用いて実験を行い, 顔色の処理が顔検出の処理段階で行われ, その顔色の処理に左紡錘状回顔領域 (FFA) が関わることを示唆した. ここで新たな疑問が生じる. 顔色は顔検出以外の顔知覚処理に影響を及ぼすのだろうか. 本章では, 顔処理の早期段階で扱われる顔色の情報が, それ以降の顔処理にどのような影響を与えるのかを調査することを目的とした.

2 章でも述べたように, 顔色は健康状態や表情 (感情) の判断に影響を及ぼすことが, 経験的にも心理物理実験的にも示されている. なかでも「真っ赤になって怒る」「恐怖で顔が青ざめる」という表情が日常的に使用されることから分かるように, 顔色はヒトの感情状態を表す手がかりであるといえる. しかし, 表情の知覚に顔色が影響を及ぼすことを明確に示す研究は少なく [69, 111, 112], もちろんその脳内処理メカニズムも明らかでない. そこで, 本章では顔色が表情の処理に与える影響を, 脳波を用いて検討した.

表情に関しては, これまでに数多くの研究が行われており, 表情のなかでも特に恐怖表情は脅威を示す情報として, 扁桃体によって処理されることが示されている [61, 113, 114]. さらに脳イメージング研究によって, 扁桃体での恐怖表情の処理は, 刺激の呈示が閾下の場合でも行われ, その処理は通常の視覚処理経路 (皮質経路) とは異なる処理経路 (皮質下経路) をたどるということが示されている [115, 114]. Jiang らの閾下の表情処理に関係する場所と経路を調査した研究 [114] では, 顔識別と表情の処理に特化する神経システムが別々に存在することを示唆している. 脳波研究においても, 恐怖表情処理が閾上と閾下で異なることが示されている [63, 64, 65, 116]. Liddell ら [63] は, 表情顔画像を閾下呈示し, 中性表情に比べて恐怖表情に対して N2 成分が増大することを示した. しかし,

Kiss らは [64] 閾下呈示の恐怖表情の効果がより早い 140~180ms に前頭・頭頂で生じることを報告しており, Pegna ら [65] は後側頭部での N170 で生じると報告している.

顔の色情報は特に, 顔の形状情報が曖昧な (高空間周波成分を失った) 場合に, 顔処理に寄与し [117], 無意識的な恐怖表情の処理に関わる扁桃体と皮質下領域は, 顔の高周波数成分よりも低空間周波数成分対して強く反応する [118] と言われている. これらの知見を受けて, 顔色は, 表情の意識的な処理 (閾上処理) よりも無意識的な処理 (閾下処理) に強く影響を及ぼすという仮説を立て, 閾上/閾下呈示した表情 (恐怖表情, 普通の表情) と顔色 (自然な色, 青色) を組み合わせた 4 カテゴリーの顔刺激に対する脳波の振幅と潜時を調査した.

## 6.2 実験方法

### 6.2.1 被験者

成人 15 名 (女性 4 名, 平均年齢 24.2 歳) が被験者として実験に参加した. すべての被験者に対し, 実験内容について十分な説明を行い, 参加の同意を得た上で実験を行った. 15 名のうち 1 名が左利きであった. すべての被験者は正常視力, もしくは矯正視力であった. なお, 本実験は国立大学法人豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする研究」審査会の承認を受け行われた.

### 6.2.2 実験刺激

実験には表情 (普通の表情, 恐怖表情) と顔色 (自然色, 青色) の組み合わせから成る 4 カテゴリーの顔画像 (図 6.1) を使用した. 恐怖で顔が青ざめるという表現があることから, 恐怖表情から連想される色は青であると考え, 顔色は自然色 (肌色) と青色とした. 各画像カテゴリは 20 枚の顔画像から成る. すべての顔画像はアジア人である. これらの顔画像は, 次の手順で作成した.

#### 1. 自然顔色画像の作成

顔画像作成には, 3D 画像ソフトウェア (FaceGen, Singular Inversions Inc.) を使用した. 顔の人種は SE Asian とし, 顔の構成要素を決めるパラメータはランダムに選ぶように設定し, 20 枚の普通の表情の顔画像を作成した. 作成した 20 枚の普通の表情の顔の, 恐怖表情パラメータ (Expression:fear) の値を最大 (1.00) にすることによって, 恐怖表情の顔画像を作成した.

#### 2. 顔画像の加工

1 で作成した顔画像を, PhotoShop を使用して楕円状に加工し, 8bit カラーに減色

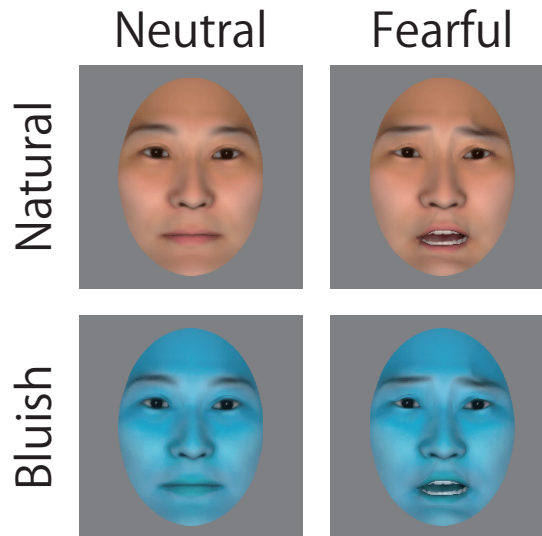


図 6.1 顔刺激の例

表情（普通，恐怖）と顔色（自然，青色）を組み合わせた 4 カテゴリーの顔刺激の例．ここでは 1 人分の顔刺激を示しているが，実験では 20 人分の顔を使用した．

した．

### 3. 顔画像の統制

各顔画像の平均輝度を，全画像の平均輝度 ( $28.64\text{cd}/\text{m}^2$ ) に統制した．その後，各画像の RMS 輝度コントラストを，全画像の平均 RMS 輝度コントラスト (5.67) に統制した．

### 4. 青色顔画像の作成

自然顔色画像の色分布を  $u'v'$  色度図上で白色点を中心とし， $180^\circ$  回転させ（輝度値は固定），青色顔画像を作成した．

普通の表情の顔画像をスクランブル化し（画像の 50 % は自然色顔画像，もう半分は青色顔画像），20 枚のマスク画像を作成した（図 6.2）．マスクが怯えと関係する顔特徴（大きく開いた目など）を含むことを避けるため [64]，スクランブル顔マスクを生成するために普通顔のみを使用した．

上記の手順で作成した 4 カテゴリーのターゲット顔画像 80 枚（4 カテゴリー × 20 枚）と，マスク画像 20 枚を実験で使用了．すべての画像の大きさは視野角  $6.6 \times 9.2^\circ$  とした．画像の背景色はグレー ( $R=G=B=128$ ) とした．刺激呈示は VSG2/5（Cambridge Research System 製）によって制御され，刺激は CRT モニタ（CV921X，TOTOKU 製，解像度  $800 \times 600\text{pixel}$ ，Frame Rate  $100\text{Hz}$ ）に呈示された．被験者はモニタから 75cm の位置に座り，顎代によって位置を固定された．

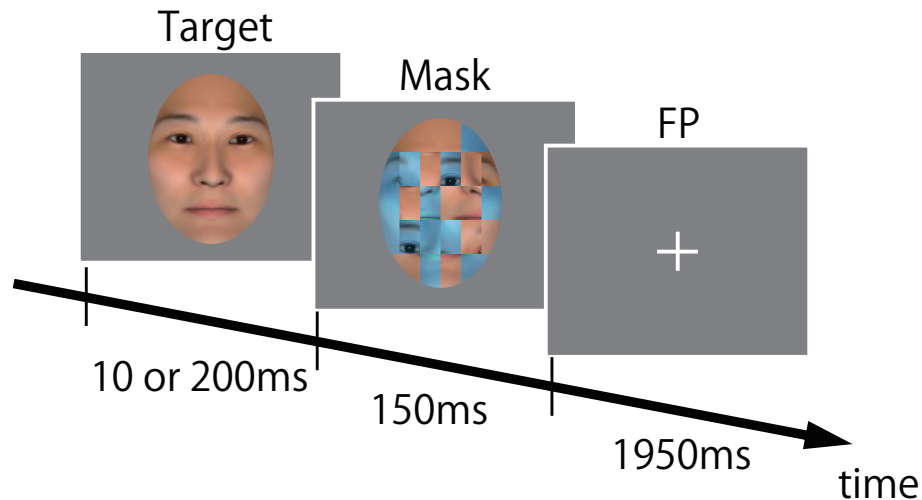


図 6.2 1 試行の刺激呈示の例

顔画像は閾上条件では 200ms，閾下条件では 10ms で呈示され，その後すぐにスクランブル顔マスクが呈示される（150ms 間）。マスクの後に固視点を含むブランク画像が呈示される（1950ms 間）。被験者はブランク画像が呈示されたタイミングで，顔画像の表情が普通だったか，恐怖だったかを判断する。

### 6.2.3 実験手続き

1 試行は，顔画像呈示，マスク画像呈示，ブランク画像（固視点を含む）呈示で構成された（図 6.2）。ターゲットである顔画像は，4 カテゴリーの顔画像セット（4 カテゴリー x 20 画像 = 80 画像）からランダム選ばれ，10ms か 200ms のどちらかの呈示時間がランダムに選ばれ，呈示された。顔画像呈示後，マスク画像（20 枚のスクランブル顔画像からランダムに選択）が 150ms 間呈示され，その後，固視点（視野角  $0.5 \times 0.5^\circ$ ）を中央を含むブランク画像が 1950ms 間呈示された。被験者には，ターゲット顔画像の表情識別課題を与え，顔画像の表情が普通か恐怖かを，ブランク画像が呈示されてからできるだけ早く，ボタン押しで判断させた。表情が認識できない場合は，どちらの表情だったかを予想して回答するように指示した。ボタン押しを行う手は，被験者間で入れかえ，カウンターバランスをとった。

1 ブロックは，80 試行（各顔カテゴリーの出現頻度は同確率，顔画像の呈示時間（10ms か 200ms）の呈示頻度も同確率）から成り，実験全体で 10 ブロック行った。ブロック間には，小休憩を挟んだ。



### 6.2.4 脳波の記録と解析

脳波は 128 電極（基準電極 Cz）の Geodesic sensor net（Electrical Geodesics, Inc., USA）[119] を用い、サンプリング周波数 500Hz で測定した。なお、センサーネット電極と頭皮の間の接触抵抗は電解溶剤（塩化カリウム KCl）水溶液によって低減させ 50k  $\Omega$  以下とした。

時系列の脳波データに対して、Cz 電極基準から全頭皮電極平均基準（average）への再基準化を行い、バンドパスフィルタ（バターワースフィルタ 10 次, 1-30Hz）をかけた。その後、顔画像を呈示したタイミングを 0ms として、顔画像呈示前 100ms から顔画像呈示後 800ms の区間で脳波の切り出しを行った。顔画像呈示前 100ms から 0ms の区間をベースラインとし、ベースライン処理を行った。± 100 $\mu$ V 以上の値を含む試行は眼球運動等のアーチファクトとして除外し、残った試行は被験者ごとに 8 つの条件（表情（普通 or 怯え）× 顔色（自然色 or 青色）× ターゲット呈示時間（10ms or 200ms））に分けた。閾上条件（顔呈示時間 200ms）については、表情識別が正確に行われた試行のみを ERP 解析に用いた。閾下条件（顔呈示時間 10ms）の場合は、表情識別精度がチャンスレベルであった（詳しくは次節に記述）ため、表情識別が正解/不正解に関わらず、すべての試行を ERP 解析で使用した。

表情の閾下/閾上処理における顔色の効果を調査するために、5 つの ERP 成分（P1, N170, P2, N2, P3）に対してピーク（または平均）振幅とピーク潜時を計算した。P1, N170, P2 に対しては、左右半球それぞれ 6 電極で得られた各時間窓での電極間平均のピーク振幅と潜時を求めた。N2 と P3 に対しては、前頭（N2）または中央（P3）の 6 電極で得られた、それぞれの時間窓での平均振幅のみを求めた。これは、N2 と P3 には明確なピークが見られなかったためである。各成分の時間窓と電極位置は結果の節で詳しく記述する。

閾下条件と閾上条件それぞれで得られた 5 つの ERP 成分の振幅と潜時に対して、SPSS（IBM, Armonk, NY, USA）を用いて反復測定分散分析を行った。P1, N170, P2 のピーク振幅に対しては、側性（右, 左）と表情（中性, 恐怖）と顔色（自然色, 青色）を要因とした 3 要因の分散分析を行った。N2 と P3 の平均振幅に対しては、表情と顔色を要因とした 2 要因の分散分析を行った。事後検定の多重比較には Bonferroni 法を用いた。

## 6.3 結果

### 6.3.1 行動データ

閾上条件（ターゲット呈示時間 200ms）での表情識別タスクの正答率は 93.7 %で、チャンスレベル以上であった [50 %;  $t(14) = 29.8, p < 0.001$ ]。それに対し、閾下条件

表 6.1 表情識別課題の応答時間 [ms]

顔色	閾上条件		閾下条件	
	普通表情	恐怖表情	普通表情	恐怖表情
自然色	443.4	433.7	611.4	619.6
青色	468.6	422.1	592.7	601.2

(ターゲット呈示時間 10ms) での表情識別タスクの正答率は 50.1 % とチャンスレベルの正答率であった [ $50\%; t(14) < 1$ ]. 閾上/閾下条件における被験者の表情識別能力をさらに調査するために, 恐怖表情に対する正解応答と中性表情に対する不正解応答を用いて, 信号検出理論の純粋な刺激検出力の指標  $d'$  [120] を算出した. 各被験者に対する  $d'$  値は, 閾下条件では表情画像の自覚的な知覚が不可能であったことを示したのに対し [ $d' = 0.01, t(14) = 0.21, p = 0.84$ ], 閾上条件では知覚が可能であったことを示した [ $d' = 3.51, t(14) = 15.46, p < 0.001$ ]. さらに, 閾上条件での  $d'$  と閾下条件での  $d'$  には有意な差が認められた [ $t(14) = -15.59, p < 0.001$ ]. 閾下/閾上どちらの条件においても, 顔色による  $d'$  の違いは見られなかった [閾上:  $t(14) = 1.84, p = 0.087$ ; 閾下:  $t(14) = 0.22, p = 0.828$ ].

表情識別タスクに対する応答時間を, 閾上/閾下条件それぞれに対して求め (表 6.1), 表情と顔色を要因とする 2 要因反復測定分散分析を行った. 閾上条件では, 表情と顔色の交互作用が見られた [ $F(1, 14) = 11.13, p < 0.01$ ]. 事後検定は, 青色顔の場合, 中性表情よりも恐怖表情に対して応答時間が短いことを示した [ $p < 0.05$ ]. さらに, 中性表情の場合は自然色顔よりも青色顔に対して応答時間が長く [ $p < 0.05$ ], 恐怖表情の場合は逆に青色顔に対して応答時間が短いことを示した [ $p < 0.05$ ]. 閾下条件では, 有意な主効果, 交互作用はなかった [表情:  $F(1, 14) = 0.3, p = 0.59$ ; 顔色:  $F(1, 14) = 3.91, p = 0.068$ ; 交互作用:  $F(1, 14) = 0, p = 0.979$ ].

### 6.3.2 脳波データ

顔処理や表情の処理に関係する ERP 成分 (P1, P2, N170, N2, P3) を求め, 閾上/閾下条件での表情処理に与える顔色の効果を調査した. 図 6.3 に P1 と P2, 図 6.4 に N170, 図 6.5 に N2 と P3 を示す. また, 各成分に対する統計解析結果を表 6.2 にまとめた.

#### P1

視覚刺激の処理を反映する最も早い ERP 成分である P1 について解析を行った. ピーク振幅・潜時を求める時間窓は 90~130ms, 観測電極は左右後頭電極 [左後頭: 58(P7), 59, 65(PO7), 66, 70(O1), 74; 右後頭: 82, 83(O2), 84, 90(PO8), 91, 96(P8)] とした (図 6.3).

3 要因（側性，表情，顔色）分散分析の結果，閾下条件での P1 ピーク振幅に対して，側性の主効果が認められ [ $F(1, 14) = 7.022, p < 0.05$ ]，左後頭よりも右後頭で大きな P1 ピーク振幅が生じた．P1 ピーク振幅，潜時において，その他の有意な主効果または交互作用は認められなかった．

## P2

時間窓を 180～260ms，観測電極を左右後頭電極 [左後頭: 58(P7), 59, 65(PO7), 66, 70(O1), 74; 右後頭: 82, 83(O2), 84, 90(PO8), 91, 96(P8)] として（図 6.3），P2 ピーク振幅・潜時を求め，3 要因（側性，表情，顔色）分散分析を行った．

閾上条件の P2 ピーク振幅には，表情の主効果があり [ $F(1, 14) = 11.736, p < 0.005$ ]，普通表情に比べ恐怖表情に対して大きな P2 振幅が生じた．閾上条件の P2 ピーク振幅においては，その他に有意な主効果，交互作用は見られなかった．P2 ピーク振幅では，その他の有意な主効果や交互作用は見られなかった．

閾上条件の P2 ピーク振幅には，表情の主効果があり [ $F(1, 14) = 8.939, p < 0.01$ ]，普通表情に比べ恐怖表情に対して潜時が遅延した．閾下条件の P2 ピーク振幅にも，表情の主効果があり [ $F(1, 14) = 6.139, p < 0.05$ ]，恐怖表情に対する潜時が遅延した．P2 ピーク潜時では，その他の有意な主効果や交互作用は見られなかった．

## N170

時間窓を 130～200ms，観測電極を左右後側頭電極 [左後側頭: 57(TP9), 58(P7), 63, 64(P9), 65(PO7), 69; 右後側頭: 89, 90(PO8), 95(P10), 96(P8), 99, 100(TP10)] として（図 6.4），N170 ピーク振幅・潜時を求め，3 要因（側性，表情，顔色）分散分析を行った．

閾上条件の N170 ピーク振幅には，顔色の主効果があり [ $F(1, 14) = 6.262, p < 0.05$ ]，自然色顔に比べて青色顔に大きな振幅が生じた．閾下条件の N170 ピーク振幅にも，顔色の主効果が認められたが [ $F(1, 14) = 6.673, p < 0.05$ ]，振幅の大小関係は閾上条件とは反対で，自然色顔に比べて青色顔に小さな振幅が生じた．閾上/閾下条件ともに，N170 ピーク振幅にはその他の有意な主効果および交互作用は見られなかった．

閾上条件の N170 ピーク潜時には，表情の主効果があり [ $F(1, 14) = 32.106, p < 0.0001$ ]，普通表情に比べて恐怖表情で N170 潜時が遅延した．さらに，閾上条件の N170 ピーク潜時には，有意な側性と表情と顔色の交互作用が認められた [ $F(1, 14) = 6.977, p < 0.05$ ]．この交互作用に対する事後検定の結果，恐怖表情の場合に側性と顔色の単純交互作用が認められ [ $F(1, 14) = 10.1, p < 0.001$ ]，右後側頭での N170 潜時は自然色顔の恐怖表情に比べて青色顔の恐怖表情に対して遅延した [ $p < 0.05$ ]．また，青色顔の場合に半球と表情の単純交互作用があり [ $F(1, 14) = 6.04, p < 0.05$ ]，左後側頭での N170 潜時は青色顔の普通表情に比べて青色顔の恐怖表情に対して遅延した [ $p < 0.0001$ ]．

閾下条件の N170 潜時には、顔色の主効果があり [ $F(1, 14) = 7.013, p < 0.05$ ], 自然色顔に比べ青色顔に対して N170 潜時が遅延した。この閾下条件の N170 潜時では、本研究で最も重要な表情と顔色の交互作用が有意であった [ $F(1, 14) = 5.17, p < 0.05$ ]。この交互作用に対する事後検定の結果、青色顔の場合に表情の単純主効果があり [ $F(1, 14) = 10.04, p < 0.01$ ], 普通表情に比べて恐怖表情に対して潜時が遅延した。また、恐怖表情の場合に顔色の単純主効果があり [ $F(1, 14) = 8.051, p < 0.05$ ], 自然色顔に比べて青色顔に対して潜時が遅延した。閾上/閾下条件ともに、有意なその他の主効果および交互作用はなかった。

## N2

時間窓を 180~260ms, 観測電極を前頭 6 電極 [5, 6(FCz), 11(Fz), 12, 15, 16(AFz)] として (図 6.5), N2 平均振幅を求め、2 要因 (表情, 顔色) の分散分析を行った。

閾上条件の N2 振幅には、表情の主効果があり [ $F(1, 14) = 8.321, p < 0.05$ ], 普通表情に比べて恐怖表情に対して小さな振幅が生じた。閾上条件では、その他の主効果や交互作用は見られなかった。閾下条件での N2 振幅には、有意な主効果や交互作用は一切見られなかった。

## P3

時間窓を 400~600ms, 観測電極を頭頂 6 電極 [31, 54, 55(CPz), 79, 80, 129(Cz)] として (図 6.5), P3 平均振幅を求めて、2 要因 (表情, 顔色) の分散分析を行った。

閾上条件では、表情の主効果があり [ $F(1, 14) = 17.43, p < 0.001$ ], 普通表情に比べて恐怖表情に対して大きな P3 振幅が生じた。閾上条件では、その他の主効果や交互作用は見られなかった。閾下条件での P3 振幅には、有意な主効果や交互作用は一切見られなかった。

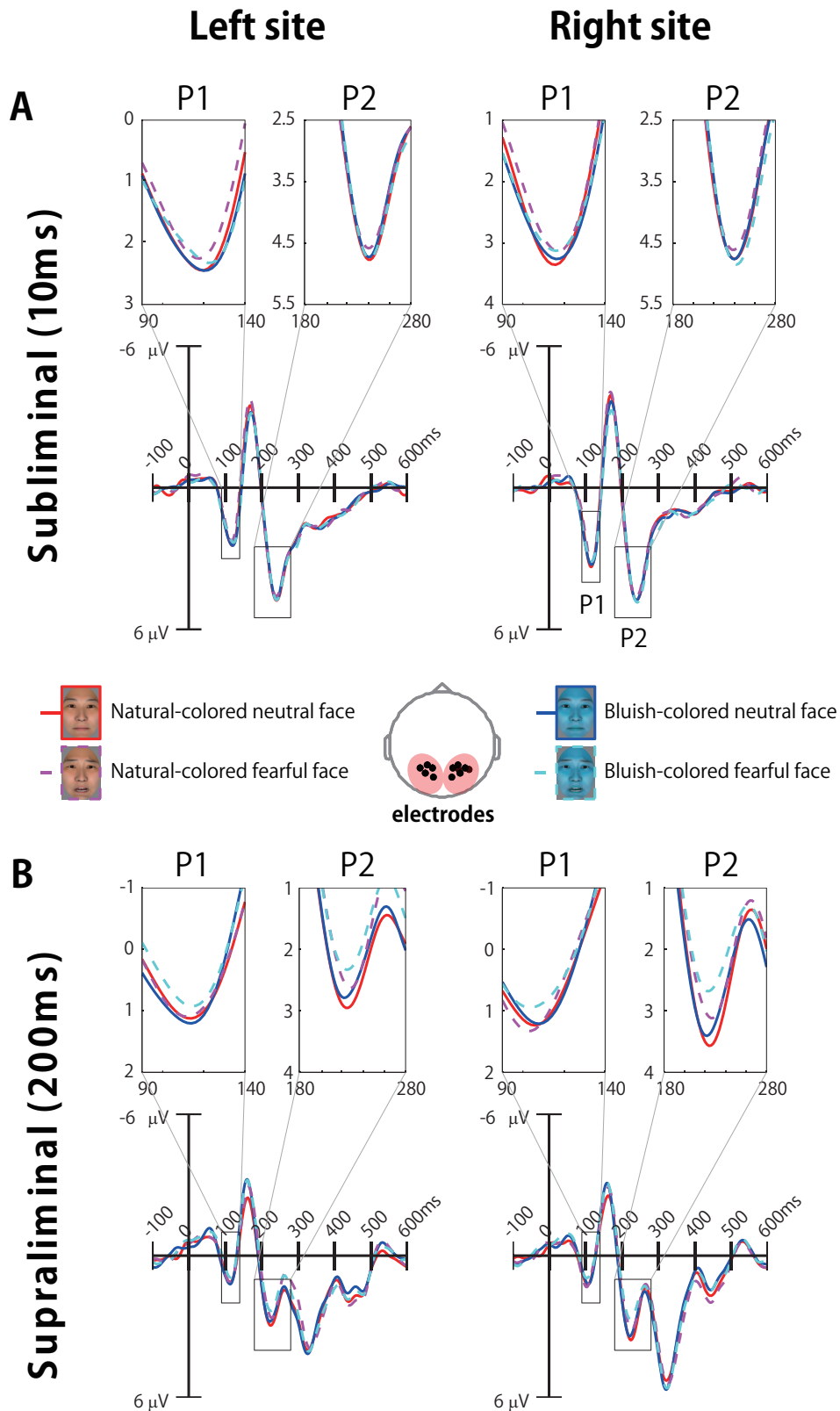


図 6.3 閾下/閾上条件における P1 と P2 成分

閾下 (A), 閾上 (B) 条件での後頭電極 ERP 波形と P1, P2 成分 (右列: 右後電極平均; 左列: 左後頭電極平均)。赤実線は自然な色の中性表情, 青実線は青色の中性表情, マゼンタ破線は自然な色の恐怖表情, シアン破線は青色の恐怖表情に対する応答を示す。図の中央部に観測電極を示す。

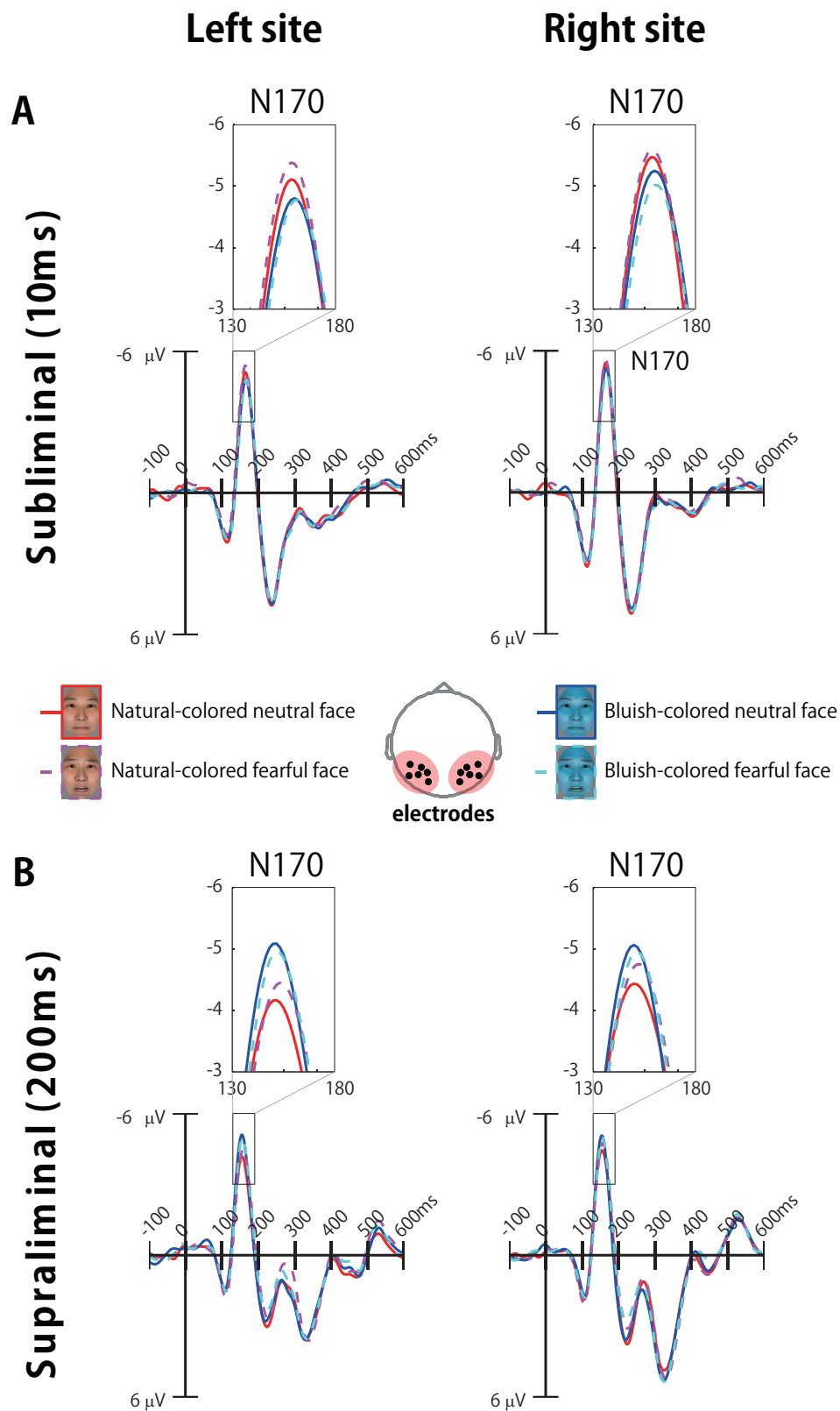


図 6.4 閾下/閾上条件における N170 成分

閾下 (A), 閾上 (B) 条件での後側頭電極 ERP 波形と N170 成分 (右列: 右後側電極平均; 左列: 左後側電極平均). 赤実線は自然な色の中性表情, 青実線は青色の中性表情, マゼンタ破線は自然な色の恐怖表情, シアン破線は青色の恐怖表情に対する応答を示す. 図の中央部に観測電極を示す.

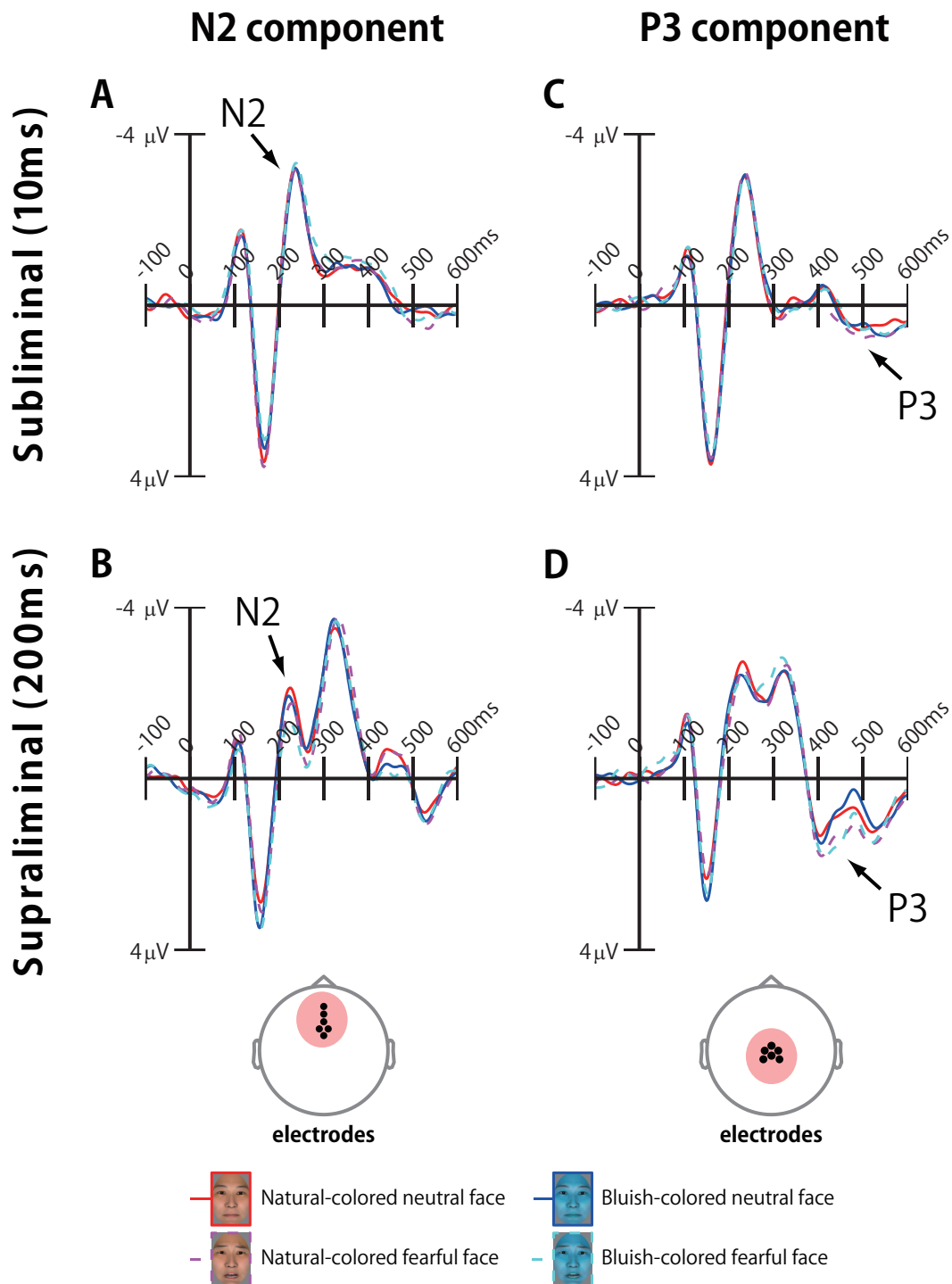


図 6.5 閾下/閾上条件における N2 と P3 成分

前頭電極での ERP 波形と N2 成分 (A: 閾上条件; B: 閾下条件) と頭頂電極での ERP 波形と P3 成分 (C: 閾上条件; D: 閾下条件). 赤実線は自然な色の中性表情, 青実線は青色の中性表情, マゼンタ破線は自然な色の恐怖表情, シアン破線は青色の恐怖表情に対する応答を示す. 図下部にそれぞれの観測電極を示す.

表 6.2 分散分析結果 (p 値) のまとめ

P1, N170, P2, N2, P3 の振幅・潜時に対する分散分析の結果 (p 値と有意であった場合の大小関係) のまとめ. グレー背景は  $p < 0.05$ であることを示す.

要因	振幅			潜時				
	P1	N170	P2	N2	P3	P1	N170	P2
閾上条件								
側性	0.422	0.392	0.193	—	—	0.266	0.342	0.147
表情	0.134	0.519	0.004 恐怖 < 普通	0.012 恐怖 < 普通	0.001 恐怖 > 普通	0.633	0.000 恐怖 > 普通	0.010 恐怖 > 普通
顔色	0.541	0.025 青色 > 自然色	0.240	0.104	0.312	0.608	0.113	0.163
表情 × 顔色	0.257	0.263	0.498	0.551	0.924	0.986	0.883	0.616
側性 × 表情	0.315	0.432	0.775	—	—	0.429	0.640	0.821
側性 × 顔色	0.860	0.191	0.498	—	—	0.080	0.100	0.132
半球 × 表情 × 顔色	0.739	0.560	0.892	—	—	0.762	0.01	0.740
閾下条件								
側性	0.019 右 > 左	0.384	0.990	—	—	0.562	0.689	0.315
表情	0.206	0.595	0.728	0.315	0.078	0.995	0.082	0.027 恐怖 > 普通
顔色	0.169	0.022 青色 < 自然色	0.875	0.901	0.365	0.888	0.019 青色 > 自然色	0.755
表情 × 顔色	0.888	0.130	0.566	0.638	0.108	0.424	0.039	0.387
側性 × 表情	0.766	0.299	0.706	—	—	0.277	0.079	0.826
側性 × 顔色	0.974	0.680	0.994	—	—	0.475	0.140	0.421
半球 × 表情 × 顔色	0.960	0.734	0.122	—	—	0.190	0.152	0.553



## 6.4 考察

本章では、顔色が閾下/閾上の表情処理に与える影響を脳波を用いて検討した。表情と顔色が異なる4種類の顔画像（自然色-普通表情，自然色-恐怖表情，青色-普通表情，青色-恐怖表情）に対する表情判別課題中のERPを，閾上呈示条件と閾下呈示条件のそれぞれで比較した。閾上/閾下条件での表情処理に与える顔色の影響を調査するために，顔処理と表情処理に関係するERPの各成分（P1，N170，P2，N2，P3）の振幅と潜時に対して分散分析を行った（表6.2）。その結果，顔色は表情の閾上処理よりも閾下処理に強く影響を及ぼすという仮説と一致して，閾下条件でのみN170潜時において表情に対する顔色の効果が生じた。

表情の効果に着目すると，閾上条件ではN170，P2，N2，P3の振幅もしくは潜時において表情（普通，恐怖）による差が生じた。閾上呈示された普通表情に比べて恐怖表情に対して，P3振幅が増大するという結果は，これまでの恐怖表情の閾上/閾下処理に関する脳波研究[63, 64, 65]と一致する。この後期成分P3は，感情的な情報の意識的な評価と統合に関わる高次の表情処理段階を反映すると考えられており[63, 64]，本研究のP3に関する結果もこの考えを支持する。閾上条件では，P3だけでなくP2とN2成分にも表情により違いが生じた。これらの成分は，普通表情に比べて恐怖表情に対して小さな振幅が生じ，この結果はStekelenburgら[121]の報告と一致する。表情の検出は刺激呈示後200msあたりで生じるとも言われており[122]，潜時200ms付近の成分であるP2とN2で見られた表情による違いは表情検出処理を反映したものと考えられる。

閾下条件では，P2潜時のみで表情により差が生じた。先行研究により，恐怖表情の閾下処理は，140～180msの前頭成分やN170，N2といった比較的早いERP成分に反映されることが示唆されている[63, 64, 65]が，これらの結果には一貫性がない。一方で，多くのニューロイメージング研究が，閾下呈示された感情的な顔は，自覚的に検出せれずとも，自動的に脳内処理されることを示唆している。これらの感情的刺激に対する自動的な処理は，上丘-視床-扁桃体を含む皮質下経路をたどる[123, 115, 114]。扁桃体を始めとして皮質下経路は脳の深部に位置するため，頭皮上で記録するERPによって，そこでの活動を敏感に捉えることは困難である。そのことが，閾下の表情処理に関するERP研究の結果の一貫性の無さの原因のひとつであろう。

顔色の効果に着目すると，閾下/閾上どちらの条件でもN170の振幅と潜時に顔色（自然色，青色）による差が生じた。閾上条件では，左後側頭でのN170振幅が自然色顔に比べ青色顔に対して増大し，4章の左後側頭N170が顔色の違いを反映するという結果と一致する。一方，閾下条件では，右後側頭N170振幅が自然色顔に比べ青色顔に対して減少

するという閾上条件と正反対の効果が見られた。これらの違いから、閾上と閾下では異なる顔色の処理が行われると推測される。顔以外の物体に対する N170 は、顔に対してよりも振幅が小さく、潜時が遅延する [39]。閾下条件での青色顔に対して振幅が小さく、潜時が遅延するという N170 の変調は、この顔以外の物体に対する N170 の変調と同じ傾向といえ、青色顔には顔の倒立効果で見られるような顔以外の物体に近い処理 [10] が適応されたと考えられる。正立顔には非常に特化した処理メカニズムが存在し、その処理メカニズムは自覚的な認識が阻害された場合（閾下）でさえ駆動するが、倒立顔は顔以外の物体と認識されるため、倒立顔に対しては駆動されない [124]。本研究の結果は、青色顔に対して、この正立顔に特化した処理メカニズムが閾上条件では駆動され、閾上条件では駆動されなかったことを示唆する。つまり、閾上では青色顔は顔として処理されたが、閾下では青色顔は顔色が極端に不自然なことによって、そもそも顔としての処理ではなく、顔以外の物体として処理されたと考えられる。

本研究において最も重要な、表情処理における顔色の影響を示す表情と顔色の交互作用が、閾下条件での N170 潜時で見られ、自然色顔に比べて青色顔に対して潜時の遅延が生じた。この結果は、顔色と表情の閾下処理に関わる神経ネットワークに重なりがあり、恐怖表情の処理が青い顔色によって抑制されたことを示唆する。閾上呈示条件での早期処理段階における表情との交互作用は、顔の親近性で生じ、その効果が N170 成分に反映されると報告されている [125, 126]。本実験で用いた青色顔は、実社会では存在しない不自然な顔色であると言える。したがって、閾下条件での青色顔は、閾上条件での親しみのない顔と同様の役割を果たしたのではないかと。しかし、顔色と表情の交互作用は閾上条件では有意ではなかった。上述したように、閾上と閾下で顔色の効果も異なった。これらの ERP の結果より、顔色は皮質下経路をたどる感情情報により影響を与える傾向にあると推測される。しかし、表情識別課題の応答時間には、閾上条件において顔色と表情の有意な交互作用があり、青い顔色が恐怖表情判断を促進させる効果が見られた。これらの行動データと ERP での結果の食い違いに関しては、今後さらなる検討が必要である。

## 6.5 本章の統括

本研究は、顔色が恐怖表情の閾下処理に影響を与えるという新たな電気生理学的知見を示した。本実験では、自然色顔と青色顔を使用し、青色顔の場合には、顔色が不自然なことによって、閾下呈示の恐怖表情に対する効率的で速い処理が抑制されることを示した。しかし、行動データと ERP での結果の食い違いが生じた。実社会で存在する自然な顔色の範囲内の顔色刺激を用いることで、この食い違いが解消され、さらなる表情と顔色の関係性の解明が望めると考える。

## 第 7 章

# 顔知覚処理における 表情と顔色の関係

### 7.1 はじめに

第 6 章では、恐怖表情の閾下知覚に顔色が影響を与えることを示した。6 章では、自然な顔色と不自然な（青い）顔色の刺激を用いたため、表情状処理を促進させるような効果が得られなかったと考えられる。しかし、実社会で存在する得る顔色の範囲内の顔色刺激を用いることで、表情処理を促進させる顔色の効果が生じると予想される。そこで、本章では表情処理を促進させる顔色の効果が存在するかどうかを、心理物理実験により検証した。

感情はヒトの心的状態だけでなく、身体にも影響を及ぼす。感情状態の変化に伴い、心拍、血圧などの生理的応答が変化し、顔色も変化する。様々な感情状態時の顔色（または顔血流量）を計測した研究 [16, 17, 18, 19] が、怒りの感情状態で顔の赤みが増す（紅潮する）と報告している。一方で、発作的な激しい怒り [20] や恐怖と怒りが入り混じった場合 [21] など、場合によっては顔面蒼白が生じることも報告されている。顔の紅潮は、交感神経系の興奮による血管の拡張により生じ [22, 23]、顔面蒼白は交感神経の興奮による血管の収縮により生じる。黒田らは、喜びの情動下でも顔の赤みが増すと報告している [17]。このように、顔色はヒトの感情状態を反映して変化する。では、他者の顔から感情状態を読み取る際に、顔色の情報は寄与するのだろうか。Drummond[21] は、顔色と感情に関するアンケート調査を行い、紅潮は怒り、蒼白は恐怖と関連付けられたと報告しており、顔色と感情との間に経験則的な関係性があることを示している。さらに、鈴木らの研究 [69] は、喜びの表情の場合、顔の赤みを増加させると喜び評定値が増加し、悲しみの表情の場合、顔の青みを増加させると悲しみ評定値が増加すると報告しており、知覚的にも顔色が表情に影響を与えることを示唆している。しかし、鈴木らの評定実験は非常に複雑で、ま

ず基準画像の表情から、20種類もの感情を表す言葉（「嬉しい」、「腹立たしい」、「沈んだ」など）が読み取れるか否かを判定させ、読み取れ場合には、基準画像と表情は同じで顔色を変化させた画像に対して、基準画像と比べて読み取れた感情が弱まった、やや弱まった、変わらない、やや強まった、強まったの5段階で判断させるというものであった。そこで本研究では、評定実験よりも単純である2AFC（2者強制選択）法を用いて、表情の知覚における顔色の影響を調査した。

本研究では、顔色が表情知覚に与える影響（実験1）と表情が顔色知覚に与える影響（実験2）を調査することにより、顔知覚における顔色と表情との関係を検討した。実験1では、2つの異なる表情のモーフィング顔画像に対する表情判別課題を行った。実験2では、顔色を段階的に変化させた顔画像に対する顔色判別課題を行った。

## 7.2 実験1：表情知覚に与える顔色の影響

### 7.2.1 実験方法

#### 被験者

成人20名（女性10名、平均年齢23.3歳）が被験者として実験に参加した。すべての被験者に対し、実験内容について十分な説明を行い、参加の同意を得た上で実験を行った。すべての被験者は右利きで、正常視力もしくは矯正視力であった。なお、本実験は国立大学法人豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする研究」審査会の承認を受け行われた。

#### 実験刺激

男性モデル1名、女性モデル1名それぞれの4種類の（恐怖、怒り、悲しみ、喜び）顔表情画像をATR顔表情データベース（<http://www.atr-p.com/face-db.html>）から取得した。顔画像から顔以外の特徴（首、耳、髪など）をPhotoshop CS2（Adobe Systems Inc., San Jose, CA, USA）を用いて取り除いた。元画像の顔色を基準として、顔画像の肌領域のCIE Lab  $a^*$ 値（赤-緑軸）、 $b^*$ 値（黄-青軸）を操作することによって、各表情について次の3条件の顔色画像を作成した。

1. 赤みがかった顔色（ $a^*+12$ ）
2. 自然な顔色（色操作なし； $a^*, b^* \pm 0$ ）
3. 青みがかった顔色（ $b^*-12$ ）。

青みがかった顔色と関連があると予想される表情（恐怖、悲しみ）と、赤みがかった顔色と関連があると予想される表情（怒り、喜び）をペアにして、2種類の表情対（恐怖-怒

り、悲しみ-喜び)を作成した。同じ顔色条件の表情対画像(同じ人物)を、SmartMorph software (MeeSoft, <http://meesoft.logicnet.dk/>)を用いてモーフィングし、11段階(0~10; 等間隔)の表情画像群を作成した。合計で、132枚(3顔色×11表情段階×2表情対×2顔モデル)の顔画像を実験で使⽤した(図7.1, 7.2)。各画像の平均輝度とRMS輝度コントラストは、すべての画像間で等しくなるように統制した。すべての刺激の大きさは、219×243 pixels(視野角11.0°×12.2°)であった。顔刺激はニュートラルグレー背景の中央に配置された。

### 実験手続き

実験セッションは表情対ごと、男性/女性顔ごとに行った。つまり、実験2は以下の4セッションで構成された。

1. 男性顔 恐怖-怒り表情対(図7.1A)
2. 男性顔 悲しみ-喜び表情対(図7.1B)
3. 女性顔 恐怖-怒り表情対(図7.2A)
4. 女性顔 悲しみ-喜び表情対(図7.2B)

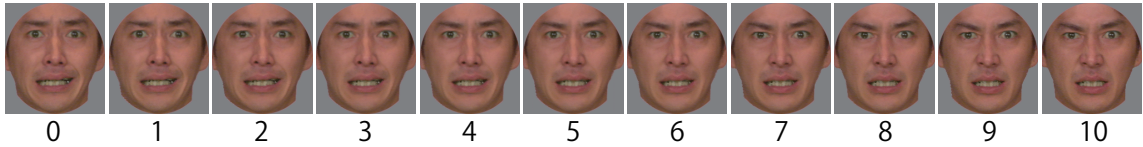
各セッションでは、33枚(3顔色×11表情段階)の顔画像を8試行ずつランダムな順番で呈示した(264試行/セッション)。実験セッションの順番は被験者ごとにランダムとした。実験セッションの前に、各画像の試行数を1回とした練習セッションを行った。各試行は250msの固視点の呈示で始まり、そのあとにブランクが250ms呈示され、その後顔画像が300ms呈示された。その後、白い四角形が1700ms呈示された(7.3)。被験者は、呈示された顔画像の表情を2者強制選択(恐怖 or 怒り, 悲しみ or 喜び)し、可能な限り早く、正確に応答する表情判別課題を行った。被験者の応答は、顔刺激呈示をオンセットし、2000msの間受け付けられた。応答は手元の2つのボタンで行い、ボタンの位置と表情との対応は被験者間でカウンターバランスを取った(ある被験者は右ボタンが恐怖、左ボタンが怒り、ある被験者はその対応が逆)。

### データ解析

各顔刺激に対しする表情判別率と平均応答時間を求めた。表情判別における顔色の効果を検討するために、各顔色条件の表情対画像群に対する表情判別率をロジット関数(二項分布の一般線形モデル)でフィッティングし、表情判別率が50%となる主観的等価点(PSE: point of subjective equality)を被験者ごとに求めた(図7.4)。各表情対(恐怖-怒り, 悲しみ-喜び)のPSEに対して、被験者の性別(男, 女)を被験者要因、刺激の性別(男, 女)と顔色(赤みがかった顔色, 自然な顔色, 青みがかった顔色)を被験者内要因とする混合3要因分散分析を行った。

## A. Fear-to-anger morph

Reddish-colored



Natural-colored



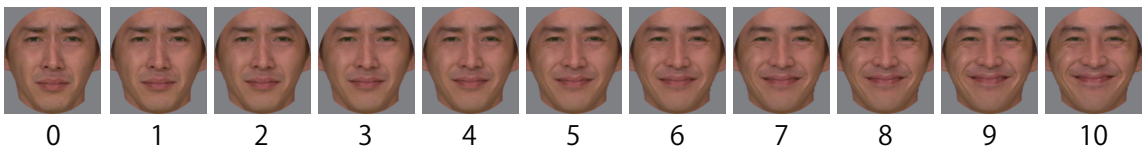
Bluish-colored



100% 90/10 80/20 70/30 60/40 50/50 40/60 30/70 20/80 10/90 100%  
Fear Fear/anger Anger

## B. Sad-to-happy morph

Reddish-colored



Natural-colored



Bluish-colored



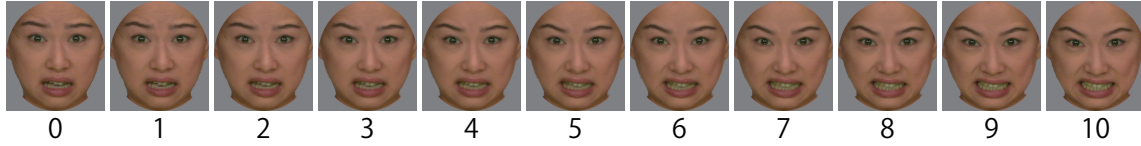
100% 90/10 80/20 70/30 60/40 50/50 40/60 30/70 20/80 10/90 100%  
Sad Sad/happy Happy

図 7.1 男性顔の表情対画像群

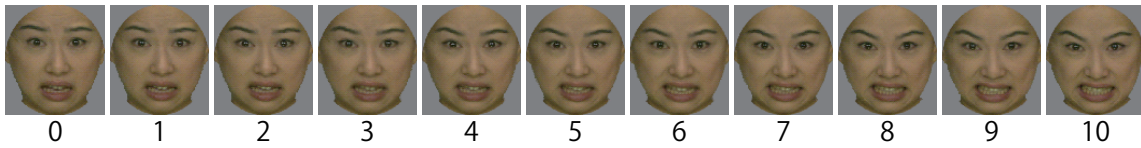
男性顔の3色条件の表情対画像群。3つの色条件ごとに、2つの異なる表情をモーフィングして、11段階の表情画像を作成した。恐怖-怒り表情対画像群（A）、悲しみ-喜び表情対画像群（B）。

## A. Fear-to-anger morph

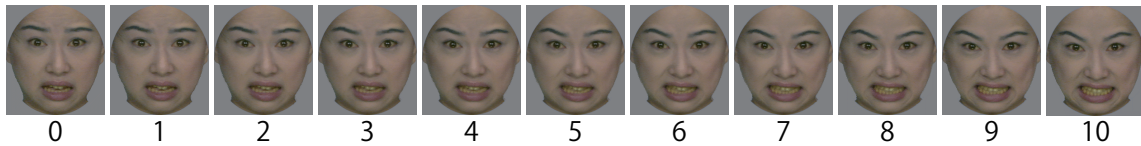
Reddish-colored



Natural-colored



Bluish-colored



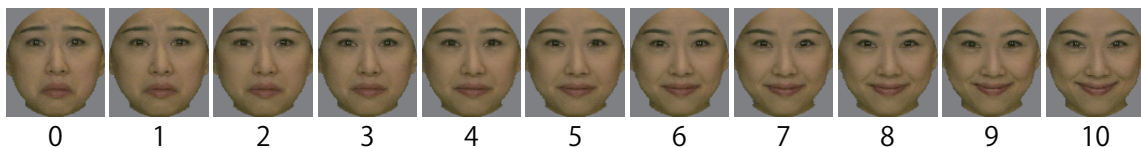
100% 90/10 80/20 70/30 60/40 50/50 40/60 30/70 20/80 10/90 100%  
Fear Fear/anger Anger

## B. Sad-to-happy morph

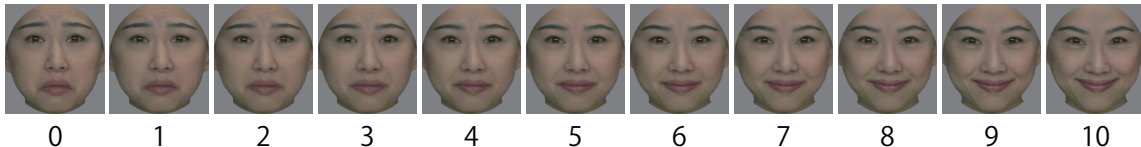
Reddish-colored



Natural-colored



Bluish-colored



100% 90/10 80/20 70/30 60/40 50/50 40/60 30/70 20/80 10/90 100%  
Sad Sad/happy Happy

図 7.2 女性顔の表情対画像群

女性顔の 3 顔色条件の表情対画像群. 3 つの顔色条件ごとに, 2 つの異なる表情をモーフィングして, 11 段階の表情画像を作成した. 恐怖-怒り表情対画像群 (A), 悲しみ-喜び表情対画像群 (B).



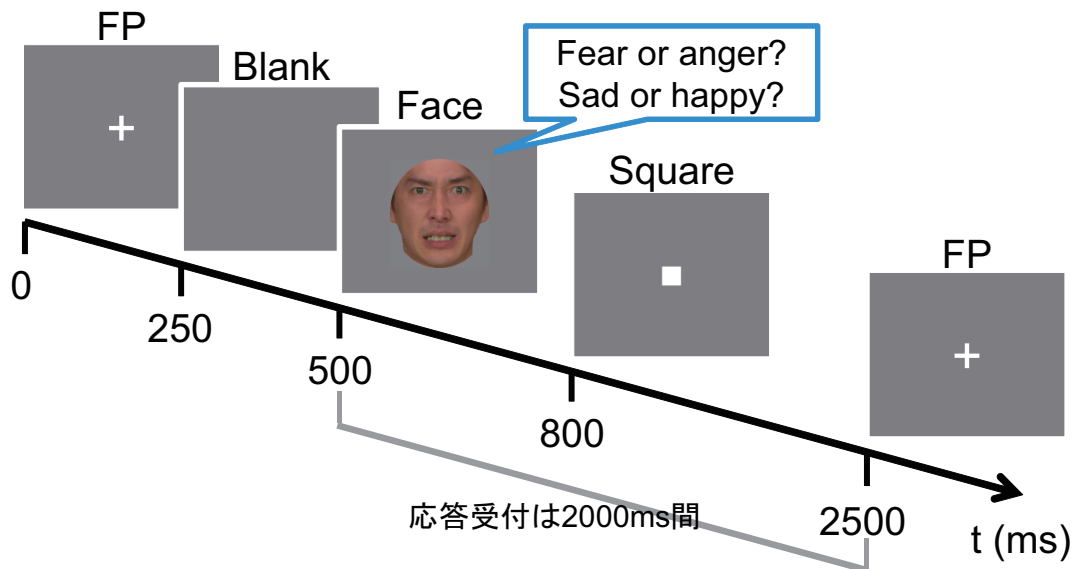


図 7.3 実験 1 の 1 試行の刺激呈示の例

各試行は 250ms の固視点の呈示で始まり，そのあとにブランクが 250ms 呈示され，その後顔画像が 300ms 呈示された．その後，白い四角形が 1700ms 呈示された．被験者は，呈示された顔画像の表情を 2 者強制選択（恐怖 or 怒り，悲しみ or 喜び）した．被験者の応答受付区間は，顔刺激呈示から 2000ms であった．

応答時間に関しては，表情対（恐怖-怒り，悲しみ-喜び）ごとに，顔色（赤みがかった顔色，自然な顔色，青みがかった顔色）と表情段階（11 段階）を要因として，2 要因反復測定分散分析を行った．事後検定には Bonferroni 法を用いた．反復測定分散において，球形性の仮定が成立しない場合には，Greenhouse-Geisser によって自由度を補正し，有意性の検定を行った．これらの統計検定には SPSS（IBM, Armonk, NY, USA）を用いた．

## 7.2.2 結果

### PSE（主観的等価点）

表情対画像群の各刺激に対する表情判別率（恐怖-怒り条件では怒り判別率，悲しみ-喜び条件では喜び判別率）を被験者ごとに求め，そこから PSE を算出した（図 7.4 PSE の算出例）．各表情対条件（恐怖-怒り，悲しみ-喜び）に対する PSE の被験者間平均を図 7.5 に示す．恐怖-怒り条件では，各顔色条件の表情対画像群に対する PSE が大きいほどその画像群に対する恐怖判別率が高いことを示し，小さいほど怒り判別率が高いことを示す．悲しみ-喜び条件では，PSE が大きいほど悲しみ判別率が高いことを示し，小さいほど喜び判別率が高いことを示す．なお，被験者 2 名（女性 1 名）は表情判別パターンが他の被験者と著しく異なったため，統計解析から除外した．従って，以降の統計解析は 18 名のデータに対して行った．



恐怖-怒り条件では、顔色の主効果があり [ $F(2, 32) = 21.148; p < 10^{-4}$ ], 青みがかった顔色と自然な顔色に比べて、赤みがかった顔色に対して PSE が小さかった [どちらも,  $p < 10^{-4}$ ]. つまり、赤みがかった顔色の表情対画像群は、高確率で怒りと判断された。青みがかった顔色と自然な顔色の PSE には有意な差はなかった [ $p > 1$ ] (図 7.5A). さらに、恐怖-怒り条件では、被験者の性別  $\times$  顔色  $\times$  刺激の性別の交互作用があった [ $F(2, 32) = 3.558; p < 0.05$ ]. 男性刺激に対して、被験者の性別  $\times$  顔色の単純交互作用があり [ $F(2, 32) = 4.92; p < 0.05$ ], 赤みがかった男性顔に対する PSE は、青みがかった男性顔と自然な色の男性顔に比べて小さかった [赤  $<$  青:  $p < 10^{-4}$ ; 赤  $<$  自然:  $p < 0.01$ ]. 青みがかった男性顔と自然な顔色の男性顔の間にも有意な PSE の差があった [青  $>$  自然:  $p < 0.05$ ]. 女性被験者に対して、顔色  $\times$  刺激の性別の単純交互作用があり [ $F(2, 32) = 4.5; p < 0.05$ ], 赤みがかった男性顔に対する PSE は、青みがかった男性顔と自然な色の男性顔に比べて小さかった [赤  $<$  青:  $p < 0.05$ ; 赤  $<$  自然:  $p < 10^{-4}$ ]. 青みがかった男性顔と自然な顔色の男性顔の間には PSE に有意な差はなかった [ $p > 0.08$ ] (図 7.6). その他に有意な主効果や交互作用はなかった。

悲しみ-喜び条件では、顔色の主効果があり [ $F(2, 32) = 8.75; p < 10^{-3}$ ], 青みがかった顔色に対する PSE は、赤みがかった顔色と自然な顔色に比べて有意に大きかった [青  $>$  赤:  $p < 0.01$ ; 青  $<$  自然:  $p < 0.05$ ]. つまり、青みがかった顔色の表情対画像群は、悲しみ表情と判別される確率が高かった。赤みがかった顔色と自然な顔色の間には有意な PSE の差はなかった [赤 vs. 自然:  $p > 0.3$ ] (図 7.5B). その他に有意な主効果や交互作用はなかった。

### 応答時間

恐怖-怒り条件では、顔色の主効果があり [ $F(1.96, 33.24) = 6.6; p < 0.005$ ], 赤みがかった顔色は自然な顔色よりも応答時間が短かった [赤  $<$  自然:  $p < 0.05$ ] (図 7.12A). 表情段階の主効果も有意であった [ $F(2.56, 43.56) = 16.22; p < 10^{-4}$ ]. さらに、顔色  $\times$  表情段階の交互作用があり [ $F(6.66, 113.25) = 6.91; p < 10^{-4}$ ], 表情段階 4 以外で顔色の単純主効果があった [段階 7, 9:  $p < 10^{-4}$ ; 段階 0, 8, 10:  $p < 0.005$ ; 段階 2:  $p < 0.01$ ; 段階 1, 3, 5, 6:  $p < 0.05$ ; 段階 4:  $p > 0.3$ ]. 顔色の単純主効果があった表情段階に対して、多重比較を行った結果を表 7.1 上段, 図 7.7A に示す。恐怖表情の割合が高い表情段階では、青みがかった顔色に対する応答時間が短く、怒り表情の割合が高い表情段階では、赤みがかった顔色に対する応答時間が短いという顔色の効果が見られた。

悲しみ-喜び条件では、顔色の主効果は有意ではなく、表情段階の主効果は有意であった [ $F(1.17, 29.80) = 22.50; p < 10^{-4}$ ]. さらに、顔色  $\times$  表情段階の交互作用があり [ $F(8.33, 141.58) = 4.48; p < 10^{-4}$ ], 表情段階 0, 1, 2, 3, 6, 9, 10 で顔色の単純主効果があった [段階 0:  $p < 10^{-4}$ ; 段階 1, 3:  $p < 0.005$ ; 段階 2:  $p < 0.01$ ; 段階 6, 9:  $p < 0.05$ ; 段階

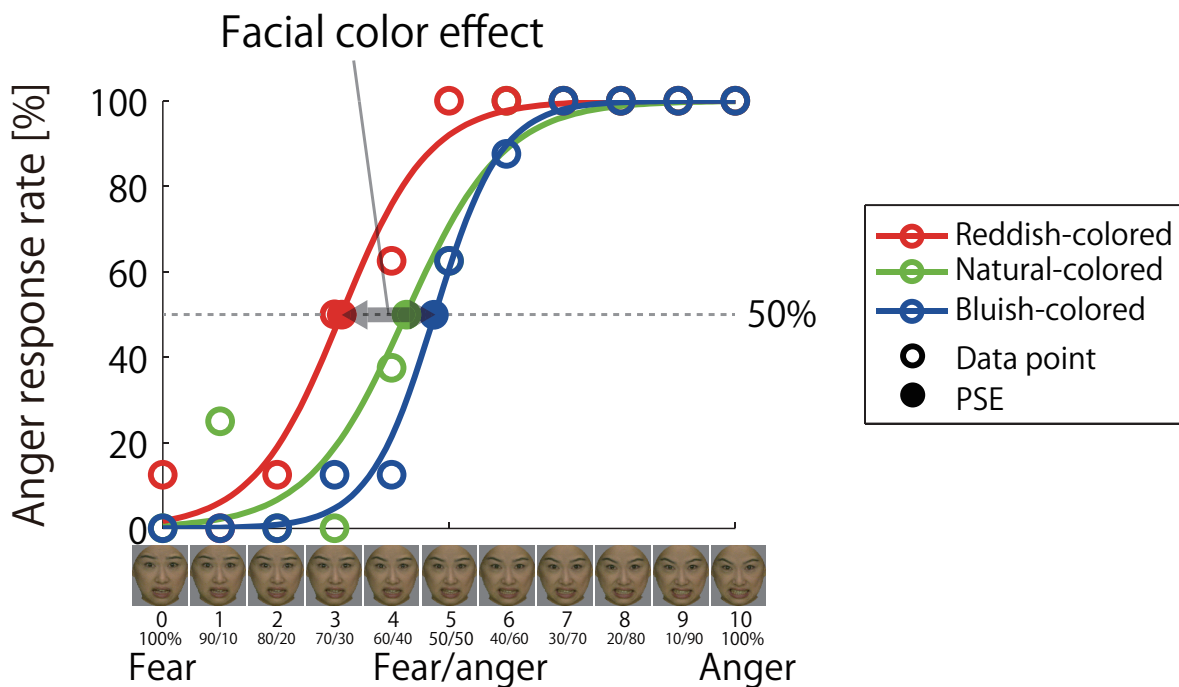


図 7.4 表情判別率と PSE

被験者 HN の女性顔 恐怖-怒り表情対セッションの表情判別率と主観的評価点。白抜き丸は、8 試行中怒りと応答した確率を、塗りつぶし丸は判別確率が 50 % となる主観的評価点を示す。赤色は赤みがかった顔色、緑色は自然な顔色、青色は青みがかった顔色の結果を示す。

階 4, 5, 7, 8:  $p > 0.3$ ]. 顔色の単純主効果があった表情段階に対して、多重比較を行った結果を表 7.1 下段, 図 7.7B に示す. 悲しみ表情の割合が高い表情段階では, 青みがかった顔色に対する応答時間が短く, 喜び表情の割合が高い表情段階では, 赤みがかった顔色に対する応答時間が短いという顔色の効果が見られた.

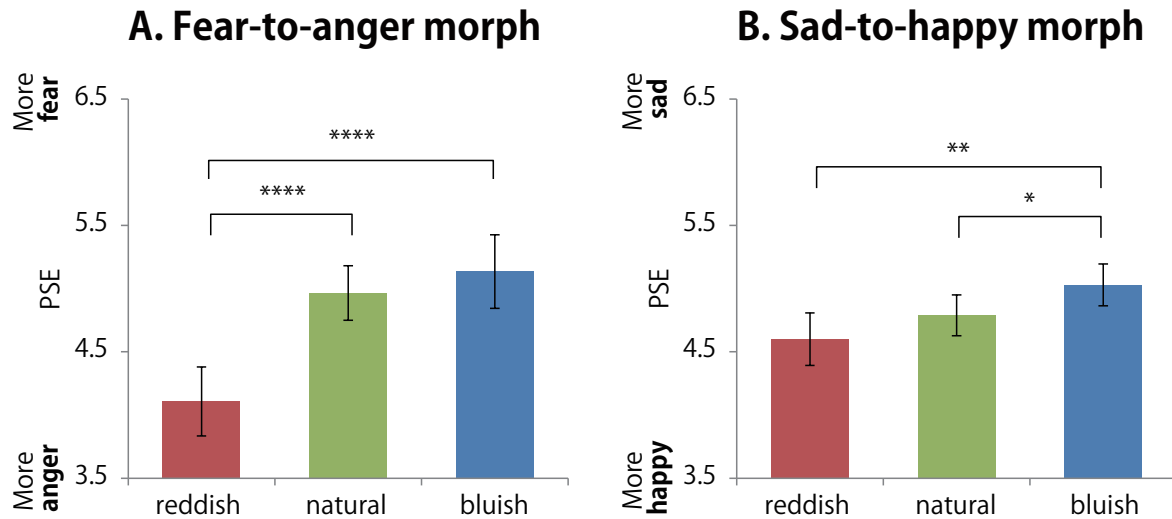


図 7.5 3つの顔色に対する PSE

恐怖-怒り表情対画像群 (A), 悲しみ-喜び表情対画像群 (B). 顔色の主効果の下位検定において\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.005$ , \*\*\*\*  $p < 0.001$ . エラーバーは標準誤差を示す.

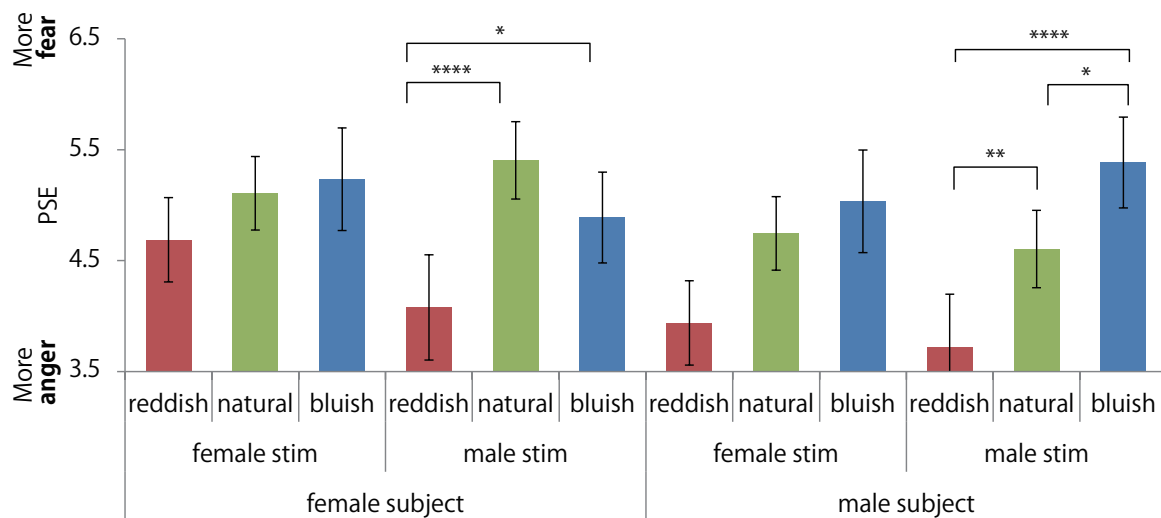


図 7.6 被験者の性別、刺激の性別ごとの恐怖-怒り条件の PSE

被験者の性別  $\times$  顔色  $\times$  刺激の性別の交互作用があった恐怖-怒り条件での PSE を被験者の性別、刺激の性別ごとにプロット. 被験者の性別  $\times$  顔色  $\times$  刺激の性別の下位検定において\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.005$ , \*\*\*\*  $p < 0.001$ . エラーバーは標準誤差を示す.

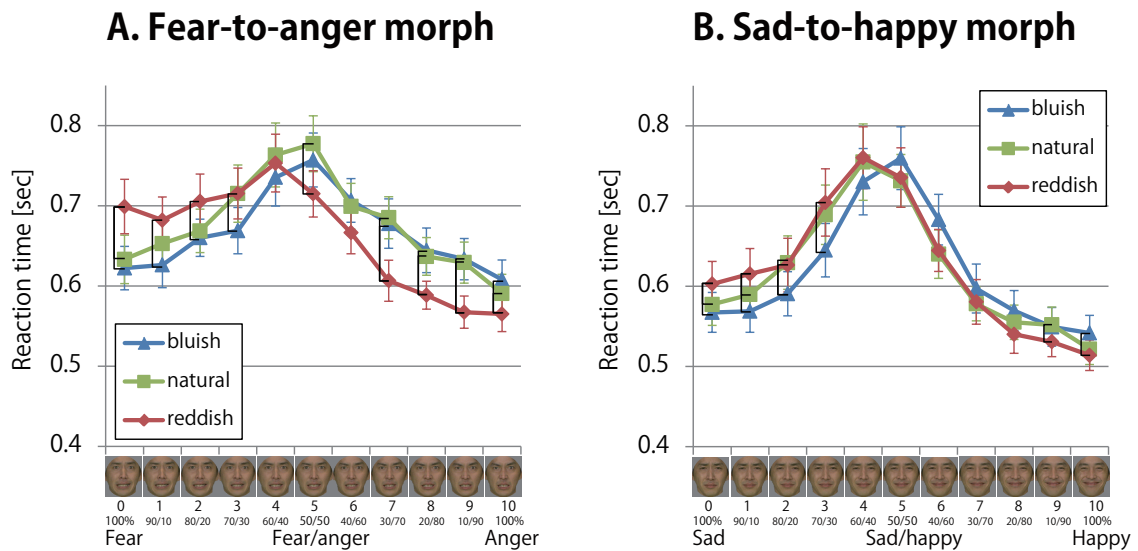


図 7.7 3つの顔色に対する応答時間

恐怖-怒り表情対画像群 (A), 悲しみ-喜び表情対画像群 (B). 黒線カッコは、顔色と表情段階の交互作用の下位検定において  $p < 0.05$  であったことを示す。エラーバーは標準誤差を示す。

表 7.1 表情判別課題の応答時間における顔色 × 表情段階の下位検定結果

応答時間に見られた顔色 × 表情段階の交互作用の下位検定結果、顔色の単純主効果があつた表情段階における多重比較の結果を示す (p 値と有意であつた場合の大小関係)。グレー背景は  $p < 0.05$ であることを示す。

恐怖-怒り条件												
表情段階												
顔色	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
自然 vs. 赤	.035 自然 < 赤	.310	.066	1.000	---	.005 赤 < 自然	.186	.000 赤 < 自然	.031 赤 < 自然	.000 赤 < 自然	.000 赤 < 自然	
	1.000	.356	1.000	.022 青 < 自然	---	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
赤 vs. 青	.000 青 < 赤	.027 青 < 赤	.028 青 < 赤	.136	---	.109	.052	.001 赤 < 青	.025 赤 < 青	.000 赤 < 青	.000 赤 < 青	
悲しみ-喜び条件												
顔色	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
自然 vs. 赤	.035 自然 < 赤	.042 自然 < 赤	1.000	1.000	---	---	1.000	---	---	.034 赤 < 自然	1.000	
	.369	.380	.035 青 < 自然	.099	---	---	.089	---	---	1.000	.132	
赤 vs. 青	.003 青 < 赤	.002 青 < 赤	.015 青 < 赤	.004 青 < 赤	---	---	.062	---	---	.247	.015 赤 < 青	

## 7.3 実験2：顔色知覚に与える表情の影響

### 7.3.1 実験方法

#### 被験者

成人20名（女性10名，平均年齢23.9歳）が被験者として実験に参加した。うち17名は，実験2の約2ヶ月前に実験1にも参加した。すべての被験者に対し，実験内容について十分な説明を行い，参加を同意を得た上で実験を行った。すべての被験者は右利きで，正常視力もしくは矯正視力であった。なお，本実験は国立大学法人豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする研究」審査会の承認を受け行われた。

#### 実験刺激

男性モデル1名，女性モデル1名それぞれの5種類の（恐怖，怒り，悲しみ，喜び，中性）顔表情画像をATR顔表情データベースから取得した。顔画像から顔以外の特徴（首，耳，髪など）をPhotoshop CS2を用いて取り除いた。元画像の顔色を基準として，顔画像の肌領域のCIE Lab  $a^*$ 値（赤-緑軸）， $b^*$ 値（黄-青軸）を操作することによって，各表情に対して11段階（0～10）の顔色画像群を作成した。段階5を基準となる自然な顔色（元画像の顔色）と設定した。段階0～4は段階5の $b^*$ 値を操作（減分2）し，段階0が最も青みの強い顔色（段階5の $b^*-10$ ）であった。段階6～10は段階5の $a^*$ 値を操作（増分2）し，段階10が最も赤みの強い顔色（段階5の $a^*+10$ ）であった。合計110枚の顔画像（5表情×11顔色段階×2顔モデル）を実験2に使用した（図7.8, 7.9）。各画像の平均輝度とRMS輝度コントラストは，すべての画像間で等しくなるように統制した。すべての刺激の大きさは， $219 \times 243$  pixels（視野角 $11.0^\circ \times 12.2^\circ$ ）であった。顔刺激はニュートラルグレー背景の中央に配置された。

#### 実験手続き

顔色と表情の関係性から，以下のように3表情条件を定義し，5つの表情を分類した。

1. 赤み関連表情（怒り，喜び）
2. 中性表情（中性）
3. 青み関連表情（恐怖，悲しみ）

この3つの表情条件から，1つずつ表情を選んで，表情セット（2種類; 怒り-中性-恐怖，喜び-中性-悲しみ）とした。実験セッションは表情セットごと，男性/女性顔ごとに行った。つまり，実験2は以下の4セッションで構成された。

1. 男性顔 怒り-中性-恐怖表情セット（図 7.8）
2. 男性顔 喜び-中性-悲しみ表情セット（図 7.8）
3. 女性顔 怒り-中性-恐怖表情セット（図 7.9）
4. 女性顔 喜び-中性-悲しみ表情セット（図 7.9）

各セッションでは，33 枚（3 表情 × 11 顔色段階）の顔画像を 8 試行ずつランダムな順番で呈示した（264 試行/セッション）．実験セッションの順番は被験者ごとにランダムとした．実験セッションの前に，各画像の試行数を 1 回とした練習セッションを行った．各試行は 250ms の固視点の呈示で始まり，そのあとにブランクが 250ms 呈示され，その後顔画像が 300ms 呈示された．その後，白い四角形が 1700ms 呈示された（7.10）．被験者

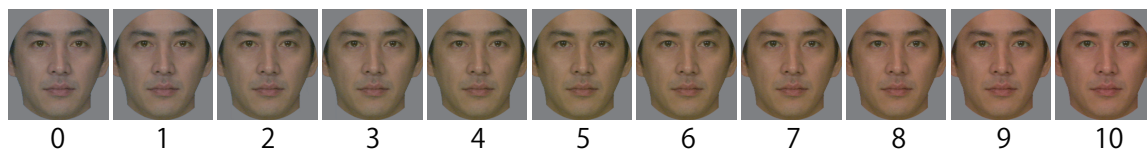
Fear



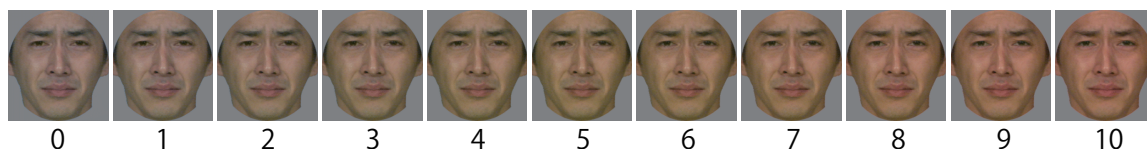
Anger



Neutral



Sad



Happy

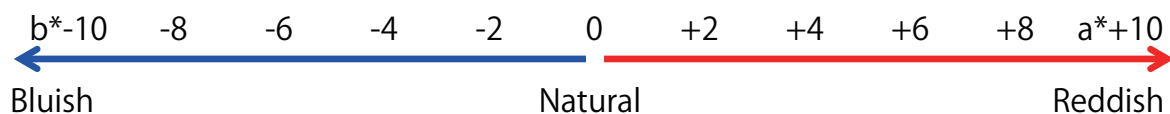


図 7.8 男性顔の表情セット顔色画像群

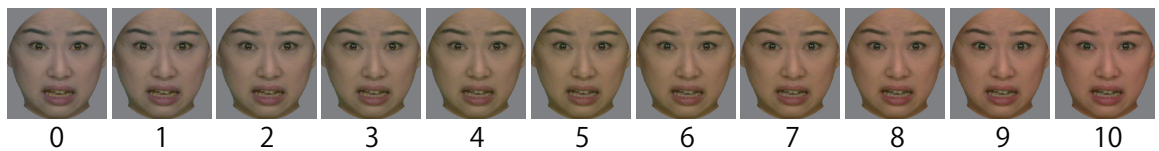
男性顔の顔色画像群．各表情に対して，11 段階の顔色画像を作成した．恐怖-普通-怒り顔色画像群（A），悲しみ-普通-喜び顔色画像群（B）．

は、呈示された顔画像の顔色を2者強制選択（赤っぽい or 青っぽい）し、可能な限り早く、正確に応答する顔色判別課題を行った。被験者の応答は、顔刺激呈示をオンセットし、2000msの間受け付けられた。応答は手元の2つのボタンで行い、ボタンの位置と表情との対応は被験者間でカウンターバランスを取った（ある被験者は右ボタンが恐怖、左ボタンが怒り、ある被験者はその対応が逆）。

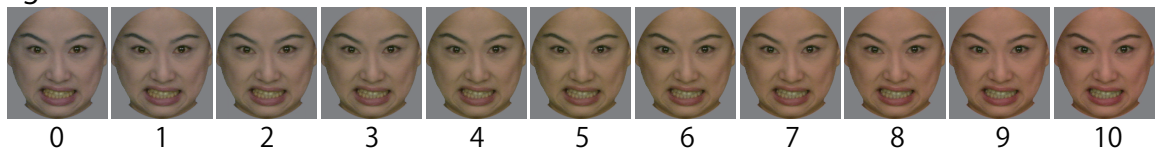
### データ解析

各顔刺激に対しする顔色判別率と平均応答時間を求めた。顔色判別における表情の効果を検討するために、各表情条件の顔色画像群に対する顔色判別率をロジット関数（二項分布の一般線形モデル）でフィッティングし、判別率が50%となるPSEを被験者ごとに求

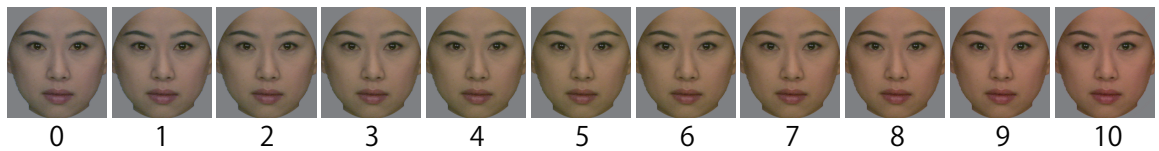
#### Fear



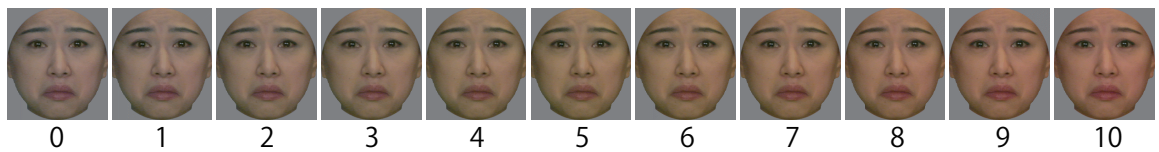
#### Anger



#### Neutral



#### Sad



#### Happy

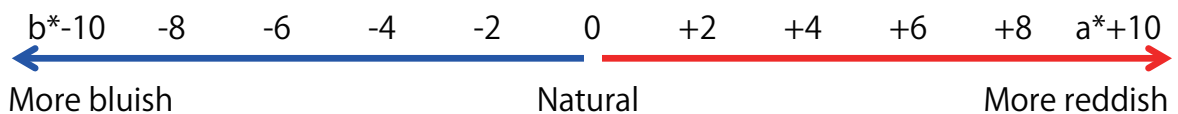
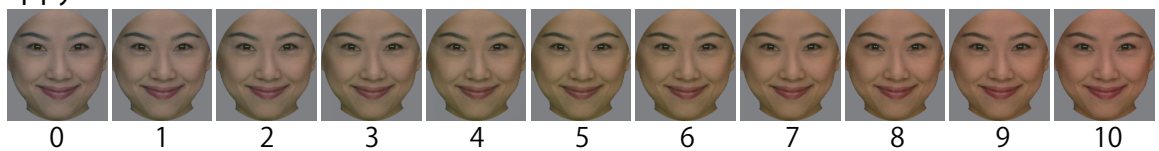


図 7.9 女性顔の表情セット顔色画像群

女性顔の顔色画像群。各表情に対して、11段階の顔色画像を作成した。恐怖-普通-怒り顔色画像群 (A), 悲しみ-普通-喜び顔色画像群 (B)。



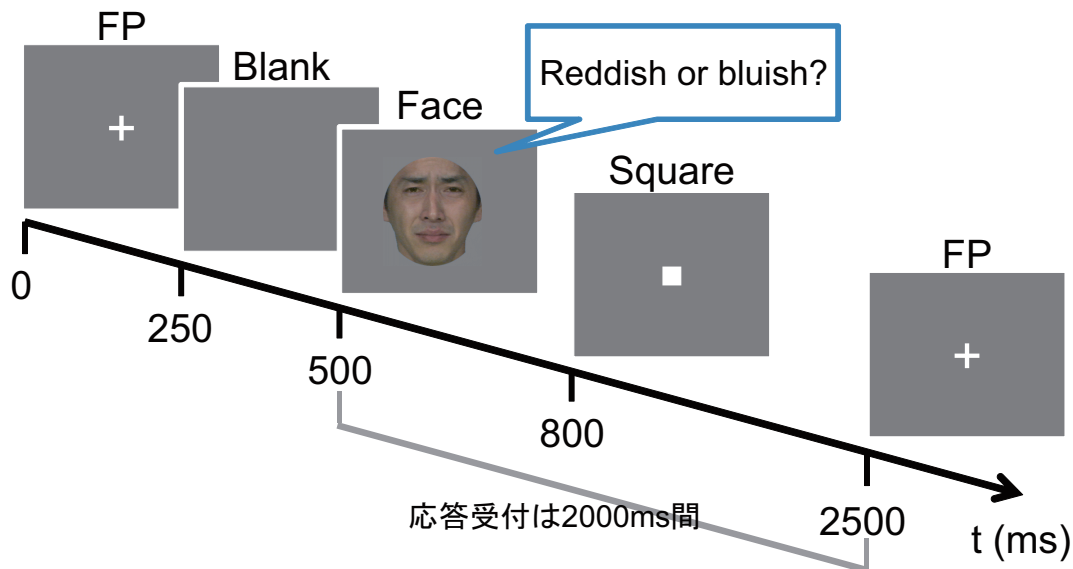


図 7.10 実験2の1試行の刺激呈示の例

各試行は 250ms の固視点の呈示で始まり，そのあとにブランクが 250ms 呈示され，その後顔画像が 300ms 呈示された．その後，白い四角形が 1700ms 呈示された．被験者は，呈示された顔画像の顔色が青っぽいか赤っぽいかを判断した．被験者の応答受付区間は，顔刺激呈示から 2000ms であった．

めた．各表情セット（怒り-中性-恐怖，喜び-中性-悲しみ）の PSE に対して，被験者の性別（男，女）を被験者要因，刺激の性別（男，女）と表情（赤み関連，中性，青み関連）を被験者内要因とする混合 3 要因分散分析を行った．

応答時間に関しては，表情セット（怒り-中性-恐怖，喜び-中性-悲しみ）ごとに，表情（赤み関連，中性，青み関連）と顔色段階（11 段階）を要因として，2 要因反復測定分散分析を行った．事後検定には Bonferroni 法を用いた．反復測定分散において，球面性の仮定が成立しない場合には，Greenhouse-Geisser によって自由度を補正し，有意性の検定を行った．これらの統計検定には SPSS（IBM, Armonk, NY, USA）を用いた．

### 7.3.2 結果

#### PSE（主観的等価点）

顔色群の各刺激に対する顔色判別率（「赤っぽい」判別率）を被験者ごとに求め，そこから PSE を算出した．各表情セット（恐怖-中性-怒り，悲しみ-中性-喜び）に対する PSE の被験者間平均を図 7.11 に示す．どちらの表情セットでも，各表情条件の顔色画像群に対する PSE が大きいほどその画像群に対する「青っぽい」判別率が高いことを示し，小さいほど「赤っぽい」判別率が高いことを示す．なお，女性被験者 1 名は顔色判別パターンが他の被験者と著しく異なったため，統計解析から除外した．従って，以降の統計解析は 19 名のデータに対して行った．

恐怖-中性-怒り表情セットでは、有意な表情の主効果は見られず [ $F(2, 34) = 1.611; p > 0.2$ ], その他の主効果や交互作用もなかった (図 7.11A).

悲しみ-中性-喜び表情セットでは、表情の主効果があり [ $F(2, 34) = 8.588; p < 10^{-3}$ ], 悲しみ表情に対する PSE は、喜び・中性表情に比べて有意に大きかった [悲しみ > 喜び:  $p < 10^{-3}$ ; 悲しみ > 中性:  $p < 0.005$ ]. つまり、悲しみ表情の顔色画像群は「青っぽい」と判別される率が高かった. 喜び表情と中性表情の間には、有意な PSE の差はなかった [喜び vs. 中性:  $p > 1$ ] (図 7.11B).

### 応答時間

恐怖-中性-怒り表情セットでは、顔色の主効果があった [ $F(2.21, 39.68) = 30.187; p < 10^{-4}$ ]. 表情の主効果、表情 × 顔色の交互作用は有意ではなかった.

悲しみ-中性-喜び表情セットでは、顔色の主効果があった [ $F(2.37, 42.70) = 24.62; p < 10^{-4}$ ]. 表情の主効果、表情 × 顔色の交互作用は有意ではなかった.

## 7.4 考察

本研究では、顔色が表情知覚に与える影響 (実験 1)、表情が顔色知覚に与える影響 (実験 2) を調査することにより、顔知覚における顔色と表情との関係を検討した. 実験 1 では、2 つの異なる表情のモーフィング顔画像に対する表情判別課題を行った. その結果、恐怖-怒り表情判別では赤みがかった顔色が怒り知覚を促進させ、悲しみ-喜び表情判別では青みがかった顔色が悲しみ知覚を促進させ、表情知覚に顔色が影響を与えることを示した. 実験 2 では、顔色を段階的に変化させた顔画像に対する顔色判別課題を行った. その結果、悲しみ表情が顔色の青み知覚を促進させ、表情もまた顔色知覚に影響を及ぼすことを示した.

### 7.4.1 表情知覚における顔色の効果

本研究の実験 1 で、恐怖-怒り判別、悲しみ-喜び判別のどちらの場合にも顔色の効果が見られたが、なかでも、赤みがかった (紅潮した) 顔色の怒り知覚促進効果 (怒り判別率の上昇、応答時間の減少) が最も顕著であった. この結果は、怒りによる顔の紅潮が感情を反映する顔色シグナルとして顕著であるためだと考えられる. 様々な感情状態時の顔色 (または顔血流量) を計測したいくつかの研究 [16, 17, 18, 19] で、多く報告されているのが、怒りの感情状態で生じる顔の紅潮であり、感情による顔色変化のなかでも怒りによる顔の紅潮が顕著な変化であることが伺える. もう一つの理由として、恐怖-怒り判別の表情判別難度が考えられる. 恐怖-怒り判別と悲しみ-喜び判別に対する応答時間 (図 7.7)

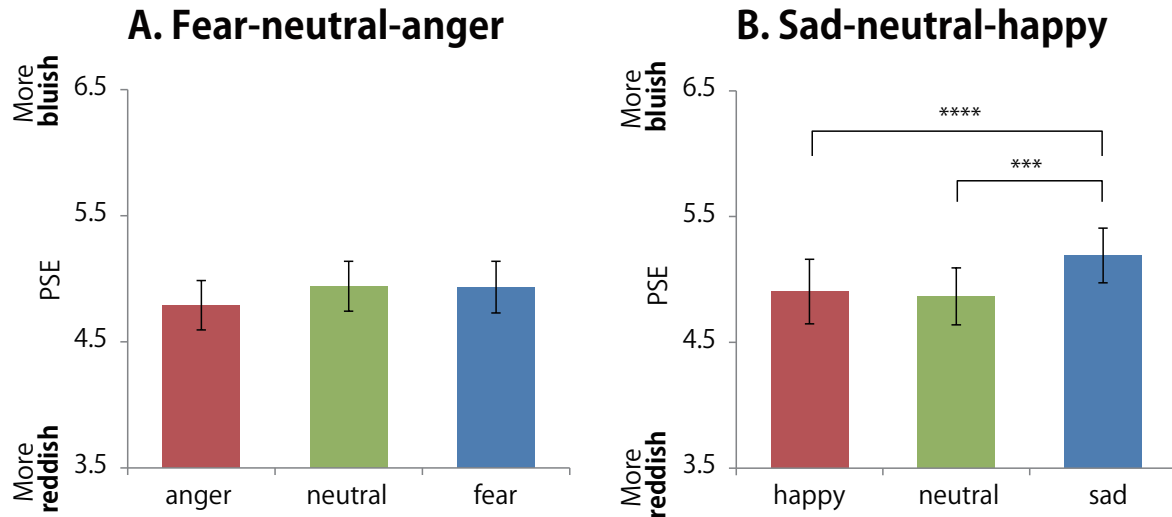


図 7.11 各表情セットに対する PSE

怒り-中性-恐怖表情セット (A), 喜び-中性-悲しみ表情セット (B). 表情の主効果の下位検定において  $p < 0.05$ ,  $** p < 0.01$ ,  $*** p < 0.005$ ,  $**** p < 0.001$ . エラーバーは標準誤差を示す.

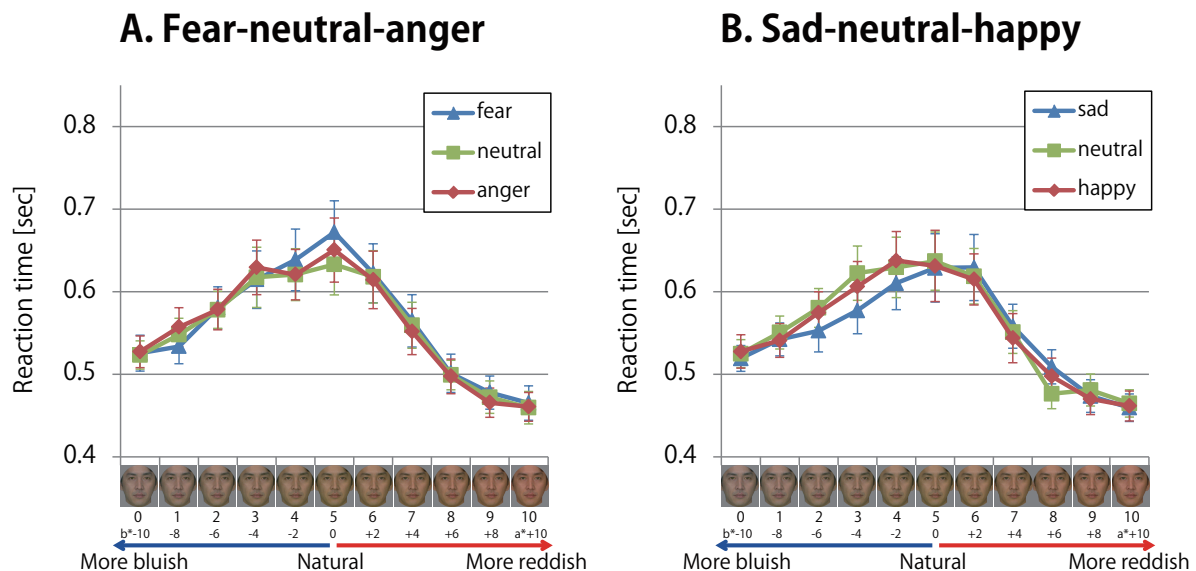


図 7.12 各表情セットに対する応答時間

怒り-中性-恐怖表情セット (A), 喜び-中性-悲しみ表情セット (B). エラーバーは標準誤差を示す. どちらの表情セットにおいても, 表情と顔色段階の交互作用はなかった.

を見ると、全体的に恐怖-怒り判別の応答時間が遅く、恐怖-怒りの方が表情判別が困難であったと考えられる。恐怖-怒り判別では、表情から得られる感情情報が不足していたためにそれを補足する意味合いで顔色の効果が顕著に表れたと考えられる。

赤みがかった（紅潮した）顔色の怒り知覚促進効果は男性顔において強くみられた。ヒト以外の霊長類やトリ、魚の場合には、身体の赤みの強さがオスの社会的優位性や配偶者獲得に関係し、ヒトの場合でも男性の攻撃性や支配力、魅力に顔の赤さが関係すると言われている [68]。また、顔の赤みには男女差があり、男性は女性よりも赤みが強いとも言われており [127, 128]、特に男性顔において顔の赤みが重要な意味を持つと言える。また、男性顔においては怒り表情が、女性顔では幸福な表情が早く正確に検出され [129]、怒り表情は男性的、幸福な表情は女性的と知覚される [130]。このように、女性の顔に比べ、男性顔は顔の赤みと怒り表情に強く関係することから、実験 1 において男性顔有意の紅潮による怒り知覚促進効果が生じたと考えられる。

悲しみ-喜び判別においては、青みがかった（蒼白な）顔色の悲しみ知覚促進効果（悲しみ判別率の上昇、応答時間の減少）が見られた。顔色の計測を行った研究により、喜びの情動下で顔の赤みが増すことがと報告されている [17]。また、鈴木らは、表情顔画像から読み取れる感情の強さを 5 段階で評定させ、喜びの表情の場合、顔の赤みを増加させると喜び評定値が増加し、悲しみの表情の場合、顔の青みを増加させると悲しみ評定値が増加すると報告している [69]。今回の実験においては、自然な顔色と赤みがかった顔色の PSE に有意な差はなく、自然な顔色と青みがかった顔色には差があったことから、紅潮による喜び知覚促進効果というよりも、青みがかった顔色の悲しみ知覚促進効果が強く生じたと言える。その原因のひとつとして、顔色操作の方法が挙げられる。今回の実験では、顔の肌領域の色を一様に変化させたが、チークを塗ったように頬の赤みだけを増加させるような顔色操作を行えば、喜び知覚をより促進させる効果が得られるかも知れない。このように、顔色操作の方法による顔色効果の違いは、今後の検討事項のひとつである。

#### 7.4.2 顔色知覚における表情の効果

顔色知覚における表情の効果として、2 つの効果が考えられる。一つは、単純に顔色の判断がその表情に関連する顔色の方向に引っ張られる促進効果で、例えば、怒り表情は赤みがかった顔色と判断されやすくなるという効果である。もう一つは、顔色の判断がその表情に関連する顔色とは逆方向に引っ張られる打ち消し効果である。この効果は、表情の知覚が顔色による影響を受けるということが前提で、例えば、怒り表情は実際の顔色よりも赤っぽい見えているから、本当はもっと青い顔色に違いないと判断される、表情知覚における顔色効果を打ち消すための効果である。

本研究の実験 2 で得られた結果では、悲しみ-中性-喜びの表情の組合せの顔色知覚にお

いて、表情の効果が見られ、悲しみ表情が顔の青み知覚を促進（青判別率の上昇）させた。つまり、上記の前者の効果が生じたと言える。しかし、恐怖-中性-怒りの表情の組合せでは、上記のどちらの方向の効果もなかった。この表情の組合せによる効果の違いは、暗示的な表情情報の影響力（明確さ）の違いによるものと考えられる。実験2で使用した表情は、実験1で使用した表情画像群の両極の表情と同じであり、実験1の応答時間から分かるように、恐怖-怒りは悲しみ-喜びに比べて表情の違いがわかりづらい。したがって、恐怖-中性-怒りでは、顔色知覚に与える表情の影響力が小さかったと考えられる。また、実験1で見られた顔色の効果は表情判別率（PSE）と応答時間にまで及んだのに対し、実験2の表情の効果は顔色判別率（PSE）にとどまり、応答時間まではその効果が及ばなかった。これは、脳内での顔色と表情の処理の段階の違いが影響しているのかもしれない。第6章の脳波実験の結果（表6.2）は、顔色が表情よりも早く処理が行われることを示している。予想した2つの表情の効果うち、後者の打ち消し効果が見られなかったことから、顔色の処理が表情の処理よりも先に行われることが示唆される。

## 7.5 本章の統括

本研究では、2つの心理物理実験を通して、顔知覚における顔色と表情との関係を検討した。本研究は、顔色が表情知覚に影響を与えるという経験則的な見解に対して、明確な心理物理学的証拠を提供した。さらには、その逆方向の効果、つまりは表情もまた顔色知覚に影響を与えることを示した。本研究は、顔知覚において顔色と表情がそれぞれの知覚・認識において有力な手がかりになることを示唆した。



## 第 8 章

# 総括

ヒトの顔色は、健康状態や感情を反映して変化することから、ヒトの内面情報を周囲に表出する極めて重要な社会的シグナルと言える。集団生活をおくるヒトは、他者と良好な関係性を築くために、他者の顔色の変化を敏感に感じとる能力を獲得したのであろう。そもそもヒトが、顔に対して極めて優れた認識能力を有していることは言うまでもなく、脳活動計測技術の発展に伴い、顔知覚・認識の脳内処理明を目指した研究が活発に行われている。しかしながら、顔色に関して言えば、研究の手が十分には及んでおらず、その神経的処理基盤はいまだ明らかではない。本論文は、心理物理学的手法および脳活動計測手法を用いた実験を通して、ヒト脳内で行われる顔色知覚の処理メカニズムを検討した。

第 3 章では、物体色が記憶色と異なること（例えば、青い顔）から感じる不自然さに着目し、顔と顔以外の物体とで不自然さを反映するオドボール課題中の P3 非対称性を比較した。他の物体に比べて顔に対して大きな P3 非対称性が生じた。つまり、記憶色と異なる不自然な顔色に対して大きな P3 振幅が生じたのである。この結果から、ヒトは他の物体に比べて、顔に対して特に強い色の記憶を持ち、その色情報を敏感に感知する能力を持つと考えられる。

第 4, 5 章では、顔色の情報は顔処理に関係する脳波成分（4 章）と脳領域（5 章）でどのような影響を与えるのかを調査し、顔知覚処理における顔色処理を検討した。

第 4 章では、顔処理を反映する ERP 成分である N170 に与える顔色の影響を調査した。Minami らの先行研究 [71] により、N170 が顔色の違いを反映されることが示唆されていたが、彼らの研究では、自然な顔色と不自然な顔色（青色）の比較しか行われておらず、典型的な顔からの逸脱（不自然さ）を反映した可能性が残されていた。そこで、本研究では顔色の色相を段階的に変化させた 8 色相の顔色刺激を用いることによって、N170 が顔色の色相によって変調されるか否かを検討した。その結果、左後側頭電極で観測された N170 振幅が顔色の違いにより変調され、さらにその変調パターンが顔色刺激に対する不自然さ評定値のパターンと異なることを示した。つまり、左後側頭での N170 は、典型的

な顔からの逸脱（不自然さ）というよりも、顔色の違いを反映することを示した。N170は顔検出に関係する成分だと言われていることから、顔色の情報は顔検出の手がかりとなると考えられる。

第5章では、空間分解能の高い脳活動計測手法であるfMRIを用いて、顔色の処理に関係する脳領域の特定を試みた。第4章で、顔色の処理がN170の処理段階、つまり顔刺激呈示後約170msに、左後側頭領域で行われることを示唆した。後側頭皮質には顔処理の中核を担うと言われる3つの顔選択的領域（OFA, FFA, STS）が存在する。本研究の結果は、両側のOFAと右半球のFFAでの活動には顔色の違いが反映されず、左半球のFFA（紡錘状回顔領域）での活動に顔色の違いが反映されることを示した。FFAは脳波N170の信号源であると言われており、4章の結果とも整合性の取れた結果と言える。第4, 5章の結果より、顔色の処理は顔刺激呈示後約170msに左FFAで行われることが示唆された。

第6, 7章では、顔色との関係性が強い表情知覚に与える顔色の影響を脳波計測（6章）と心理物理実験（7章）により調査した。

第6章では、恐怖表情に対する閾上/閾下処理に与える顔色の影響を脳波実験により検討した。被験者が表情画像を意識的に知覚することができる閾上呈示条件では、どの処理段階においても表情の処理に顔色が介入することではなく、それぞれの処理が別々に進行されることを示唆する結果となった。それに対して、被験者が表情画像を意識的に知覚できない閾下呈示条件では、青い恐怖顔に対してN170潜時の遅延が生じた。この結果は、皮質下経路を介して行われる恐怖表情に対する迅速な処理が、顔色が不自然なことによって抑制されたために生じたと考えられる。つまり、恐怖表情の閾下処理を駆動させるには、適切な顔色である必要があるのだろう。

第7章では、実世界上で存在し得る範囲の顔色刺激を用いて、顔知覚における顔色と表情の関係性を検討した。実験1では、2つの異なる表情をモーフィングした表情画像群に対する表情判別課題を行った。その結果、恐怖-怒り判別では赤みがかった顔色が怒り知覚を促進させ、悲しみ-喜び判別では青みがかった顔色が悲しみ知覚を促進させるという、表情知覚における顔色の効果が生じた。実験2では、顔色を段階的に変化（青み～自然～赤み）させた顔色画像群に対する顔色判別課題を行った。その結果、悲しみ表情は顔色が青みがかって知覚されるという、顔色知覚における表情の効果が生じた。表情の知覚に顔色が影響するという説は、経験的な感覚から誰しにも違和感なく受け入れられるものである。しかし、これまでは、この説を裏付ける実験的な証拠は乏しく、実際にそのような現象が生じるのかどうかは明確ではなかった。本研究は、この説を裏付ける明確な証拠を提供するとともに、表情もまた顔色知覚に影響を与えるという逆方向の効果が存在することを示した。本研究は、顔知覚において顔色と表情が互いに影響し合うことを示すものである。



以上のように、本研究では、顔色処理における顔色の処理過程・領域を突き止め、さらに表情知覚に与える顔色の影響を論じた。第4, 5章の結果は、顔色の処理は顔刺激呈示後約170msに左FFAで行われることを示唆している。第6章の脳波実験においても、閾上呈示の場合には、N170（特に左後側頭の）に顔色の違いが反映され、4章と一致する結果が得られている。閾下呈示の場合にも、N170は顔色によって変調されたが、青い顔色に対してN170振幅が減少するという閾上呈示時の顔色の効果とは逆方向の効果が生じた。この結果から、おそらく閾上と閾下では、顔色に対して異なる処理が行われると予想される。本研究において、閾下呈示を取り入れた実験を行ったのは6章のみであるため、顔色の処理は顔刺激呈示後約170msに左FFAで行われるという説が閾下処理にも適応できるか否かは、新たな閾下呈示実験を行い検証する必要がある。

また、第6章では自然な顔色（肌色）と不自然な顔色（青色）の刺激を使用して、閾下の恐怖表情処理が不自然な顔色によって抑制され、閾上の恐怖表情処理には顔色が関与しないことを示した。しかし、第7章では実社会に存在しうる顔色（紅潮、蒼白）の刺激を使用することによって、閾上呈示した場合でも表情知覚に顔色が影響することを行動データで示した。したがって、適切な顔色刺激を使用することで、脳活動データからも表情処理における顔色の効果を見出すことができる可能性がある。よって、今後は第6章の実験を脳活動計測実験に持ち込み、表情知覚に与える顔色効果の発生メカニズムを検討する必要がある。

本研究は顔刺激、被験者ともにアジア人に限られている。人種に関する顔研究では、他人種効果と呼ばれる自分の属する人種の顔は弁別できるが、他の人種の顔の弁別が困難となる人種の違いによる効果が存在すると報告している。本研究で得られた顔色の効果にも、他人種効果が生じる可能性は高く、さらに同人種間の効果も、その民族性によって効果の大きさに違いが生じることが予想される。例えば、周囲との調和に重きを置く日本人は他の人種と比べ、顔色の変化に敏感かもしれない。こういった人種・民族による顔色効果の違いを今後さらに検討することにより、それぞれの人種や民族に対する理解をより深めることにつながるであろう。

本研究は、ヒト脳内で行われる顔色処理メカニズムの解明に向けた大きな一歩となる研究成果を示した。インターネットやSNSなど、情報ネットワークを介した新たなコミュニケーション手段が一般化した現代において、現実世界での人間同士のコミュニケーション能力の低下が嘆かれている。現実世界でのヒト対ヒトのコミュニケーションでは、顔が非常に多くの情報を伝達することから、相手の顔から情報を読み取る力は、コミュニケーション能力に直結すると言えるであろう。従って、ヒトの顔認識能力・処理に関する研究は、コミュニケーション能力を向上させる方法を見出す大きな可能性を持つ。また、ヒトの顔認識処理メカニズムを解明することができれば、それをアバターなどコンピュータ上のコミュニケーションツールに応用することで、よりリアルな顔表現が可能となり、ヒト

対コンピュータのコミュニケーション向上が期待できる。本研究は、ヒトの顔知覚・認識処理に関する神経基盤の解明に貢献するものであり、将来的には、本研究の成果がヒト対ヒトさらには、ヒト対コンピュータの円滑なコミュニケーションに応用されることを期待している。

## 参考文献

- [1] R. L. Fantz: “The origin of form perception”, *Scientific American*, **204**, pp. 66–72 (1961).
- [2] R. L. Fantz: “Pattern vision in newborn infants”, *Science*, **140**, 3564, pp. 296–297 (1963).
- [3] R. L. Fantz and J. F. Fagan Iii: “Visual attention to size and number of pattern details by term and preterm infants during the first six months”, *CHILD DEVELOP.*, **46**, 1, pp. 3–18 (1975).
- [4] R. L. Fantz and J. Yeh: “Configurational selectivities: critical for development of visual perception and attention”, *Canadian journal of psychology*, **33**, 4, pp. 277–287 (1979).
- [5] 竹原, 野村: “「顔」研究の最前線”, 北大路書房 (2004).
- [6] P. C. Quinn, J. Yahr, A. Kuhn, A. M. Slater and O. Pascalis: “Representation of the gender of human faces by infants: A preference for female”, *Perception*, **31**, 9, pp. 1109–1121 (2002).
- [7] G. Hole and V. Bourne: “Face processing: Psychological, neuropsychological, and applied perspectives”, Oxford University Press Oxford,, UK (2010).
- [8] D. A. Jeffreys: “A face-responsive potential recorded from the human scalp”, *Experimental Brain Research*, **78**, 1, pp. 193–202 (1989).
- [9] K. Botzel and O. J. Grusser: “Electric brain potentials evoked by pictures of faces and non-faces: a search for ”face-specific” eeg-potentials”, *Exp Brain Res*, **77**, 2, pp. 349–60 (1989).
- [10] J. V. Haxby, E. A. Hoffman and M. I. Gobbini: “The distributed human neural system for face perception”, *Trends Cogn Sci*, **4**, 6, pp. 223–233 (2000).
- [11] G. Yovel and N. Kanwisher: “The neural basis of the behavioral face-inversion effect”, *Curr Biol*, **15**, 24, pp. 2256–62 (2005).
- [12] N. Kanwisher, J. McDermott and M. M. Chun: “The fusiform face area: a module

- in human extrastriate cortex specialized for face perception”, *J Neurosci*, **17**, 11, pp. 4302–11 (1997).
- [13] I. Gauthier, M. J. Tarr, J. Moylan, P. Skudlarski, J. C. Gore and A. W. Anderson: “The fusiform ”face area” is part of a network that processes faces at the individual level”, *J Cogn Neurosci*, **12**, 3, pp. 495–504 (2000).
- [14] A. Puce, T. Allison, S. Bentin, J. C. Gore and G. McCarthy: “Temporal cortex activation in humans viewing eye and mouth movements”, *Journal of Neuroscience*, **18**, 6, pp. 2188–2199 (1998).
- [15] A. Ishai, C. F. Schmidt and P. Boesiger: “Face perception is mediated by a distributed cortical network”, *Brain Research Bulletin*, **67**, 12, pp. 87–93 (2005).
- [16] 黒田, 渡辺: “顔色の強調による顔画像の情動提示”, 全国大会講演論文集, **54**, 4, pp. 99–100 <http://ci.nii.ac.jp/naid/110002890909/> (1997).
- [17] 黒田, 渡辺: “情動変動に伴う顔色の画像分析とバーチャル顔画像合成”, 日本機械学会論文集. C 編, **65**, 638, pp. 4114–4120 <http://ci.nii.ac.jp/naid/110002384478/> (1999).
- [18] 山田, 渡辺: “表情と顔色の色彩強調に伴うバーチャル顔画像合成による怒りの情動提示効果 (機械力学, 計測, 自動制御)”, 日本機械学会論文集. C 編, **73**, 733, pp. 2543–2550 (2007).
- [19] P. D. Drummond and S. H. Quah: “The effect of expressing anger on cardiovascular reactivity and facial blood flow in chinese and caucasians”, *Psychophysiology*, **38**, 2, pp. 190–196 (2001).
- [20] C. Darwin: “The expression of the emotions in man and animals”, Vol. 526, University of Chicago Press (1965).
- [21] P. D. Drummond: “Correlates of facial flushing and pallor in anger-provoking situations”, *Personality and Individual Differences*, **23**, 4, pp. 575–582 (1997).
- [22] P. D. Drummond: “The effect of adrenergic blockade on blushing and facial flushing”, *Psychophysiology*, **34**, 2, pp. 163–8 (1997).
- [23] M. Nordin: “Sympathetic discharges in the human supraorbital nerve and their relation to sudo- and vasomotor responses”, *Journal of Physiology*, **423**, pp. 241–255 (1990).
- [24] M. A. Changizi, Q. Zhang and S. Shimojo: “Bare skin, blood and the evolution of primate colour vision”, *Biol Lett*, **2**, 2, pp. 217–21 (2006).
- [25] K. W. Tan and I. D. Stephen: “Colour detection thresholds in faces and colour patches”, *Perception*, **42**, 7, pp. 733–741 (2013).
- [26] V. Bruce and S. Langton: “The use of pigmentation and shading information in recognising the sex and identities of faces”, *Perception*, **23**, 7, pp. 803–22 (1994).
- [27] S. R. Langton, A. S. Law, A. M. Burton and S. R. Schweinberger: “Attention capture

- by faces”, *Cognition*, **107**, 1, pp. 330–42 (2008).
- [28] B. Fink, K. Grammer and P. J. Matts: “Visible skin color distribution plays a role in the perception of age, attractiveness, and health in female faces”, *Evolution and Human Behavior*, **27**, 6, pp. 433–442 (2006).
- [29] B. C. Jones, A. C. Little, D. M. Burt and D. I. Perrett: “When facial attractiveness is only skin deep”, *Perception*, **33**, 5, pp. 569–576 (2004).
- [30] P. J. Matts, B. Fink, K. Grammer and M. Burquest: “Color homogeneity and visual perception of age, health, and attractiveness of female facial skin”, *Journal of the American Academy of Dermatology*, **57**, 6, pp. 977–984 (2007).
- [31] I. D. Stephen, M. J. L. Smith, M. R. Stirrat and D. I. Perrett: “Facial skin coloration affects perceived health of human faces”, *International Journal of Primatology*, **30**, 6, pp. 845–857 (2009).
- [32] M. J. Tarr, D. Kersten, Y. Cheng and B. Rossion: “It’s pat! sexing faces using only red and green”, *Journal of Vision*, **1**, 3, p. 337 (2001).
- [33] V. Bruce and A. Young: “Understanding face recognition”, *Br J Psychol*, **77** ( Pt 3), pp. 305–27 (1986).
- [34] C. C. Goren, M. Sarty and P. Y. Wu: “Visual following and pattern discrimination of face-like stimuli by newborn infants”, *Pediatrics*, **56**, 4, pp. 544–9 (1975).
- [35] A. J. Calder and A. W. Young: “Understanding the recognition of facial identity and facial expression”, *Nature Reviews Neuroscience*, **6**, 8, pp. 641–651 (2005).
- [36] R. Adolphs: “Neural systems for recognizing emotion”, *Current Opinion in Neurobiology*, **12**, 2, pp. 169–77 (2002).
- [37] S. Bentin, T. Allison, A. Puce, E. Perez and G. McCarthy: “Electrophysiological studies of face perception in humans”, *Journal of Cognitive Neuroscience*, **8**, 6, pp. 551–565 (1996).
- [38] D. A. Jeffreys and E. S. Tukmachi: “The vertex-positive scalp potential evoked by faces and by objects”, *Exp Brain Res*, **91**, 2, pp. 340–50 (1992).
- [39] R. J. Itier and M. J. Taylor: “N170 or n1? spatiotemporal differences between object and face processing using erps”, *Cereb Cortex*, **14**, 2, pp. 132–42 (2004).
- [40] K. Linkenkaer-Hansen, J. M. Palva, M. Sams, J. K. Hietanen, H. J. Aronen and R. J. Ilmoniemi: “Face-selective processing in human extrastriate cortex around 120 ms after stimulus onset revealed by magneto- and electroencephalography”, *Neurosci Lett*, **253**, 3, pp. 147–50 (1998).
- [41] B. Rossion, J. F. Delvenne, D. Debatisse, V. Goffaux, R. Bruyer, M. Crommelinck and J. M. Guerit: “Spatio-temporal localization of the face inversion effect: an event-

- related potentials study”, *Biol Psychol*, **50**, 3, pp. 173–89 (1999).
- [42] M. Eimer: “Effects of face inversion on the structural encoding and recognition of faces. evidence from event-related brain potentials”, *Brain Res Cogn Brain Res*, **10**, 1-2, pp. 145–58 (2000).
- [43] R. J. Itier and M. J. Taylor: “Inversion and contrast polarity reversal affect both encoding and recognition processes of unfamiliar faces: a repetition study using erps”, *Neuroimage*, **15**, 2, pp. 353–72 (2002).
- [44] B. Rossion, I. Gauthier, M. J. Tarr, P. Despland, R. Bruyer, S. Linotte and M. Crommelinck: “The n170 occipito-temporal component is delayed and enhanced to inverted faces but not to inverted objects: an electrophysiological account of face-specific processes in the human brain”, *Neuroreport*, **11**, 1, pp. 69–74 (2000).
- [45] E. Zion-Golumbic and S. Bentin: “Dissociated neural mechanisms for face detection and configural encoding: evidence from n170 and induced gamma-band oscillation effects”, *Cereb Cortex*, **17**, 8, pp. 1741–9 (2007).
- [46] M. Eimer: “The face-specific n170 component reflects late stages in the structural encoding of faces”, *Neuroreport*, **11**, 10, pp. 2319–24 (2000).
- [47] B. Rossion, S. Campanella, C. M. Gomez, A. Delinte, D. Debatisse, L. Liard, S. Dubois, R. Bruyer, M. Crommelinck and J. M. Guerit: “Task modulation of brain activity related to familiar and unfamiliar face processing: an erp study”, *Clin Neurophysiol*, **110**, 3, pp. 449–62 (1999).
- [48] S. Bentin and L. Y. Deouell: “Structural encoding and identification in face processing: Erp evidence for separate mechanisms”, *Cognitive Neuropsychology*, **17**, 1-3, pp. 35–54 (2000).
- [49] M. Eimer: “Event-related brain potentials distinguish processing stages involved in face perception and recognition”, *Clin Neurophysiol*, **111**, 4, pp. 694–705 (2000).
- [50] Y. Mouchetant-Rostaing, M. H. Giard, S. Bentin, P. E. Aguera and J. Pernier: “Neurophysiological correlates of face gender processing in humans”, *European Journal of Neuroscience*, **12**, 1, pp. 303–310 (2000).
- [51] T. A. Ito and G. R. Urland: “The influence of processing objectives on the perception of faces: An erp study of race and gender perception”, *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, **5**, 1, pp. 21–36 (2005).
- [52] R. Caldara, G. Thut, P. Servoir, C. M. Michel, P. Bovet and B. Renault: “Face versus non-face object perception and the ‘other-race’ effect: a spatio-temporal event-related potential study”, *Clinical Neurophysiology*, **114**, 3, pp. 515–528 (2003).
- [53] N. Kanwisher, D. Stanley and A. Harris: “The fusiform face area is selective for faces

- not animals”, *Neuroreport*, **10**, 1, pp. 183–7 (1999).
- [54] B. Rossion, C. A. Joyce, G. W. Cottrell and M. J. Tarr: “Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex”, *Neuroimage*, **20**, 3, pp. 1609–1624 (2003).
- [55] I. Deffke, T. Sander, J. Heidenreich, W. Sommer, G. Curio, L. Trahms and A. Lueschow: “Meg/eeg sources of the 170-ms response to faces are co-localized in the fusiform gyrus”, *Neuroimage*, **35**, 4, pp. 1495–501 (2007).
- [56] R. J. Itier and M. J. Taylor: “Source analysis of the n170 to faces and objects”, *Neuroreport*, **15**, 8, pp. 1261–1265 (2004).
- [57] A. Calder, G. Rhodes, M. Johnson and J. Haxby: “Oxford handbook of face perception”, Oxford University Press (2011).
- [58] 渡邊, 米本: “SPM8 脳画像解析マニュアル: fMRI、拡散テンソルへの応用”, 医歯薬出版 (2012).
- [59] R. Adolphs, D. Tranel, H. Damasio and A. Damasio: “Impaired recognition of emotion in facial expressions following bilateral damage to the human amygdala”, *Nature*, **372**, 6507, pp. 669–672 (1994).
- [60] A. J. Calder, A. W. Young, D. Rowland, D. I. Perrett, J. R. Hodges and N. L. Etcoff: “Facial emotion recognition after bilateral amygdala damage: Differentially severe impairment of fear”, *Cognitive Neuropsychology*, **13**, 5, pp. 699–745 (1996).
- [61] J. S. Morris, K. J. Friston, C. Buchel, C. D. Frith, A. W. Young, A. J. Calder and R. J. Dolan: “A neuromodulatory role for the human amygdala in processing emotional facial expressions”, *Brain*, **121**, pp. 47–57 (1998).
- [62] L. M. Williams, D. Palmer, B. J. Liddell, L. Song and E. Gordon: “The ‘when’ and ‘where’ of perceiving signals of threat versus non-threat”, *Neuroimage*, **31**, 1, pp. 458–467 (2006).
- [63] B. J. Liddell, L. M. Williams, J. Rathjen, H. Shevrin and E. Gordon: “A temporal dissociation of subliminal versus supraliminal fear perception: an event-related potential study”, *J Cogn Neurosci*, **16**, 3, pp. 479–86 (2004).
- [64] M. Kiss and M. Eimer: “Erps reveal subliminal processing of fearful faces”, *Psychophysiology*, **45**, 2, pp. 318–26 (2008).
- [65] A. J. Pegna, T. Landis and A. Khateb: “Electrophysiological evidence for early non-conscious processing of fearful facial expressions”, *Int J Psychophysiol*, **70**, 2, pp. 127–36 (2008).
- [66] N. Armstrong and J. R. Welsman: “Peak oxygen uptake in relation to growth and maturation in 11-to 17-year-old humans”, *European Journal of Applied Physiology*,

- 85, 6, pp. 546–551 (2001).
- [67] A. L. Ponsonby, T. Dwyer and D. Couper: “Sleeping position, infant apnea, and cyanosis: A population-based study”, *Pediatrics*, **99**, 1, pp. E31–E37 (1997).
- [68] I. D. Stephen, F. H. Oldham, D. I. Perrett and R. A. Barton: “Redness enhances perceived aggression, dominance and attractiveness in men’s faces”, *Evolutionary Psychology*, **10**, 3, pp. 562–572 (2012).
- [69] 鈴木, 小谷津: “表情から認知される感情に及ぼす顔色の効果に関する研究”, *日本色彩学会誌*, **22**, 2, pp. 45–52 <http://ci.nii.ac.jp/naid/110001708243/> (1998).
- [70] B. Balas and C. A. Nelson: “The role of face shape and pigmentation in other-race face perception: An electrophysiological study”, *Neuropsychologia*, **48**, 2, pp. 498–506 (2010).
- [71] T. Minami, K. Goto, M. Kitazaki and S. Nakauchi: “Effects of color information on face processing using event-related potentials and gamma oscillations”, *Neuroscience*, **176**, pp. 265–73 (2011).
- [72] 色彩学会: “新編色彩科学ハンドブック” (1998).
- [73] G. K. Adams: “An experimental study of memory color and related phenomena”, *The American Journal of Psychology*, **34**, 3, pp. 359–407 (1923).
- [74] J. S. Bruner, L. Postman and J. Rodrigues: “Expectation and the perception of color”, *The American Journal of Psychology*, **64**, 2, pp. 216–227 (1951).
- [75] J. L. Delk and S. Fillenbaum: “Differences in perceived color as a function of characteristic color”, *The American Journal of Psychology*, **78**, 2, pp. 290–293 (1965).
- [76] T. Hansen, M. Olkkonen, S. Walter and K. R. Gegenfurtner: “Memory modulates color appearance”, *Nature Neuroscience*, **9**, 11, pp. 1367–1368 (2006).
- [77] A. C. Hurlbert and Y. Ling: “If it’s a banana, it must be yellow: The role of memory colors in color constancy”, *Journal of Vision*, **5**, 8, pp. 787–787 (2005).
- [78] R. C. Bolles, I. M. Hulicka and B. Hanly: “Colour judgment as a function of stimulus conditions and memory colour”, *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, **13**, 3, p. 175 (1959).
- [79] M. Olkkonen, T. Hansen and K. R. Gegenfurtner: “Color appearance of familiar objects: effects of object shape, texture, and illumination changes”, *J Vis*, **8**, 5, pp. 131–16 (2008).
- [80] 中日新聞: “男女で同じマーク, 元へ 大府市トイレ「分かりづらい」”(2008年12月10日).
- [81] A. M. Proverbio, F. Burco, M. del Zotto and A. Zani: “Blue piglets? electrophysiological evidence for the primacy of shape over color in object recognition”, *Cognitive*



- Brain Research, **18**, 3, pp. 288–300 (2004).
- [82] A. T. Lu, G. P. Xu, H. Jin, L. Mo, J. J. Zhang and J. X. Zhang: “Electrophysiological evidence for effects of color knowledge in object recognition”, *Neuroscience Letters*, **469**, 3, pp. 405–410 (2010).
- [83] T. J. Lloyd-Jones, M. V. Roberts, E. C. Leek, N. C. Fouquet and E. G. Truchanowicz: “The time course of activation of object shape and shape+colour representations during memory retrieval”, *Plos One*, **7**, 11 (2012).
- [84] Inf, Lus, C. Forkstam, Filomena, Susana, K. M. Petersson, A. Reis : “The interaction between surface color and color knowledge: Behavioral and electrophysiological evidence”, *Brain and Cognition*, **78**, 1, pp. 28–37 (2012).
- [85] T. Minami, K. Goto, M. Kitazaki and S. Nakauchi: “Asymmetry of p3 amplitude during oddball tasks reflects the unnaturalness of visual stimuli”, *Neuroreport*, **20**, 16, pp. 1471–1476 (2009).
- [86] F. W. Billmeyer and M. Saltzman: “Principles of color technology”, J. Wiley & Sons, 2nd edition (1981). ”A Wiley-Interscience publication.”; Includes indexes.
- [87] A. Delorme and S. Makeig: “Eeglab: an open source toolbox for analysis of single-trial eeg dynamics including independent component analysis”, *Journal of Neuroscience Methods*, **134**, 1, pp. 9–21 (2004).
- [88] V. Bruce: “Recognising faces”, Lawrence Erlbaum Associates, Hove (1988).
- [89] 後藤, 南, 北崎, 中内 : “顔認知処理に与える色情報の影響と時間特性”, *感性工学*, **8**, 3, pp. 527–534 (2009).
- [90] C. Jacques and B. Rossion: “Early electrophysiological responses to multiple face orientations correlate with individual discrimination performance in humans”, *Neuroimage*, **36**, 3, pp. 863–76 (2007).
- [91] X. H. Gu, Y. J. Li, X. L. Yang and Y. S. Zhu: “Spatial-temporal analysis of face processing using an erp study of the thatcher illusion”, 2007 Annual International Conference of the Ieee Engineering in Medicine and Biology Society, Vols 1-16, pp. 2496–2499 6760 (2007).
- [92] L. S. Scott and C. A. Nelson: “Featural and configural face processing in adults and infants: A behavioral and electrophysiological investigation”, *Perception*, **35**, 8, pp. 1107–1128 (2006).
- [93] F. Jiang, L. Dricot, V. Blanz, R. Goebel and B. Rossion: “Neural correlates of shape and surface reflectance information in individual faces”, *Neuroscience*, **163**, 4, pp. 1078–91 (2009).
- [94] J. L. Brebner, O. Krigolson, T. C. Handy, S. Quadflieg and D. J. Turk: “The impor-

- tance of skin color and facial structure in perceiving and remembering others: An electrophysiological study”, *Brain Research*, **1388**, pp. 123–33 (2011).
- [95] R. : “Spatial frequency bandwidth used in the recognition of facial images”, *Vision Research*, **39**, 23, pp. 3824–3833 (1999).
- [96] C. Jacques and B. Rossion: “The time course of visual competition to the presentation of centrally fixated faces”, *J Vis*, **6**, 2, pp. 154–62 (2006).
- [97] T. D. Wager and T. E. Nichols: “Optimization of experimental design in fmri: A general framework using a genetic algorithm”, *Neuroimage*, **18**, 2, pp. 293–309 (2003).
- [98] B. Sadeh and G. Yovel: “Why is the n170 enhanced for inverted faces? an erp competition experiment”, *Neuroimage*, **53**, 2, pp. 782–9 (2010).
- [99] A. Harris and G. K. Aguirre: “Neural tuning for face wholes and parts in human fusiform gyrus revealed by fmri adaptation”, *Journal of Neurophysiology*, **104**, 1, pp. 336–345 (2010).
- [100] B. Rossion, L. Dricot, A. Devolder, J. M. Bodart, M. Crommelinck, B. De Gelder and R. Zoontjes: “Hemispheric asymmetries for whole-based and part-based face processing in the human fusiform gyrus”, *Journal of Cognitive Neuroscience*, **12**, 5, pp. 793–802 (2000).
- [101] Y. Ma and S. Han: “Functional dissociation of the left and right fusiform gyrus in self-face recognition”, *Human Brain Mapping*, **33**, 10, pp. 2255–2267 (2012).
- [102] A. J. Golby, J. D. Gabrieli, J. Y. Chiao and J. L. Eberhardt: “Differential responses in the fusiform region to same-race and other-race faces”, *Nat Neurosci*, **4**, 8, pp. 845–50 (2001).
- [103] N. Kanwisher and G. Yovel: “The fusiform face area: A cortical region specialized for the perception of faces”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **361**, 1476, pp. 2109–2128 (2006).
- [104] G. Yovel, A. Tambini and T. Brandman: “The asymmetry of the fusiform face area is a stable individual characteristic that underlies the left-visual-field superiority for faces”, *Neuropsychologia*, **46**, 13, pp. 3061–3068 (2008).
- [105] J. K. E. Steeves, J. C. Culham, B. C. Duchaine, C. C. Pratesi, K. F. Valyear, I. Schindler, G. K. Humphrey, A. D. Milner and M. A. Goodale: “The fusiform face area is not sufficient for face recognition: Evidence from a patient with dense prosopagnosia and no occipital face area”, *Neuropsychologia*, **44**, 4, pp. 594–609 (2006).
- [106] A. D. Milner and C. A. Heywood: “A disorder of lightness discrimination in a case of visual form agnosia”, *Cortex*, **25**, 3, pp. 489–494 (1989).
- [107] D. J. McKeefry and S. Zeki: “The position and topography of the human colour centre

- as revealed by functional magnetic resonance imaging”, *Brain*, **120**, pp. 2229–2242 (1997).
- [108] J. E. Hardee, J. C. J. C. Thompson and A. Puce: “The left amygdala knows fear: Laterality in the amygdala response to fearful eyes”, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, **3**, 1, pp. 47–54 (2008).
- [109] D. Talmi, A. K. Anderson, L. Riggs, J. B. Caplan and M. Moscovitch: “Immediate memory consequences of the effect of emotion on attention to pictures”, *Learning and Memory*, **15**, 3, pp. 172–182 (2008).
- [110] T. Yamada and T. Watanabe: “Effects of facial color on virtual facial image synthesis for dynamic facial color and expression under laughing emotion”, pp. 341–346 (2004). Cited By (since 1996): 6 Export Date: 5 October 2012 Source: Scopus.
- [111] M. Yasuda, S. Webster and M. Webster: “Color and facial expressions”, *Journal of Vision*, **7**, 9, p. 946 (2007).
- [112] H. Song, A. J. Vonasch, B. P. Meier and J. A. Bargh: “Brighten up: Smiles facilitate perceptual judgment of facial lightness”, *Journal of Experimental Social Psychology*, **48**, 1, pp. 450–452 (2012).
- [113] P. J. Whalen, S. L. Rauch, N. L. Etcoff, S. C. McInerney, M. B. Lee and M. A. Jenike: “Masked presentations of emotional facial expressions modulate amygdala activity without explicit knowledge”, *J Neurosci*, **18**, 1, pp. 411–8 (1998).
- [114] Y. Jiang and S. He: “Cortical responses to invisible faces: Dissociating subsystems for facial-information processing”, *Current Biology*, **16**, 20, pp. 2023–2029 (2006).
- [115] L. M. Williams, B. J. Liddell, A. H. Kemp, R. A. Bryant, R. A. Meares, A. S. Peduto and E. Gordon: “Amygdala-prefrontal dissociation of subliminal and supraliminal fear”, *Human Brain Mapping*, **27**, 8, pp. 652–661 (2006).
- [116] Y. Jiang, R. W. Shannon, N. Vizueta, E. M. Bernat, C. J. Patrick and S. He: “Dynamics of processing invisible faces in the brain: automatic neural encoding of facial expression information”, *Neuroimage*, **44**, 3, pp. 1171–7 (2009).
- [117] A. W. Yip and P. Sinha: “Contribution of color to face recognition”, *Perception*, **31**, 8, pp. 995–1003 (2002).
- [118] P. Vuilleumier, J. L. Armony, J. Driver and R. J. Dolan: “Distinct spatial frequency sensitivities for processing faces and emotional expressions”, *Nat Neurosci*, **6**, 6, pp. 624–31 (2003).
- [119] D. M. Tucker: “Spatial sampling of head electrical fields - the geodesic sensor net”, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **87**, 3, pp. 154–163 (1993).
- [120] D. M. Green and J. A. Swets: “Signal detection theory and psychophysics”, Vol. 1,

Wiley New York (1966).

- [121] J. J. Stekelenburg and B. de Gelder: “The neural correlates of perceiving human bodies: an erp study on the body-inversion effect”, *Neuroreport*, **15**, 5, pp. 777–80 (2004).
- [122] M. Eimer and A. Holmes: “An erp study on the time course of emotional face processing”, *Neuroreport*, **13**, 4, pp. 427–431 (2002).
- [123] B. J. Liddell, K. J. Brown, A. H. Kemp, M. J. Barton, P. Das, A. Peduto, E. Gordon and L. M. Williams: “A direct brainstem-amygdala-cortical ‘alarm’ system for subliminal signals of fear”, *Neuroimage*, **24**, 1, pp. 235–43 (2005).
- [124] M. Suzuki and Y. Noguchi: “Reversal of the face-inversion effect in n170 under unconscious visual processing”, *Neuropsychologia*, **51**, 3, pp. 400–409 (2013).
- [125] N. Wild-Wall, O. Dimigen and W. Sommer: “Interaction of facial expressions and familiarity: Erp evidence”, *Biological Psychology*, **77**, 2, pp. 138–149 (2008).
- [126] A. Leleu, S. Caharel, J. Carre, B. Montalan, M. Snoussi, A. V. Hofe, H. Charvin, R. Lalonde and M. Rebai: “Perceptual interactions between visual processing of facial familiarity and emotional expression: An event-related potentials study during task-switching”, *Neuroscience Letters*, **482**, 2, pp. 106–111 (2010).
- [127] E. A. Edwards and S. Q. Duntley: “The pigments and color of living human skin”, *American Journal of Anatomy*, **65**, 1, pp. 1–33 (1939).
- [128] P. Frost: “Preference for darker faces in photographs at different phases of the menstrual cycle: preliminary assessment of evidence for a hormonal relationship”, *Perceptual and Motor Skills*, **79**, 1 Pt 2, pp. 507–514 (1994).
- [129] D. V. Becker, D. T. Kenrick, S. L. Neuberg, K. C. Blackwell and D. M. Smith: “The confounded nature of angry men and happy women”, *Journal of Personality and Social Psychology*, **92**, 2, pp. 179–190 (2007).
- [130] U. Hess, R. B. Adams Jr, K. Grammer and R. E. Kleck: “Face gender and emotion expression: Are angry women more like men?”, *Journal of Vision*, **9**, 12, pp. 1–8 (2009).

## 謝辞

本研究は、多くの方々からの御指導と御協力を賜り、こうしてまとめ上げることができました。研究はもちろんのこと、あらゆる目標を達成するための心構えを説いて下さり、ご多忙中、御指導、御鞭撻頂きました豊橋技術科学大学大学院工学研究科中内茂樹教授に心から感謝申し上げます。また、研究の方針や実験計画、解析、論文執筆に至るまで、本研究に関わるありとあらゆる点に熱心かつ丁寧にご指導頂きましたエレクトロニクス先端融合研究センター南哲人特任准教授に、厚く御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたり貴重なご意見をいただいた本学堀川順生教授、北崎充晃准教授に深く感謝申し上げます。研究を進める上で貴重なご助言を頂いた本学情報・知能工学系の先生方に深く感謝申し上げます。

本研究のfMRI実験は、生理学研究所で行われたものであり、多大なるご意見、ご助言をいただいた大脳皮質機能研究系 心理生理学研究部門 定藤規弘教授、名古屋大学 文学研究科 文学部 田邊宏樹准教授に心より感謝致します。また、fMRI実験にご協力いただいた、定藤研究室の皆様には感謝申し上げます。はじめてチャレンジしたfMRI実験でしたが、丁寧にご教授いただいたおかげで、成果をまとめあげることができました。

本研究の遂行にあたり文部科学省グローバルCOEプログラムおよび本学テラーメイド・バトンゾーン教育プログラムより、多大なる支援を受けましたことを、ここに深く感謝致します。

学部4年から博了までの6年という長い年月を過ごした中内研究室（旧：生体・神経情報工学研究室、現：視覚認知情報学研究室）では、数多くの方々に関わることができました。日頃から研究面だけでなく、生活面においても大変お世話になった河合由紀氏、石橋妙子氏、研究者という生き方を目指すにあたり多くのご助言を頂いた永井岳大准教授（現：山形大学工学部情報科学科准教授）、宮澤佳苗博士（現：伊藤光学工業株式会社技術部）、豊田敏裕博士（現・静岡県工業技術研究所機械科研究員）に、感謝申し上げます。研究室で日常生活から研究に至るまで、数多くの助言を頂いた諸先輩方、切磋琢磨しともに成長する喜びを教えてくれた同輩、後輩一同に感謝致します。最後に、9年間と長きに渡った大学生活をあらゆる面で支えてくれた両親・家族に、心から感謝の意を表します。



## 研究業績目録

### 学術論文

- 中島加恵, 南哲人, 中内茂樹, “記憶色の強さが事象関連電位 P3 に与える影響”, 日本感性工学会論文誌, Vol. 9, No. 2, pp.235-242, 2010
- Nakajima, K., Minami, T. and Nakauchi, S., “The face-selective N170 component is modulated by facial color”, Neuropsychologia, Vol. 50, No. 10, pp.2499-2505, 2011

### 国際学会発表

- Nakajima, K., Minami, T. and Nakauchi, S., “Event-related potential correlated to facial color processing”, 7th Annual ECNS/ISNIP Conference (Istanbul, Turkey), pp.17-18, 2010
- Nakajima, K., Minami, T. and Nakauchi, S., “Effect of facial color on subliminal/supraliminal processing of fearful facial expressions”, Association for the Scientific Study of Consciousness 15(ASSC15; Kyoto, Japan), p.87, 2011
- Nakajima, K., Minami, T. and Nakauchi, S., “Brain regions sensitive to the facial color processing: an fMRI study”, The 18th International Conference on Biomagnetism (BIOMAG2012; Paris, France), Mo-104, 2012
- Nakajima, K., Minami, T. and Nakauchi, S., “Effect of face color on face-selective regions”, 43rd NIPS International Symposium (Face Perception and Recognition; Okazaki, Japan), p.149, 2012
- Nakajima, K., Minami, T. and Nakauchi, S., “The relationship between expression and colour on the face perception”, 36th European Conference on Visual Perception (ECVP2013; Bremen, Germany), p.192, 2013

## 国内学会発表

- 中島加恵, 中内茂樹, “記憶色の強さが脳波 P3 に与える影響”, 電子情報通信学会 東海支部卒業研究発表会, P2-27, 豊橋技術科学大学, Mar. 2009 (ポスター, 査読なし)
- 中島加恵, 南哲人, 中内茂樹, “記憶色の強さが脳波 P3 に与える影響”, 第 11 回日本感性工学会大会, CD-ROM, 芝浦工業大学, Sep. 2009 (口頭, 査読あり)
- 中島加恵, 南哲人, 中内茂樹, “記憶色の強さが脳波 P3 に与える影響”, 第 32 回日本神経科学大会, Neuroscience Research, Vol.65 (Suppl), p.S174, 名古屋, Sep. 2009 (ポスター, 査読あり)
- 中島加恵, 南哲人, 中内茂樹, “顔色の色相変化と顔選択的事象関連電位の関係”, 電子情報通信学会 NC 研究会, NC2009-65, 豊橋技術科学大学, Dec. 2009 (口頭, 査読なし)
- 中島加恵, 南哲人, 中内茂樹, “事象関連電位による顔色知覚の検討”, Vision (日本視覚学会 2010 年冬季大会), Vol.22, No.1, p.111, 工学院大学, Jan. 2010 (ポスター, 査読なし)
- 中島加恵, 南哲人, 中内茂樹, “顔色の違いが顔選択的成分 N170 に与える影響”, 第 33 回日本神経科学大会, P2-h23, 神戸, Sep. 2010 (ポスター, 査読あり)
- 中島加恵, 南哲人, 中内茂樹, “恐怖表情処理における顔色の影響 ~ 閾上/閾下の顔処理に関する ERP 研究 ~”, 第 34 回日本神経科学大会, P2-i13, 横浜, Sep. 2011, (ポスター, 査読あり)
- Nakajima, K., Minami, T., Nakauchi, S., “Facial color selectivity is reflected in the left FFA activity”, 日本神経回路学会第 22 回全国大会, P1-17, Sep. 2012 (ポスター, 査読あり)
- 中島加恵, 南哲人, 中内茂樹, “左紡錘状回顔領域が顔色の処理に関係する”, 第 35 回日本神経科学大会, P2-a25, 名古屋, Sep. 2012 (ポスター, 査読あり)
- 南哲人, Changvisommid Linda, 中島加恵, 中内茂樹, “N170 成分における顔の表面色効果と倒立効果の関係”, 第 35 回日本神経科学大会, P2-a33, 名古屋, Sep. 2012 (ポスター, 査読あり)
- 中島加恵, 南哲人, 中内茂樹, “モーフ表情判別に顔の色情報が寄与する”, 第 36 回日本神経科学大会, P3-1-175, 京都, Jun. 2013 (ポスター, 査読あり)

## 受賞

- 豊橋技術科学大学 情報工学専攻特別研究報告会 最優秀特別研究発表賞 受賞, 2011 年 2 月 18 日



- センシングアーキテクト優秀活動賞 受賞，2012 年 3 月 23 日

## その他

- 豊橋技術科学大学グローバル COE ポスターコンペティション研究費獲得，2011 年
- 豊橋技術科学大学グローバル COE センシング・アーキテクトシンポジウム実行委員，2011 年