

博士学位論文

氏名（本籍）	黒住 元紀（神奈川県）
学位の種類	博士（情報学）
学位記番号	博甲178号
学位授与年月日	令和5年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
学位論文題目	顔の運動と観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響の研究

論文審査委員	主査 蒲池みゆき教授
	副査 大和淳司教授
	〃 田中久弥教授
	〃 真鍋義文教授
	〃 溝上陽子教授（千葉大学）
	〃
	〃

工学院大学大学院

博士論文

顔の運動と観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響の研究

Influence of facial movement and viewpoints on age perception

工学院大学大学院 工学研究科 情報学専攻

黒住 元紀

目 次

要約	6
第 1 章 序論：顔の老化研究と知覚年齢に関する実験的研究の概観	8
1-1.顔の外観的变化	11
1-1-1.顔の外観的变化—乳幼児期から成人期まで	11
1-1-2.顔の外観的变化—成人期以降	12
1-2.顔知覚の情報処理過程	15
1-2-1. Bruce and Young (1986) の顔認識モデル	15
1-2-2. 顔認識モデルの脳イメージング研究による検証	17
1-2-3. 顔の知覚年齢に関わる情報処理過程	19
1-3.顔の知覚年齢に関わる外観的特徴	20
1-4.本論文の目的と概要	22
第 2 章 実験的検討概要：顔の運動が知覚年齢に及ぼす影響	23
第 3 章 実験的検討：表情表出時の皮膚の動的特性が顔印象に及ぼす影響	25
3-1.実験 3-1:表情が知覚年齢に及ぼす影響の検討	26
3-1-1.方法	26
3-1-2.結果	34
3-1-3.考察	37
3-1-4.実験 3-1 のまとめ	39
3-2.実験 3-2:表情表出に伴う皮膚表面の動的特性の加齢変化の検討	40
3-2-1.方法	42

3-2-2. 結果	47
3-2-3. 考察	50
3-2-4. 実験 3-2 のまとめ	52
3-3. 実験 3-3: 表情表出時の頬部運動の遅延の知覚感度調査	53
3-3-1. 方法	54
3-3-2. 結果と考察	61
3-3-3. 実験 3-3 のまとめ	65
3-4. 実験 3-4: 表情表出時の頬部運動の遅延が顔印象へ及ぼす影響の検討	66
3-4-1. 方法	66
3-4-2. 結果と考察	69
3-4-3. 実験 3-4 のまとめ	70
3-5. 第 3 章のまとめと考察	72
第 4 章 実験的検討: 表情表出時の皮膚の動的特性に対する皮膚内部要因の影響	74
4-1. 実験 4-1: 皮下組織の粘弾性の年齢および BMI との関係性調査	75
4-1-1. 方法	77
4-1-2. 結果	82
4-1-3. 考察	88
4-1-4. 実験 4-1 のまとめ	91
4-2. 実験 4-2: 皮下組織上層の粘弾性低下と表情表出時の皮膚表面の遅延の相関性調査	92
4-2-1. 方法	92
4-2-2. 結果	94
4-2-3. 考察	95
4-2-4. 実験 4-2 のまとめ	95

4-3.実験 4-3:皮下組織上層の粘弾性低下と表情表出時の皮膚表面の遅延の因果性調査	96
4-3-1.方法	96
4-3-2.結果	98
4-3-3.考察	99
4-3-4.実験 4-3 のまとめ	99
4-4.実験 4-4.皮下組織の線維構造体の加齢変化の検討	100
4-4-1.方法	100
4-4-2.結果	103
4-4-3.考察	105
4-4-4.実験 4-4 のまとめ	106
4-5.第 4 章のまとめと考察	108
第 5 章 実験的検討概要:顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響	110
第 6 章 実験的検討:顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響	112
6-1.実験 6-1:顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響の検討	113
6-1-1.方法	113
6-1-2.結果	120
6-1-3.考察	124
6-1-4.実験 6-1 のまとめ	128
6-2.実験 6-2:顔 3 次元形状の加齢変化調査	129
6-2-1.方法	129
6-2-2.結果と考察	133
6-2-3.実験 6-2 のまとめ	143
6-3.第 6 章のまとめと考察	144

第7章 総合的考察	146
7-1.実験結果のまとめ	146
7-2.知覚年齢に及ぼす顔の運動と観察の向きの関与	152
7-3.皮膚科学的考察	153
7-3-1.頬部運動の加齢変化	153
7-3-2.頬部形態の加齢変化	154
7-4.成果の活用可能性	155
7-4-1.皮膚表面特徴からの活用	155
7-4-2.皮膚内部特徴からの活用	156
7-4-3.皮膚表面特徴と皮膚内部特徴との関係性の活用	156
おわりに	158
引用文献	159
付記	178
倫理審査	178
初出一覧	178
謝辞	181

要約

日常のふとした瞬間に、家族や友人の顔を見て老けたと感じる、もしくは若々しく感じた経験はあるだろうか。実年齢を知る友人や家族であるにも関わらず、彼らの知覚年齢が生活上の様々なシーンで異なることを私たちは経験している。

本論文では、これら知覚年齢の変化が日常下で接する顔の動的特性により生じるという仮説のもと、知覚年齢に対する顔の運動（顔の非剛体的運動）および観察方向（顔の剛体的運動）の影響を実験的に検討する。年齢という属性は、変化が緩やかで、かつ不可逆的な一方向の変化である。だからこそ、知覚年齢を規定する要因を理解することは、いつまでも若々しくありたい、という人の根源的な願望に応える方策の提案に繋がるものと考えられる。そのため、本論文では知覚年齢の要因となる顔領域、外観の動的状态、および動的状态を生じる皮膚科学的メカニズムの同定を実施する。

本論文の研究により、以下が明らかになった。

(1) 皮膚の運動が顔印象に及ぼす影響

加齢に伴い表情表出時の頬部皮膚の運動が知覚年齢を増加させること

加齢に伴い頬部皮膚の遅延量・伸縮量が変化すること

人間は加齢に伴う頬部皮膚の遅延を知覚可能であること

頬部皮膚の遅延は顔魅力や快感情の知覚を低下させること

(2) 皮膚の運動に対する皮膚内部要因の影響

加齢に伴い皮下組織上層の粘弾性が低下すること

皮下組織上層の粘弾性低下が皮膚表面の遅延増加に影響すること

皮下組織の脂肪細胞周囲の線維化が粘弾性低下に影響すること

(3) 顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響

顔の観察の向きが知覚年齢を低下させること

加齢に伴う顔形状の変化は若齢群と高齢群とで異なること

観察の向きで生じる知覚年齢変化に顔形状が影響すること

以上の結果は、他者の顔に対する知覚年齢は従来の研究で扱われてきたシワ、シミ、たるみといった静的な特徴によってのみ規定されるのではなく、実生活で絶えず変化している顔の運動や観察の向きの影響を考慮する必要性を示している。さらに、これら動的な顔から受ける知覚年齢の変化には皮膚の表面状態および内部状態の変化が関与することが示された。これらの結果は、個人同定をより正確に実施するシステムや若々しい印象を向上する美容方策への応用を含め、広範な分野への活用ができるものと考えている。

第1章 序論：顔の老化研究と知覚年齢に関する実験的研究の概観

実年齢を知る友人や家族であるにも関わらず、日々のふとした瞬間に若々しさや老けた印象を抱くように、他者の顔の知覚年齢が生活上の様々なシーンで異なることを私たちは経験している。

顔の見た目は社会生活を送る人間にとって重要な情報源である[1]。人間の顔情報は、性別や人種といった不変的な個人的属性、年齢や性格といった緩やかに変化する属性、感情や興味といった速やかに変化する属性を表している。そして、人間はこれら属性情報を活用することで社会生活をより円滑に営んでいる。人間は顔情報をその他の物体情報とは独立した脳内システムで処理することで高感度に顔の特徴を識別し様々な印象形成に用いている[2]。また、顔の識別能力は個体の成長とともに向上することも報告されている[3]。このような適応的な能力を有することから、人間にとって顔情報が重要であることが示唆される。

一方で、日常における対人印象は顔という情報の発信側と受信側の動的なインタラクションにより形成される。顔情報の発信側の動的状態としては、会話中に代表される表情や発語により顔が運動した状態（顔の非剛体的運動）が存在する。また印象を形成する顔情報の受信側も動的状態にあり、発信側の顔をどういった方向から捉えるか、すなわち顔の観察方向の要因（顔の剛体的運動）が存在する。したがって、日常生活において人間は顔情報の発信側と受信側双方の動的状態が反映された、変化し続けている顔情報の中から他者の属性に関する安定した情報を取り出すことを試みていると言える。

しかしながら、顔の知覚年齢に関する先行研究は主に静止した正面顔を対象としており動的状態を考慮しないまま実施されてきた。先行研究では、幼少期の成長過程で生じる頭部骨格の変化や、それに伴う目鼻口の布置関係の変化が知覚年齢に影響することが明らかにされてきた[4]。また、青年期以降の老化過程で生じる、皮膚の肌理・シワ・たるみに代表される形態変化や、シミや色ムラに代表される色調変化、頭髪の白髪化や脱落、骨格の左右非対称性の増加についても知覚年齢に影響することが明らかにされてきた[5]-[11]。一方で、冒頭で触れた日常における知覚年齢が変化する事例は、これまでの静止した正面顔を対象とした研究の限界を示唆しており、顔の非剛体的・剛体的運動の影響を加味した研究の必要性を支持している。

そこで本論文では、知覚年齢における顔の運動および観察方向の影響を実験的に検討する。対人印象の中でも本論文で焦点をあてる知覚年齢は、「若々しくありたい」という人間の根源的な願望から意義があると考えられる。また年齢という属性は、変化が緩やかで、かつ年齢を重ねるのみという一方向の変化である。だからこそ、知覚年齢に関わる要因を理解することで、見た目の老化速度を緩やかにする方策や実年齢よりも若く魅せる方策など、人間がいつまでも若々しくあるために有益な情報が得られるものと考えられる。そこで、本論文では「若々しくある」ための方策の提案へと繋げるために、心理物理実験に加えて、計測実験、皮膚生理実験に渡る学際的なアプローチを図る。具体的には、知覚年齢を判断する顔領域の特定、印象を左右する動的状態の特定、およびその状態を生じる皮膚科学的メカニズムの考察を実施する。

本章においては序論として、顔の知覚年齢に関する先行研究を概観し本論文の位置づけについて述べる。本論文における顔の知覚年齢は、ある人が他者の顔の外観を基に推定した年齢のことを指す。そのため、この知覚年齢は顔情報の発信側と受信側から構成される。まず 1-1 節では顔情報の発信側の観点から顔の外観的特徴の加齢変化について整理する。続く 1-2 節では、顔情報の受信側の観点から顔知覚における視覚情報の処理過程に関する先行研究の知見を整理する。そして 1-3 節では、顔情報の発信側と受信側双方の観点から顔の知覚年齢に關与する外観的特徴について整理する。最後に、1-4 節において先行研究の問題点を整理し、本論文の目的と概要を述べる。

1-1. 顔の外観的变化

顔は人間の一生を通して様々に変化していく。私達は顔見知りでない他者の顔から、その人の大まかな年代が判別できる。これは、人間の顔が乳幼児期から青年期、成人期、壮年期、老年期へと経時的に成長・成熟・老化するに従い一定の規則に沿って形や色が変わっており、人間がその規則を理解したうえで判断に活用しているからに他ならない。本論文では、成人期から老年期にあたる20~69歳の女性の顔を対象として検討を実施する。一方で、知覚年齢においては成人期以降の顔に対してもベビースキーマと呼ばれる幼体の顔でみられる、丸い頭部や大きな目、両眼と口の近接した配置といった特徴[12], [13]も重要となる。そのため、本項では顔の外観的变化について、成人期以降の老化過程に加えて乳幼児期から成人期に至る成長・成熟過程についても整理する。

1-1-1. 顔の外観的变化—乳幼児期から成人期まで

乳幼児期の顔の特徴は、広い額、大きな目、小さな鼻、小さな口、小さな顎、目と目の間隔の広さなどである[12], [13]。青年、成人期へと成長するに従い、主にカージオイド変形と呼ばれる頭部骨格の成長に伴う面長型への輪郭の変化や、この骨格変化に伴う目・鼻・口といった顔器官の布置関係の変化が顕著となる[14], [15] (図 1-1-1)。身体の成長は組織ごとに速度が異なり、特に顔の外観に関わる器官としては、脳や頭蓋、視覚器といった上顔面がまず成長し、続いて呼吸・咀嚼機能を向上させるために下顔面が成長することが報告されている[16]。特に乳幼児期から成人期における外観変化としては後者の下顔面の変化が顕著となる。具体的に

は、鼻の突出と垂直方向への伸長や、下顎部の垂直方向への伸長と外側への張り出しが生じ、顔全体としてのプロポーションが変化する[17] (図 1-1-2)。身体成長には性差があり、顔のプロポーションの変化は女性では 16~18 歳、男性では 18~20 歳ごろに終了する。



図 1-1-1. カージオイド変形 ([14]から引用)



図 1-1-2. 乳幼児期から成人期までの顔の変化例 ([17]から引用)

1-1-2. 顔の外観的变化—成人期以降

成人期までの顔の外観的变化の中心が頭部骨格の変化であることに対して、成人期以降の加齢による顔の外観的变化で顕著となるのは、顔の最外層を覆う皮膚状態の変化である。皮膚の老化による加齢変化を表 1-1-1 にまとめる。皮膚の老化による外観変化は、主に色調変化と形態変化に大別される。色調変化は、皮膚色の黄色化や褐色化、シミの増加[18]–[22]による顔の全体および部分的な皮膚色の変化である。形態変化は、シワやたるみ[23]–[31]により皮

膚表面の凹凸の顕在化である。これら皮膚状態の変化の要因は、加齢に伴う生理的变化である自然老化と、紫外線を主とした日光暴露による光老化の2種に分類される。このうち光老化は皮膚老化の8割を占めるとされるが、身体の中でも顔は露光部であるため、加齢に伴い自然老化と光老化の両者が相まって生じる。

自然老化は、個々人の加齢に伴う老化であり生理的老化とも称される。自然老化で生じる皮膚状態変化としては、皮膚の菲薄化や、表皮と真皮の境界部の表皮突起の消失・扁平化が生じる[32]。また、表情表出や皮膚を押すなどした外力により細かなシワが観察される[33]。一方で光老化は紫外線を主とした日光暴露により生じるため、その徴候は露光部の皮膚で顕著にみられ、真皮弾性線維の変性により皮膚が弾性を失うソーラーエラストーシスや、コラーゲンなど真皮支持構造の減少に伴うシワやたるみの形成[23]–[31]など、自然老化と比較してダイナミックな形態変化が生じる。加えて、光老化では皮膚の色調変化も観察される。具体的には、日光暴露に対する生体の防御反応として生成される表皮メラニンにおいて、その産生・代謝異常により、シミ（老人性色素斑）や肝斑、脂漏性角化症が生じる[18]–[20]。また、皮膚の糖化やソーラーエラストーシスによる皮膚色の黄変[21], [22]が生じる。さらに光老化の発現は、人種間や人種内で異なることも特徴的である。この違いは皮膚の紫外線感受性を表すスキントップ[34]（表 1-1-2）によって生じる。スキントップは皮膚障害性を有する日光から組織を防御する表皮メラニン合成量に相当し、有色人種に比べて白人は紫外線感受性が高い。また、同一人種内においてもスキントップは単一ではなく、日本人の間でも紫外線感受性が高いことで光老

化の徴候である深いシワや色素沈着が顕著に観察される。図 1-1-3 に成年期(20代)から老年期(60代)の顔の加齢変化を示す。

表 1-1-1. 皮膚老化による外観変化

老化の種類	自然老化	光老化
色調の変化	ほとんどない	黄色・褐色化 シミ(老人性色素斑)、脂漏性角化症、肝斑
形態の変化	細かいシワ	深いシワ、たるみ
発生部位	非露光部位	露光部位(顔, 首, 手の甲など)

表 1-1-2. フィッツパトリックのスキンタイプの分類([34]を改変)

スキンタイプ	特徴	紫外線への反応性
I	青白い皮膚; 赤毛またはブロンドの毛髪; 青色/緑色の眼; そばかす	常に赤くなり、黒くなることはない
II	色の薄い皮膚; 赤毛またはブロンドの毛髪; 青色、薄茶色、または緑色の眼	赤くなりやすく、黒くなりにくい
III	暗めの白色; 眼と毛髪の色は問わない	ときに軽く赤くなり、徐々に黒くなる
IV	明るい褐色の皮膚	少しだけ赤くなり、黒くなりやすい
V	褐色の皮膚	まれにしか赤くならず、とても黒くなりやすい
VI	濃い褐色または黒色の皮膚	赤くなることはなく、常に極めて簡単にとても黒くなる

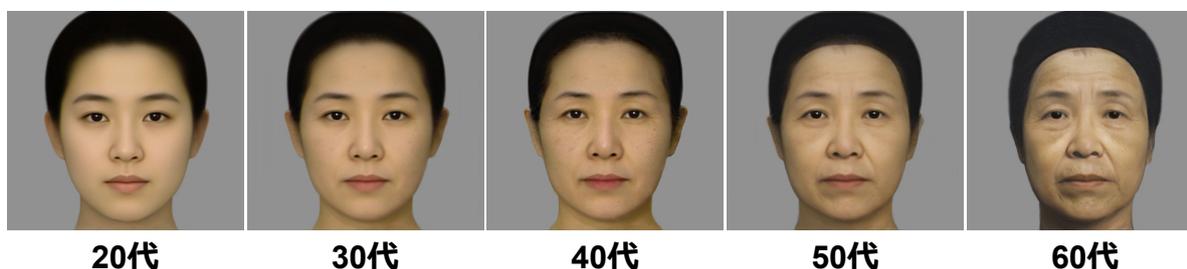


図 1-1-3. 20代から60代までの各年代の老化特徴を再現した平均顔

(ポーラ化成工業㈱より提供)

1-2. 顔知覚の情報処理過程

私達人間は家庭や学校, 会社などで円滑なコミュニケーションをとるために他者の顔から人種や年齢, 性別といった個人属性や感情や体調, 注意の対象といった絶えず変化する属性を読み取っている。そのため, 顔の外観は, 社会的な動物である人間にとって, 最も重要な情報源だといえる。視覚情報としての顔は日常生活で接する物体の一種である。しかしながら, 人間の顔認識はその他の物体認識と比べて非常に高感度に行うことができる。これは, 実物を精巧に再現した CG 映像を鑑賞した際に, 自然や街並み, 数々の生活雑貨に比べて人間の顔に不気味さや不自然さを感じることから想像に難くないだろう。これら顔認識の特殊性を支持する視覚情報処理過程のモデルについては古くは心理実験手法を用いた先行研究にて数多く提案されている。そして近年も脳疾患患者の症例報告や脳イメージング技術を用いた神経科学的な研究報告からそれらのモデルは更新され続けている。本節では, これら先行研究から代表的な顔認識モデルおよび知覚年齢に関する情報処理過程の先行研究を概観する。

1-2-1. Bruce and Young (1986) の顔認識モデル

顔認識モデルのなかでも最も有名なのは, Bruce and Young (1986) の顔認識モデルである [35] (図 1-2-1)。同モデルの特徴は, 顔情報の処理過程を多層的なモジュールで構成している点, および知覚された顔情報が恒常的な「人物同定」と可変的な「表情や発話認識」の独立した 2 つの過程で処理されるモデルとして提案されている点にある。同モデルの中心的議題は「人物同定」であり, 4 つの過程を経由するとしている。同過程では, 知覚された顔が「1. 顔構

造の符号化 (Structural encoding)」により脳内で顔の表象として形成され、続く「2. 顔認識ユニット (Face recognition unit)」で記憶された既知顔との照合、「3. 個人情報ノード (Person identity nodes)」, 「4. 名前の生成 (Name generation)」へと送られ人物同定に至る。対して、見慣れない顔に対しても判断のできる「表情や発話認識」はこの人物同定とは独立した経路で処理されるとしている。

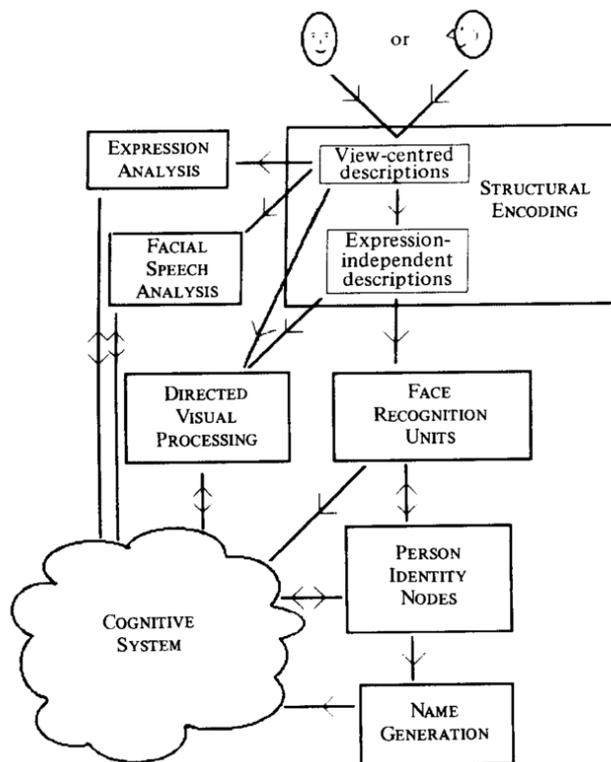


図 1-2-1. Bruce & Young (1986)の顔認識モデル

1-2-2. 顔認識モデルの脳イメージング研究による検証

近年, ヒトの脳活動に直接的にアプローチする手法として, 磁気共鳴機能画像法 (Functional magnetic resonance imaging: fMRI) や陽電子放出断層撮影 (Positron emission tomography: PET) など, 脳イメージング技術が広く利用されている. そこで, これらの技術を用いて顔認識が脳領域のどこで行われているかを調査し, 先述した顔認識モデルの妥当性検証や新たな神経機構モデルの提唱が行われている. これらの検討の結果, 顔認識は複数の脳領域の協働により実行されるモデルが提案されている. 本項では, 代表的な成果として fMRI や PET を用いた脳神経科学研究の成果を統合した Haxby らの提案する分散神経機構モデル [36], [37] について説明する. このモデルは, 顔の視覚的情報処理を担う「コアシステム (Core system)」とコアシステムで処理された結果を基に高次の認知処理を行う「拡張システム (Extended system)」から構成される (図 1-2-2). コアシステムでは, 個人同定に重要な個人の顔立ちなど恒常的特徴と, 表情や視線などの顔の動きから生じる可変的特徴とを区別することに重点を置いている. これらの知見は, 前項で述べた Bruce and Young などの心理実験から提案されたモデルと高い整合性を持つ. さらに, Haxby らのモデルでは, コアシステムは拡張システムとして他の領域にも連結されると提唱している. 拡張システムでは, 顔から人の態度や意図, 精神状態などを理解する領域, 顔の動作から人の視線や注意などの行動を理解する領域, 顔の表情から情動を理解する領域の 3 つに大別される.

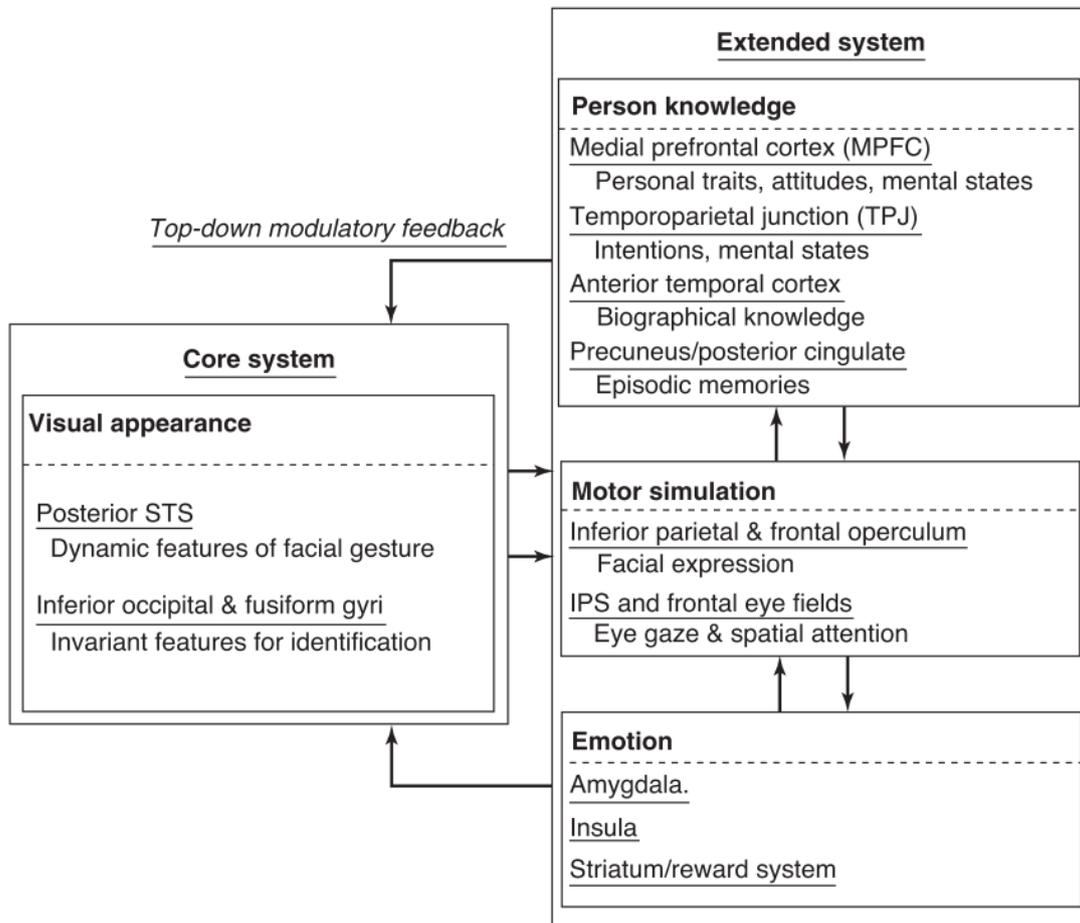


図 1-2-2. Haxby & Gobbini (2012)の分散神経機構モデル

1-2-3. 顔の知覚年齢に関わる情報処理過程

顔認識モデルの中で顔の知覚年齢に関する報告は非常に少ないが、本節では代表的な2つの先行研究を取り上げる。1報目は、伊師ら[4]の心理物理実験による報告である。伊師らは顔画像を基に年齢推定を行う際の正確さや誤推定の傾向について評定者の年齢差に依存した相違を系統的に検証した。評定者は年齢ごとに若年層(6~18歳)、青年層(20~39歳)、壮年層(40~59歳)、高年層(70~78歳)の4群に区分された。検証の結果、評定者の年代によって評定精度は異なり、評定精度は青年期・壮年期をピークとする逆U字型の曲線をとることが確認された。同結果から、知覚年齢に関わる顔の情報処理能力の精度は、多様なヒトとの接触経験や学習の積み重ねによる向上と、加齢に伴う顔の情報処理能力の低下が複合的に影響していることが考察される。2報目はHomolaら(2012)の顔画像とfMRIを用いた検証である。Homolaらは年齢推定には下側頭溝(Inferior temporal sulcus)と角回(Angular gyrus)の2領域がウェルニッケ垂直束(Wernicke's perpendicular fasciculus)を介して相互作用するモデルを提案している[38]。しかしながら、同研究で使用したfMRIという計測手法の特性上、明らかとなるのは活性部位の特定に留まるため、絶えず変化する顔の運動や顔向きなどの視覚情報変化を反映した時系列変化としての情報処理プロセスは依然不明である。

1-3. 顔の知覚年齢に関わる外観的特徴

人間は他者の顔を見て瞬時に相手の年齢を見積もることができる。これは人間が知覚年齢を円滑な対人関係のために社会的な手がかりとして活用するためだと考えられる。他者の年齢を正確に判断できることは、ビジネスや社交など人間の社会生活上重要である。特に、日本を含む儒教思想に影響を受けた東アジアの各国においては「長幼の序」として年長者を敬い従う道徳的法則があり、対面時に他者の年齢を見積もることは言葉使いや立ち回りといったコミュニケーション方法に影響を与える。また、顔の若々しさ（幼児性）は魅力的な印象を形成すること[39]も報告されており、他者が受け取る自身の知覚年齢も社会生活上重要となる。これらの背景から、顔の知覚年齢に寄与する顔の外観的特徴について数多くの研究が実施されてきた。本項では、代表的な先行研究を基に顔の知覚年齢の規定要因について整理する。

知覚年齢に寄与する顔特徴については、これまでに多くの研究結果が報告されている。そのほとんどが 1-1 節で取り上げた、加齢に伴う顔や皮膚変化の特徴が知覚年齢に及ぼす影響に関する報告である。具体的には、顔形態のマクロ特徴として、両眼間の距離と目から口までの距離の比[4]、たるみによる輪郭の変化[5]や目の大きさ[40]、唇の厚さ[7]の関与、さらにはマイクロ特徴の関与として、シワ[5]–[8]、シミ[5]、色ムラ[41]といった皮膚状態のテクスチャに関する報告が数多くなされている。また、これらマクロ特徴とマイクロ特徴の変化は互いに独立して生じるものではないことから、知覚年齢においてもそれら両方の影響を受けることも報告されている[5]、[42]。これら多くの先行研究の課題は、研究対象が静止した正面顔という日常生活で目にする顔のごく一部分だということである。唯一、蒲池らは表情表出時の顔を対象に知覚

年齢への影響を検討しており, 笑顔を表出する運動が対称な刺激と非対称な刺激を用いた検証により, 顔の運動の非対称性が知覚年齢を増加させることを確認している[43]. 日常で我々が目にする顔が発語や表情, 瞬きなどで絶えず動き, また様々な方向から観察されていることを踏まえると, より顔の実態に即した動的な条件下で知覚年齢への影響を調査することが重要だと考えられる. 表 1-3-1 に顔の知覚年齢に関わる外観的特徴をまとめる.

表 1-3-1. 顔の知覚年齢に関わる外観的特徴

顔の状態	知覚年齢の規定要因
静止・正面顔	目と口の距離の増加[4] 頬のたるみ/ほうれい線[5] 瞼のたるみ[30] 唇の厚みの減少[7]
	シワの数・長さ・深さの増加[5]-[8] シミの増加[5] 色ムラ・くすみの増加[41] 明度コントラストの低下[11]
笑顔	笑顔表出時の運動の非対称性[43]

1-4. 本論文の目的と概要

上述した様に、私たちは日常生活の中で会話や表情変化といったダイナミックに変化する他者の顔に対して、観察者としての位置関係も変化の中で知覚年齢という印象を形成している。しかし、従来の老化研究の多くは静止した正面顔という非常に限られた条件下で、シワやシミなどの皮膚の加齢変化の影響を明らかにしてきた。その大きな理由としては、顔の計測や取得したデータ解析に用いる実験装置の限界や、知覚実験に用いる顔刺激の統制が困難であったことが挙げられる。また顔の加齢変化は数年から数十年の単位で生じることから知覚年齢は個人に備わる固定的な属性として捉えられていたことも、静止顔を用いた検証が中心であった理由であろう。しかしながら、知覚年齢は実生活下の様々な条件の中で揺れ動く不安定な側面を持ち合わせている。そのため、日常生活における知覚年齢の全容を解明するためには、顔の運動や観察方向の影響について体系的に調査する必要がある。そこで、本論文において第3章および第4章で顔の運動が知覚年齢に及ぼす影響について実験的検討を行う。それに先んじて、第2章で関連する実験の概要を述べる。次に、第6章で顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響について実験的検討を行う。それに先んじて、第5章で関連する実験の概要を述べる。最後に、第7章において本論文で明らかにした顔の運動や観察の向きが顔の知覚年齢に及ぼす影響を整理し、その外観変化を左右する要因について皮膚科学的な観点から考察を行い、より若々しくあるための方策など、産業活用に向けた提案を行う。

第2章 実験的検討概要：顔の運動が知覚年齢に及ぼす影響

第1章で述べた様に、私たちは日常生活の中で会話や表情変化といった動的な顔を観察して他者に対する印象を形成している。しかし、従来の老化研究の多くは静止顔というごく限られた条件で、シワやシミといった皮膚の加齢変化の影響を明らかにしてきた。すなわち、日常生活における知覚年齢の全容を解明するには、顔の運動の影響を把握する必要がある。そこで、第3章および第4章では、顔の運動が知覚年齢に及ぼす影響について実験的検討を行う。

私たちは表情や発語といった顔の運動を通じて他者に自身の感情や意思を伝達している。そのため、顔の動的情報は感情や意思などの可変的属性を認識するために活用されており、年齢は個人の固定的属性として顔の静的情報が重要視されてきた。しかしながら、顔の最外層を覆う皮膚は加齢に伴いその外観や内部構造が変化するため、顔の運動に伴い発信される動的情報も皮膚の加齢状態により変化する可能性がある。これら日常における知覚年齢の差異の要因を特定することが可能となれば、人の顔をセンシングすることで、より正確に人の属性を把握するシステムの開発や、また要因を改善することで若々しさを演出する方策の開発につながるものと考えられる。

第3章では、知覚年齢に対する顔の動的特性の影響を実験的に検討する。第4章では、第3章で知覚年齢への影響が示唆された皮膚表面の動的特性を生ずる皮膚内部要因の特定を試みる。

各実験の内容は下記の通りである。

第3章 実験的検討：表情表出時の皮膚の動的特性が顔印象に及ぼす影響

実験 3-1：表情が知覚年齢に及ぼす影響の検討

実験 3-2：表情表出に伴う皮膚表面の動的特性の加齢変化の検討

実験 3-3：表情表出時の頬部運動の遅延の知覚感度調査

実験 3-4：表情表出時の頬部運動の遅延が顔印象へ及ぼす影響の検討

第4章 実験的検討：表情表出時の皮膚の動的特性に対する皮膚内部要因の影響

実験 4-1：皮下組織の粘弾性の年齢および BMI との関係性調査

実験 4-2：皮下組織上層の粘弾性低下と表情表出時の皮膚表面の遅延の相関性調査

実験 4-3：皮下組織上層の粘弾性低下と表情表出時の皮膚表面の遅延の因果性調査

実験 4-4：皮下組織の線維構造体の加齢変化の検討

第3章 実験的検討：表情表出時の皮膚の動的特性が顔印象に及ぼす影響

本章では、日常生活における知覚年齢の一端を明らかにするために、皮膚表面の動的特性が知覚年齢に及ぼす影響を実験的に検討する。実験 3-1 では、年齢知覚実験により、顔の運動を伴う視覚刺激と伴わない視覚刺激を用いて顔の運動が知覚年齢に対する影響を調査する。また、年齢判断時の観察者の視線を計測し、知覚年齢に寄与する顔の領域を特定する。実験 3-2 では、実験 3-1 で特定された年齢判断に重要な顔領域（頬領域）の皮膚表面の動的特性を計測し、その加齢変化を調査する。実験 3-3 では、実験 3-2 で同定した加齢に伴う皮膚表面の動的特性の変化を人が知覚可能であることを調査し、さらに実験 3-4 では、この皮膚表面の動的特性の変化が顔の知覚年齢や魅力、感情といった対人印象に及ぼす影響について調査する。

3-1. 実験 3-1: 表情が知覚年齢に及ぼす影響の検討

実験 3-1 では、顔の運動の有無が知覚年齢に及ぼす影響を検討する。知覚年齢について顔モデルの実年齢の影響を調査するために、20 代から 60 代の女性を顔モデルとして規定された 3 種の表情（縦方向の伸縮運動、横方向の伸縮運動、膨らみ萎みの運動）を表出させ、その様子を動画撮影する。これらの動画から、各表情の表出過程を含む「動的刺激」と、各表情の表出強度が最大となった時点を連結した「静的刺激」を作成し、女性の観察者を対象とした年齢知覚実験を実施する。実験結果は、知覚年齢に対する「運動の有無」と「顔モデルの年代」の 2 要因の影響について分析する。さらに、顔印象に寄与する動的特性を明らかにするために、年齢評価時の観察者の視線を計測して顔における年齢判断領域を特定する。

3-1-1. 方法

【被験者】

知覚年齢を評価する観察者として裸眼もしくは矯正で健常な視力を有する 20–49 歳の日本人女性計 112 名が参加した。サンプルサイズは、G*Power 3.1.9.7 ソフトウェア[44]を用いた計算により決定した。事前データがないため、今回の計算では G*Power のデフォルト値を使用した。検出力分析の結果、2 要因分散分析、効果量 $F = 0.10$ 、有意水準 $\alpha = 0.05$ 、検定力 Power = 0.90 で、98 名以上の参加者が必要であることが示された。また、視覚認知機能は加齢に伴

い低下し、50代でより顕著となることが報告されていること[45]から、除外基準を50歳以上として20歳から49歳の女性112名を観察者とした。表3-1-1に、観察者の年齢内訳を示す。

表 3-1-1. 観察者の構成

年齢群 (歳)	人数	平均年齢 (歳)	年齢の標準偏差 (歳)
20-29	37	24.97	2.92
30-39	38	34.68	2.82
40-49	37	43.89	3.30

【刺激】

顔モデルは20から69歳の日本人女性80名とした。顔モデルはすべて一般人で、観察者の面識はない。年齢別の内訳を表3-1-2に示す。また、化粧の個人差の影響を排除するため、顔モデルには化粧を落とした素颜で実験に参加させた。

表 3-1-2. 顔モデルの構成

年齢群 (歳)	人数	平均年齢 (歳)	年齢の標準偏差 (歳)
20-29	16	25.38	2.90
30-39	16	35.19	2.79
40-49	16	44.5	3.08
50-59	16	54.5	3.27
60-69	16	62.88	2.36

顔モデルは、60 bpm に設定したメトロノームにより、無表情 (N) から顎を下げて口を開ける表情 (Ia)、縦に縮める表情 (Ib)、無表情 (N) から水平に口を開ける表情 (IIa)、水平に口を閉じる表情 (IIb)、無表情 (N) から頬を膨らませる表情 (IIIa)、頬を萎める表情 (IIIb) まで、1秒ごとに切り替わるよう表情をとった (図 3-1-1)。各表情は、Ekman らが提唱する顔面動作符号化

システム (Facial Action Coding System: FACS) [46] で定義された動作単位に基づいてモデルに教示した。

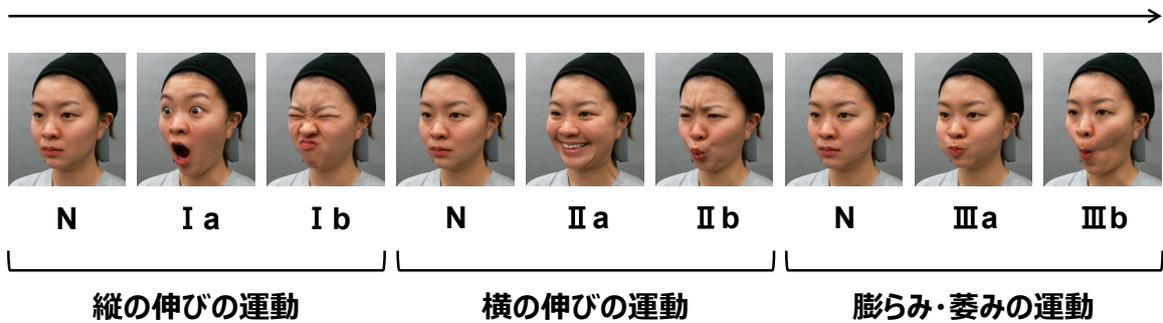


図 3-1-1. 視覚刺激における顔表情表出フロー

顔の向きは観察される顔領域を変化させるため顔の動きの影響が異なる可能性がある。そこで、本実験では (a) 正面, (b) 右方向に 45° 右回転, (c) 右方向と下方向にそれぞれ 33° 回転, (d) 右方向と上方向にそれぞれ 33° 回転, の 4 角度で顔を撮影した (図 3-1-2)。この 4 角度は、日常生活で接し得る顔の観察角度として選択した。顔モデルの視線は、顔の向きに関わらずあらかじめ設定した正面方向の基準点に固定させた。

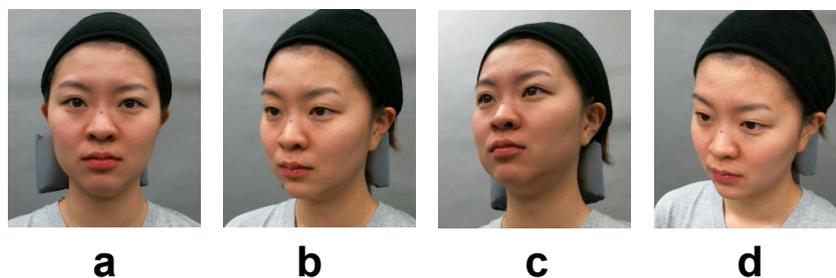


図 3-1-2. 顔の観察方向

(a) 正面. (b) 右方向に 45° 回転. (c) 右方向と下方向にそれぞれ 33° 回転.
(d) 右方向と上方向にそれぞれ 33° 回転.

上記 4 方向から顔を撮影するため、カメラ GV90C (Library, Tokyo, Japan) を設置し顔モデルの動画を撮影した。図 3-1-3 に撮影レイアウトを示す。

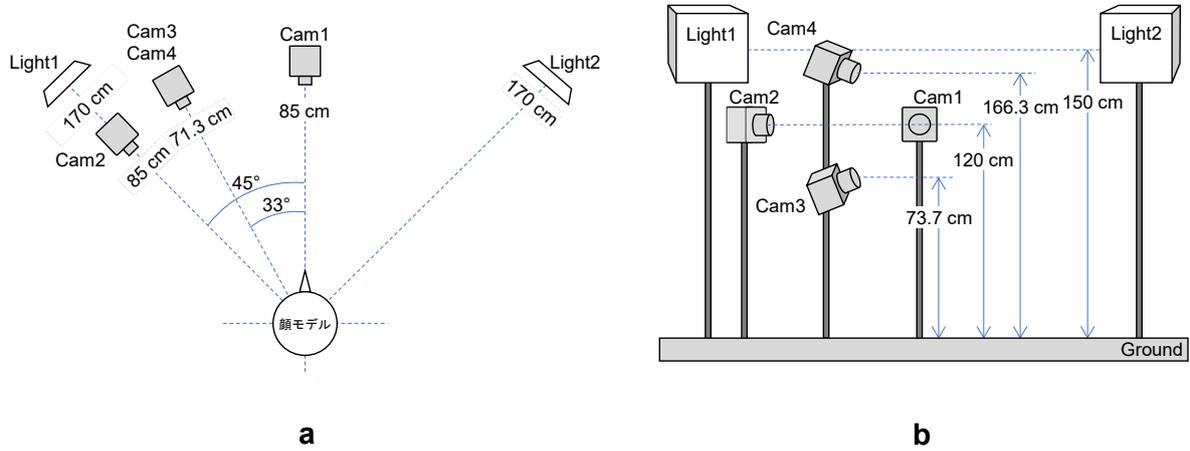


図 3-1-3. 撮影レイアウト

(a) 顔モデル上方からの配置. (b) 顔モデル正面からの配置.

刺激は表情の表出過程を含む「動的刺激」と表出過程を含まない「静的刺激」の2種とした。N-Ia-Ib, N-IIa-IIb, N-IIIa-IIIb の動画を結合した計9秒の動画を「動的刺激」、それぞれの表情の強度が最大となった時点の9枚の静止画を結合した計9秒間の動画を「静的刺激」として作成した(図3-1-4)。

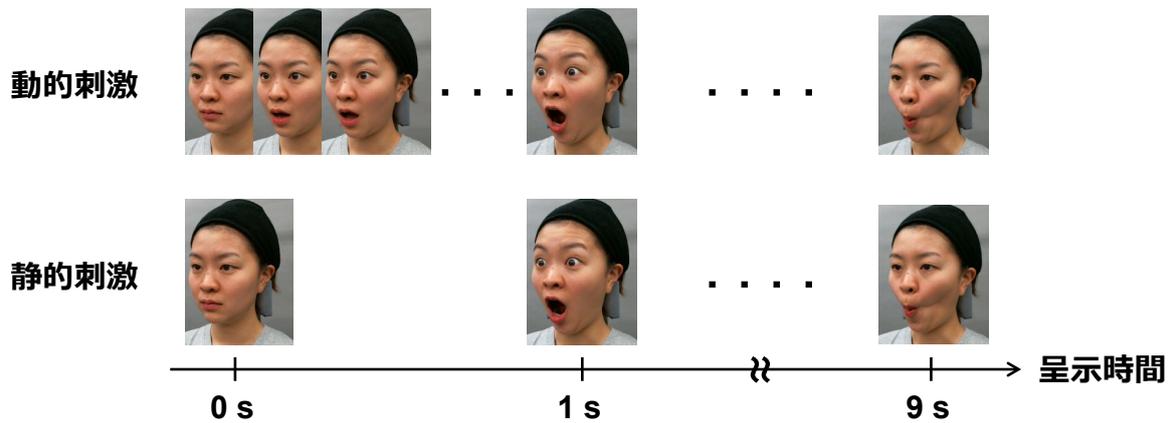


図3-1-4. 刺激の種類

表情の強度が最大となる時点の選定は正面方向から撮影された映像をもとに、次の規則で実施した。縦方向の伸縮運動は相貌顔面高(前額頭髮の生えぎわの正中点 Trichion から下顎骨の正中下縁 Gnathion までの距離)が最大および最小となるフレーム、横方向の伸縮運動では口角の距離が最大および最小となるフレーム、頬を膨らませる・萎める運動では顔の占める面積が最大および口角の距離が最小となるフレームとして定義した。顔の大きさは、実生活で人が対話する距離をもとに設定した。具体的には、刺激は24インチディスプレイ Color Edge

CX2414 (EIZO, Ishikawa, Japan) 上で, 各顔モデルの顔幅(頬骨弓の水平距離)が 12 cm (視角 11.421°) で設定し, 観察者は同刺激を視距離 60 cm で観察した.

本実験では皮膚の運動が知覚年齢に及ぼす影響を確認するため, 視覚刺激の作成において次の 2 点を考慮した. 第一に, 喜怒哀楽などの情動を表す表情は年齢推定にバイアスとして影響を与えることが指摘されていること[47]から, 本実験では, 顔の動きを「縦・横方向の伸縮」と, 「頬を膨らませる・萎ませる動き」として単純かつ独立した運動で規定した. 次に, 顔モデルごとの表情表出速度の影響を限りなく排除するために, 動画撮影時にメトロノームに合わせて表情を表出させた. モデルには撮影前にメトロノームに合わせて表情を表出する訓練を充分実施させた. このとき表情の強弱やタイミングについて実験者が規定した条件を満たさなかった 1 名は事前に除外した.

【手続き】

視線計測実験

観察者が顔モデルの年齢を判断する顔領域を特定するために, 上記の 112 名の観察者の視線を, 視線計測装置 Tobii Pro X2-30 (Tobii, Stockholm, Sweden) を用いて記録した. 視線計測装置のサンプリングレートは 30 Hz とし, 視線の停留はフィルター (Tobii I-VT フィルター [48], 速度閾値 30 度/秒, 最小固定時間 67 ms) により決定した. 興味領域は, 目, 鼻, 口, 眉毛を含む目の周囲, 頬, 額の 6 つとした (図 3-1-5). 年齢判断部位は, 刺激の観察時間における

6つの興味領域への停留時間の比率をもとに考察した。2種の刺激(動的刺激, 静的刺激)および顔の4つの観察角度は統合して評価した。

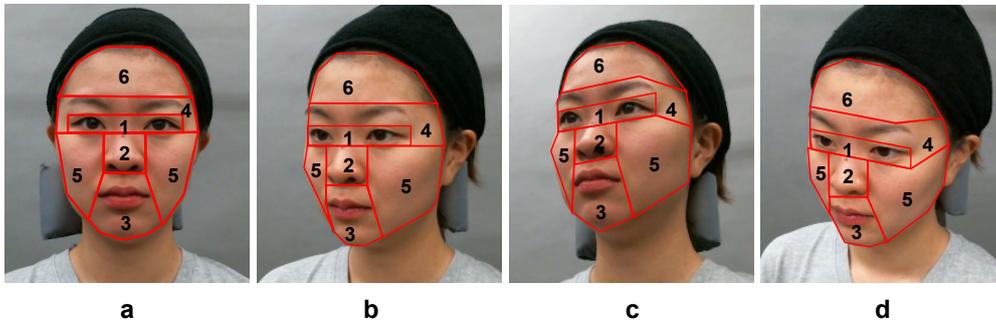


図 3-1-5. 視線計測における顔の興味領域

(a) 正面. (b) 右方向に 45°回転. (c) 右方向と下方向にそれぞれ 33°回転.

(d) 右方向と上方向にそれぞれ 33°回転.

(1) 目. (2) 鼻. (3) 口. (4) 目の周囲. (5) 頬. (6) 額.

年齢知覚実験

観察者には呈示する顔モデルの属する年齢層を事前に告知し, 動的刺激または静的刺激を9秒間観察させた後に, 「顔モデルが属する年齢層の前半であるか, 後半であるか」を回答させる二肢強制選択課題を実施した(図 3-1-6). 観察者はディスプレイへ呈示された全 80 名の顔を観察して知覚年齢を評価した. 観察者が評価する刺激は, 4 方向から撮影された動的刺激と静的刺激それぞれ 4 枚ずつ計 8 種から 1 枚ずつランダムに呈示された. 刺激の呈示順序はランダムとし. 呈示数は顔モデルおよび観察角度によりカウンターバランスをとった.

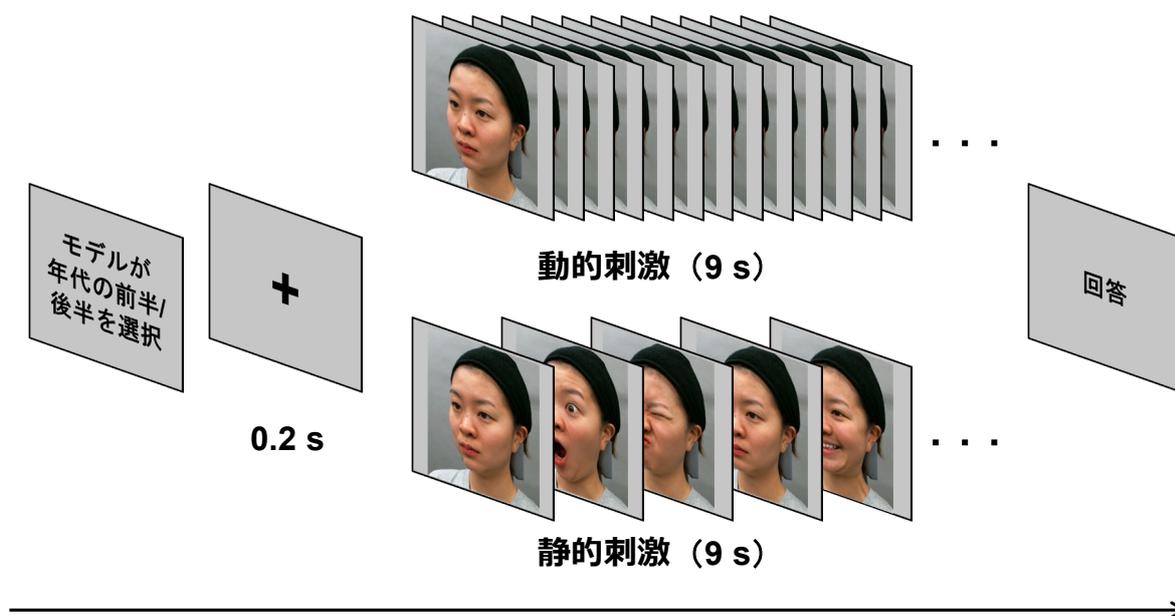


図 3-1-6. 年齢知覚実験の手続きの一例

顔の運動の有無が知覚年齢に及ぼす影響を評価するために、年代の後半だと選択された割合(20代群では25歳から29歳)を算出し従属変数として、運動の有無(2水準)、年齢層(5水準)を独立変数とした2要因分散分析を実施し、Bonferroni補正による多重比較検定を実施した。また、知覚年齢に対して顔の運動が有意に影響する年代群において、観察角度の効果を検討した。統計解析はすべてSPSS version 24.0 (IBM, Armonk, NY, USA)を用いて行った。

3-1-2. 結果

視線計測実験

観察者が年齢評価した際の顔モデルの6つの興味領域への視線停留時間の割合を図3-1-7に示した。結果、年齢判断の際には顔識別で重要とされる目、鼻、口[49]–[52]に限らず、顔の皮膚領域、特に頬部が注視されることが確認された [$F(1, 111) = 523.567, P < 0.01, \eta_p^2 = 0.825$]。

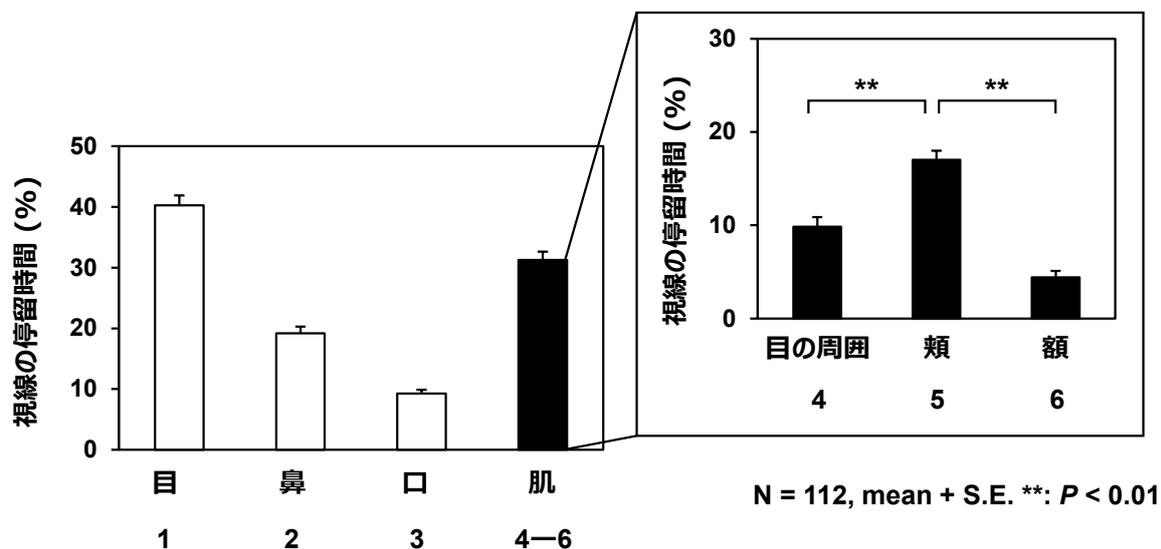


図 3-1-7. 年齢推定時の顔への視線の停留

(1) 目. (2) 鼻. (3) 口. (4) 目の周囲. (5) 頬. (6) 額.

年齢知覚実験

年齢知覚実験の結果、顔モデルの年齢によって皮膚の運動が知覚年齢に及ぼす影響が異なること、およびモデルの年齢が高くなるほど皮膚の運動が知覚年齢を高める傾向が確認さ

れた。具体的には、知覚年齢(年代の「後半」選択率)を従属変数、モデルの年齢群(5水準: 20代, 30代, 40代, 50代, 60代)と顔の運動の有無(2水準: 動的刺激, 静的刺激)を独立変数とした2要因分散分析を実施した。結果、顔モデルの年代と顔の運動の有無の間に有意な交互作用が認められた[$F(4, 444) = 4.081, P = 0.003, \eta_p^2 = 0.035$]. さらに、顔の運動の単純主効果が確認され、50代において知覚年齢に対する有意な運動の増加効果が確認された[$F(1, 444) = 11.753, P = 0.001, \eta_p^2 = 0.096$]. 60代は統計的に有意な差はないものの、動的条件が知覚年齢を増加させる方向に影響することが示された[$F(1, 444) = 2.224, P = 0.139, \eta_p^2 = 0.020$] (図 3-1-8).

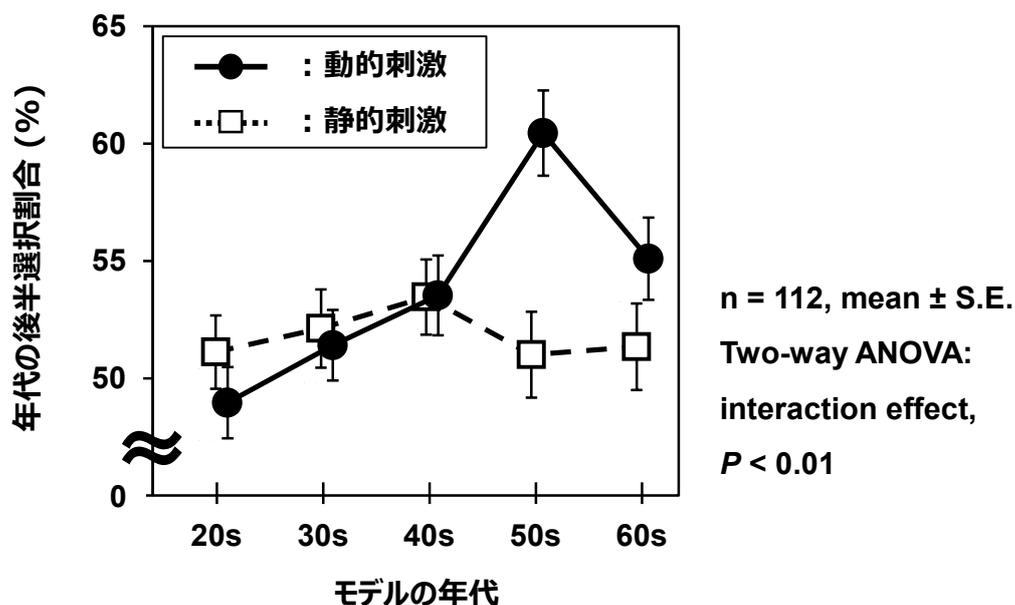


図 3-1-8. 知覚年齢に対する運動の有無の影響

日常生活における顔の観察角度を考慮して本実験では4方向から撮影した顔刺激を用いた。結果、顔の運動が知覚年齢を増加する効果は特定の観察角度では減少することが確認された。具体的には、顔の向きが横方向(Yaw方向)に大きくなるほど、運動による知覚年齢の増加効果は減弱した。この傾向は、特に運動による知覚年齢の有意な増加効果が示された50代で確認された(図3-1-9)。このとき、正面顔(Yaw方向に0°)のみ顔の運動による知覚年齢の有意な増加が確認された[$t(111) = 3.040, P = 0.003, d = 0.431$]。右上方向と右下方向の観察角度(Yaw方向にいずれも33°)の条件では、右上方向[$t(111) = 1.927, P = 0.056, d = 0.243$]、右下方向[$t(111) = 1.817, P = 0.072, d = 0.259$]にそれぞれ有意傾向が確認された。さらに、右方向の観察角度(Yaw方向に45°)の場合は、顔の運動による知覚年齢の増加効果は確認されなかった[$t(111) = 0.673, P = 0.503, d = 0.080$]。

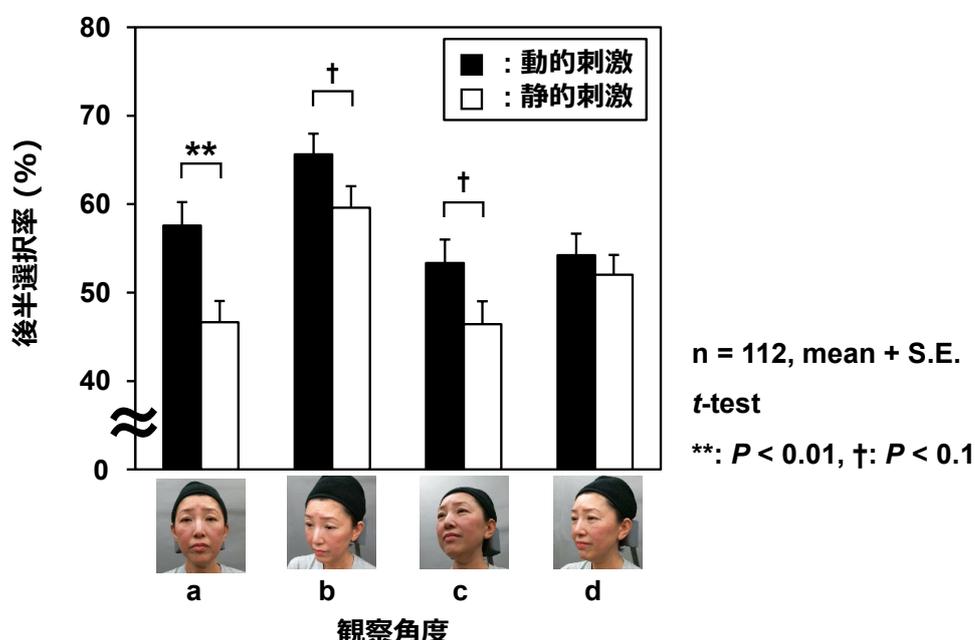


図 3-1-9. 観察角度ごとの知覚年齢に対する運動の影響(50代モデル)

- (a) 正面. (b) 右方向と上方向にそれぞれ33°回転. (c) 右方向と下方向にそれぞれ33°回転.
(d) 右方向に45°回転.

3-1-3. 考察

先行研究では、主に静止顔を対象として、シワ、シミ、たるみなどの皮膚の老化特徴が知覚年齢に影響を与えることが報告されている[6]–[9], [30], [41], [53], [54]. 本実験では、動的な皮膚状態が知覚年齢に影響を与えるという仮説のもと、顔の運動が知覚年齢に及ぼす影響を検討した。また、年齢判定に重要な顔の領域を特定するため、年齢判断時の観察者の視線計測を実施した。結果、人は年齢判断時に頬領域を観察することが示された。また、顔の運動が知覚年齢に影響を及ぼし、40代を境としてモデルの年齢に応じて知覚年齢への運動の効果が異なることが示された。特に50代においては顔の運動が知覚年齢を有意に増加させることが確認された。

まず、視線計測実験の結果について考察する。本実験では、観察者の年齢判断時の視線を評価することで観察者が他者の年齢判断時に無意識下で観察する顔領域の特定を試みた。先行研究では、人は少数の人種差を除き個人識別する上で目、鼻、口などの顔の特徴を注視していることが報告されている[49]–[52]. 今回の結果は、人が年齢を判断する際には、目・鼻・口といった視覚的顕著性の高い領域だけでなく、皮膚を含む領域、特に頬部を観察していることが判明した。

先行研究から、人間の視線行動は視覚情報の顕著性(ボトムアップ処理)だけでなく、観察時の探索行動(トップダウン処理)に影響されることが報告されている[55]. 文化的な違いはあるものの、人が個人識別する上では視線は通常、目、鼻、口へと集中する。骨格の成長した成人

の顔では、顔面の器官の相対的な布置関係や個々の形態特徴はほとんど変化しない。そのため、目、鼻、口は個人を特定するための重要な情報となることが、その理由だと考えられる。逆に、成人の年齢を判断する際には、加齢変化が顕著となる皮膚、特に笑いジワやたるみのある頬部や目元は有用な情報源となる可能性がある。本実験で確認された、他者の年齢判断時の頬部への注視は、人が年齢判断に有利な領域を経験的に活用していることを示唆する。

また本実験では、5つの年代において動的および静的な条件下で知覚年齢を調査した。その結果、モデルの年代と運動の有無の間に有意な交互作用が確認された。20代から40代の若齢群では知覚年齢を増加させないが、50代モデルの顔の運動は他者へ老けた印象を与える可能性が示された。このことから、モデルの年齢が上がるにつれて、顔の運動が老化印象を増大させる方向に作用する可能性がある。我々は当初、顔の運動は生き活きと若々しい印象を与えるものと想定していた。しかしながら、高齢群においては、皮膚の運動が若々しい印象に寄与するどころか、より顔を老けて感じさせることが示唆されたことは非常に興味深い。

一方で、顔の運動による知覚年齢への影響は、50歳代をピークに60歳代では減弱した。60代の女性は、加齢に伴う組織学的な変化により外観としてシワやたるみが顕在化する年代であることが報告されている[23], [24], [56], [57]。したがって、60代においてはシワやたるみのような静的な状態でも知覚される老化特徴が運動による知覚年齢の増加効果を減弱させたものと考えられる。

さらに本実験では、顔の運動により知覚年齢が有意に増加した 50 代において観察角度の効果を予備的に検討した。結果、顔の運動が知覚年齢に及ぼす影響は正面顔では有意であるが、顔が横方向 (Yaw 方向) に傾くにつれてその効果は減少した。先行研究において顔の動きの対称性が知覚年齢に影響することが報告されている[43]。このことから、顔の動きの左右対称性が検出されやすい正面顔において知覚年齢への運動の効果が最大となったものと考察される。

3-1-4. 実験 3-1 のまとめ

実験 3-1 では、顔の動きが知覚年齢に与える影響について検討した。その結果、50 代女性は、会話など動的な顔を通して他者に老化印象を与える可能性が示唆された。さらに、年齢判断時の観察者の視線計測の結果から頬部への視線の停留が確認された。したがって、この老化印象の原因が頬部皮膚の動的特性である可能性が示唆された。私たちは、日常的に鏡や写真に映る自身の静止顔を主に認識している。しかし、本実験により、他者に対して若々しい印象を与える上では自身の動的な顔も考慮することが重要であることが明らかとなった。一方で、顔印象の違いを生じる皮膚の動的特性については定かではない。そのため、続く実験 3-2 においては、加齢により増大する知覚年齢の要因として想定される皮膚表面の動的特性について、その加齢変化を調査する。

3-2. 実験 3-2: 表情表出に伴う皮膚表面の動的特性の加齢変化の検討

実験 3-1 の結果から, 表情表出時の頬部皮膚の動的特性の加齢変化は顔の知覚年齢に影響を与えることが示唆された. また, 顔の年齢推定システムの研究においても, 顔画像ベースのシステムよりも動画ベースのシステム, すなわち静的情報に動的情報を加えることで年齢推定精度が向上することが報告されている[58]. したがって, 皮膚の何らかの動的な特徴が加齢によって変化していることが示唆される.

表情による皮膚の動的状態に着目した先行研究として, Kuwazuru らは皮膚の多層構造を模したモデルを用いて表情変化時の皮膚表面に生じるシワの形成を有限要素法によりシミュレートして皮膚物性がシワ形成に寄与することを報告している. また, 彼らは実際の人の目尻の皮膚を強制的に収縮させた際に生じる一過性のシワの形成について, その加齢変化をしている[33]. しかしながら, これら先行研究は目尻などの皮膚の収縮動作の結果として生じるシワの形成について調査したものであり, 顔の表情変化に応じた皮膚の運動状態については不明である.

その他, 皮膚の動的特徴を計測した先行研究は数多くあるが, その目的は人の感情推定や, CG により人の表情を再現することであり[59]–[63]皮膚の動的特徴の加齢変化を調査してはいない. 加えて, これら先行研究の課題としては, 顔の表面を覆う皮膚を均質なものと仮定している. すなわち, 各種計測により取得した顔表面の運動(運動量, 速度, 加速度)は皮膚深部の表情筋の運動とみなして議論されている. しかし, 皮膚は皮下組織と真皮, 表皮という異なる物

性値を有する多層構造体であり,加齢に伴い皮下組織や真皮の構成成分であるコラーゲンやエラスチンなど細胞外マトリックスの質的・量的変化が生じ,粘弾性が低下する[23], [25], [27]–[31], [64], [65].このとき,皮膚深部の表情筋の運動は物性の異なる皮下組織,真皮,表皮を介して顔の表面へと伝搬している.したがって,本研究では皮膚の動的特徴について皮膚自体の力学特性から議論することで,表情変化に対する皮膚の応答性を評価することとした.

本研究では,表情変化に対する皮膚の応答性を評価するために,表情は縦の伸びの運動として単純化して,さらに動かす強度とタイミングを全モデルで統制した.皮膚の応答性としては,顔の縦の伸びの運動を想定すると,顎が下方へと引っ張る応力に対して応答にかかる時間と変形量とに分けられる.本研究ではこれら時間と変形量とを反映した皮膚表面の動的特徴として,皮膚表面が顎の下方への運動へ追従しない程度(遅延量)と,頬部皮膚の上部・下部の伸縮比率(伸縮量)とを解析し,それらの加齢変化を調査した.

皮膚の動的特徴の計測方法としては,直接的に計測するモーションキャプチャ法と皮膚の撮影像をもとに間接的に計測するオプティカルフロー法が代表的である.モーションキャプチャ法は,顔の座標を時系列的に取得する方法であり,計測部位にマーカーやセンサーを設置して座標を取得する方法[61], [62],および顔の画像情報から特徴点を定めて座標情報を自動的に生成する方法[59], [60], [63]がある.一方,オプティカルフロー法は,撮影された動画像に対して2つの連続した画像間のピクセルの移動を分析することにより表面の運動を計測する手法である[66]–[68].モーションキャプチャ法と比較してオプティカルフロー法は簡便に計測ができる.しかしその一方で,画像ベースでの計測となるため,3次元物体である顔を対象とした場合

には、頬など輪郭付近の奥行方向の情報が欠落してしまうことや、照明や頭部の剛体的な運動により計測精度が低下することが欠点である。本研究で捉える顔の加齢に伴う動的特徴の変化は、表情変化の過程で生じる非常に微細な特徴であることから、計測精度を最重要視して直接的に皮膚表面の運動を計測できるマーカー設置によるモーションキャプチャ法を採用した。

3-2-1. 方法

【被験者】

実験には 20–69 歳の日本人女性 86 名 (49.29 ± 12.99) が参加した。

【追跡マーカーの配置】

被験者の顔の皮膚の運動をカメラで追跡するために図 3-2-1 に示すように追跡マーカーを配置した。追跡マーカーを配置した。表情変化に伴う頬部皮膚の動的特徴のみを計測するために、頭部の剛体的な運動の影響を除外することを目的に、補正用の参照点 R を前頭中心部頭髪生え際上に設置した。また、表情変化の基準点として、顎部 Menthone に基準点 0 を設置した。頬部皮膚の運動性の計測対象として、頬部の目尻の垂線上の 7 点を配置した。追跡マーカーには、粒径約 4 mm の白色の発砲ビーズを用いた。

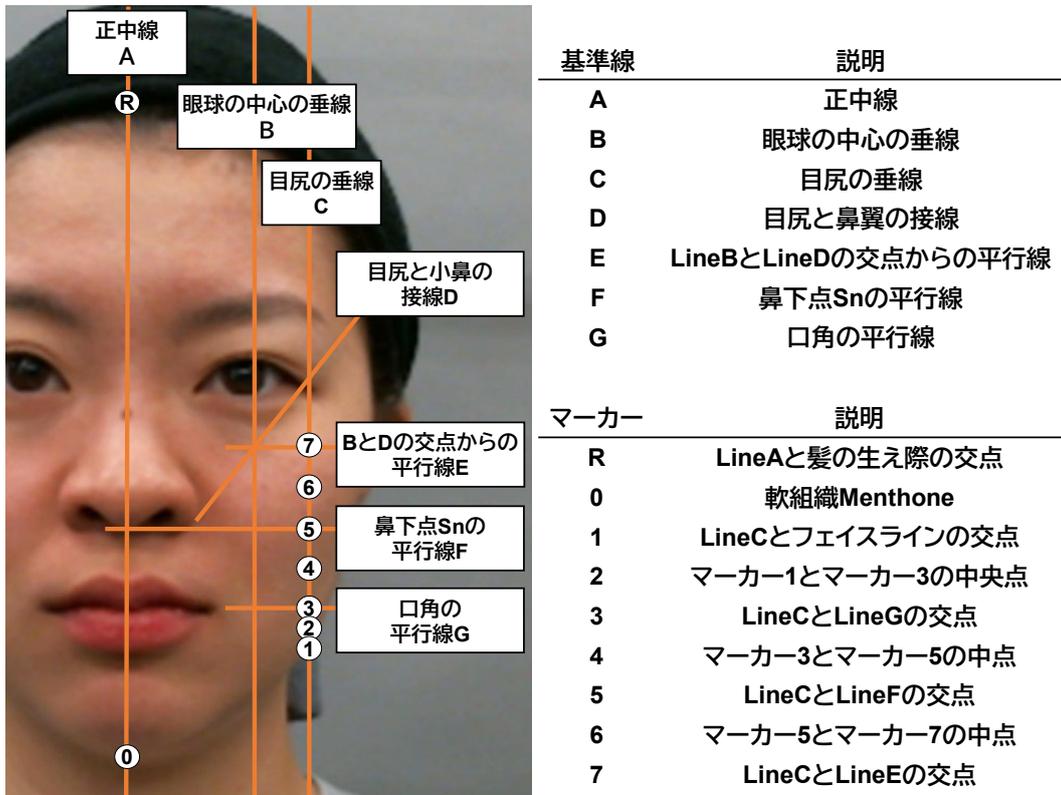


図 3-2-1. 追跡マーカーの配置図

【顔の運動の計測】

モーションキャプチャシステムは高解像度 30Hz C-MOS カラーカメラ LB-GV140, マルチ画像入力ソフト Capture-NX Ver2.96, SAS 接続式連続高速書き込み HDD システム HDD-EXViewer Ver2.60 (いずれも Library, Tokyo, Japan) を用いた。被験者を座位の状態で図 2 のようにカメラの前に配置し, 規定した顔の動きを表出したときの様子を撮影した。被験者には, 無表情から縦方向の伸びの表情を取らせた (図 3-2-3)。表情変化は, メトロノームを用いてタイミングを調整し, 1 秒ごとに無表情から縦方向の伸びの表情を表出するものとした。この表情表出のタイミングは実験前に十分に訓練させた。

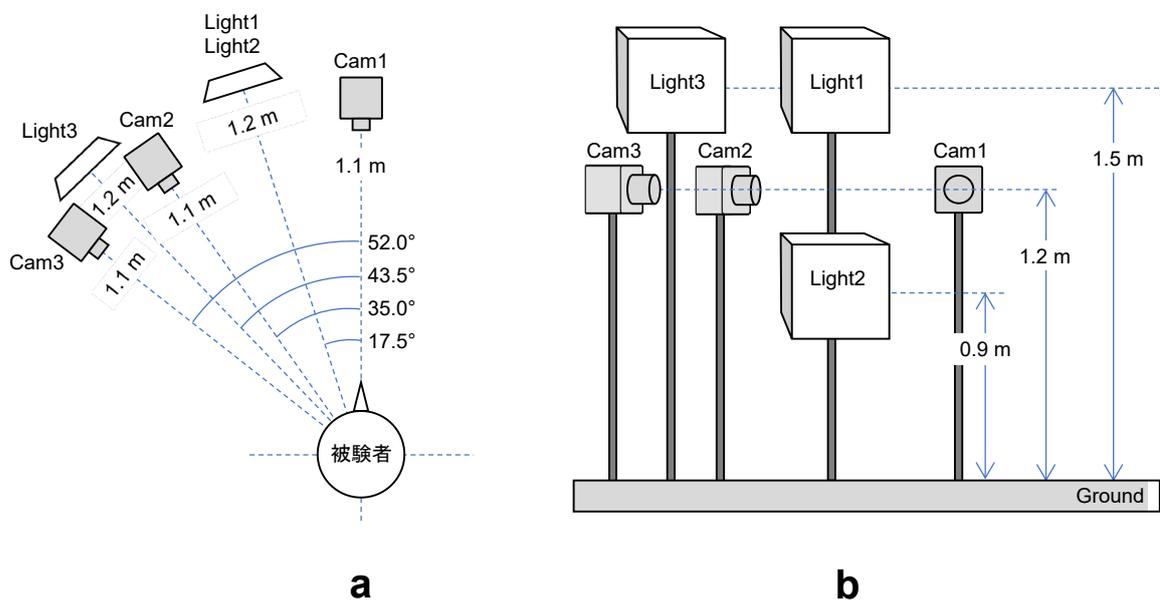


図 3-2-2. モーションキャプチャシステムの配置

(a) 被験者上方からの配置. (b) 被験者正面からの配置.

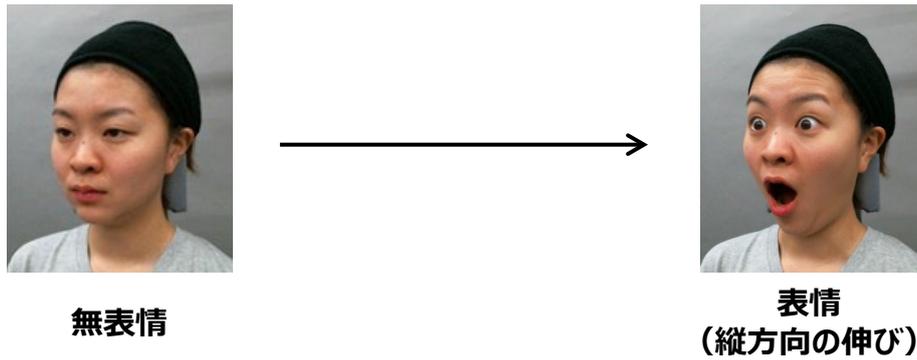


図 3-2-3. 表出表情

【遅延量の算出】

表情表出時の頬部皮膚の連動性に着目し、無表情から縦方向の伸びの運動を表出した際に、参照点（図 3-2-1 中のマーカーR）に対する基準点（図 3-2-1 中のマーカー0）の移動速度が最大値に達した時点と、頬部の各点（図 3-2-1 中のマーカー1 から 7）の移動速度が最大値に達した時点との時間差を頬部皮膚の遅延時間として算出した（図 3-2-4）。図 3-2-5 は、遅延時間とマーカー1 から 7 の関係を示したものである。このとき各マーカーの遅延時間とマーカー番号から求めた回帰係数（傾き）を各被験者の頬部運動の「遅延量」と定義した。

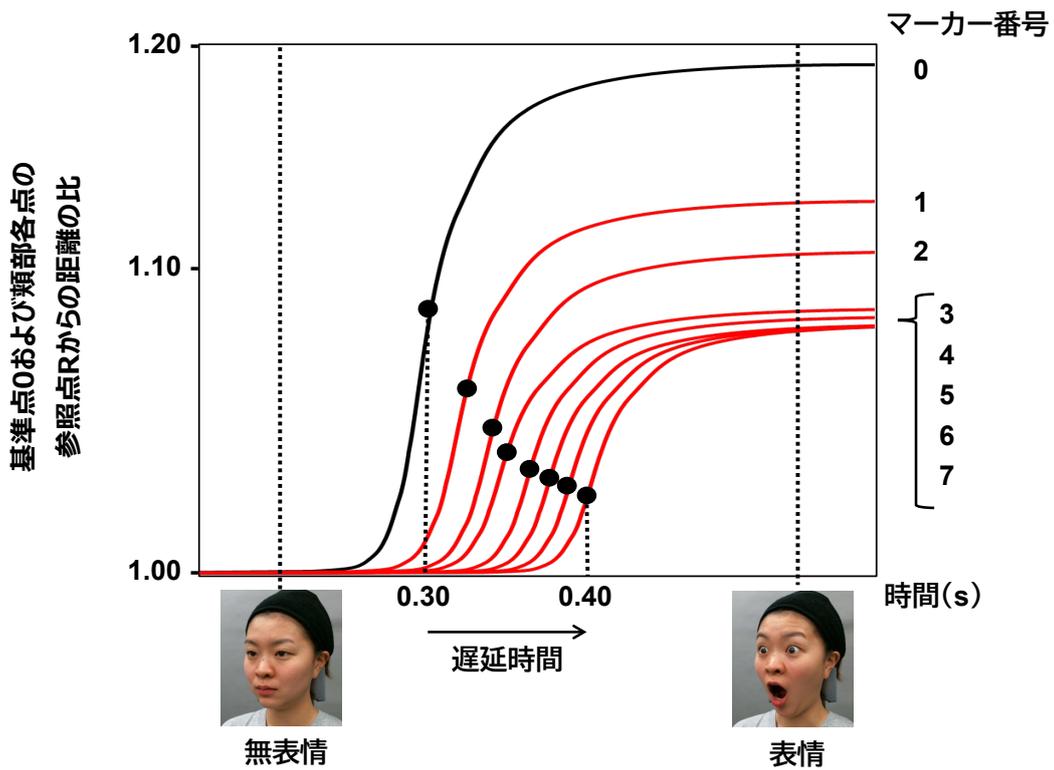


図 3-2-4. 各追跡マーカーの参照マーカーからの距離の時間変化

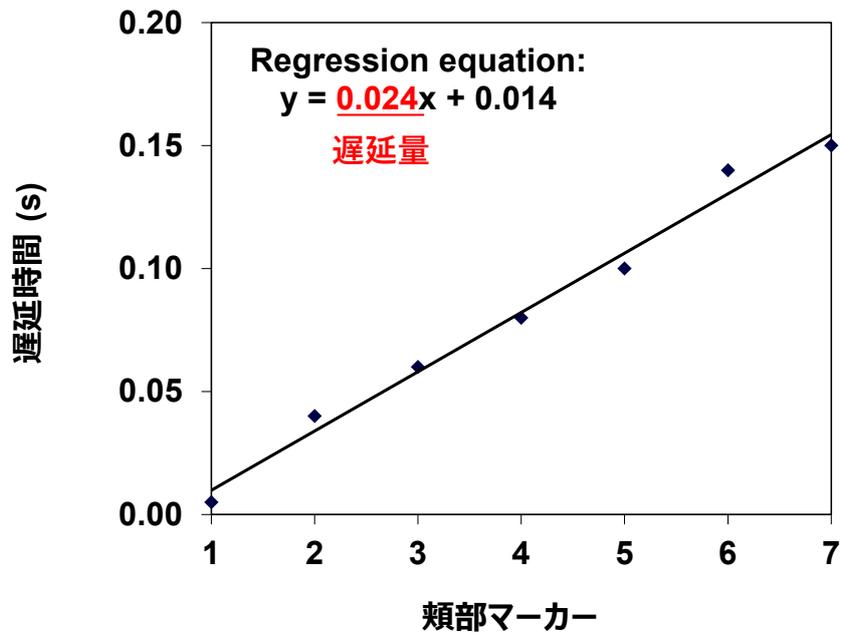


図 3-2-5. 遅延量の一例

【伸縮量の算出】

表情表出時の頬部皮膚の伸縮性に着目し、無表情から縦方向の伸びの運動を表出した際の、参照点（図 3-2-1 中のマーカーR）に対する基準点（図 3-2-1 中のマーカー0）の移動距離が最大となった時点で、頬部皮膚（図 3-2-1 中のマーカー1 から 7）の無表情時点からの移動距離の変化率を、頬部皮膚の表情表出に対する皮膚運動の「伸縮量」と定義した。このとき、顔面頬部分を、頬上部（図 3-2-1 中のマーカー1 から 4）と頬下部（図 3-2-1 中のマーカー4 から 7）に分割し、被験者ごとの表情表出時の頬部全体の伸縮運動量に対する頬下部の距離変化率、即ち「頬下部の伸縮量」を計測した。

【統計解析】

各被験者の遅延量および伸縮量と年齢との関係性は Pearson の積率相関分析により検討した。統計解析は SPSS version 25.0（IBM, Armonk, NY, USA）を用いて実施した。

3-2-2. 結果

【遅延量】

各被験者の遅延量と年齢の散布図を図 3-2-6 に示した。遅延量と年齢との間の相関関係を解析した結果、弱い相関関係が確認され（ $r = 0.24$, $P < 0.05$ ）、加齢に伴い遅延量が増加することが示唆された。また、同年齢層における遅延量の分散が加齢に伴い増加する傾向が確認された（表 3-2-1）。

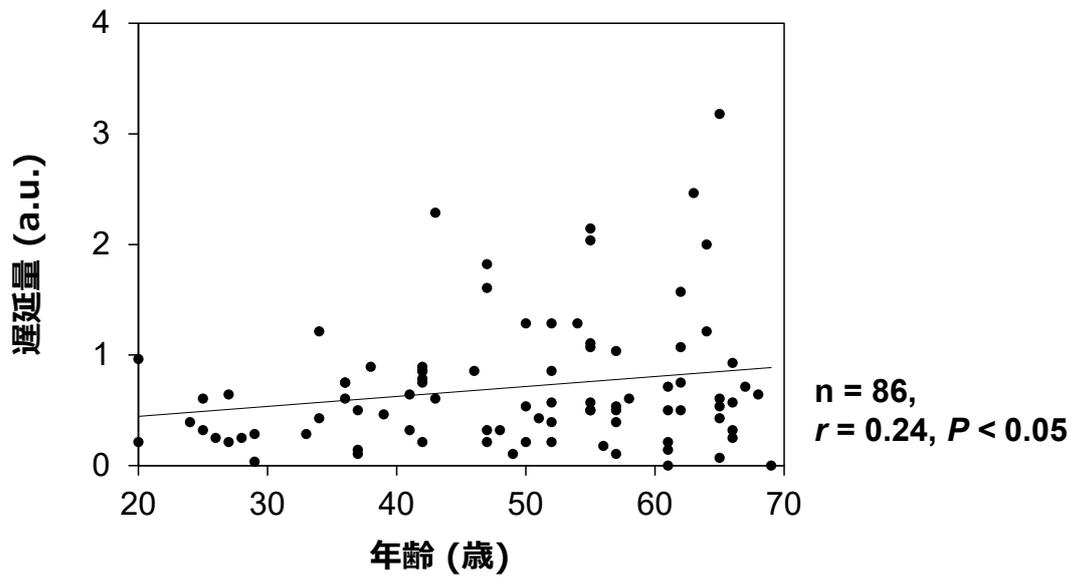


図 3-2-6. 遅延量の高齢変化

表 3-2-1. 遅延量の年代ごとの分散

年齢層	20代	30代	40代	50代	60代
分散	0.069	0.110	0.365	0.296	0.624

【伸縮量】

被験者ごとの「頬下部の伸縮量」の解析結果を図 3-2-7 に示す。結果、縦方向の伸びの表情を表出した際の頬部皮膚全体の伸縮量に対して、頬下部の伸縮量が加齢に伴い低下することが確認された ($r = -0.549, P < 0.01$)。また、同年齢層における遅延量の分散が加齢に伴い増加する傾向が確認された (表 3-2-2)。

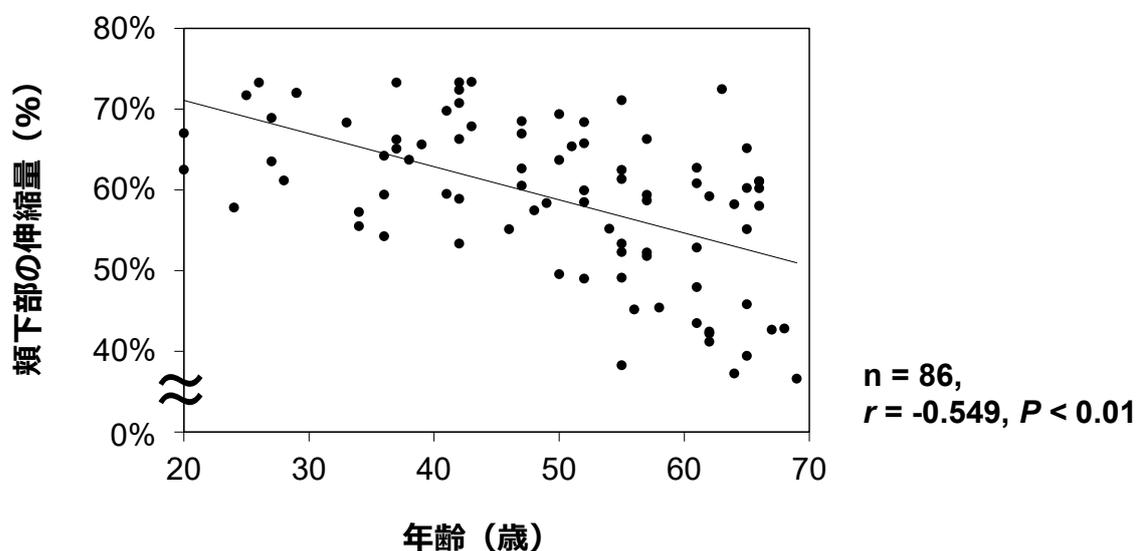


図 3-2-7. 伸縮量に加齢変化

表 3-2-2. 伸縮量の年代ごとの分散

年齢層	20代	30代	40代	50代	60代
分散	0.054	0.058	0.066	0.087	0.103

3-2-3. 考察

本研究では、皮膚の動的特徴について皮膚の力学特性から議論するために、開口運動により顎が下方へ運動することで生じる応力に対する応答時間と変形量とをそれぞれ遅延量、伸縮量として解析し、それらの加齢変化を調査した。

はじめに、表情変化に対する頬部皮膚運動の遅延は、モデルが加齢するに従い増加することが確認された。これは、開口運動による下方への応力に対する応答時間が大きくなることを反映している。この結果は、加齢により皮膚の弾性が低下するとした数多くの皮膚力学特性の報告[56][69][70]とも一致する。顔の皮膚老化は、加齢に伴う生理的变化である自然老化と紫外線を主とした日光暴露による光老化の両者が相まって生じる。第一章で整理した様に、細胞外マトリックスは、生理老化として年齢とともに減少、変性することが知られている[28], [57], [71], [72]。また、光老化として紫外線や近赤外線によって線維構造が変性することが報告されている[28], [29]。今回、確認された皮膚表面の運動の遅延は、この光老化を主とした皮膚の組織学的変化により粘弾性という皮膚内部物性が変化したことで生じたものと考えられる。

次に、表情変化に対する頬の伸縮変化は、頬下部の伸縮変化率が加齢により減少することを確認した。この伸縮運動が偏在する原因としても、光老化を中心とした加齢による頬部たるみの増大[26], [27]が影響していると考えられる。特に、今回運動を計測した部位は、顔の中でもたるみが多いことが報告されている[73]。頬の皮膚は、その深部に存在する筋肉と保持靭帯(Retaining ligament: RL)と呼ばれる線維構造で繋がっていることが知られている[74]。たる

みが生じた場合、頬上部の皮膚は RL により表情筋と接続するが頬下部は上部の RL で吊り下がった状態にある[75]。頬下部の伸縮量が加齢により減少したことは、頬部のたるみの程度が増大することにより、頬下部の皮膚表面の運動が筋肉の運動と連動して動かない状態を反映したものと考えられる。

さらに、遅延量と伸縮量はいずれも加齢に伴いスコアの分散が大きくなることが確認された。これは、各動的特徴量の要因として推察された光老化の程度が個人間で大きく異なることを反映したものと考えられる。光老化のリスクは、居住地域の日照時間や労働形態、運動習慣などのライフスタイルにより個人間で大きく異なる。また、サンスクリーンや日傘、帽子といった光老化への対策についても個人間で異なる。本研究で確認された加齢による遅延量や伸縮量の分散の増加は、個人間の光老化の程度の違い[76]を反映しているものと考えられる。

本実験の結果から、従来静的な皮膚を対象に調査されてきたシミ、シワ、たるみに代表される皮膚老化の静的特性だけでなく、表情変化する顔においては皮膚老化の動的特性が存在することが示唆された。実験 3-1 では、モデルの年齢が増加することで動的な顔はより老けて知覚されることが確認されたが、その知覚年齢の一要因が本実験で確認された皮膚の運動性の低下であると考えられる。

3-2-4. 実験 3-2 のまとめ

実験 3-1 にて, 頬部皮膚の動的特性の加齢変化が顔の外観を変化させ知覚年齢に影響を与えたことが示唆された. そこで, 本実験では, モーションキャプチャを用いて表情表出時の頬部皮膚の動的特性の加齢変化を検証した. その結果, 加齢に伴い表情変化に対して頬部皮膚の遅延量が増加すること, および頬部下部の伸縮量が減少することを明らかにした.

本実験で確認された皮膚の運動性の加齢変化が実験 3-1 で確認された知覚年齢の要因であるか否かの検証は, 続く実験 3-3 および実験 3-4 にて実施する. また, 考察で述べた運動性の変化要因として皮膚内部の組織学的変化の関与については, 第 4 章にて検証する.

3-3. 実験 3-3: 表情表出時の頬部運動の遅延の知覚感度調査

実験 3-2 では、表情表出時の頬部皮膚の運動が加齢で遅延することが確認された。そこで実験 3-3 では、人間が頬部運動の遅延を知覚する感度を調べるための実験的検討を行う。実験 3-3 の目的は 2 つある。

一つは、加齢で生じる微小な頬部運動の遅延を人が知覚できるか否かを明らかにすることである。そのために、頬部皮膚の遅延量を操作した顔の動画像を視覚刺激として用意した上で人間の遅延の検出感度を評価する。

二つめの目的は、遅延の検出感度が人間の顔情報処理で特異的に働くか否かを確認することである。人間の顔認識は脳内で顔固有の皮質領域を介して処理されることが知られており[2]、その能力は経験とともに熟達し[3]、顔のパーツの配置（例えば、目と口の間の距離）などのわずかな違いも検知できることが知られている。また、顔のパーツのみを上下反転させた顔画像において、倒立にすると正立した場合よりもその違和感に気づきにくい事象（サッチャー錯視）[77]も知られており、顔パーツの布置情報（配置関係）という顔の全体的処理システムが顔認識に重要であることが明らかになっている[77]、[78]。そこで、本実験では表情表出者の頬部運動の遅延が観察者の顔情報処理過程を介することで高感度に知覚されると仮説をたてた。本仮説検証のため、人間の顔知覚特性である全体的処理の観点から検討する。検討方法としては、運動の遅延を施す部位を頬部に限定し、全体的処理が機能する顔の正立条件に加えて、全体的処理が阻害される顔の倒立条件および部分（頬部）のみを呈示した条件を用い

て遅延の知覚感度を比較する。具体的には、モーションキャプチャで取得された顔の運動情報から、顔をグリッドとして再構成したものを視覚刺激とすることで、顔を認識できる最低限の形状成分と運動成分のみを抽出する。さらに、得られた運動成分から視覚刺激の運動量を統一的に制御した上で、「正立／倒立」「全体／部分(頬部)」の各条件に対する遅延の検出感度を調査する。まず、顔情報処理が働く「正立条件」から頬部遅延量の検出感度を調査する。次に、正立条件に対して顔情報処理が働かない「倒立条件や部分(頬部)条件」を比較することで顔認知における遅延情報処理の特異性を検証する。

3-3-1. 方法

【被験者】

裸眼もしくは矯正で健常な視力を有する 20 代の男性 16 名、女性 4 名の計 20 名が実験に参加した。

【刺激】

実験 3-3 では、グリッドで構成された「正立顔」「倒立顔」「正立頬部」「倒立頬部」の 4 つの刺激形状に対して、7 種の異なる遅延パターンをそれぞれの頬部に付与した計 28 条件の動画像を実験刺激として使用した。

(a) 顔の運動情報のデータベース

まず各刺激の作成に用いた顔の運動情報のデータベースについて記述する。本データベースは、20代～60代女性101名の顔モデルの表情変化時の顔表面の運動情報が記録されている。本実験に用いた運動情報の取得方法を以下に記述する。顔モデルに対して、図3-3-1に示すように配置された顔の左半分の追跡マーカーの挙動を Move-tr/3D (Library, Tokyo, Japan) により取得した。本実験においては、顔の運動や器官の布置関係の左右非対称性の影響を排除するために、顔の左半分の運動情報を取得した上で、後述する方法に則り顔の反対側へ展開することで左右対称の動的刺激を作成した。

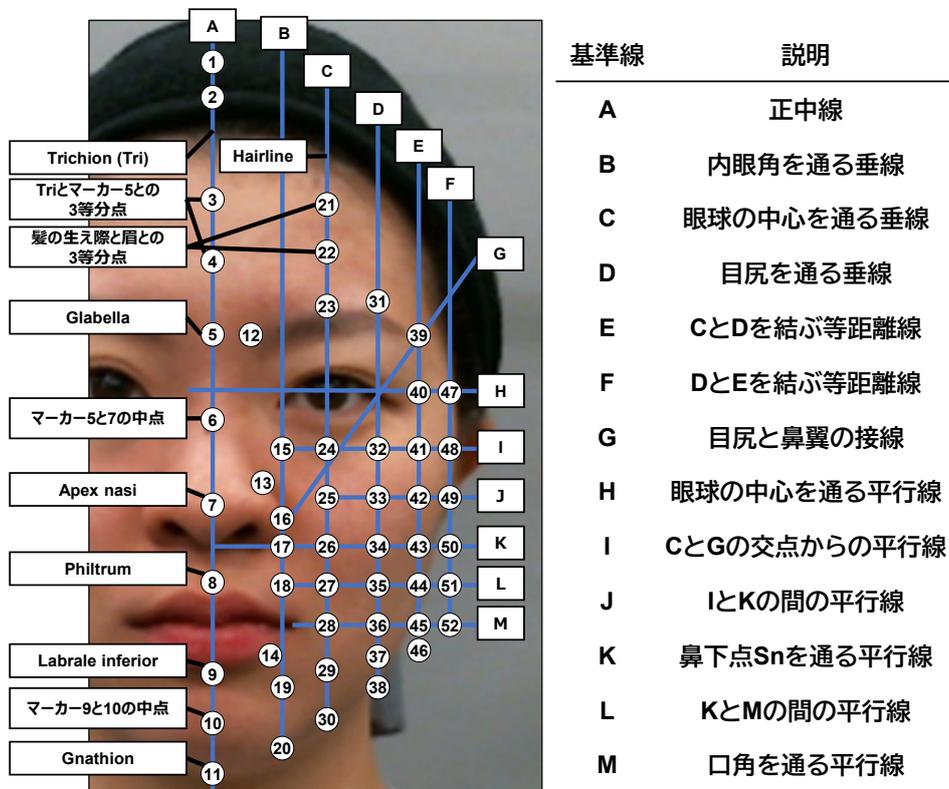


図 3-3-1. 追跡マーカーの配置

顔モデルには座位にて無表情から縦方向の伸びの表情を行わせた(図 3-3-2). 表情変化はメトロノームを用いてタイミングを調整し, 1 秒間で表情を表出させた. 顔モデルには撮影前にタイミングに合わせた表出の練習を十分に実施させた.

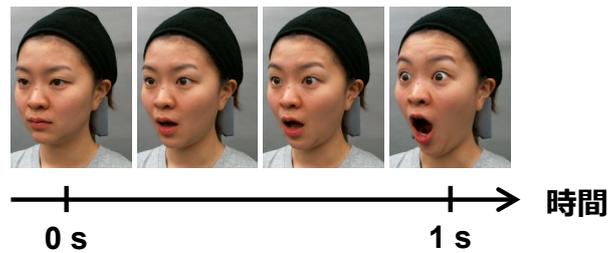


図 3-3-2. 表出表情

(b) 刺激の形状条件

次に, 顔刺激と頬部刺激の形状条件の決定方法について記述する. 顔運動情報のデータベースには顔の左半分の運動情報のみが記録されているため, 実験に用いた顔刺激では, 図 3-3-1 におけるマーカー1, 7, 11 の3点を通る平面に対して左右対称にマーカーを反転することで顔の右半分にマーカーを展開し, 顔全体の動きを作成した. その後, 異常データを除いた 97 名分(平均年齢 46.5 歳(標準誤差 \pm 13.3 歳))の座標データから表情表出前の「無表情」および「縦方向の伸びの表情」の2つの表情における各マーカーの座標平均値を算出し, 「無表情」と「縦方向の伸びの表情」それぞれの平均的な顔形状を作成して顔刺激の形状とした. 作成した2つの平均顔から, マーカー15, 20, 52, 48の4点で囲まれた範囲を抜き出し, 頬部刺

激の形状とした。図 3-3-3 に顔刺激の開始時形状および終了時形状を示す。「倒立顔」「倒立頬部」の形状は「正立顔」「正立頬部」の形状をそれぞれ上下反転させたものとした。

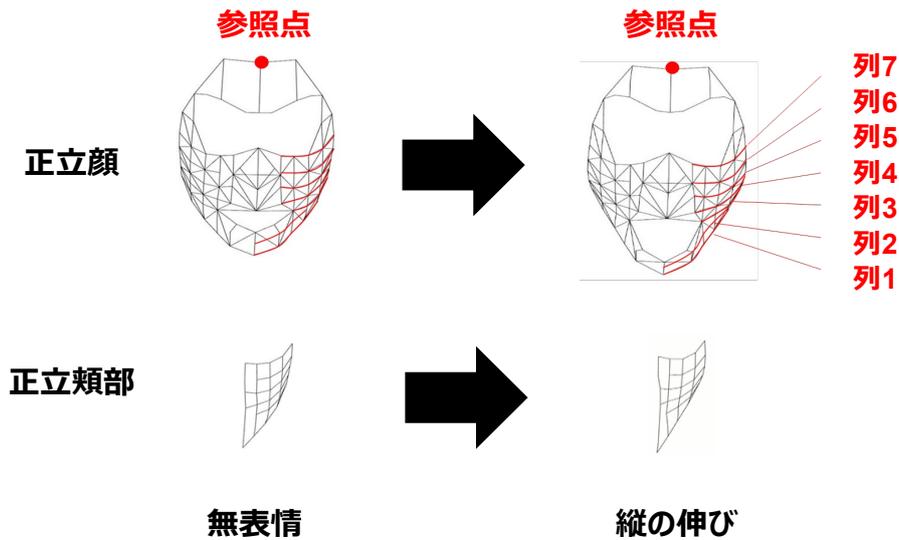


図 3-3-3. 無表情から表情表出までの刺激形状

(c) 刺激の運動条件

頬部の運動遅延量を系統的に制御するため、付与する 7 種の遅延量（遅延なしを含む）の作成を行った。元となる運動は「無表情」から「縦方向の伸びの表情」へと約 1 秒間で推移した。各表情顔上のマーカーの平均座標を算出し、「無表情」の平均顔の各マーカー座標を、「縦方向の伸びの表情」の平均顔の対応するマーカー座標まで直線的に遷移させることで、開口モーションを作成した。このとき、各マーカーの遷移速度は、実測されたマーカーの挙動を模

倣してシグモイド関数(1式)を用いて設計した。Kは変化率を、bは曲線の位置を、cは傾斜の大きさを示している。

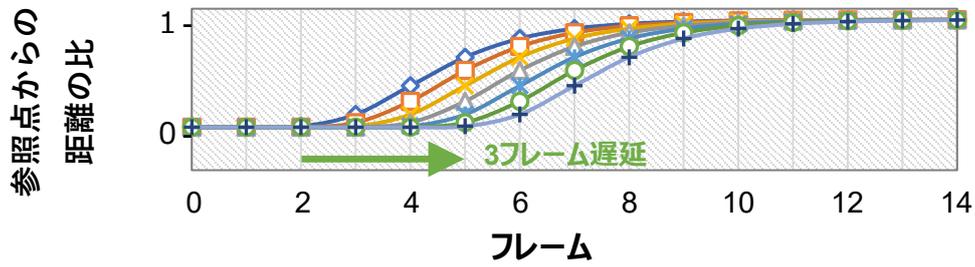
$$y = Kb e^{-cx} \quad (1)$$

頬部の遅延量が異なる6種の開口モーションを作成した(Delay1~Delay6)。頬部の遅延量は Delay1 が最も小さく、Delay2, Delay3, ...となるにつれて大きくなる。このとき、Delay3 はモーションキャプチャで計測した実際の20代女性と50代女性の頬上部(図3-3-1のマーカー15~48の列)における遅延時間の差である0.1秒の遅延量を反映させた。Delay3をベースとし、Delay1では頬上部の遅延量が Delay3 の3分の1に、Delay2では3分の2に、...Delay6では2倍となるよう値を設定し、任意のタイミングにおける座標を得た。表3-3-1に、ターゲット刺激に適用した頬部の遅延フレーム数を、図3-3-4に遅延量の付与と遷移の例を示す。

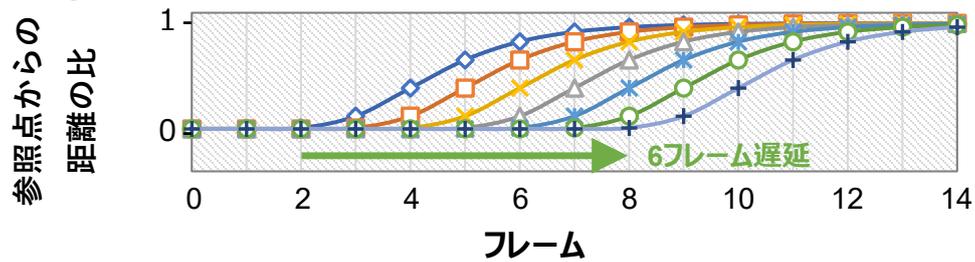
表 3-3-1. 頬部各列の遷移フレーム

	列 1	列 2	列 3	列 4	列 5	列 6	列 7
Delay1	0.000	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	1.000
Delay2	0.000	0.333	0.667	1.000	1.333	1.667	2.000
Delay3	0.000	0.500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000
Delay4	0.000	0.667	1.333	2.000	2.667	3.333	4.000
Delay5	0.000	0.833	1.667	2.500	3.333	4.167	5.000
Delay6	0.000	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000

Delay3



Delay6



◇1列目 □2列目 ×3列目 △4列目 *5列目 ○6列目 +7列目

図 3-3-4. 遅延性の遷移の一例

1 列目はマーカー11, 20, 30, 38, 46 (輪郭), 2 列目はマーカー10, 19, 29, 37, 3 列目はマーカー28~52の横列, 4 列目はマーカー18~51の横列, 5 列目はマーカー17~50の横列, 6 列目はマーカー25~49の横列, 7 列目はマーカー15~48の横列を指している(図 3-3-1, 図 3-3-4 参照). 右頬部にも左頬部と同じ遅延量を付与し, その他のマーカーについては1 列目と同じ遅延量を付与した. 頬部刺激についても顔刺激と同じ遅延量を使用し, マーカーの遷移座標を求めた.

次に, 前節で作成した遅延なしおよび遅延ありモーションのマーカー座標を用いた動画像刺激の作成手順および統制方法について説明する. はじめに, 「正立顔」「倒立顔」「正立頬部」「倒立頬部」の4種×遅延量7種(遅延なしを含む)の計28種類のモーションそれぞれを,

MATLAB 2018a (Mathworks, Natick, MA, USA) を用いて画面に描画し、60 枚の連続する静止画像として展開した。このとき、各マーカーの座標を線画として繋いだグリッドとすることで顔の立体的な形状を表現した。続いて、それら画像群についてマーカー7を中心に、674 (縦) ×674 (横) pixels の 2 秒間 (30 fps) の動画を作成した。

以上の開口モーションから「正立顔」「倒立顔」、顔刺激の左頬部を抜き出した「正立頬部」「倒立頬部」の計 4 種について、それぞれで遅延なし、遅延あり (6 種) の計 7 種の遅延パターンを付与し、計 28 種の動画像刺激を実験刺激として採用した。また、各刺激条件のうち遅延なしをコントロール刺激として採用した。

顔刺激の大きさについては、再生開始時の顔の縦幅が約 9.3 cm、横幅が約 6.7 cm、再生終了時の顔の縦幅が約 10.6 cm、横幅が約 6.8 cm で画面上に呈示された。また、頬部刺激は再生開始時の頬部の縦幅が約 5.2 cm、横幅が約 2.1 cm、再生終了時の頬部の縦幅が約 6.9 cm、横幅は約 2.2 cm で画面上に呈示された。

【手続き】

実験は「正立顔」「倒立顔」「正立頬部」「倒立頬部」でブロック化して行った。被験者には、連続して呈示される 2 つの動画が同一のものであるか否かをキーボードにて回答させた。画面上に教示文が呈示された後、被験者が任意のタイミングでキーを押すことで実験が開始された。固視点が 0.5 秒間表示された後に一つ目の動画が 2 秒間再生された。その後、固視点が 0.5 秒間表示された後に 2 つ目の動画が 2 秒間再生された。刺激呈示後、被験者はそれら 2

つの動画が同一のものであるか否かをキーボードにて回答した。回答は2つ目の動画が再生されている途中でも可能とした。以上の流れを1試行として各ブロックで140試行ずつ行った。このとき、呈示する2つの動画のうち1つはターゲット刺激(遅延なし, Delay1~Delay6)からランダムに選ばれ、もう1つはコントロール刺激(遅延なし)を呈示した。各ブロックの呈示順およびターゲット刺激とコントロール刺激の呈示順はカウンターバランスをとり、7種のターゲット刺激は各20回ずつ呈示された。

また、実験は暗室にて行い、ディスプレイまでの視距離は57.3cmとした。各ブロックの実験は実験間を3時間以上空けて実施した。

3-3-2. 結果と考察

実験結果から回答の信頼性の低いデータを除外することを目的に、全被験者の平均回答時間(2.13秒)に対して回答時間が6秒以上のデータ(全データの0.82%)をエラーデータとして解析から除外した。また、エラーデータが著しく見られた被験者1名の全データ(140データ×4刺激条件分)を解析から除外した。除外したデータ数は各ブロック2800データのうち、「正立顔」では145データ、「倒立顔」では144データ、「正立頬部」では149データ、「倒立頬部」では148データとなった。

はじめに、人間が頬部の運動からどの程度の遅延量を検出できるかを確認するため、19名の被験者に対して「正立顔」における検出率50%および75%の遅延量を調べ、その平均値を求めた。ここで、検出率50%の遅延量は遅延を弁別できる閾値として丁度可知差異(Just

Noticeable Difference: JND) と表記する。JND は値が低いほど感度が高いことを意味する。その結果、加齢で生じる遅延量として 20 代と 50 代の差として設定した Delay3 (0.1 秒) の遅延量を 3 としたとき、JND は 2.03、さらに明白な差異がわかる検出率 75%の遅延量は 2.78 となった。正立顔における JND や検出率 75%遅延量が実際に加齢で生じる遅延量よりも小さくなったことから、人間は加齢に伴い生じる頬部の遅延量を知覚可能であることが示された。

次に、頬部の遅延性の知覚が顔の情報処理で特異的に働くかを検証するため、4 種の刺激条件における遅延検出感度の違いを比較した。正立顔と同様の手順で「倒立顔」「正立頬部」「倒立頬部」における JND を算出した。その結果、「倒立顔」では 2.20、「正立頬部」では 2.68、「倒立頬部」では 2.43 となった。図 3-3-5 は各刺激条件において、それぞれの遅延量に対する遅延の検出感度をマーカーでプロットし、さらに、刺激条件ごとに最小二乗法を用いて S 字の近似曲線をフィッティングしたものである。横軸は遅延量を表しており、0:遅延なし、1~6: Delay1~6 に対応している。縦軸は各遅延量が付与された刺激に対して遅延があると知覚された割合、すなわち「遅延検出率」を示している。また、図 3-3-6 に各刺激条件における JND を示す。

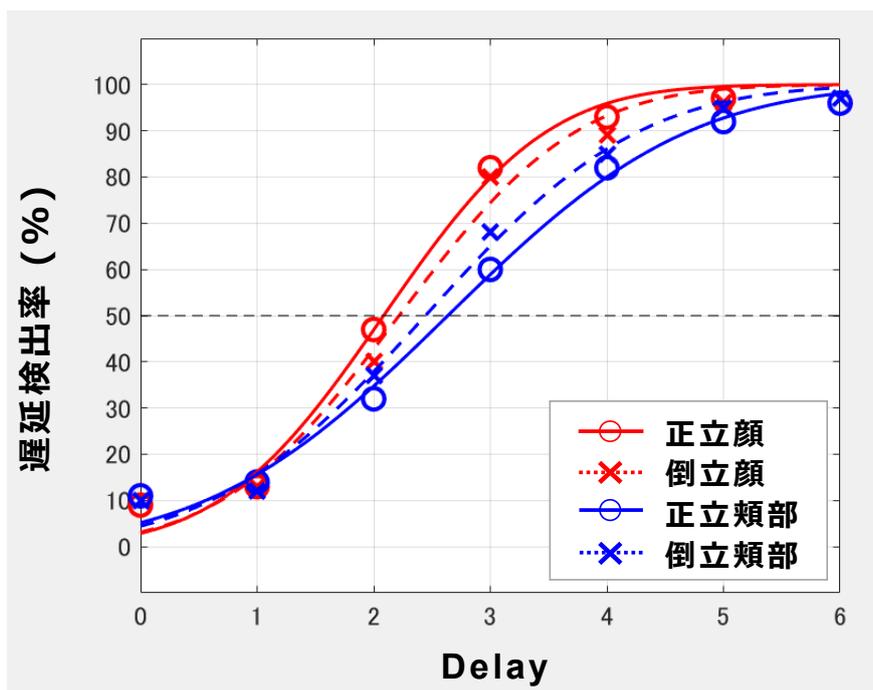


図 3-3-5. 各刺激形状に対する遅延の検出感度

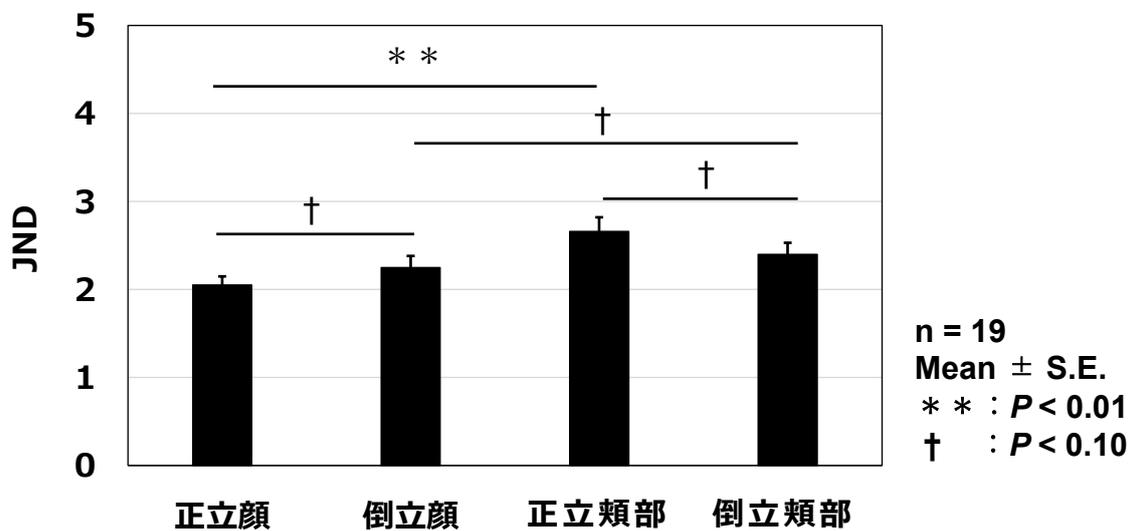


図 3-3-6. 各刺激形状に対する JND

刺激の向き(正立・倒立)および領域(顔・頬部)によって JND に差が見られるかどうかを検証するために、独立変数を刺激の向き(2水準)と領域(2水準)、従属変数を JND とする 2 要因分散分析を行った。結果、交互作用が認められた [$F(1, 18) = 5.272, P < 0.05, \eta_p^2 = 0.227$]。単純主効果の検定の結果、「正立顔 × 正立頬部」では検出感度に有意差が認められ、正立顔で感度が高くなった [$F(1, 18) = 24.327, P < 0.01, \eta_p^2 = 0.575$]。顔全体と頬部のみの遅延検出感度に差が現れたことから、遅延情報が顔情報処理に特異的である可能性が示唆された。また、「正立顔 × 倒立顔」では正立顔において倒立顔よりも検出感度が高い傾向が確認された [$F(1, 18) = 3.010, P < 0.1, \eta_p^2 = 0.143$]。顔刺激と頬部刺激ほどの顕著な差は認められなかったが、顔情報処理が働き難い倒立顔刺激と比較して正立顔刺激で検出感度が高い結果は、顔の頬部遅延情報が顔情報処理過程において特異的である可能性を支持するものと考えられる。

次に、「倒立顔 × 倒立頬部」および「正立頬部 × 倒立頬部」では遅延検出感度の差に有意傾向が認められ(順に [$F(1, 18) = 3.337, P < 0.1, \eta_p^2 = 0.156$], [$F(1, 18) = 3.847, P < 0.1, \eta_p^2 = 0.176$]), 「倒立顔 × 倒立頬部」では倒立顔で、「正立頬部 × 倒立頬部」では倒立頬部でそれぞれ検出感度が高くなった。「倒立顔」と「倒立頬部」の比較では、倒立顔においては倒立効果による一定程度の全体的処理の障害は受けるものの、物体処理が働く頬部形状よりは検出感度が高いものと考えられる。一方でいずれも物体処理が働く「正立頬部」と「倒立頬部」の比較では、倒立頬部の検出感度が高い結果となった。これは、倒立頬部のモーションが正立頬部と比べて物理現象に即した動きであったためだと推測する。今回、正立頬部が一番

下の列から順々に下にずれていく動きをとり、倒立頬部は一番上の列から順々に上にずれていく動きをとった。倒立頬部の動きは現実世界において、粘性のある物体の上部を重力に反して上方へと十分に早く引っ張った際の物体の動きに相当する。この場合、力点がまず初めに引っ張られた方向に動き出し、力点から遠い部分ほど動き出しが遅くなる。一方で、物体の下部が下向き（重力方向）に引っ張られた場合、重力の影響で物体全体が同時に落下を行うため、重力に対して十分大きな力を下方へ加えない限り正立頬部で示される下から順々に動き出すモーションは生じない。このように、倒立頬部のモーションは現実世界に即した挙動を取ることから細部の情報まで知覚がなされ、遅延検出感度が高くなったと考察される。

3-3-3. 実験 3-3 のまとめ

実験 3-3 では、加齢に伴い生じる「頬部運動の遅延」という情報に注目し、同情報を人間が検知可能であるかについて検証を行った。結果、人間が他者の顔動作（縦方向の伸びの運動）の観察において、加齢で生じる頬部の遅延を高い精度で知覚可能であり、非顔刺激と比べて顔刺激で遅延検出感度が高くなることが分かった。このことから、人間は表情表出時に生じる頬部の遅延を普段から無意識的に知覚しており、頬部の遅延情報を他者の印象判断に利用している可能性が考えられた。したがって、人間は加齢にともなう頬部の遅延を知覚可能であることが示された。さらに、頬部の遅延は顔情報処理過程で特異的に処理される可能性が示唆された。

3-4. 実験 3-4: 表情表出時の頬部運動の遅延が顔印象へ及ぼす影響の検討

実験 3-3 では、人が加齢に伴う頬部の運動の微小な遅延を知覚可能であることが示された。そこで実験 3-4 では、人間が十分知覚できる頬部の遅延量を付与した顔刺激と遅延量を付与していない顔刺激とを用いて、頬部の遅延情報が顔から受ける年齢、魅力、感情（活動性および快不快）の印象に与える影響について調査を行う。

3-4-1. 方法

【被験者】

裸眼もしくは矯正で健常な視力を有する 10 代～20 代の男性 17 名、女性 8 名の計 25 名が実験に参加した。

【刺激】

(a) 刺激の形状条件

実験 3-1 で用いた顔モデルから 20 代～60 代の各年代 2 名ずつ、10 名の顔運動データを無作為に選出し、遅延を付与する基本顔とした。

(b) 刺激の運動条件

それぞれの顔に対して、実験 3-1 で作成した遅延量の決定方法と同様の手順で開口モーションおよび頬部への遅延付与を行った。本実験では実験 3-3 で正立顔において検出感度が閾

値より十分高い値 (= 75%) であった遅延量 (Delay3 の遅延量を 3 としたとき 2.78) を頬部に付与し, 「遅延あり刺激」とした. 検出感度 75% の具体的な遅延フレーム数を表 3-4-1 に示す.

表 3-4-1. 検出感度 75% の遅延フレーム数

	列 1	列 2	列 3	列 4	列 5	列 6	列 7
Delay2.78	0.000	0.455	0.909	1.364	1.819	2.274	2.728

また, 頬部に遅延のない「遅延なし刺激」を作成した. 実験 3-3 と同様の方法にてシグモイド関数 (1 式) を用いて頬部に遅延を付与した開口モーションの座標遷移を算出後, 674 (縦) × 674 (横) pixels の 2 秒間 (30 fps) の動画を作成した. 図 3-4-1 に顔輪郭形状の一例を示す. 遅延あり刺激が 10 本, 遅延なし刺激が 10 本, 計 20 本の動画像を実験刺激として用いた.

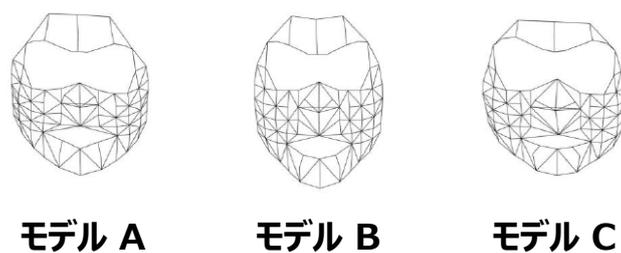


図 3-4-1. 刺激とした顔輪郭形状の例

【手続き】

被験者には、呈示された顔刺激に対する印象を二者強制選択により回答させた。印象標語は「10代 or 70代」（年齢）、「魅力的である or 魅力的でない」（魅力度）、「生き生きしている or 生き生きしていない」（活性度）、「快表情である or 不快表情である」（快/不快表情）の4種とした。4種とも先に挙げた印象を好印象標語と定義した。

まず、教示文が呈示され、被験者が任意のタイミングでキーを押すことで実験が開始された。固視点が0.5秒間表示された後に顔刺激が2秒間再生された。顔刺激呈示後、被験者はその印象をキーボードにて回答した。この流れを1試行として各印象で40試行を行った。それぞれの印象評価実験はブロック化して行った。動画の呈示順、ブロックの評価順はカウンターバランスをとった。実験環境については実験3-1と同様に暗室で行い、ディスプレイまでの視距離は57.3 cmであった。

3-4-2. 結果と考察

各印象への頬部遅延の影響を調べるため、印象ごとに遅延の有無別で好印象選択率を求めたものを図 3-4-2 に示す。ここで好印象選択率とは、ある刺激条件の呈示回数に対する好印象標語が回答された割合とし、各印象で「10代」、「魅力的である」、「活き活きしている」、「快表情である」の選択率を指す。

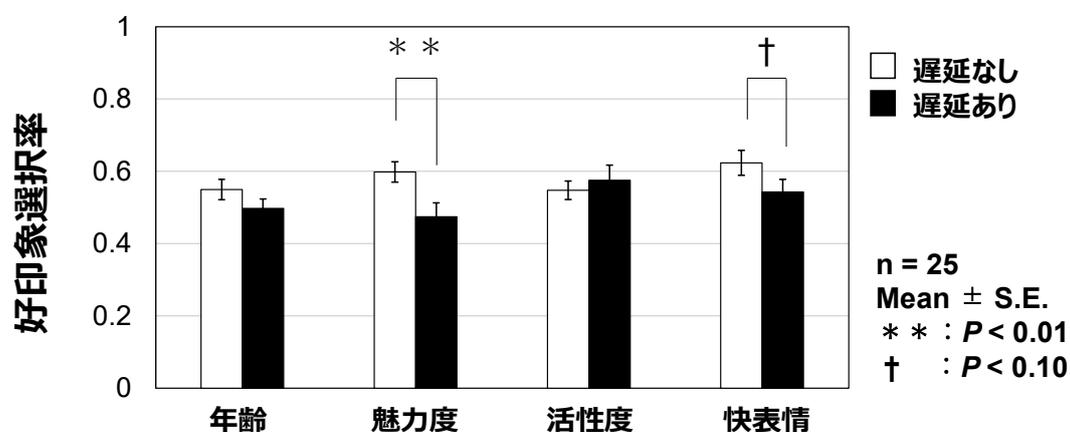


図 3-4-2. 顔印象に対する遅延有無の影響

印象評価における頬部の遅延の影響を調べるため、独立変数を印象条件(4水準)と遅延条件(2水準)、従属変数を好印象選択率とした2要因分散分析を行った。その結果、交互作用に加え、遅延の有無について「魅力度」で単純主効果が有意であり[$F(1, 24) = 15.356, P < 0.01, \eta^2 = 0.390$], 「快/不快表情」で有意傾向が認められ[$F(1, 24) = 3.620, P < 0.1, \eta^2 = 0.131$], 両者ともに「遅延なし」のほうが「遅延あり」よりも好印象であると評価された。一方で、「年齢」および「活性度」の印象については遅延条件で有意差が認められなかった。

実験 3-4 では、頬部の遅延量が他者の印象に与える影響について調査を行った。結果、「魅力度」や「快/不快」の判断では、遅延のある顔では遅延のない顔に対して印象が悪化すること（魅力度の低下および快印象の低下）が確認された。本結果は、頬部の遅延情報が他者の印象評価に影響を及ぼすことを示している。魅力印象については、先行研究では静的な顔を対象に、顔の形態的、色調的特徴の影響が報告されてきた。具体的には、顔の平均性[79]や左右非対称性[80]、目や口といったパーツの形態的特徴[81]や皮膚色の輝度[82]や均一性[83]が魅力に影響することが報告されている。本実験から、加齢に伴い生じる微小な頬部運動の遅延という顔の動的特性が魅力に影響することが初めて示された。また、先行研究においては、他者の感情の認知に感情と対応する表情の表出速度が影響を及ぼすことが報告されている[84]。本実験では、頬部遅延の有無という感情とは直接的には関与せず表出者が制御できない運動情報によって顔から受ける快印象を低下する可能性を初めて明らかにした。

3-4.3. 実験 3-4 のまとめ

実験 3-4 では頬部の遅延情報が顔印象に及ぼす影響について検証を行った。その結果、加齢で生じる頬部遅延は直接的な「年齢」の知覚に有意な影響は確認されなかった。しかしながら、頬部遅延が「魅力度」と「快/不快」といった対人的な印象を悪化させる可能性が示された。

実験 3-3 および実験 3-4 では、人間が顔の部分的な動的特性を知覚する機構が顔情報処理においてなされる可能性を示すとともに、動的な顔が対人印象に影響することを示した初め

ての研究である。実験的検討であることから、特定の顔の動作であることやグリッドで構成された顔であるなど、人間が日常で接する顔の状態とは乖離があるため、今後は顔運動として情動に即した表情を用いることや、刺激として皮膚のテクスチャ情報を付与することで、より顔の実態に即した条件による詳細な検討が必要である。

3-5. 第3章のまとめと考察

本章では、知覚年齢に対する皮膚表面の動的特性の影響を実験的に検討した。実験 3-1 では、年齢知覚実験により、顔運動の有無を操作した視覚刺激を用いて知覚年齢に対する顔運動の影響を調査した。加えて、年齢判断している最中の観察者の視線を計測することで知覚年齢に寄与する顔の領域を特定した。その結果、顔の運動は知覚年齢に影響しモデル年齢が増加することで知覚年齢が増大することを確認した。また、観察者は年齢を頬部情報から判断している可能性が示唆された。実験 3-2 では、モデル年齢の増加に伴い知覚年齢が増大する原因を明らかにするために実験 3-1 で特定された年齢判断に重要な顔領域（頬領域）について、モデルの頬部皮膚表面の動的特性を計測し、その加齢変化を調査した。その結果、加齢に伴い頬部皮膚表面の運動が表情表出に対して遅延すること、および頬下部の皮膚が伸縮しなくなることを確認した。実験 3-3 では、加齢に伴い生じる「頬部運動の遅延」という情報に注目し、同情報を人間が検知可能であるかについて検証を行った。その結果、人間が他者の顔動作（開口運動）の観察において、加齢により生じる頬部の遅延を高い精度で知覚可能であり、非顔刺激と比べて顔刺激で遅延検出感度が高くなることが確認された。したがって頬部の遅延情報は顔情報処理過程で特異的に処理される可能性が示唆された。実験 3-4 では、人間が十分知覚できる頬部の遅延量を付与したワイヤーフレームの顔刺激を用いて、頬部の遅延情報が顔から受ける年齢、魅力、感情（活動性および快不快）の印象に与える影響について調査した。その結果、加齢で生じる頬部遅延は直接的な「年齢」の印象に有意な影響は確認されないものの、モデル顔から知覚される魅力度や快感情を低下することで対人印象を悪化する

可能性が示された。本結果から、知覚年齢においてはワイヤーフレームでは表現できない皮膚のシワやたるみといった表面テクスチャの運動による見え方が寄与することが考察できた。本章の結果から、加齢に伴い生じる頬部皮膚の運動の遅延が知覚年齢の増加をはじめとする対人印象悪化の要因となることが示唆された。

第 4 章 実験的検討：表情表出時の皮膚の動的特性に対する皮膚内部要因の影響

第 3 章では、表情表出時の顔の知覚年齢が変化する要因として、皮膚表面の動的特性の関与が示唆された。本章では、これら皮膚表面の動的特性を生じる要因を明らかにすることを目的とする。皮膚表面の動的特性は、皮膚深部の筋肉の運動が皮膚内部を伝搬して生じる。そこで、運動の伝搬に寄与する皮膚内部物性として粘弾性に着目し、前章で確認された皮膚表面の動的特性との関連性を検討する。

実験 4-1 では、多層構造体である皮膚について、深さごとの粘弾性を把握することを目的に、深さごとの粘弾性と、年齢および Body mass index (BMI) との関係性を調査する。続く実験 4-2 では、実験 4-1 で加齢変化が示唆された皮下組織上層の粘弾性について、皮膚表面の遅延性との相関関係を調査する。さらに、実験 4-3 では、ヒト皮膚物性の計測値を用いた高齢および若齢の皮膚モデルをコンピュータシミュレーションにより作成し、皮下組織上層の粘弾性の加齢変化が皮膚表面の遅延の増加へ影響するという因果関係を調査する。最後に、実験 4-4 では実験 4-1 で確認された皮下組織の物性変化のメカニズム解明に向けて、ヒト皮下組織の組織学的観察により皮下脂肪周囲の線維構造の加齢変化について調査する。

4-1. 実験 4-1: 皮下組織の粘弾性の年齢および BMI との関係性調査

第 3 章では、加齢に伴い頬部皮膚運動の遅延が生じること、およびその遅延が顔印象に寄与する可能性を確認した。本実験では、頬部皮膚運動の遅延の要因となる皮膚内部物性として粘弾性に着目し、皮膚の深さごとの粘弾性の計測と年齢および BMI との関係性を調査する。

皮膚は、最外層から表皮、真皮、皮下組織から成る多層構造体である(図 4-1-1)。表情は皮下組織の下層の筋肉の収縮により生じる。我々は表情表出に伴う頬部皮膚の遅延の増加は、皮膚内部構造、特に皮下組織の物性の変化に起因するとの仮説をたて、実験 4-1 にて皮膚の粘弾性の測定を実施する。その理由としては、(1) 皮膚表面の動きは、皮膚深部の筋肉およびその表層を覆う表在性筋膜 (Superficial musculoaponeurotic system: SMAS) の運動に起因し皮下組織・真皮・表皮と皮膚内部を伝達することで生じていること、(2) 皮膚と筋肉に挟まれた最も厚い皮下組織が皮膚運動に関係していると推測されること、があげられる。

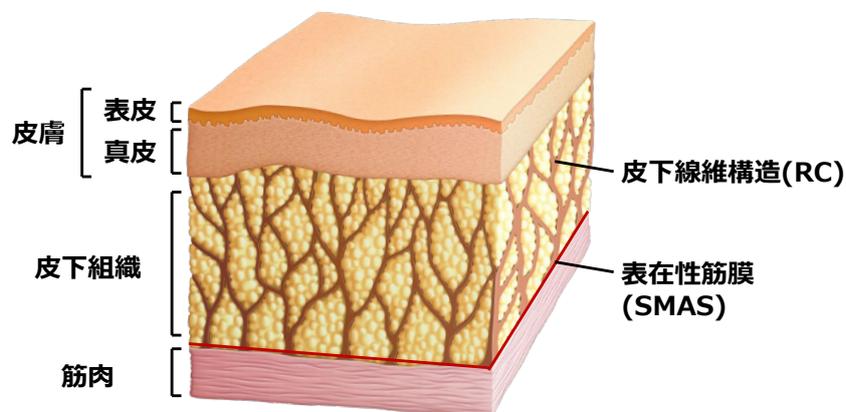


図 4-1-1. 皮膚の構造

そこで、本実験では、皮膚および皮下組織の物性値として粘弾性を計測し、その加齢変化を調査する。また、皮膚の粘弾性には体脂肪率が影響することが報告されている。そのため、皮膚の粘弾性とBMIとの関係性についても調査する。

先行研究において、顔の皮膚の粘弾性は様々な方法で測定され、加齢とともに変化することが報告されている。従来、皮膚の粘弾性は代表的な測定機器である Cutometer [56], [85], Ballistometer [86]などで測定されている。これらの測定方法は、皮膚表面に吸引や振動などの刺激を与え、刺激に対する皮膚表面の変化量から、皮膚の浅層から深層にわたる全体の粘弾性を推定するものである。一方、皮膚は表皮、真皮、皮下組織など複数の層で構成されており、それぞれ異なる物性を有する。そのため、各層の物性を組み合わせて皮膚表面に現れる物性を捉える従来の手法では、各層の粘弾性を個別に計測することができない。Cutometer は、プローブの開口径や減圧の程度を変えることで、皮膚の深度に応じた力学特性が測定できる[87]。しかし、プローブが近接する皮膚浅層の影響は排除できず、層間や層内の粘弾性を詳細に調べることはできない。

また、表情表出時の皮膚表面の動的特性に影響する皮膚領域として、皮下組織は他の層より厚いことを考えると、重要性が高いと想定される。上述した手法は主に真皮の粘弾性の計測に用いられており、皮下組織の粘弾性は殆ど調査されていない。また、皮下組織の粘弾性は体脂肪率に関係すると考えられているが、これまでに詳細な検討はなされていない。皮下組織では、加齢に伴い皮下線維構造 (Retinacula cutis: RC) (図 4-1-1) が変化する[88]。したがって、粘弾性の変化は、皮下脂肪量だけでなく、皮下線維構造にも起因している可能性がある。

そこで、本実験では超音波エラストグラフィ[89]を用いて、皮膚の真皮および皮下組織を対象として、皮膚深度別の粘弾性を測定する。超音波エラストグラフィは、生体内の粘弾性の分布を非侵襲的に直接測定する方法である。本手法は組織に加圧した際のひずみの分布を画像化する方法であり、ひずみの程度がヤング率と相関することに基づき組織断層像における相対的な粘弾性分布を得るものである[90]。長内ら[91]は、超音波エラストグラフィを用いて皮膚内部の粘弾性を測定しているが、真皮層と皮下層を一つの領域として扱っており、皮膚の各層の厚さや粘弾性の加齢変化については検討されていない。

そこで本実験では、超音波エラストグラフィを用いて、皮膚の粘弾性を層間および同一層内における深度ごとに計測し、これら粘弾性について加齢および BMI との関係性を調査することとした。

4-1-1. 方法

【被験者】

20 歳から 69 歳の日本人女性 77 名を被験者とした。年齢層別の被験者数は、20 代 8 名、30 代 13 名、40 代 20 名、50 代 18 名、60 代 18 名であった。各被験者の体重 (kg) と身長 (m) より、BMI ($BMI = \text{体重}/(\text{身長})^2$) を算出した。

【測定部位】

被験者の左頬を測定対象とした。測定中心点は、外眼角から下方のフェイスラインに伸びる垂直線と鼻尖から外方向に伸びる水平線の交点とした(図 4-1-2)。測定は仰臥位で行い、測定中心点を含む皮膚面は水準器を用いて水平となるよう設定した。

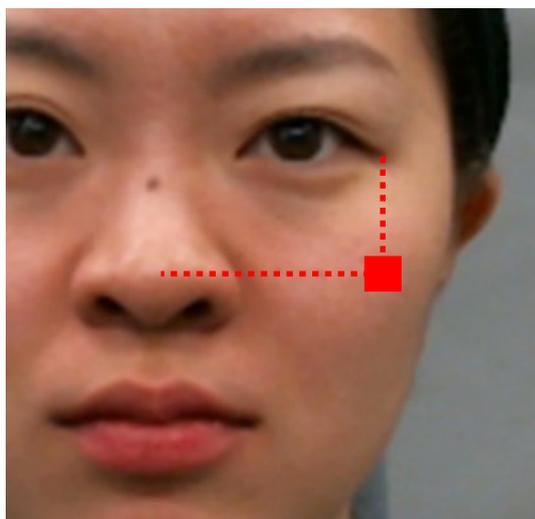


図 4-1-2. 粘弾性の測定部位

【データ取得】

超音波エラストグラフィの測定には、いくつかの方法が適用されている[89]。本実験では、ひずみイメージング法をベースに、HITACHI Noblus (Hitachi, Tokyo, Japan) を使用した。超音波プローブは 8~15 MHz を使用した。超音波エラストグラフィ画像を生成するためには、皮膚に加圧状態を作り出す必要がある。そこで、超音波プローブを皮膚表面に接触させ、「押し引き」する運動により加圧状態を発生させた。この押し引き運動は電動スライダー LES8DK-50-

R36ND (SMC, Tokyo, Japan) を用いて, 移動距離 0.3 mm, 復帰速度 30 mm/s, 間隔 1 秒の矩形往復運動とした。

本実験で用いた超音波エラストグラフィ装置は, 超音波画像に弾性特性を重ね合わせ, 画像として 0~255 階調で表示する。超音波エラストグラフィの測定値は, 同一測定視野内での相対値である。そこで, 被験者間で測定値を比較するために, プロブと皮膚の間に標準カップラー EZU-TECPL1 (Hitachi, Tokyo, Japan) を配置し, 皮膚の測定値を標準カップラーの測定値で除して標準化した。プロブは, 測定中心点を通るように, 左右の目と平行に顔に当てた。プロブ表面は皮膚表面と平行かつ均一に接触するよう配置した。実際の測定状態を図 4-1-3 に示す。



図 4-1-3. エラストグラフィによる測定状態

【データ解析】

(a) 解析領域の設定・厚さの算出

プローブを皮膚へ押し込む時点(加圧時点)の超音波エラストグラフィ画像を解析対象として、解析領域を深度ごとに設定した。図 4-1-4a に Noblus で得られた超音波画像の代表例を示す。深さに応じて真皮層を 2 層, 皮下組織を 5 層に区分した合計 7 層を興味領域 (Region of interest: ROI) として設定した。真皮層は, エコー画像の強度が異なる 2 層に区分した。表皮の下端から真皮内でエコー強度が異なる境界までを ROI-1 (真皮上層), ROI-1 の下端から皮下組織上端までの領域を ROI-2 (真皮下層) とした。皮下組織は ROI-2 の下端から超音波画像が得られない筋層までの領域について, 深さ方向に領域を 5 分割 (ROI-3~7) した。これら合計 7 層 (ROI-1~7) について, 各 ROI の厚さを算出した。

(b) 粘弾性の算出

各 ROI を超音波エラストグラフィ画像に重ね合わせ, 粘弾性を算出した。図 4-1-4b に粘弾性の階調をカラーで示した代表例を示す。皮膚の各領域 (ROI-1~7) について, 標準カプラー (ROI-8) との粘弾性比を算出し被験者間で比較した。これらの解析は, ImageJ (National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA) を用いて実施した。

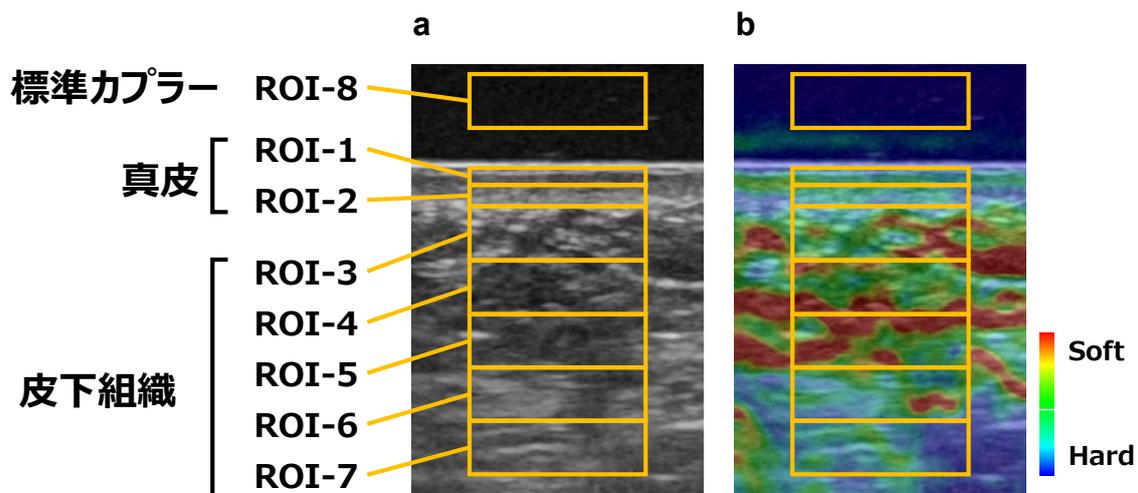


図 4-1-4. 皮膚の超音波画像と解析領域

(a) 皮膚の超音波画像と解析した興味領域 (ROI: Region of interest)の代表例.

(b)皮膚のエラストグラフィ画像と興味領域の代表例.

【統計解析】

特徴量間の関係性は Pearson の積率相関分析により検討した. 統計解析は JMP version 14.0 (SAS Institute Inc, Cary, NC, USA) を用いて実施した.

4-1-2. 結果

はじめに、基本的な特徴として、超音波画像による真皮の厚みの加齢変化を調べた。図 4-1-5 は、真皮の上層 (ROI-1) および下層 (ROI-2) の厚さと、真皮全層 (ROI-1+ROI-2) の厚さの加齢変化を示したものである。結果、真皮全層の厚さと年齢との間に相関は認められなかった (図 4-1-5a)。真皮上層 (ROI-1) では、厚さは加齢に伴い減少する傾向が確認された (図 4-1-5b)。一方、真皮下層 (ROI-2) では、厚さと年齢との間に関係性は確認されなかった (図 4-1-5c)。

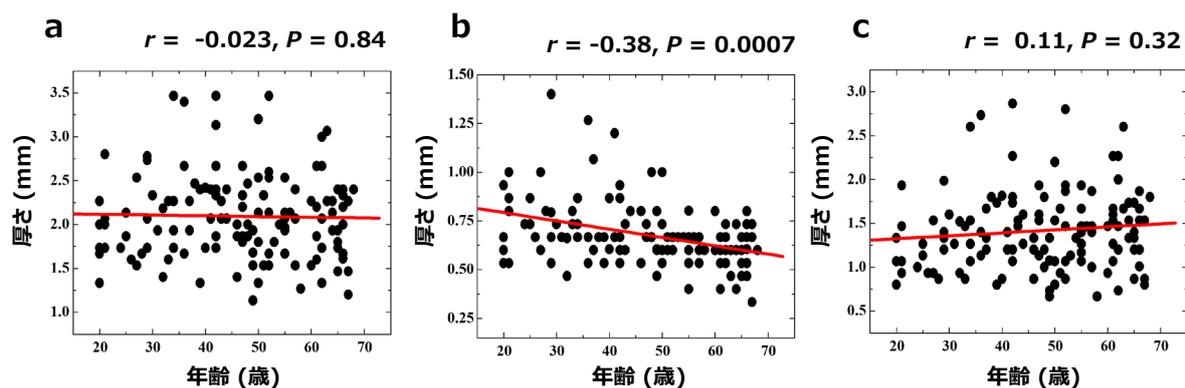


図 4-1-5. 皮膚の厚さと年齢との関係性

- (a) 真皮全層 (ROI-1 + ROI-2) の厚さと年齢との関係性. (b) 真皮上層 (ROI-1) の厚さと年齢との関係性.
(c) 真皮下層 (ROI-2) の厚さと年齢との関係性.

図 4-1-6 は, ROI-3 から ROI-7 までの皮下組織全層の厚さと, 年齢および BMI との関係性を示したものである. 年齢 (図 4-1-6a) および BMI (図 4-1-6b) の増加とともに皮下組織全層の厚さが増加することが確認された.

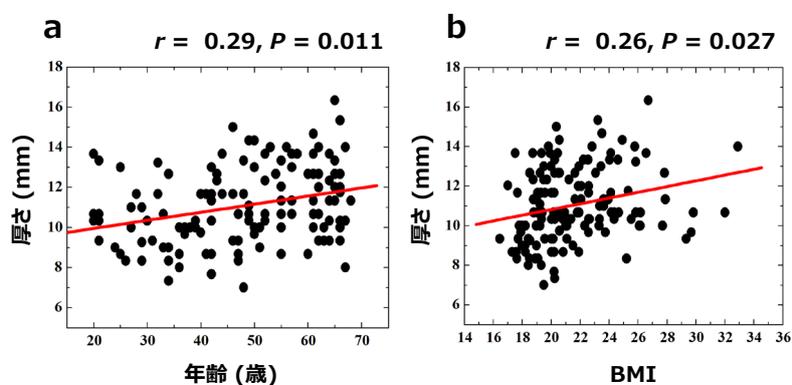


図 4-1-6. 皮下組織の厚さと年齢および body mass index (BMI) との関係性

(a) 皮下組織の厚さと年齢との関係性. (b) 皮下組織の厚さと BMI との関係性.

次に、超音波エラストグラフィで測定した各 ROI の粘弾性と年齢との関係を解析した (図 4-1-7). 図 4-1-7a は、真皮全層の粘弾性と年齢との関係を示したものである. 真皮全層 (ROI-1 + ROI-2) では、粘弾性と年齢との間に弱い負の相関が認められた. しかし、真皮上層 (ROI-1) では、粘弾性と年齢との間に有意な関係性は認められなかった (図 4-1-7b). 真皮下層 (ROI-2) では、粘弾性と年齢との間に弱い負の相関が認められた (図 4-1-7c).

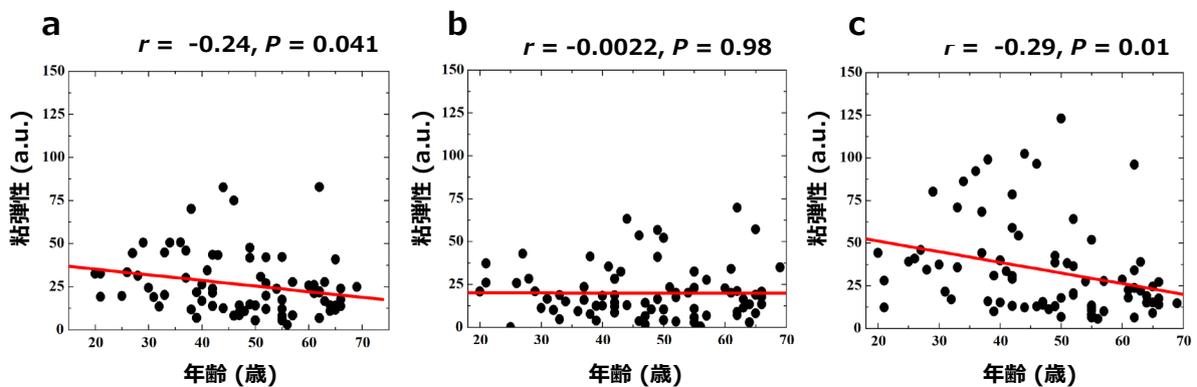


図 4-1-7. 真皮の粘弾性と年齢との関係性

- (a) 真皮全層(ROI-1 + ROI-2)の粘弾性と年齢との関係性. (b) 真皮上層(ROI-1)の粘弾性と年齢との関係性.
(c) 真皮下層(ROI-2)の粘弾性と年齢との関係性.

図 4-1-8 は皮下組織の粘弾性と年齢との関係を示している。皮下組織全層 (ROI-3~ROI-7) の粘弾性は、年齢との有意な関係性は認められなかった (図 4-1-8a)。皮下組織を 5 つに分けた場合、皮下組織最上層 (ROI-3) の粘弾性は年齢と弱い相関が認められた (図 4-1-8b)。一方で ROI-4 より深い領域では、加齢変化は認められなかった (図 4-1-8c-f)。

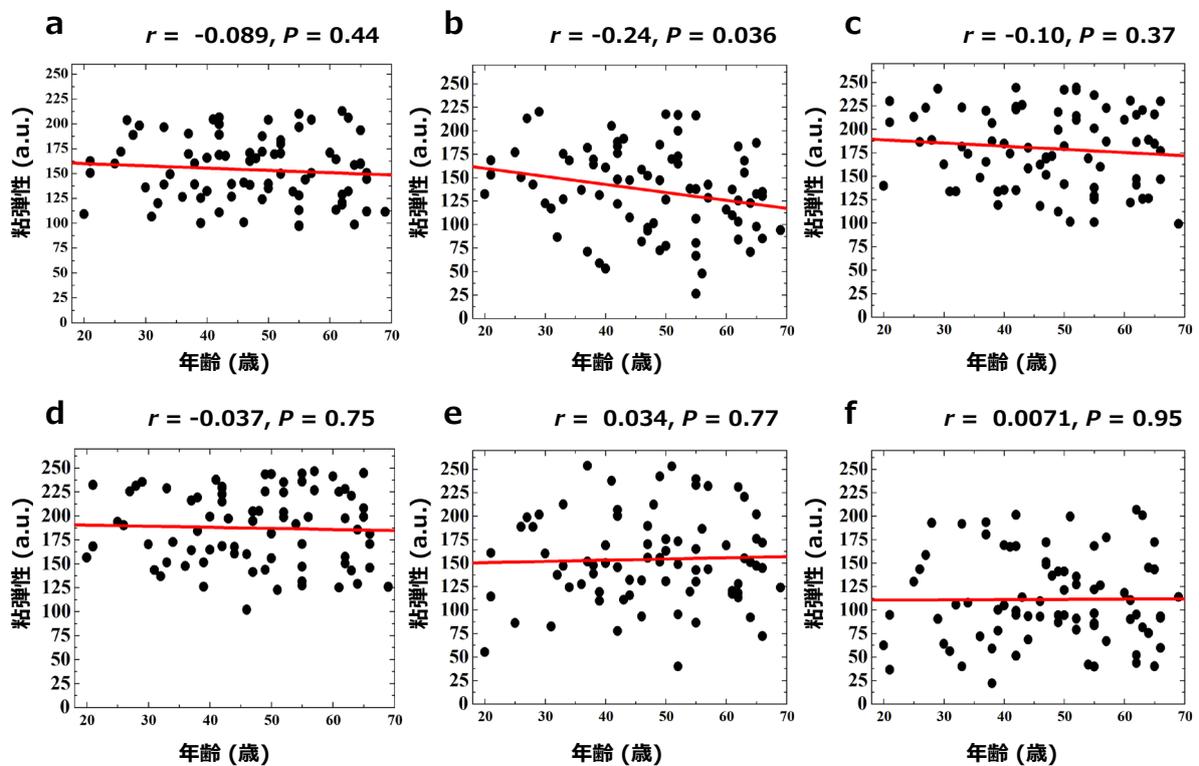


図 4-1-8. 皮下組織の粘弾性と年齢との関係性

- (a) 皮下組織全層 (ROI-3~ROI-7) の粘弾性と年齢との関係性. (b) ROI-3 の粘弾性と年齢との関係性.
(c) ROI-4 の粘弾性と年齢との関係性. (d) ROI-5 の粘弾性と年齢との関係性.
(e) ROI-6 の粘弾性と年齢との関係性. (f) ROI-7 の粘弾性と年齢との関係性.

次に、皮下組織の粘弾性とBMIの関係を検討した(図 4-1-9)。皮下組織全層(ROI-3~ROI-7)の粘弾性はBMIとの関係が認められなかった(図 4-1-9a)。最上部の皮下組織(ROI-3)では、BMIが高くなるにつれて粘弾性が低下することが確認された(図 4-1-9b)。ROI-4とROI-5では、粘弾性とBMIとの相関関係は認められなかった(図 4-1-9c, d)。皮下組織下部(ROI-6, ROI-7)では、BMIの上昇に伴い粘弾性が増加することが確認された(図 4-1-9e, f)。

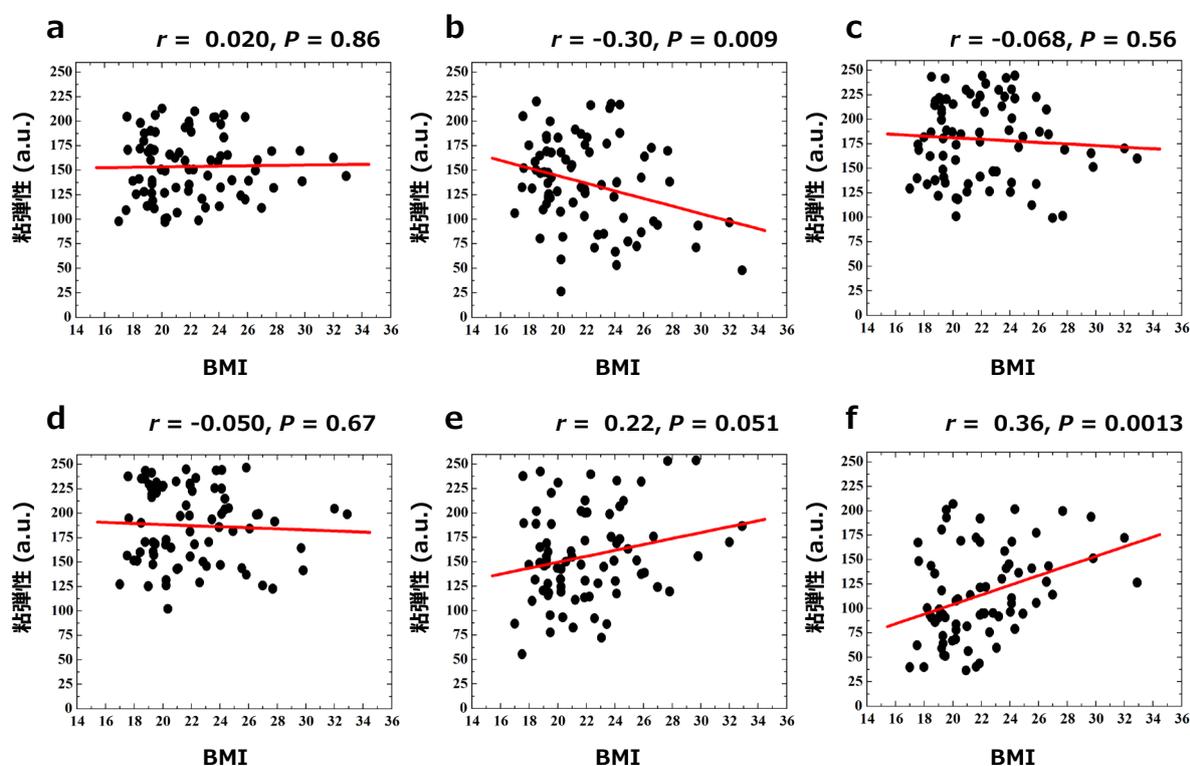


図 4-1-9. 皮下組織の粘弾性と body mass index (BMI)との関係性

- (a) 皮下組織全層(ROI-3~ROI-7)の粘弾性と BMIとの関係性. (b) ROI-3 の粘弾性と BMIとの関係性.
(c) ROI-4 の粘弾性と BMIとの関係性. (d) ROI-5 の粘弾性と BMIとの関係性.
(e) ROI-6 の粘弾性と BMIとの関係性. (f) ROI-7 の粘弾性と BMIとの関係性.

以上の結果を表にまとめる。表 4-1-1 には、真皮層について、各層の厚さおよび粘弾性の年齢との相関関係をまとめた。さらに、表 4-1-2 には、皮下組織について、粘弾性と年齢、粘弾性と BMI との相関関係をまとめた。

表 4-1-1. 真皮層の厚さと粘弾性の年齢との相関関係

領域	年齢との相関関係	
	厚さ	粘弾性
真皮全層	n.s. ($r = -0.023, P = 0.84$)	負の相関 ($r = -0.24, P < 0.05$)
真皮上層	負の相関 ($r = -0.38, P < 0.01$)	n.s. ($r = -0.0022, P = 0.98$)
真皮下層	n.s. ($r = 0.11, P = 0.32$)	負の相関 ($r = -0.29, P < 0.05$)

n.s.: not significant

表 4-1-2. 年齢と BMI の皮下組織の粘弾性との相関関係

領域	粘弾性との相関関係	
	年齢	BMI
皮下組織全層	n.s. ($r = -0.089, P = 0.44$)	n.s. ($r = 0.020, P = 0.86$)
ROI-3 皮下組織最上層	負の相関 ($r = -0.24, P = 0.036$)	負の相関 ($r = -0.30, P = 0.009$)
ROI-4 皮下組織上層	正の相関 ($r = 0.10, P = 0.37$)	n.s. ($r = -0.068, P = 0.56$)
ROI-5 皮下組織中層	n.s. ($r = -0.037, P = 0.75$)	n.s. ($r = -0.050, P = 0.67$)
ROI-6 皮下組織下層	n.s. ($r = 0.034, P = 0.77$)	n.s. ($r = 0.22, P = 0.051$)
ROI-7 皮下組織最下層	n.s. ($r = 0.0071, P = 0.95$)	正の相関 ($r = 0.36, P = 0.0013$)

n.s.: not significant

4-1-3. 考察

従来、皮膚の粘弾性は主に Cutemeter[56], [85]や Ballistometer [86]などの測定装置を用いて、皮膚表面から測定されてきた。そのため、真皮、皮下組織の各層の粘弾性や真皮内、皮下組織内の深さごとの粘弾性については十分な知見が得られていなかった。そこで本実験では、超音波エラストグラフィを用いて真皮および皮下組織の皮膚断層像から深さごとに領域を区分し、領域ごとの厚みや粘弾性の違い、および各パラメータの年齢、BMIとの関係性を調査した。

真皮においては、深さによって超音波エコー強度の濃淡に差が見られた。そのため、エコー画像から真皮を上層と下層の2層に分けることができた(図 4-1-4a, b)。真皮における超音波画像特性は、頸部や四肢の正常皮膚で報告されており[92]、本実験においても顔面皮膚で同様の特徴が明瞭に観察された。Sorrellらによれば、真皮上層の乳頭層と、真皮下層にあたる網状層とで細胞や線維構造が異なることが報告されている[93]。本実験で確認された真皮の深さごとの超音波エコー強度の違いは、各層の構成成分の違いが反映されたものと考えられる。

次に、真皮における組織厚と粘弾性を計測した結果、真皮全層と真皮下層では、厚さと年齢との間に相関関係は確認されなかった。一方で、真皮上層では厚さと年齢との間で弱い相関関係が認められ、年齢とともに厚みが減少することが示された(図 4-1-5)。真皮全層と真皮上層では、粘弾性の加齢変化は確認されなかった。一方で、真皮下層は粘弾性と年齢との間で弱い相関性が示され、加齢に伴い粘弾性が低下することが示唆された(図 4-1-7)。本実験で

得られた皮膚の厚みと粘弾性との関係を表 4-1-1 にまとめた。先行研究においても皮膚の厚みに関して超音波測定により広く検討されてきた。頬部の真皮の厚さを測定した先行研究では、加齢に伴い皮膚の厚みが薄くなるという報告[94]と、厚くなるという報告[95]が存在する。本実験およびこれら先行研究の結果の違いは、被験者、測定方法、解析方法に関する条件の違いに起因すると考えられる。先行研究では、真皮を 1 層として解析しており、今回実施した様に物性の違いで分けて検討されていない。本実験では、真皮をエコー強度の差で 2 層に分けることで、真皮上層の厚さのみが減少することが確認できた。真皮上層は、組織学的に乳頭層を含む領域である。本実験で確認された加齢に伴う真皮上層の厚みの減少は、真皮と表皮の間に位置する乳頭構造[32]の加齢に伴う扁平化を反映したものだと考えられる。さらに、顔など露光部位は、紫外線暴露により真皮上部の乳頭層の組織構造が加齢に伴い変化することが報告されている[96]。そのため、粘弾性においても真皮上部で加齢とともに低下することが予想された。しかし、本実験の結果、真皮上部では粘弾性の加齢変化は観察されず、真皮下部において、粘弾性の加齢変化が確認された。近年、皮下組織と真皮の境界領域の凹凸構造が加齢に伴い変化することが報告されている[97]。本実験で確認された真皮下層の粘弾性の低下は、これら皮下組織との境界部の加齢に伴う扁平化を反映した可能性がある。上述した様に、真皮の上部乳頭層と下部網状層とで細胞の特徴や構成タンパク質に違いがあることが報告されている[93]。今後、真皮上層と下層の加齢変化の違いを明らかにするためには、生化学的な検討も必要である。

皮下組織では、真皮で観察されるような深さによる超音波像の強度の差は観察されなかった。そのため、皮下組織を深さ方向に5等分し、各層のエラストグラフィ画像から粘弾性を解析した。また、この粘弾性と年齢やBMIとの関係性を調査した。結果、加齢に伴い皮下組織が厚くなることが示唆された(図 4-1-6a)。一方で先行研究では、皮下組織の厚さと年齢には関係がないことが報告されている[98]。先行研究と結果が異なった要因としては、プローブの設置位置や押し当てる強度など計測条件の違いが想定される。顔の皮膚深部には Fat compartment structure [99]が領域ごとに並んで存在するため、プローブの設置位置を考慮して計測する必要がある。本実験では、プローブの貼付位置は Malar fat pad の存在領域であり、この領域においては加齢に伴い皮下組織が厚くなることが考えられた。また、皮下組織の厚さとBMIとの間に弱い相関関係が確認された(図 4-1-6b)。したがって、体脂肪率は皮下組織の厚さに影響を与える可能性が示唆された。

さらに、皮下組織の粘弾性と年齢との間の関係性を調査した結果、皮下組織上部(ROI-3)では粘弾性が加齢に伴い低下することが示唆された。一方で、皮下組織中下層(ROI-4~ROI-7)や皮下組織全層では相関関係は確認されなかった(図 4-1-8, 表 4-1-2)。皮下組織のRC構造[88]や真皮との境界部の凹凸構造[97]は、加齢変化することが報告されている。太陽光中の近赤外線は紫外線より皮膚深達度が高く皮下組織まで到達することが知られており[100]、近赤外線は Matrix metalloproteinase-1 などのコラーゲン分解酵素を誘導することが報告されている[101]。本実験で確認された皮下組織上層でのみ生じた加齢に伴う粘弾性低下は、これら近赤外線による光老化が一因として考えられる。

また、本実験では粘弾性と BMI との関係性についても評価した。結果、皮下組織上部 (ROI-3) では負の相関、中間層 (ROI-4, ROI-5) では相関なし、下層 (ROI-6, ROI-7) では正の相関と、層ごとで BMI と粘弾性との関係性が異なることが確認された (図 4-1-9, 表 4-1-2)。皮下組織は、脂肪滴で満たされた脂肪細胞、およびこの脂肪細胞を取り囲むメッシュ状の線維構造、脂肪層を縦に貫く RC 構造など複数の要素から構成される[88]。したがって、皮下組織の粘弾性は、それら脂肪細胞や線維構造の物性が複雑に関係して決定されるものと考えられる。肥満がセルライト形成の原因となることは広く知られている。セルライトは肥満により血管が圧迫されることで血流が悪くなり、低酸素状態となる。この低酸素状態が組織の線維化を招きセルライトを形成する[102]。線維化した組織構造は、粘弾性が低下していることが予想される。本実験で確認された BMI と皮下組織上層の粘弾性との負の相関性は、脂肪組織の増加により酸素供給が減少し、線維化が起こるためだと考えられる。しかし、皮下組織の上層、中層、下層で粘弾性と BMI との関係性が異なる理由について明らかにするためには、皮下脂肪組織の深さの違いによる血管網の状態の違いに着目した検討や、皮膚酸素濃度、加齢、粘弾性との関係性についての検討など、より詳細な調査が必要である。

4-1-4. 実験 4-1 のまとめ

超音波エラストグラフィを用いた皮膚粘弾性の深さごとの計測により、真皮上層の厚さは加齢に伴い減少し、皮下組織の厚さは加齢に伴い増加することが確認された。さらに、加齢に伴い真皮下層および皮下組織上層の粘弾性が低下することが明らかとなった。また、被験者の BMI も皮下組織の厚さや粘弾性へ関与することが示唆された。

4-2. 実験 4-2: 皮下組織上層の粘弾性低下と表情表出時の皮膚表面の遅延の 相関性調査

実験 3-2 では、加齢に伴う皮膚表面の遅延の増加が確認された。また、実験 4-1 では加齢に伴う皮下組織上層の粘弾性の低下が確認された。そこで、実験 4-2 では、皮膚表面の遅延の増加が皮下組織上層の粘弾性低下に起因すると仮説をたて、これらの相関関係について検証を行う。具体的には、実験 3-2 および実験 4-1 の両実験に参加した被験者 47 名を対象として、皮膚表面の遅延量と皮下組織上層の粘弾性との間の相関関係を確認する。

4-2-1. 方法

【被験者】

20 歳から 69 歳の日本人女性 47 名を被験者とした。被験者の構成を表 4-2-1 に示す。

表 4-2-1. 被験者構成

年齢群 (歳)	人数	平均年齢 (歳)	年齢の標準偏差 (歳)
20-29	7	24.71	3.30
30-39	11	35.64	2.73
40-49	7	45.29	3.55
50-59	11	54.27	3.35
60-69	11	63.73	3.04

【取得データ】

皮膚表面の遅延量は、実験 3-2 により算出された結果を用いた。皮下組織上層の粘弾性は、実験 4-1 により算出された結果を用いた。各データの取得条件は前述した実験 3-2 および実験 4-1 に記した。

【統計解析】

皮膚表面の遅延量と皮下組織上層の粘弾性との関係性は Pearson の積率相関分析により検討した。統計解析は SPSS version 24.0 (IBM, Armonk, NY, USA) を用いて実施した。

4-2-2. 結果

皮膚表面の遅延量と皮下組織上層の粘弾性との相関関係を解析した。その結果、皮下組織上層の粘弾性と皮膚運動の遅延量との間に弱い相関関係が確認された[$r = 0.33, P < 0.05$]

(図 4-2-1)。

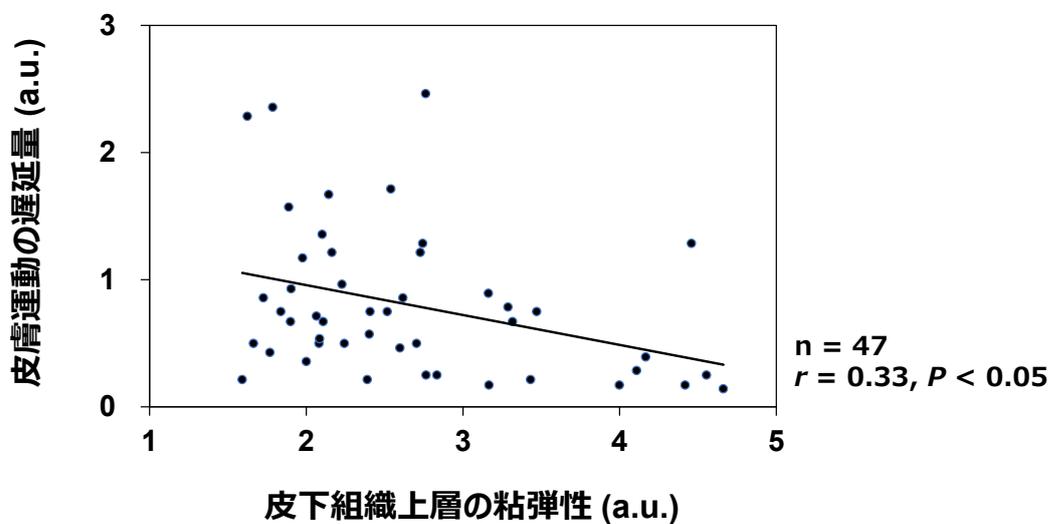


図 4-2-1. 皮下組織上層の粘弾性と頬部皮膚運動の遅延量との関係性

4-2-3. 考察

本実験では、頬部皮膚表面の遅延量と皮下組織上層の粘弾性との間の相関関係を調査した。結果、皮下組織上層の粘弾性と表情表出時の頬部皮膚表面の遅延量との間で負の相関関係が確認された(図 4-2-1)。実験 3-2 で確認された皮膚表面の遅延量と、実験 4-1 で確認された皮下組織上層の粘弾性は、ともに加齢に伴い低下した。また、皮膚表面の運動性は皮膚深部の筋肉の運動を起点として生じる。そのため、加齢に伴う皮下組織上層の粘弾性の低下により、表情表出時の筋肉の運動が皮膚表面へと伝搬することが妨げられ、頬部皮膚運動の遅延として生じた可能性が考えられた。しかしながら、本実験で確認されたのは相関関係にすぎないため、これら両パラメータの因果関係を検証するためには、例えば皮下組織上層の粘弾性のみが異なる 2 種のモデルを用いて、各モデルの底面を運動させた際のモデル表面の運動性を評価するなど、より詳細な検証が必要となる。

4-2-4. 実験 4-2 のまとめ

本実験では頬の皮膚表面の遅延量と皮下組織上層の粘弾性との間で負の相関関係を確認した(図 4-2-1)。したがって、知覚年齢への寄与が示唆された頬部皮膚運動の遅延が頬部皮膚深部の皮下組織上層の粘弾性低下により生じる可能性が考えられる。これらの因果関係の検証については、続く実験 4-3 において検討し、再び議論する。

4-3. 実験 4-3:皮下組織上層の粘弾性低下と表情表出時の皮膚表面の遅延の因果性調査

実験 4-2 の結果, 皮下組織上層の粘弾性と表情表出時の頬部皮膚表面の遅延量との間で負の相関関係が確認された. このことから, 加齢に伴う皮下組織上層の粘弾性の低下により, 表情表出時の筋肉の運動が皮膚表面へと伝搬することが妨げられ, 頬部皮膚運動の遅延として生じたことが示唆された. そこで, 実験 4-3 では, 両者の因果関係を調査するために実験 4-1 で確認された皮膚物性を基にコンピュータシミュレーションにて皮下組織上層の粘弾性のみ異なる若齢皮膚モデルと高齢皮膚モデルを再現し, 両モデルに表情表出を模した運動を生じた際に実験 3-2 で確認された皮膚表面の遅延が生じることを検証する.

4-3-1. 方法

【皮膚モデルの作成】

皮膚運動の遅延量が皮膚内部組織の粘弾性と関係していることを確認するために, 若齢および高齢の皮膚を模した 2 種の皮膚モデル (100×50×14 mm) をコンピュータ上で作成した (図 4-3-1). 真皮のヤング率は既報[103]から, 皮下組織のヤング率は実験 4-1 の計測値から設定した (表 4-3-1). 皮膚モデルは, 真皮, 皮下組織の上層, 中層, 下層の 4 層で構成された. 頬部皮膚は, その深部に存在する筋肉と保持靭帯 (Retaining ligament: RL) と呼ばれる線維構造で繋がっている[74]ことから, 皮膚モデルの下面には RL を模倣した構造を設置した. 開

口運動時に頬がRLによって顎側に引き込まれ、口腔内側方向へ移動するという頬の皮膚運動を模擬するために、皮膚モデルのRLをx軸方向に5 mm/sの速度で3秒間移動させた。

【データ解析】

有限要素法 (Finite element method: FEM) により、皮膚モデルのz軸方向の挙動を解析した。なお、シミュレーションはソフトウェア ABAQUS/Explicit, CAE (Dassault Systemes, Vélizy-Villacoublay, France) を用いた。

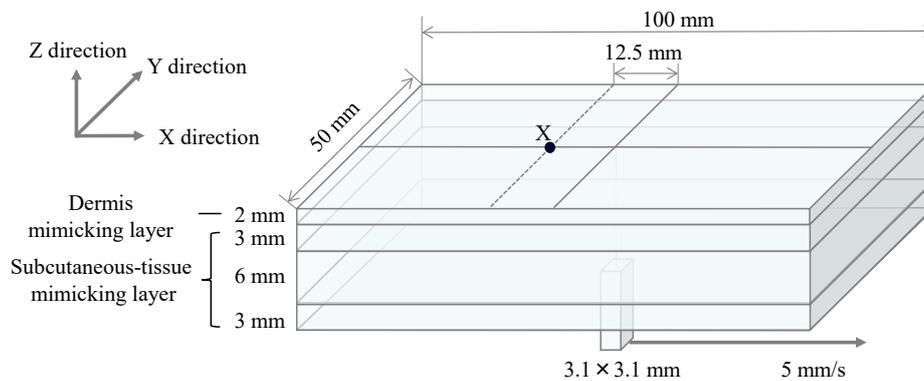


図 4-3-1. 作成した皮膚モデル

表 4-3-1. 作成した皮膚モデルの層ごとの粘弾性値

領域	ヤング率 (N/m ²)		ポアソン比	密度 (kg/m ³)
	若齢モデル	高齢モデル		
真皮層	8.50×10^5	8.50×10^5	0.48	1000
皮下組織上層	2.77×10^5	3.37×10^5	0.48	1000
皮下組織中層	2.19×10^5	2.19×10^5	0.48	1000
皮下組織下層	2.49×10^5	2.49×10^5	0.48	1000

4-3-2. 結果

粘弾性の異なる2種類の皮膚モデルを用いて、表情表出を模倣した運動を取らせた際の筋肉から皮膚への力学的伝達をFEMにより解析した。その結果、皮下組織上層の粘弾性が低下した高齢モデルでは、同層の粘弾性が高い若齢モデルと比べて皮膚モデル上面(図4-3-1上の点X)の運動が遅延することが確認された(図4-3-2)。

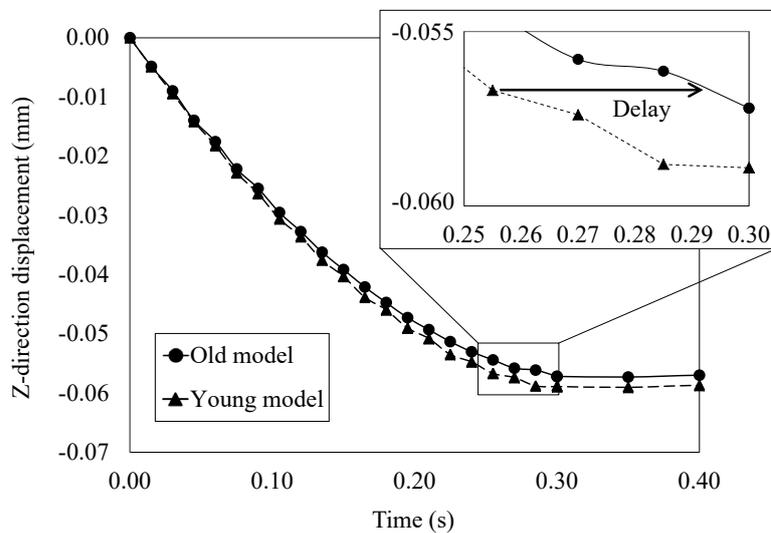


図 4-3-2. 高齢皮膚モデルと若齢皮膚モデルの皮膚表面の挙動

4-3-3. 考察

本実験では、若齢者と高齢者の粘弾性データを基に2種類の力学特性を有する皮膚モデルを作成し、皮膚の変位挙動をシミュレートした。その結果、皮下組織上層の粘弾性を低下させた高齢モデルでは、若齢モデルよりも皮膚表面の移動が遅れることが確認された(図 4-3-2)。この結果から、皮下組織上層の粘弾性低下が深部筋肉の運動を皮膚表面へと伝搬することを妨げ、皮膚表面の運動を遅延させることが示唆された。この結果から、皮下組織の物性の改善を行うことで、表情表出に対する皮膚の遅延を低減させる(追従性を向上させる)ことが可能となることが示唆された。

4-3-4. 実験 4-3 のまとめ

コンピュータシミュレーションを用いて皮下組織上層の粘弾性を操作した若齢モデルと高齢モデルを用意し、表情表出を模した運動を取らせた際の皮膚表面の運動性を評価した。その結果、皮下組織上層の粘弾性を低下させた高齢モデルでは、若齢モデルよりも皮膚表面の移動が遅れるという因果関係が確認された。確認された皮下組織の力学特性の変化は皮下組織を構成する細胞や細胞外マトリックスの組織学的変化により生じるものと考えられる。そこで、続く実験 4-4 ではヒトの皮膚組織を用いて、その物性と組織学的変化との間の関係性を検証する。

4-4. 実験 4-4. 皮下組織の線維構造体の加齢変化の検討

実験 4-3 にて, 表情表出時の皮膚表面の運動の遅延が皮下組織の粘弾性低下により生じるといふ因果関係を確認した.

皮下組織の主要構成要素の 1 つは線維構造である. 臨床研究より線維化は組織を硬くすることが報告されており, セルライトでは皮下組織の線維化が観察されていることから, 皮下組織の線維化状態は皮下組織の粘弾性に影響を与えるものと推測される[104], [105].

そこで本実験では, 皮下組織上層の粘弾性, 線維構造の加齢変化とそれら両者の関係性を明らかにするために皮下組織を含む皮膚サンプルに対して, 走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) による撮影画像の評価とエラストグラフィによる粘弾性の計測を実施する.

4-4-1. 方法

【皮膚組織サンプル】

表皮, 真皮, 皮下組織を含むヒト頬部の皮膚組織 18 サンプルを用いた. ドナーは, 20~100 歳の白人女性であり, すべての組織は, Ohio, El Segundo, CA より購入した.

【SEM による皮下組織の観察】

SEM JSM-IT500HR (JEOL, Tokyo, Japan) を用いて, 頬部皮膚の脂肪細胞周囲の線維構造を観察した. 組織画像を用いて, 線維構造の量と密度をスコア化することにより, 線維化の状

態を評価し、5つのカテゴリーに分類した(図 4-4-1)。各サンプルの線維化スコアは、1 サンプルにつき 6 領域を 3 名の評価者(皮膚組織の観察に習熟した研究員)が採点し、その平均値を使用した。また、線維化スコアと年齢との相関関係を解析した。

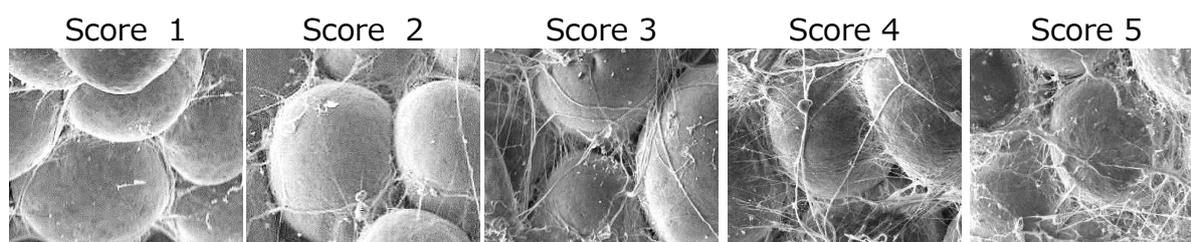


図 4-4-1. 線維化状態の評価基準

【エラストグラフィによる粘弾性の計測】

線維化スコアを評価した組織の粘弾性について、実験 4-1 で実施した頬のエラストグラフィによる計測と同様の方法で測定した。正しく粘弾性を測定できたサンプルのうち、線維化スコアが最も高い組織から 4 サンプルを高スコア群として、線維化スコアが最も低い組織から 4 サンプルを低スコア群として選定した。線維化スコアの高スコア群と低スコア群との間で粘弾性の平均値を比較したところ、高スコア群では低スコア群に比べて粘弾性が高いことが確認された。

【統計解析】

すべての数値データは平均値 \pm 標準偏差で示した。2 群間の関係性は Spearman の順位相関分析により検討した。独立した 2 群間の比較は Student の t 検定を実施した。すべての統計解析は JMP version 13 (SAS Institute Inc, Cary, NC, USA) を用いて実施した。

4-4-2. 結果

【皮下組織脂肪細胞周囲の線維構造の加齢変化】

ヒト皮下組織を SEM にて観察したところ, 球状の脂肪細胞が線維ネットワークに囲まれることで脂肪組織の構造が維持されている様子が確認された. 線維ネットワークの線維化の程度は, 量, 密度ともに個体差が大きかった. また, 高齢ドナー由来のサンプルは, 若齢ドナー由来のサンプルに比べて, より不均一な線維ネットワークを有する傾向が確認された (図 4-4-2a). また, 線維化スコアと年齢との相関関係が認められ ($r = 0.48, P < 0.05$), 脂肪細胞周囲の線維構造は加齢に従い線維化の程度が増大することが確認された (図 4-4-2b).

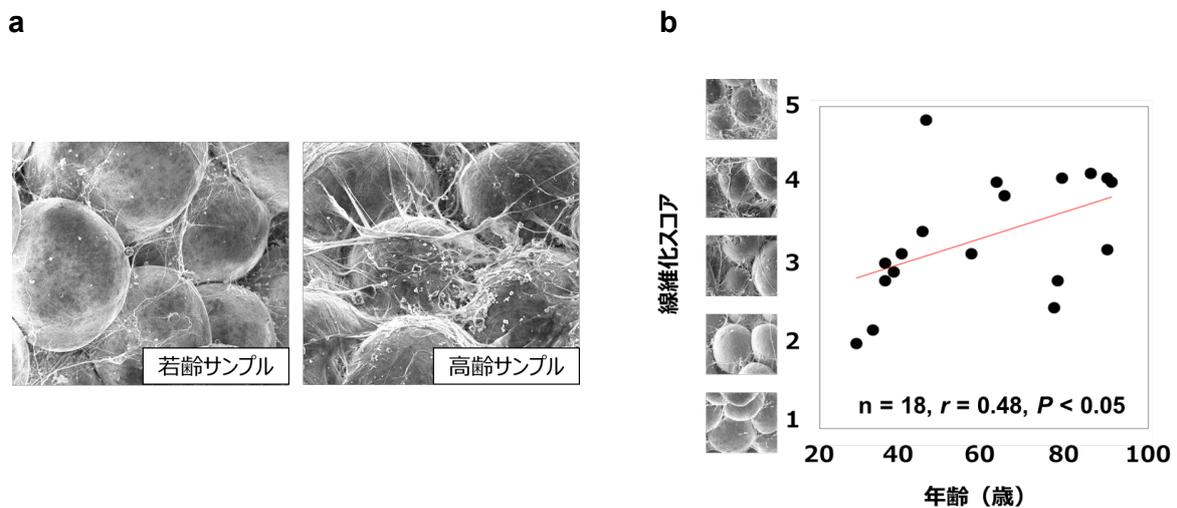


図 4-4-2. 線維化状態の加齢変化

(a) SEM 撮影像の若齢・高齢サンプルの一例. (b) 線維化スコアと年齢との相関関係.

【皮下組織脂肪の粘弾性と線維化スコアの関係】

線維化スコアが線維化状態の高スコア群と低スコア群で異なることが確認された ($P < 0.05$) (図 4-4-3a), 粘弾性は高スコア群と低スコア群で有意に異なることが示された ($P < 0.05$) (図 4-4-3b).

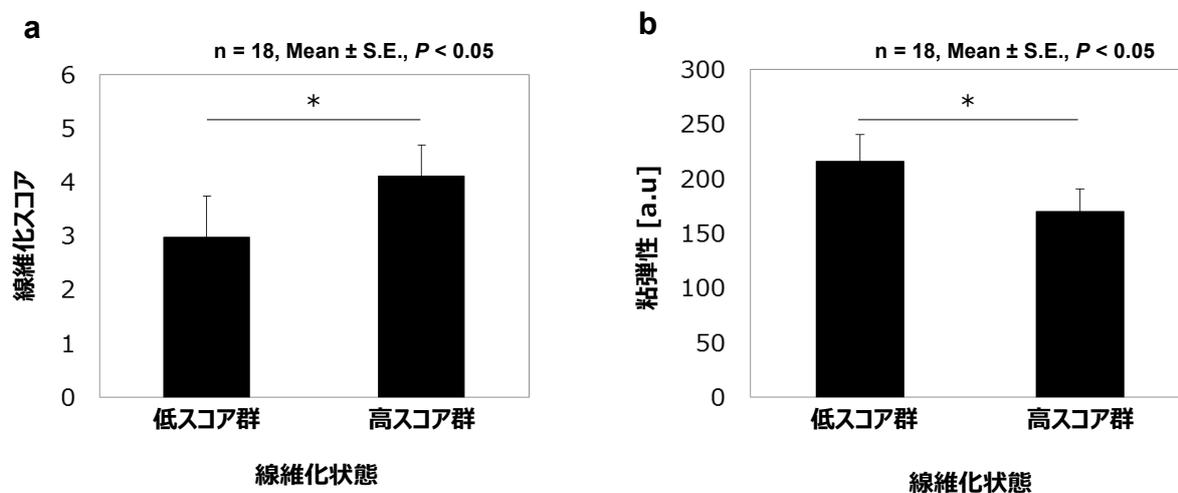


図 4-4-3. 線維化状態の高低群の線維化スコアおよび粘弾性

(a)線維化状態の高低群の線維化スコア. (b)線維化状態の高低群の粘弾性.

4-4-3. 考察

組織の粘弾性は線維化と相関があることが知られており、特に線維化を伴う疾患の一つである肝硬変の診断には、肝臓の粘弾性の計測値を用いている[106]. 今回、皮下組織の線維化レベルを SEM 像より評価したところ、脂肪細胞周囲の線維構造が加齢に伴い線維化することが確認された. また、線維化スコアは頬の皮膚組織の粘弾性と負の相関を示したことから、加齢に伴う皮膚粘弾性の低下に皮下組織の線維構造が関与していることが示唆された(図 4-4-

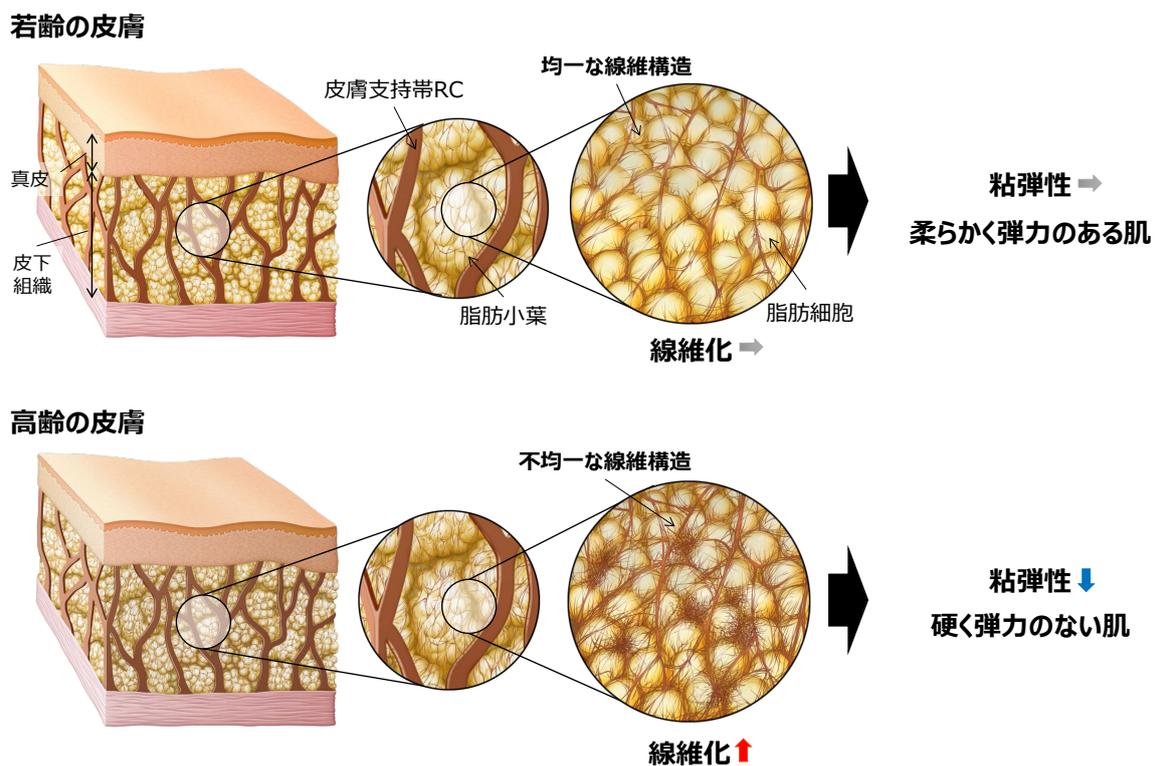


図 4-4-4. 加齢に伴う線維化状態の変化

4).

線維化に関連する遺伝子としては、LOX, LOXL2, COL3A1, COL6A1, COL6A3 などが存在する。特に、LOX および LOXL2 は細胞外マトリックスの形成に重要な酵素であり、コラーゲンやエラスチンのリジン残基を酸化して、架橋を形成することが報告されている[107]–[109]。実際に、LOX が癌組織の硬化[110]や、LOXL2 が組織の硬さ[111]に影響するなど、物性への影響についても報告されている。また、線維化の促進には、皮膚の低酸素環境の影響が報告されている[112]。低酸素は LOX, COL3A1, COL6A1, COL6A3 を制御する HIF1- α の活性化を誘導する[107], [113], [114]。したがって、頬の皮膚の低酸素状態により線維化関連遺伝子の発現が増加し、その結果、線維化が進行することが考察される。

本実験から、柔らかく弾力のある皮膚を保つためには、真皮だけでなく皮下組織も重要であることが示唆された。皮下組織は皮膚深部に位置することから、その改善策としては、化粧品など外用剤による方策は困難となる。線維化を促進する要因としては低酸素状態の関与が報告されていることから、皮膚内の酸素環境を適切に改善・維持することが重要であると考えられた。適切な酸素環境を整えるためには、マッサージなどの美容的アプローチに加えて、運動などの生活習慣の改善も効果的だと考えられる。

4-4-4. 実験 4-4 のまとめ

本実験では、加齢に伴う頬の皮下組織の構造変化について検討した。皮下組織は身体の保護や、美容学的には肌の柔らかさに寄与するが、個人差や年齢差が存在する。そのため、これ

らの違いや変化を引き起こすメカニズムを解明することが重要である。しかし、加齢に伴う顔の皮下組織の構造変化については、ほとんど解明されていなかった。本実験でヒトの頬の皮下組織を SEM で観察した結果、脂肪細胞周囲の線維性ネットワークは量・密度ともに個人差があることが確認された。そこで、線維化の程度を 5 段階のスコア基準画像をもとに評価し、年齢および粘弾性との関係性を確認した。その結果、脂肪細胞周囲の線維ネットワークの線維化が年齢および粘弾性と相関していることが明らかとなった。以上より、皮下脂肪組織における線維化は加齢とともに増加し、これが加齢による柔らかさの減少に関与していると考えられた。

4-5. 第4章のまとめと考察

本章では、第3章で顔印象への影響が示唆された皮膚表面の動的特性について、その要因が皮膚内部状態にあるとの仮説のもと、皮膚内部状態の計測学的検討を実施した。実験4-1では、皮膚内部の粘弾性をエラストグラフィにより層別に計測し、それらの加齢変化およびBMIとの関係性を調査した。その結果、真皮下層の粘弾性は加齢とともに低下すること、皮下組織上部の粘弾性は加齢とともに低下するがBMIが高くなると上昇することが示された。実験4-2では、本論文で確認された加齢に伴う皮膚表面の遅延の増加（実験3-2）および皮下組織上層の粘弾性の低下（実験4-1）の関係性を確認するために、両実験を実施した被験者を対象として、皮膚表面の遅延と皮下組織上層の粘弾性との間の相関関係を確認した。その結果、両特徴に弱い負の相関関係が確認された。実験4-3では、実験4-1で確認された皮膚物性を基にコンピュータシミュレーションにて若齢皮膚モデルと高齢皮膚モデルを再現し、両モデルに表情表出を模した運動を生じさせた際の皮膚表面の挙動を確認した。その結果、皮下組織上層の粘弾性が低下することで表情表出により皮膚表面で遅延が生じるという因果性が確認された。実験4-4では、皮下組織上層の粘弾性低下の原因を調査するために、若齢ドナーと高齢ドナーの摘出皮膚の皮下組織についてSEM像の観察およびエラストグラフィによる粘弾性評価を実施した。その結果、加齢に伴い皮下組織の脂肪細胞周囲に線維化が生じ粘弾性が低下することが示唆された。以上、本章の結果から、第3章で確認された顔印象に寄与する頬部皮膚運動の遅延が加齢に伴う皮下組織の粘弾性の低下により生じること、およびこの

粘弾性の変化は加齢に伴う皮下組織の脂肪細胞周囲の線維化が一因であることが示唆された。

第5章 実験的検討概要：顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響

第1章で述べた様に、私たちは日常生活の中で他者の顔を様々な方向から観察してその人の印象を形成している。例えば、ソーシャルメディアにおいて流行したセルフィー（自撮り）で自身の顔をより魅力的に写すために斜め上からのアングルから撮影することも、観察角度による顔印象の変化を活用している事例の一つだと考えられる。しかし、従来の老化研究の多くは正面顔というごく限られた顔の状態を対象に実施されてきた。すなわち、日常生活で知覚される知覚年齢の全容を解明するには、顔の観察方向の影響を把握する必要がある。そこで、第6章では、顔の観察の向きが年齢知覚に及ぼす影響について実験的検討を行う。

私たちは日常生活において、電車で座っている際に前方で手すりにつかまる他者の顔を下方から観察することや、車の助手席から運転者の横顔を観察するなど、顔を多様な方向から観察している。第1章で述べた様に、顔からの知覚年齢には顔型や目鼻口といった器官の布置関係が関与していることから、顔の観察の向きが変化することは、観察者視点からは顔の輪郭や器官の布置関係が見かけ上変化することとなる。例えば下方から観察した顔では見かけ上は目と口の距離が近づき顔型も丸顔に近づくことからベビースキーマの顔特徴[12], [13]が知覚され、正面顔に比べて若い印象を形成する可能性がある。もしくは、正面顔では気に留めることのなかった老化特徴が観察の向きによって顕著となり、老けた印象を形成する可能性もある。したがって、年齢知覚への顔の観察の向きが及ぼす影響やその差異の要因を解明することができれば、鏡を通して自己認識している自身の正面顔からは見出すことのできない、他者が

感じる印象の規定要因を明らかにでき、より美しく若々しく魅せるための方策の提案に繋がるものと考える。

そこで第6章では、知覚年齢に対する顔の観察の向きの効果および皮膚表面の形態特性の影響を実験的に検討する。

各実験の内容は下記の通りである。

第6章 実験的検討：顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響

実験 6-1：顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響の検討

実験 6-2：顔 3 次元形状の加齢変化調査

第 6 章 実験的検討：顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響

本章では、顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響について検討する。実験 6-1 では、顔の観察方向を操作した視覚刺激を用いて年齢知覚実験を実施し、知覚年齢に対する顔の観察方向の影響を調査する。また、年齢判定時の観察者の視線を計測することで知覚年齢に寄与する顔領域を特定する。さらに実験 6-2 では、「顔の観察の向きによる知覚年齢への影響が顔の 3 次元形状により生じる」という仮説に基づき、20 代から 60 代の日本人を対象に顔 3 次元形状の個人差を主成分分析により評価した。さらに、各主成分得点に対して、実年齢および観察の向きごとの知覚年齢との相関関係を検討し、顔の 3 次元形状の加齢変化と、顔の観察の向きによる知覚年齢に対する顔の 3 次元形状の影響について考察する。

6-1. 実験 6-1: 顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響の検討

従来の顔の知覚年齢に関する先行研究は、正面顔という限られた条件下でアプローチされてきた。そして、顔の形や色情報の影響[115]、目・鼻・口の配置や大きさの影響[116]、シワ・しみ・たるみなどの皮膚の形態的・色調的特徴の影響[6]–[8], [30], [53]が報告されてきた。しかし、助手席から運転手の横顔を見るときや、電車で座っているときに前に立っている相手の顔を見上げるときなど、私たちは日常生活の中で、様々な角度から顔の特徴を観察している。実際に、ソーシャルメディアに投稿される顔の動画は正面顔に限らず、横方向や斜め上から撮影された顔も多い。投稿者は顔の角度によって顔印象を操作できることを経験的に理解した上で実践していると考えられる。そこで、顔の観察角度が知覚年齢に与える影響を把握することができれば、顔の知覚年齢を左右する老化特徴や、それら特徴を隠蔽することで若々しさを演出する方策が見出される可能性がある。そこで、実験 6-1 では、顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響を系統的に調べることを目的とした。具体的には、顔の水平方向と垂直方向の観察角度が知覚年齢に及ぼす影響を実験的に検討した。

6-1-1. 方法

【被験者】

裸眼もしくは矯正で健常な視力を有する 20 歳から 49 歳までの日本人女性 112 名（平均年齢 34.4 歳）が、知覚年齢の評価者（観察者）として実験に参加した。観察者は一般人であり、心理実験や年齢評価の専門家ではない。サンプルサイズは、G*Power 3.1.9.7 ソフトウェアを

用いた計算により決定した[44]. 事前データがないため, 今回の計算では G*Power のデフォルト値を使用し, 検出力分析の結果, 2 要因分散分析, 効果量 $F = 0.10$, 有意水準 $\alpha = 0.05$, 検定力 Power = 0.90 で, 合計 98 名の参加者が必要であることが示された. 観察者を 50 代未満としたのは, 人間の視覚の知覚機能[45]と脳の情報処理速度[117]が加齢とともに低下し, 特に 50 代以上では低下することが先行研究で報告されているためである.

【刺激】

顔モデルは 20 歳から 69 歳の日本人女性とした. 顔モデルはすべて一般人で, 観察者との面識はない. 化粧の個人差の影響を排除するため, モデルには化粧を落とした素顔で実験に参加してもらった.

顔モデルの顔の 3 次元画像は, 3 次元画像撮影装置 VECTRA M3 (Canfield Technology, Fairfield, ND, USA) を用いて, 目を開けて座った姿勢で撮影された. 顔モデルの頭部方向は, 下眼窩縁と外耳道上縁を結ぶフランクフルト平面[118]–[120]が地表に対して水平となるように標準化した. 顔モデルの視線は, あらかじめ設定した正面方向の基準点に固定させた.

本実験では, 顔の観察角度が知覚年齢に及ぼす影響を検証するために, 知覚年齢が近い顔モデルを事前に選定して実験に使用した. この事前選定では, 18 名の日本人女性を評定者とした年齢知覚実験により, 20 歳から 69 歳の日本人女性顔モデル 420 名から 5 歳刻みの 10 の年齢群について各年代群内で正面顔の知覚年齢のばらつきが最も少ない 280 名 (各群 28

名)を選出された。これら 280 名がその後の手続きに参加した。刺激として用いた年齢群別の顔モデルの内訳は表 6-1-1 の通りである。

表 6-1-1. 顔モデルの構成

年齢群 (歳)	人数	平均年齢 (歳)	年齢の標準偏差 (歳)
20-24	28	23.21	1.87
25-29	28	27.54	1.79
30-34	28	32.29	1.67
35-39	28	37.79	1.17
40-44	28	41.04	1.17
45-49	28	46.43	1.64
50-54	28	51.93	1.54
55-59	28	55.64	2.71
60-64	28	61.07	1.09
65-69	28	66.14	1.76

次に、3次元画像撮影装置で取得した各顔データの正規化について述べる。以降の画像処理は、顔形状解析ソフトウェア Face-Rugle (Medic Engineering, Kyoto, Japan) を用いて行った。まず、瞳孔の中心 A を頭部回転の原点に設定した (図 6-1-1)。顔の向きの調整については、Pitch 角は下眼窩縁と外耳道上縁を結ぶフランクフルト平面[118]-[120]を基準に調整し、Yaw 角と Roll 角は正面顔に対して凹凸より描画したモアレ縞 (等高線) をもとに画像が左右対称となる様に調整した。また、分析に不要な髪と首以下の部位を削除した。

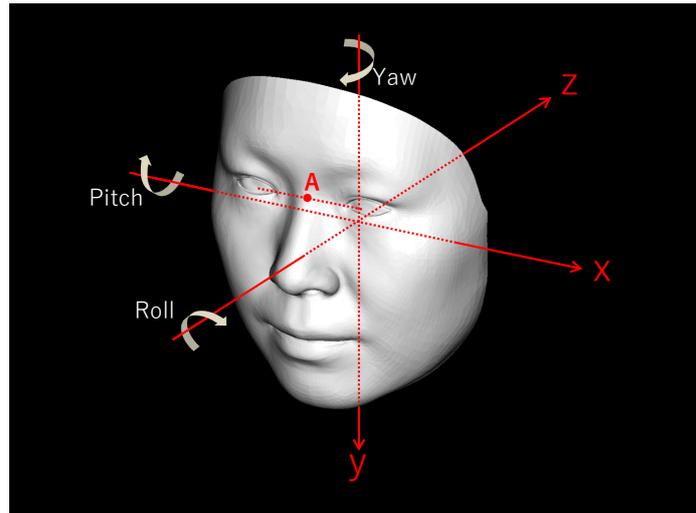


図 6-1-1. 刺激の顔向き調整に用いた原点と回転方向

次に、正面と Yaw 角（横方向）または Pitch 角（縦方向）からなる 5 種類の実験刺激（図 6-1-2 (a)―(e)）と、Yaw 角（横方向）および Pitch 角（縦方向）からなる 2 種類のダミー刺激（図 6-1-2 (f), (g)）を作成した。ダミー刺激は、観察者に本実験の検証の目的が垂直および水平方向の影響であることを悟られないために用いて、年齢知覚実験で回答は記録したが解析には供さなかった。顔に対する観察方向について正面 (a) を対照刺激および実験刺激とし、右方向に 45°回転 (b)、右方向に 90°回転 (c)、下方向に 45°回転 (d)、上方向に 45°回転 (e) を実験刺激とした。また、右方向と下方向にそれぞれ 33°回転 (f)、右方向と上方向にそれぞれ 33°回転 (g) をダミー刺激とした。これら観察の向きは、人が日常生活で接し得る顔の環境から設定した。例えば、集団で会話する場面では、隣に座っている人の水平方向に傾いた顔を観察する状況や、立っている人と座っている人がそれぞれ上方向と下方向からお互いの顔を観察する機会がある。本実験では、上下・左右方向の効果を検証するために、上下・左右は 45 度を基

本とし, 左右方向は観察頻度から横顔(90度)を含めた5種類の角度とした.

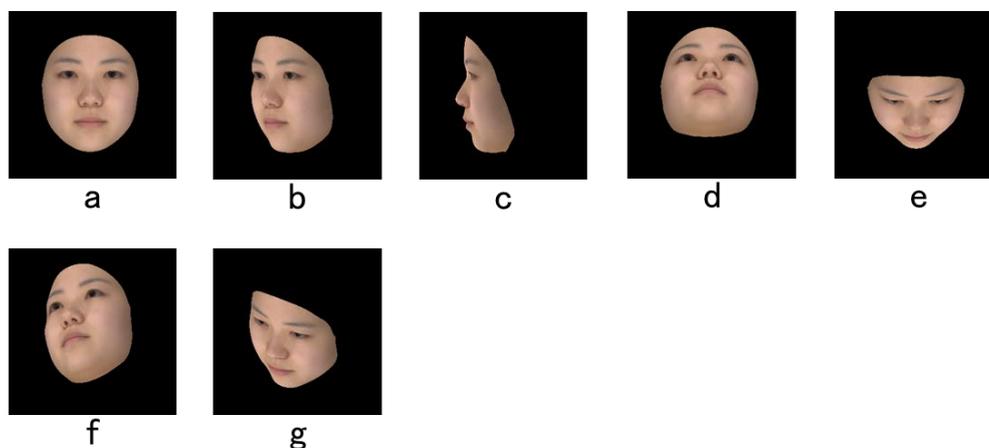


図 6-1-2. 顔の観察の向き

(a) 正面. (b) 右方向に 45°回転. (c) 右方向に 90°回転. (d) 下方向に 45°回転. (e) 上方向に 45°回転.
(f) 右方向と下方向にそれぞれ 33°回転. (g) 右方向と上方向にそれぞれ 33°回転.

実験刺激(図 6-1-2 (a) — (e))とダミー刺激(図 6-1-2 (f), (g))は, 対照刺激(図 6-1-2 (a))と比較できるように呈示された. なお, 本実験では左右差は考慮せず, モデルの顔の左側を観察する Yaw 角方向について検討した. 顔の大きさは, 日常的な会話の距離を参考に 24 インチディスプレイ ColorEdge CX2414 (EIZO, Ishikawa, Japan) 上で各顔モデルの顔幅(頬骨弓間の水平距離)を 12 cm(視角 11.421°)に調整した. 観察者は刺激を視距離 60 cm で観察した.

【手続き】

視線計測実験

観察者が顔モデルの年齢を判断する顔領域を特定するために、上記の 112 名の観察者の視線を、視線計測装置 Tobii Pro X2-30 (Tobii, Stockholm, Sweden) を用いて記録した。視線計測装置のサンプリングレートは 30 Hz とし、視線の停留は Tobii I-VT フィルター (Tobii, Stockholm, Sweden) [56], 速度閾値 30 度/秒, 最小固定時間 67 ms により決定した。興味領域は、目、鼻、口、眉毛を含む目の周囲、頬、額の 6 つを設定した (図 6-1-3)。年齢判断部位は、刺激の観察時間における 6 つの興味領域の停留時間の比率をもとに算出した。

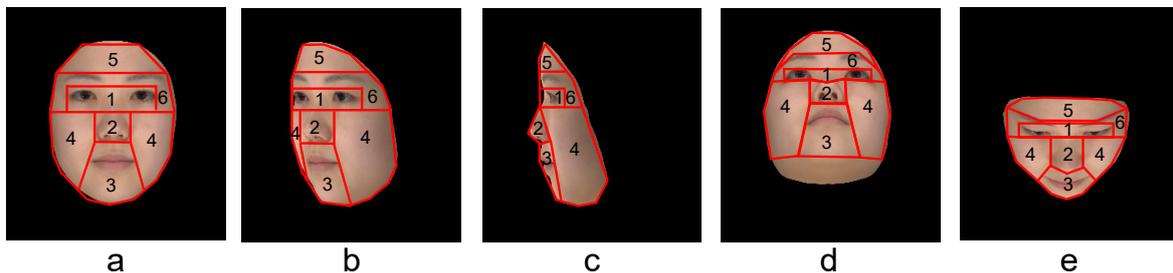


図 6-1-3. 視線計測における顔の興味領域

(a) 正面. (b) 右方向に 45°回転. (c) 右方向に 90°回転. (d) 下方向に 45°回転. (e) 上方向に 45°回転.

(1) 目. (2) 鼻. (3) 口. (4) 目の周囲. (5) 頬. (6) 額.

観察者には 2 つの顔を連続的に呈示した後、キーボードを用いて年齢が高いと思われる方の顔を選択させる課題を行った。課題では、顔の一方を正面顔 (対照刺激)、他方を実験刺激もしくはダミー刺激とした。本実験では、顔の観察角度が知覚年齢に及ぼす影響をより正確に

調べるために、年齢知覚実験は5歳刻みの10年齢群(各年齢群28名)でブロック化して実施した。観察者は顔モデルを各1回評価することとし、各年齢群で14試行、全年齢群で合計140試行実施した。評価する年齢群の順序および年齢群内の刺激の呈示順序は観察者間でランダム化し、顔の観察角度の評価回数はカウンターバランスをとった。顔の呈示時間は、比較する2種の顔のうち1番目に呈示された顔は2秒、2番目に呈示された顔は年齢判定を行い選択されるまでの任意時間とし、評価に2秒以上要したデータは除外した(図6-1-4)。

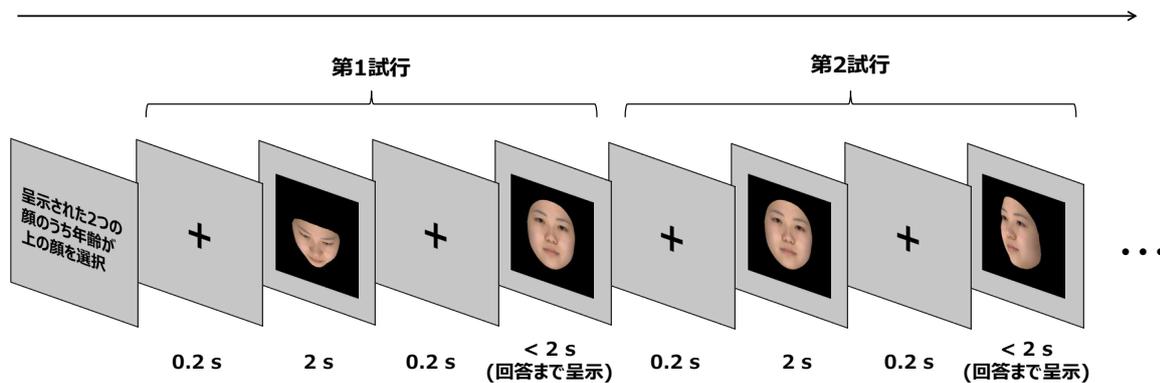


図 6-1-4. 実験手順の一例

実験刺激として呈示された5つの角度(ダミー刺激を除く)それぞれについて、正面顔(対照刺激)よりも年齢が高いと判断された顔の割合をモデルの年齢群ごとに算出して従属変数とし、観察角度(5水準)と年齢群(5水準)を独立変数とした2要因分散分析を行った。統計解析はすべてSPSS version 25.0 (IBM, Armonk, NY, USA)を用いて行った。

6-1-2. 結果

視線計測実験

観察者が年齢評価した際の顔モデルの6つの興味領域への視線停留時間の割合を図6-1-5に示した。結果、年齢判断の際には顔識別で重要とされる目、鼻、口[49]–[52]に限らず、顔の皮膚領域、特に頬部が注視されることが確認された [$F(1, 111) = 523.567, P < 0.01, \eta_p^2 = 0.825$].

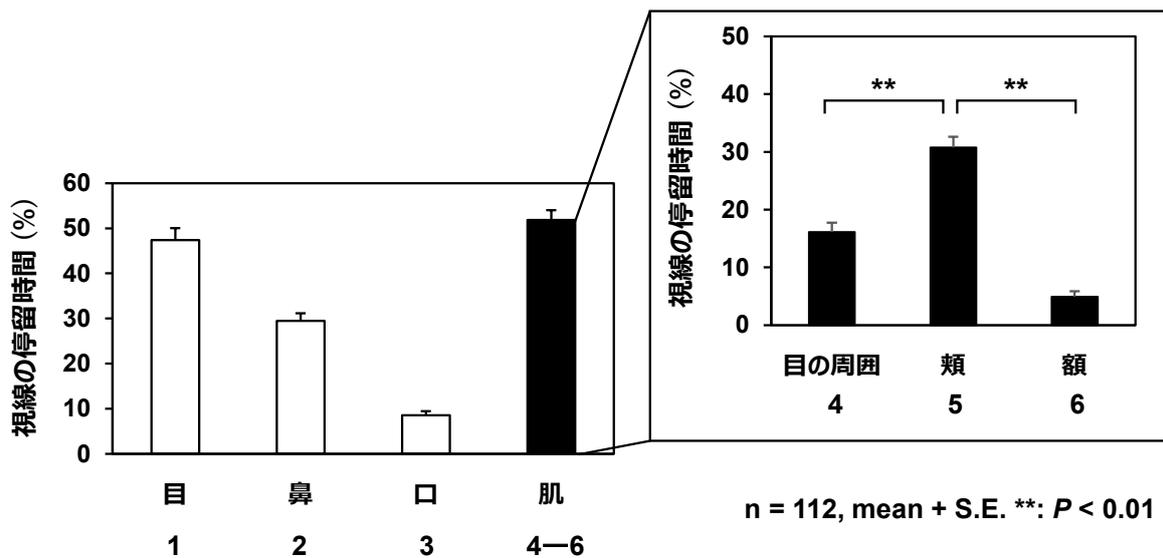


図 6-1-5. 年齢判断時の顔への視線の停留

(1) 目. (2) 鼻. (3) 口. (4) 目の周囲. (5) 頬. (6) 額.

年齢知覚実験

知覚年齢を従属変数, 観察角度 (5 水準) とモデルの年代 (5 水準) を独立変数とした 2 要因分散分析の結果, 観察角度の主効果が有意 [$F(4, 444) = 7.812, P < 0.001, \eta_p^2 = 0.066$] となり知覚年齢が観察角度によって異なることが確認された (図 6-1-6). また, Bonferroni 補正による多重比較検定の結果, 正面から観察した顔に比べて, 横から観察した顔 ($P < 0.01$), 下から観察した顔 ($P < 0.01$) では, 知覚年齢が有意に低下することが確認された.

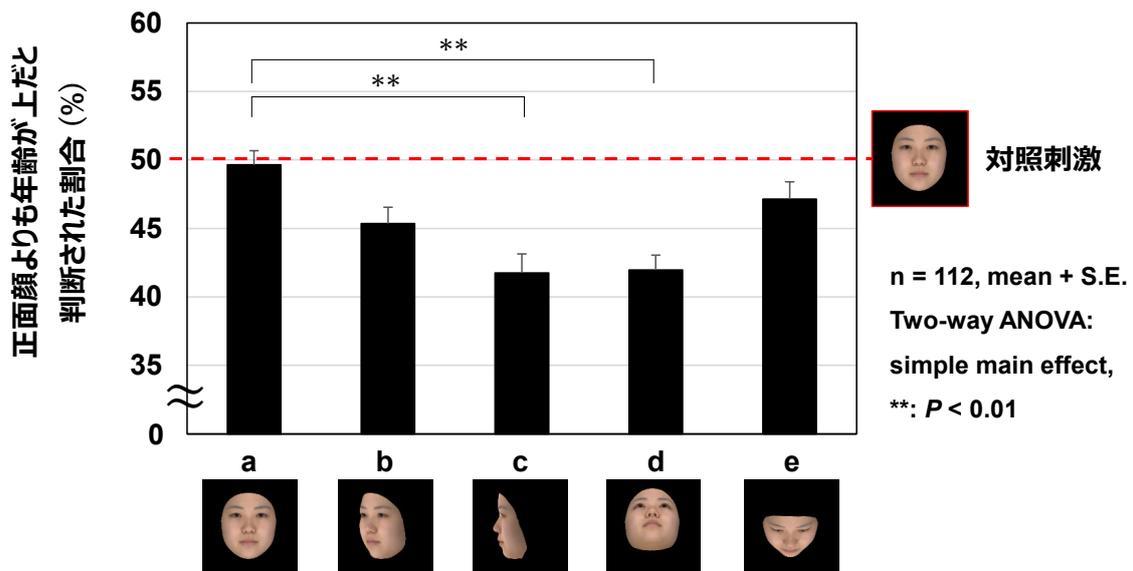


図 6-1-6. 知覚年齢に対する観察の向きの影響

(a) 正面. (b) 右方向に 45° 回転. (c) 右方向に 90° 回転. (d) 下方向に 45° 回転. (e) 上方向に 45° 回転.

ただし、この観察角度の効果は、顔モデルの年齢との交互作用によって限定された [$F(16, 1776) = 1.746, P < 0.05, \eta_p^2 = 0.015$]. 図 6-1-7 は、顔の横方向の向きが知覚年齢に与える影響を顔モデルの年代で展開した結果を示したものである。右 45°では、顔モデルの年齢は知覚年齢に影響を及ぼさなかった。一方、右 90°では、顔モデルの年齢が高くなるほど知覚年齢は低下し、50代 ($P < 0.01$) および 60代 ($P < 0.01$) では、正面顔と比べて知覚年齢の有意な低下が確認された。

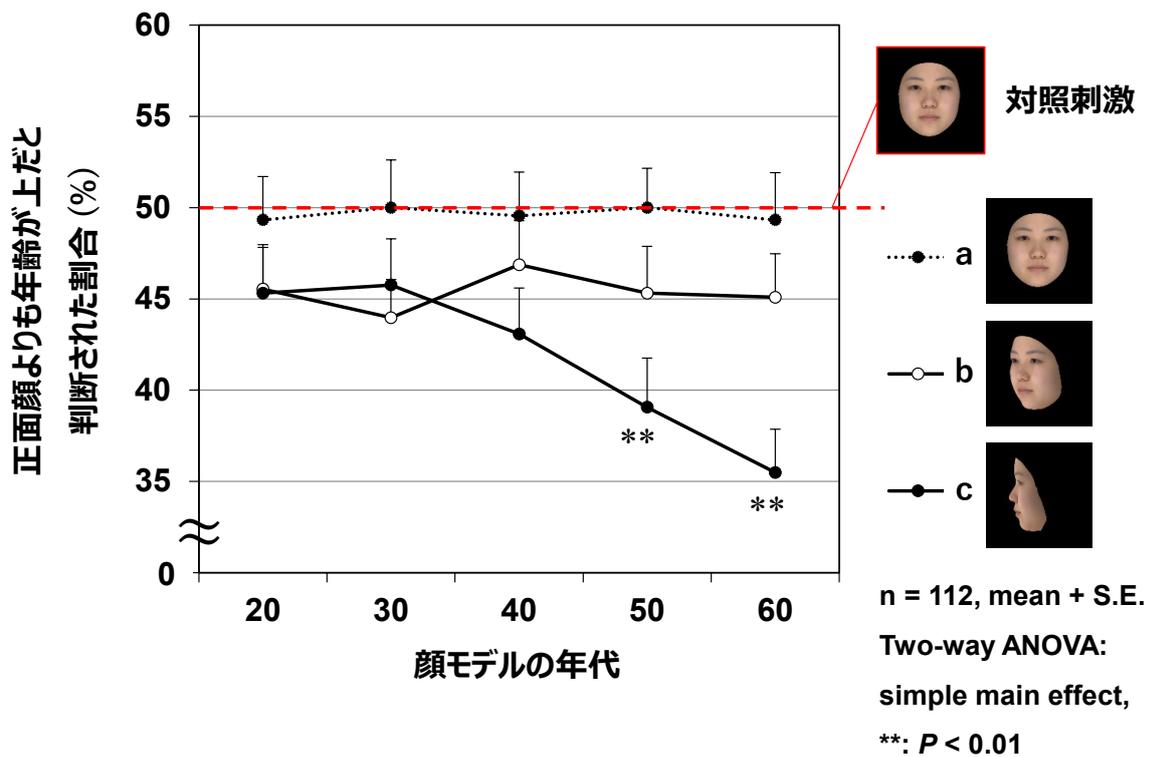


図 6-1-7. 知覚年齢に対する横方向の観察の向きとモデル年代の影響
(a) 正面. (b) 右方向に 45°回転. (c) 右方向に 90°回転.

次に、図 6-1-8 に、顔の縦方向の向きが知覚年齢に及ぼす影響を顔モデルの年代で展開した結果を示す。下方向から観察した顔では、40 代以下の顔モデルで 50 代以上の顔モデルに比べて知覚年齢が低値となることが確認され、正面顔と比べて 30 代で有意な低下 ($P < 0.05$)、40 代で低下傾向が確認された ($P < 0.1$)。なお、上方向から観察した顔では、いずれの年代においても知覚年齢に及ぼす影響は確認されなかった。

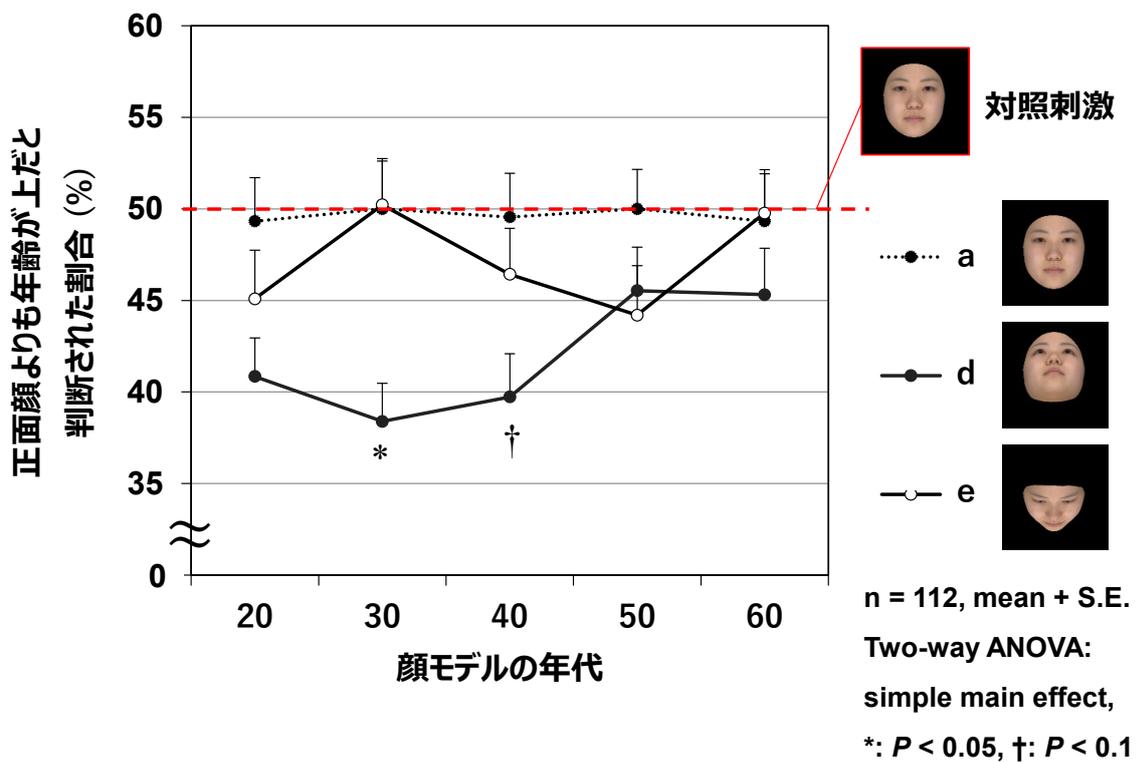


図 6-1-8. 知覚年齢に対する縦方向の観察の向きとモデル年代の影響
 (a) 正面. (d) 下方向に 45°回転. (e) 上方向に 45°回転.

表 6-1-2 に分散分析の結果を示す。

表 6-1-2. 分散分析結果

要因	<i>F</i>	<i>P</i>	η_p^2
角度	7.812	< 0.001	0.066
年代	0.085	0.987	0.001
角度×年代	1.746	0.033	0.015

6-1-3. 考察

本実験では、日本人女性を顔モデルおよび観察者とした年齢知覚実験を行い、顔の観察角度が知覚年齢に及ぼす影響を評価した。また、年齢判定に重要な顔の領域を特定するため、年齢判断時の観察者の視線計測を実施した。結果、第3章実験 3-1 と同様、人は年齢判断時に頬の皮膚領域を観察することが示唆された。また、角度のある顔は正面顔よりも若く判断される傾向を確認した。さらに、この観察角度が知覚年齢を下げる効果は、顔モデルの年齢によって異なることが示唆された。

視線計測実験から、観察者の年齢判断時の視線を評価することで観察者が他者の年齢判断時に無意識下で観察する顔領域を特定した。先行研究では、少数の人種差を除いて人は「個人を識別」する際には目、鼻、口などの顔の特徴を注視していることが報告されている[49]–[52]。一方で、本実験では実験 3-1 と同様に、人が「年齢を判断」する際には、目・鼻・口といった視覚的顕著性の高い領域だけでなく、皮膚を含む領域、特に頬部を年齢判断に活用していることが示唆された。

顔画像の知覚年齢に関する先行研究では、主に正面顔画像に対して、頭の形、目・鼻・口の配置、顔のシワやたるみなどの皮膚の形態的特徴、シミやくすみなどの色調的特徴の影響が報告されている[7], [8], [115], [116], [121]. しかしながら、知覚年齢に影響を与えるこれらの顔特徴は、日常のシーンによって見え方が変化することがある。そこで、本実験では、顔の観察角度が知覚年齢に与える影響について検討した。その結果、一般に、非正面の顔は正面の顔よりも見かけ上の知覚年齢を低下させることが明らかになった。また、知覚年齢に及ぼす観察角度の影響は、顔モデルの年齢によっても異なることが確認された。

顔を横から観察した場合、顔を観察する角度が45°から90°と大きくなるにつれて、知覚年齢を低下させる効果が大きいことが確認された(図 6-1-6)。特に顔を観察する角度が90°、すなわち横顔に対しては、年齢が高くなるにつれて顔の年齢を低く見積もることが確認された(図 6-1-7)。顔を正中線から頬の外側まで3分割した場合、皮下支持組織の少ない中央部(図 6-1-9 領域2)において、シワやたるみなどの皮膚老化が顕著となることが報告されている[73]。



図 6-1-9. 皮膚老化の顕在化領域 ([73]から引用)

本実験では、被験者が白人よりも彫りの浅い顔立ちの日本人であったため、この老化変化の顕著な部位を 90°の角度で観察することがほとんどできず、知覚年齢の軽減に貢献した可能性がある。また、顔の非対称性は年齢とともに増加することが研究により明らかになっている [122]-[124]。横顔では、この非対称性を評価できないことも、知覚年齢の低下の一因と考えられる。

次に、垂直方向の観察角度については、上方から観察した顔は正面から観察した顔に比べ、知覚年齢の有意な減少効果は認められなかった。一方で、下から観察した顔は、正面から観察した顔に比べ、知覚年齢の有意な低下が確認された (図 6-1-6)。顔モデルの年齢の影響を考慮すると、顔モデルが若い場合 (例えば 20 代~40 代)、下から観察した顔の方が知覚年齢の低減効果が高いことが示唆された。一方で、50 代、60 代の顔モデルでは、この下方から観察されることによる知覚年齢の低下効果は確認されなかった (図 6-1-8)。人間の顔は、頭部骨格の成長とともに縦方向に伸長する [15]。また心理学的実験から、頭の縦横比と目の大きさが幼児性の印象に関与することが報告されている [125], [126]。下から観察する角度は、見かけ上の顔の縦横比は正面顔に比べて上下方向に短い印象を与える。さらに、目を覆う上瞼の影響が小さくなり、目が大きく見える。これらが、若年層で知覚年齢が低減した要因だと考えられる。しかしながら、50 代、60 代の高齢層では、この下方から観察されることによる知覚年齢の低減効果は確認されなかった。下方から観察された顔は、顔の中で目の下から頬にかけての皮膚が占める面積が大きくなる。この頬の領域には、50 代以上の女性で顕著になる頬のシワやたるみなど、皮膚の老化に伴うマクロな凹凸がある [56], [127]。したがって、50 代以降は、これら頬部の

凹凸構造の顕在化による知覚年齢の増加効果も相まって若齢層で確認された下方向から観察されることによる知覚年齢の低減効果を弱めている可能性がある。

最後に、本実験の限界について述べる。第一に、本実験は顔の観察角度が知覚年齢に与える影響にのみ着目しており、照明環境はすべての角度において同一条件で設定されていることである。日常生活においては太陽光や屋内外の照明環境は頭部の向きによって変化し、肌の乱反射や鏡面反射、肌の凹凸によって様々な影ができる可能性がある。先行研究においても、照明条件の変化が顔認識に影響を与えることが明らかにされている[128]–[130]。第二に、本実験では、仮想空間内で顔を回転させており、顔モデルは正立して前方を向き視線も正面に向けている。すなわち、正面を向いた顔に対して観察者側の位置が変わることによる顔の見え方の影響を検証した。これに対し、日常生活では顔モデル側の頭部の向きによって皮膚が伸展する状態や、皮膚が受ける重力の方向が変化する。また、上目遣いなど視線を他者に向けたまま顔の向きが変化する状況が考えられる。したがって、今後の研究では、照明条件、頭部の向きに伴う皮膚の伸縮や重力の状態、視線方向などを考慮し、日常生活における知覚年齢をより深く理解することが必要である。第三に、この実験では、髪や首の部分を含まない顔面刺激を用いている。特に、髪型や首のシワは観察角度によって変化し、年齢はこれらすべての要素からなる総合的な印象で判断される。したがって、今後の研究では、顔を観察する角度によって変化する顔とその周辺の特徴すべてを考慮する必要がある。

最後に、本実験では、モデルおよび観察者として日本人女性を使用した。顔のモデルとしては、白人の方がアジア人よりも立体的な顔立ちをしており[131]–[136]、男性の方が女性よりも

彫りの深い顔立ちをしている[137]. さらに, 顔の印象[138], [139]や視線[52]は文化によって振る舞いが異なることが報告されており, 感情認識など顔の印象形成における性差も報告されている[140]–[143]. したがって, 今回の結果が他の文化や性別に適用されるかどうかについては追加検討する必要がある.

6-1-4. 実験 6-1 のまとめ

本実験では, 顔の知覚年齢に関する先行研究が, 正面顔という限られた条件下で実施されてきた課題に対して, 実生活で受ける知覚年齢の一端を解明するために, 顔の観察角度が知覚年齢に与える影響を調査した. その結果, 顔向きをもつ顔は正面顔よりも若く判断される傾向があることが判明した. さらに, この観察角度が知覚年齢を低減させる効果は顔モデルの年齢によって異なり, 加齢に伴い横向きの角度が知覚年齢を低下させることが明らかとなった. また, 年齢判断時の観察者の視線を計測した結果, 頬部より年齢を判断していることが示唆された. 以上の結果から, 頬部のマクロな形態が観察の向きにより顕著または隠微となり, 知覚年齢に影響したことが考えられる.

6-2. 実験 6-2: 顔 3 次元形状の加齢変化調査

実験 6-1 では, 顔の観察の向きが知覚年齢に影響すること, およびその印象を形成する上で顔の頬部領域が重要であることが示唆された. 以上の結果は, 頬部のマクロな形態が観察の向きにより見え方を変化していると考えられる. そこで, 本実験では, 20-60 代の日本人女性の顔 3 次元形態データについて, 主成分分析 (Principal component analysis: PCA) を行うことで, 顔の形態的特徴の個人差や加齢変化について定量的, 体系的に整理することを試みる. また, マクロ形態が観察角度による知覚年齢に及ぼす影響について, 予備的に検証し考察を行う.

6-2-1. 方法

【被験者】

20 歳から 69 歳の日本人女性 280 名 (10 歳ごとの年齢群で各 56 名) を対象とした.

【3 次元顔形状の取得と解析の前工程】

本実験の全体概要を図 6-2-1 に示す. 3 次元画像撮影装置 VECTRA M3 (Canfield Technology, Fairfield, ND, USA) を用いて, 真顔の座位開眼時の被験者の 3 次元形状データを取得した. この形状データは多数の頂点 (x, y, z) の空間的な座標情報を有しており, 解析にはこの座標情報を用いた. 3 次元形状データを解析に供するため, 実験 6-1 と同様の手順で個々の顔の向きや空間上の位置調整, 解析に不要な髪や首以下の領域の削除を行い, データ

の正規化を行った。正規化された3次元形状データは、そのままでは、一人ひとりの顔を構成する座標点の数が異なり、各々の座標点の意味合いも不明である。例えば、鼻の高さを比較する場合、被験者間でどの頂点群が鼻を表すのかを予め定義(相同化)する必要がある。被験者間の形状を比較する準備として、標準人体モデル Dhaiba Model (AIST, Ibaraki, Japan) [144]を用いて個々の3次元形状データの相同化を行い、全被験者に対して各座標点の意味合いが対応付けられた同一点数(11320点)よりなる3次元形状データを作成した。図6-2-2に相同化に用いた標準人体モデルと21個のランドマークを示す。相同化ではランドマークを基に、標準人体モデルを被験者の3次元形状データにフィッティングすることを意味する。以上の相同化の作業は、人体形状解析ソフトウェア HBM-Rugle (Medic Engineering, Kyoto, Japan)を用いて行った。なお、相同化データの幾何学的分解能は頬で1.3mmであった。

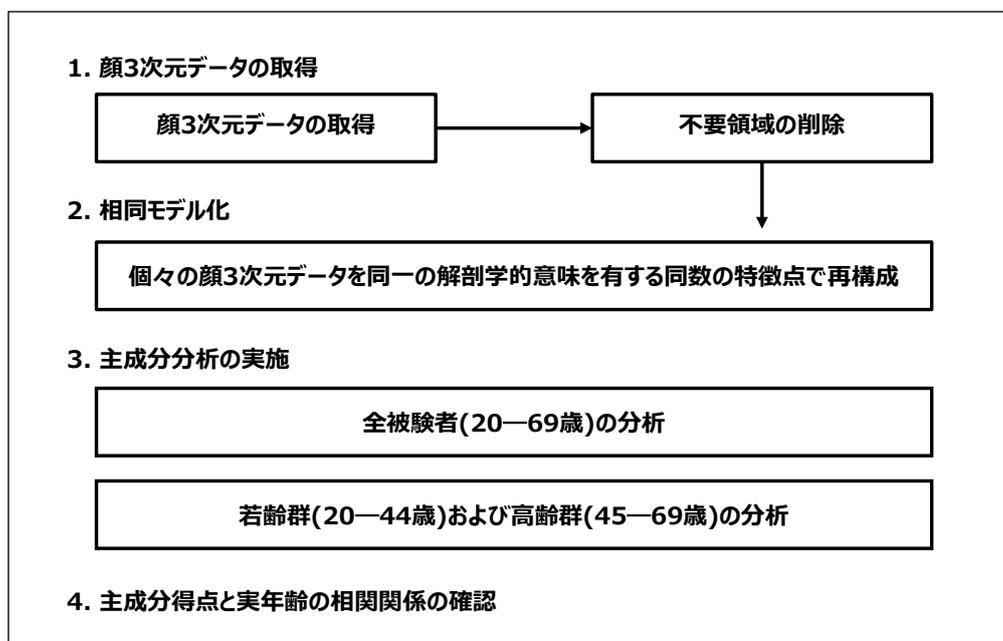
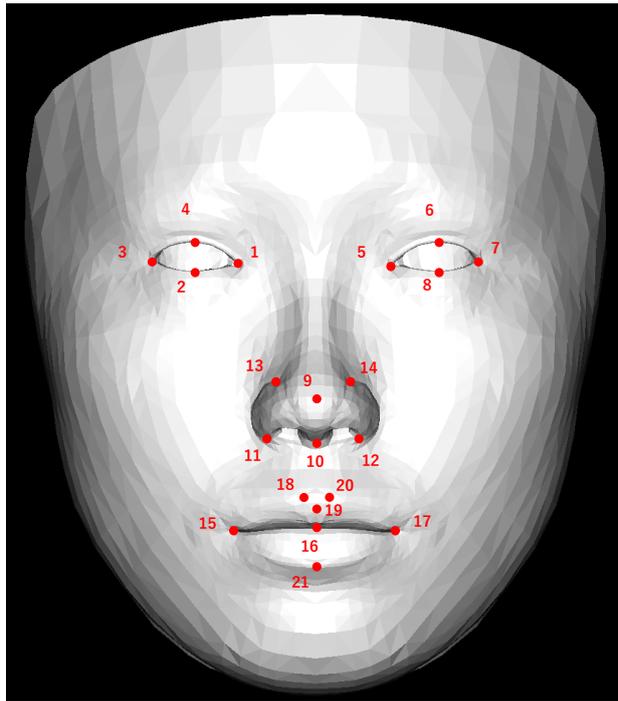


図 6-2-1. 本実験の全体概要



No. Anatomical landmarks of the face

1. Right entocanthion
2. Lowest point of the right eyelid
3. Right exocanthion
4. Highest point of the right eyelid
5. Left entocanthion
6. Highest point of the left eyelid
7. Left exocanthion
8. Lowest point of the left eyelid
9. Pronasale
10. Subnasale
11. Right alar curvature
12. Left alar curvature
13. Right alar crease
14. Left alar crease
15. Right cheillion
16. Rima oris
17. Left cheillion
18. Right peak of Cupid's bow
19. Center (low point) of Cupid's bow
20. Left peak of Cupid's bow
21. Lower vermillion border

図 6-2-2. 相同化に用いた顔のランドマーク

主成分分析は、標本集団の中におけるデータの分散に着目する手法であるため、「標本集団」が非常に重要となる。顔形状の変化にはホルモンが影響を与えることが知られている [145]。女性は閉経により 40~50 代で急激に女性ホルモンが減少し、身体形状に大きく関与する脂肪や骨の代謝が変化する [146], [147]。すなわち女性を対象とした場合、40~50 代を境に異なる形状的な変化が生じることが考えられる。そこで、本実験においては「20 歳から 69 歳までの全被験者」に加えて「20 歳から 44 歳までの若齢群」および「45 歳から 69 歳までの高齢群」をそれぞれ標本集団とした解析により、標本集団の年代区分の違いにより抽出される形状的特徴について検討することとした。

【全年代群の顔形状特徴と年齢の関係】

全被験者(20歳~69歳)の座標点を用いて主成分分析を行った。各主成分の意味づけは、以下の様に実施した。各標本集団の平均顔を作成し、主成分得点を3標準偏差(Standard deviation: SD)正負の両方向に変化させた顔を再構成し、3SDと-3SD各々の対応付けられた座標点の距離の標準偏差をカラーマップとして描画させた。各主成分が表す変化量の大きな部位はカラーマップから特定し、該当する部位がどのような形状的な変化であるかを把握するために、平均顔から3SD正負の両方向に変化させた顔をディスプレイCG 277(EIZO, Ishikawa, Japan)上で回転し様々な角度で表示させ、解析者2名が観察して各々の主成分に対して意味づけを行った。2名の解析者が同じ意味を持つと評価した主成分を議論の対象とした。さらに、各被験者の主成分得点と年齢との関係性をPearsonの積率相関分析により検討した。統計解析はJMP version 11(SAS Institute Inc, Cary, NC, USA)を用いた。

【若齢群と高齢群における顔形状特徴と年齢の関係】

顔の形状データを若齢群(20歳から44歳の被験者72名)および高齢群(45歳から69歳の被験者68名)に分け、各群について主成分分析を実施した。全年代群の解析と同様に、各主成分の意味を付与し、各主成分得点と年齢との関係性をPearsonの積率相関分析により検討した。統計解析はJMP version 11(SAS Institute Inc, Cary, NC, USA)を用いた。

6-2-2. 結果と考察

【全年代群の顔形状特徴と年齢の関係】

20歳から69歳の間で生じる顔の形状の変化を明らかにするために、20歳から69歳の被験者280名を標本集団として、3次元顔形状データの特徴点の座標に対して主成分分析を実施した。全280名のデータについて主成分分析により得られた累積寄与率から、第5主成分までが顔形状の65.0%を説明していることが示唆された。図6-2-3は、第1~5主成分の各主成分得点について、平均化された顔から正と負の3SD変化させた顔でどのように異なるかを示したものである。2名の解析者は第4主成分までを同じ意味だと評価したため、第4主成分までを議論の対象とした。まず第1主成分(PC1)は主に顔の輪郭の変化を表し(図6-2-3a)、主成分得点が高くなるほど顔が大きくなる(図6-2-3b)ことが確認された。また、顔の輪郭の変化に加えて、目と目の間隔、鼻と口の大きさなど、各パーツの大きさや相対的な位置も変化している。そこで、PC1は「顔の大きさ」と定義した。第2主成分(PC2)は、主に顎と頬の周りの変化であることが確認され、頬と顎の周りのボリュームは、主成分得点が高いほど大きくなった。そのためPC2は「頬と顎周りのボリューム」と定義した。第3主成分(PC3)は、額と顎の変化が確認され、主成分得点が高いほど、こめかみや瞼の周りのボリュームが大きくなり、顎も大きく後退した。そのため、PC3は「顔の上部のボリュームと顎の突出度」と定義した。第4主成分(PC4)は、頬や顎の変化が確認され、主成分得点が高いほど、瞼、頬、顎の位置が下がり、眉毛の前方への突出が大きくなった。そのため、PC4は「皮膚のたるみ度合、眉毛の突出度合」と定義した。図6-2-3bは、第1~4主成分について各主成分得点と被験者の年齢との相関をまと

めたものである。PC3 のみが年齢と有意な相関を示した。主成分分析では、PC1 として設定された最初の軸を基に、その軸と直交する方向で最も分散が大きい軸を次の主成分軸に採用していく。これは、上位の主成分が下位の主成分に影響を与えることを意味する。全被験者 280 名の分析では、最も寄与の大きい主成分 (PC1: 顔の大きさ) が年齢と有意な相関を示さず、このことが残りの主成分の相関に影響を与えた可能性がある。

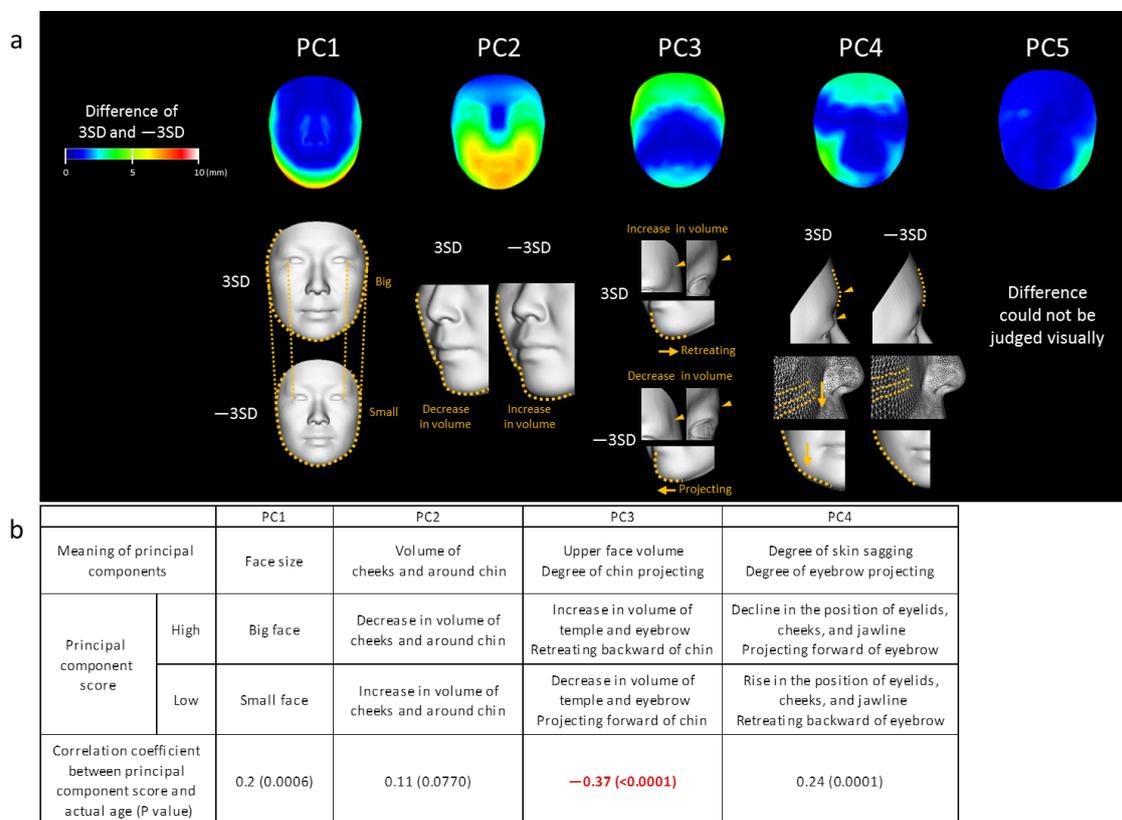


図 6-2-3. 全被験者の顔形状の主成分分析によるシミュレーション結果
(a) 第 5 主成分までの顔形状のシミュレーション結果. (b) 主成分の定義と年齢との相関.

そこで、年齢と相関のある3次元形状を調査するために、PC1の影響を排除することとした。顔の大きさの影響は、各被験者の顔全体の大きさが一様になるように拡大・縮小することで実現できる可能性がある。しかし、この方法では、目、鼻、口など個々の顔の形状が同時に操作されることになり、個々の顔の形状の絶対的なスケールが失われてしまう。そこで、本実験では、被験者280名のうち、第1主成分得点が第1四分位と第3四分位の間にある140名を選び、顔の大きさの影響を排除することとした。この140名の10歳ごとの年代のける分布は、20代が29名、30代が31名、40代が23名、50代が27名、60代が30名であった。

選抜した140名の被験者について主成分分析を実施し、累積寄与率から第5主成分までで顔形状の60.7%を説明できることが示唆された。図6-2-4に140名の被験者で主成分分析を行った結果を示す。解析者2名が同一の形状だと判断したのは第3主成分までであった。PC1は主に顎と頬の周りの変化に関係し、主成分得点が高いほど頬と顎の周りのボリュームが減少しているため、PC1は「頬と顎の周りのボリューム」と定義した。PC2は主に額と顎周辺の変化に関係し、主成分得点が高いほどこめかみと瞼のボリュームが小さく、顎の前方への突出が大きく、下顎角が広くなった。そのため、PC2は「顔上部のボリューム、顎の突出度、下顎角」と定義した。PC3は主に額、目、頬周辺の変化であり、主成分得点が高いほど眉の前方への突出が大きく、瞼や頬の位置が低下したことから、PC3は「皮膚のたるみ具合、眉の突出具合」と定義した。したがって、140名の被験者から抽出された形状特徴は、280名の全被験者から抽出された形状特徴とは異なるものが抽出された。

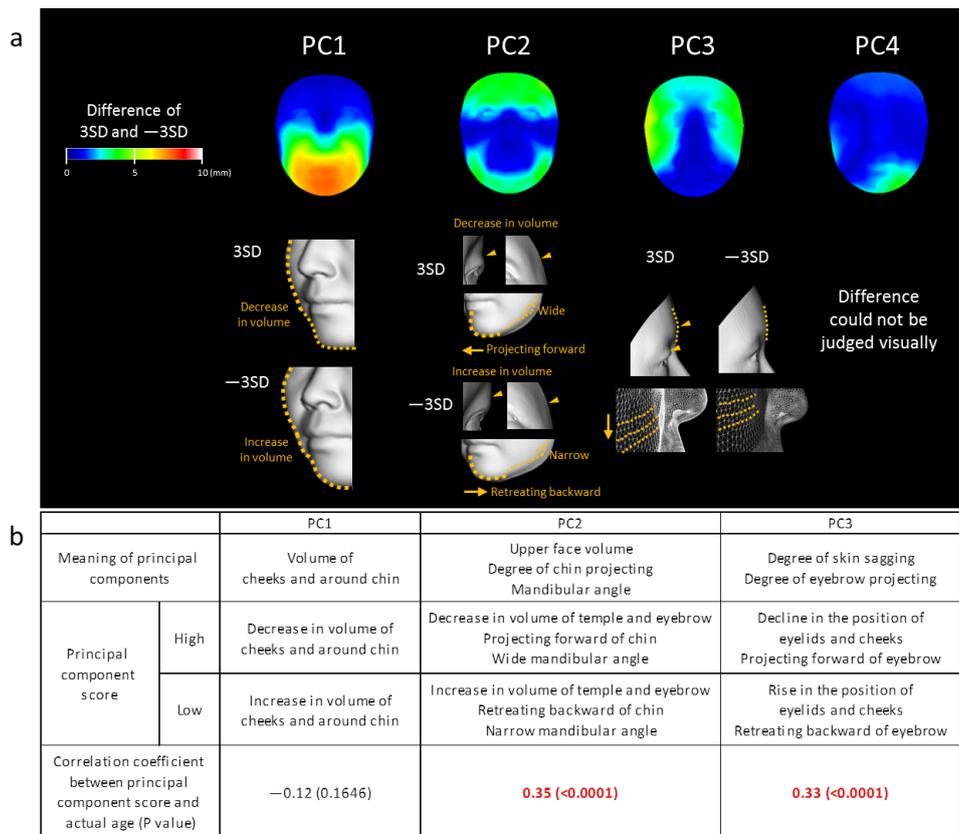


図 6-2-4. 顔の大きさの分散を抑えた半数の被験者の顔形状の主成分分析によるシミュレーション結果

(a) 第 4 主成分までの顔形状のシミュレーション結果. (b) 主成分の定義と年齢との相関.

図 6-2-4b は、これら第 1~3 主成分について各主成分得点と被験者の年齢との相関関係をまとめたものである。PC2（「顔面上部の体積、顎の突出度、下顎角」と）と PC3（「皮膚のたるみ度、眉毛の突出度」）には年齢との正の相関が確認された。PC1（頬と顎周りのボリューム）は年齢との有意な相関は認められなかった。しかし、PC1 の散布図（図 6-2-5a）から、40 代半ばで 2 つのクラスターに分けられることが示唆された。そこで、群平均法によるクラスター分析を行ったところ、データは 3 つのクラスターに分けられることが確認された（図 6-2-5a, b）。最初の

2つのクラスターは、いずれも PC1 スコアと年齢の間に有意な相関があり(図 6-2-5c), 年齢とともに「頬や顎周りのボリューム」が増加することが確認された. このように, 顔の大きさの影響を排除することで, その後設定される主成分軸が変化し, さらに年齢に関連した形状特徴を抽出できることが示唆された. 本実験は, 「女性の顔形状は 40 代で変化する」という仮説に基づいており, 20 歳から 69 歳までの女性を分析することで, 本仮説を実証することができた. また, この顔形状の変化は全年代を通して一様ではなく, 40 代を境として異なる形状変化が生じることが示唆された.

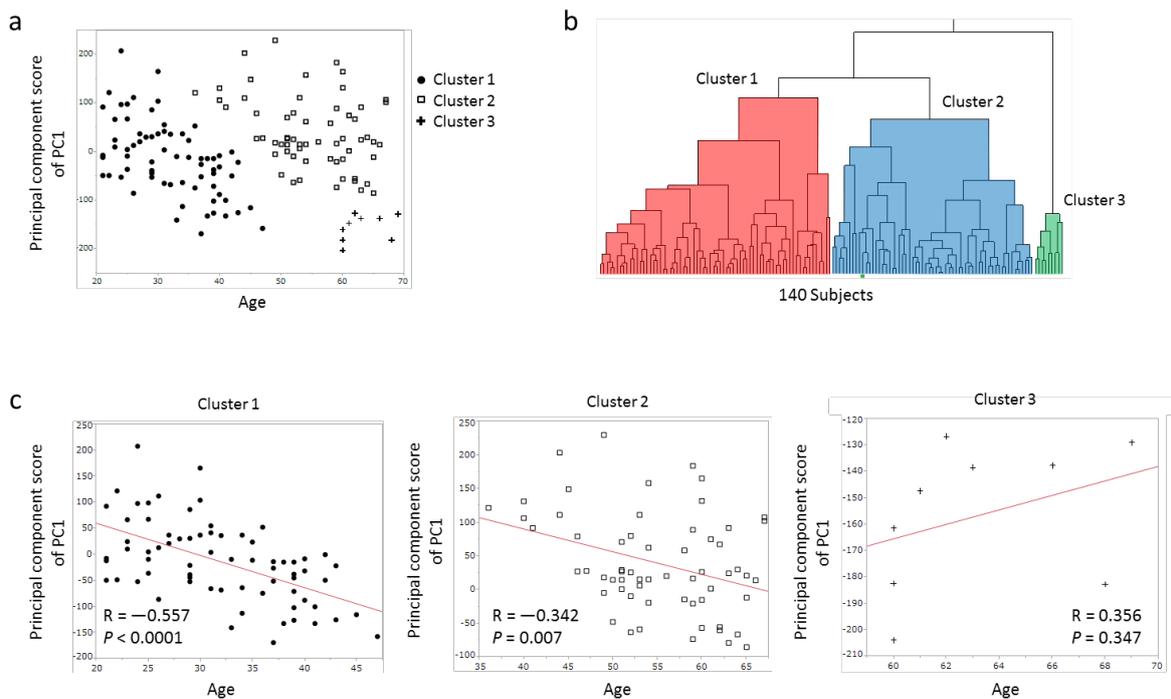


図 6-2-5. 顔の大きさの分散を抑えた半数の被験者の顔形状の主成分得点の分散

- (a) 年齢に対する第 1 主成分得点の分散. (b) 第 1 主成分得点の群平均法によるクラスタリング結果.
 (c) クラスターごとの年齢に対する第 1 主成分得点の分散.

【若年層と高齢層における顔形状特徴と年齢の関係】

上述の通り、顔形状の加齢変化は20代から60代で一様ではなく、40代半ばを境に異なることが確認されたことから、顔の大きさの影響を排除して抽出された140名の被験者を、若齢群(20~44歳, 72名)と高齢群(45~69歳, 68名)に分け、これら2群各々に対して主成分分析を実施した。各群で得られた累積寄与率から、第5主成分までで顔形状のそれぞれ63.6%, 61.4%を説明できることが示唆された。図6-2-6(若年層), 図6-2-7(高齢者層)は、先の解析と同様に顔形状を再構築したものである。解析者2名が主成分の意味合いについて、若年層では3主成分まで、高齢者層では4主成分までを同一なものとして評価した。

若齡群の主成分の定義は次の通りである。PC1は下顔面周辺の変化に関係し、主成分得点が高いほど頬全体と顎周辺のボリュームが大きくなるため、PC1は「頬全体と顎周辺のボリューム」と定義した。PC2は、顔面上部の変化で、主成分得点が高いほど、こめかみ、瞼、頬上部のボリュームが増加するため、PC2は「顔面上部のボリューム」と定義した。PC3は額と顎の変化で、主成分得点が高いほど眉と顎の突出が大きく、下顎角が小さくなるため、PC3は「眉と顎の突出の程度と下顎角」と定義した。図6-2-6bは、若齡群の主成分分析から得られた第1～3主成分をまとめたものである。

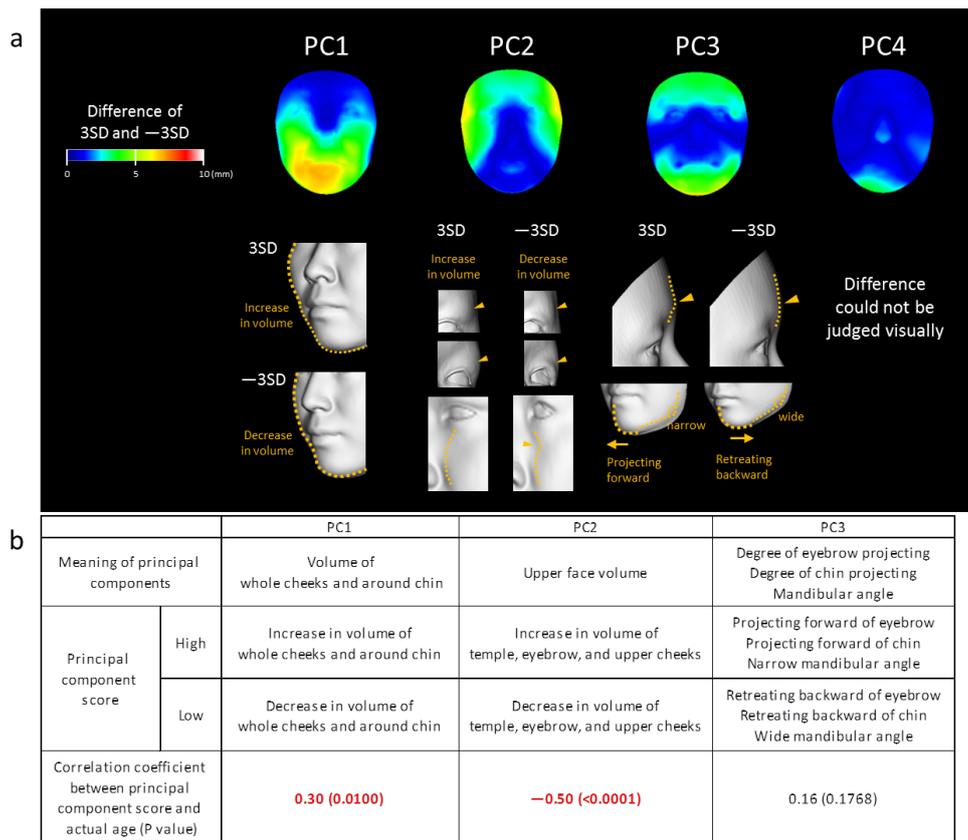


図6-2-6. 若齡群の顔形状の主成分分析によるシミュレーション結果
(a) 第4主成分までの顔形状のシミュレーション結果。(b) 主成分の定義と年齢との相関。

高年齢群の主成分の定義は次の通りである。PC1は、主に顔面下部の変化であり、主成分得点が高いほど頬下部と顎部のボリュームが少ないため、PC1は「頬下部と顎部のボリューム」と定義した。PC2は、頬上部の変化を含み、主成分得点が高いほど頬上部のボリュームが少ないことから、PC2は「頬上部のボリューム」と定義した。PC3は、額と顎の変化を表し、主成分得点が高いほど、眉の位置が低く、顎が右に歪んでいるため、PC3は「眉の位置と顎の歪み」と定義した。PC4は、主に瞼と頬の周辺、顔の輪郭の変化で、主成分得点が高いほど瞼、頬、顎の位置が高く、顎の右への歪みが大きいので、PC4は「皮膚のたるみ、顎の歪み」と定義した。図6-2-7bは、高年齢群の主成分分析について、第1~4主成分をまとめたものである。

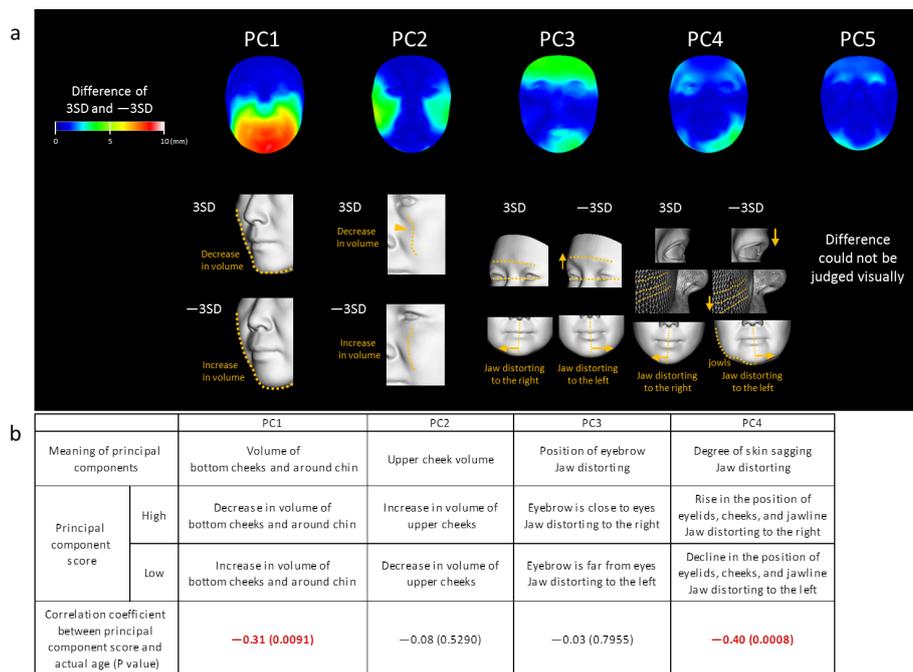


図 6-2-7. 高年齢群の顔形状の主成分分析によるシミュレーション結果
(a) 第5主成分までの顔形状のシミュレーション結果。(b) 主成分の定義と年齢との相関。

図 6-2-6b と図 6-2-7b は、それぞれ若齢群と高齢群の主成分得点と年齢の相関分析結果である。若齢群では、PC1「頬全体と顎周りのボリューム」が年齢とともに増加し、PC2「こめかみ、眉毛、頬上部のボリューム」が年齢とともに減少していることがわかる。高齢群では、PC1「頬の下部と顎周りのボリューム」が増加し、PC4「瞼、頬、顎ラインの位置、顎の歪み」が加齢とともに顕著となった。したがって、若齢群と高齢群では異なる加齢変化が生じていることが示唆され、20 歳から 69 歳までの全体を対象とした分析では確認できなかった、各年齢層で起きている形状特徴の変化を明らかにすることができた。

加齢に伴う顔形状の変化を図 6-2-8 にまとめた。45 歳前後までの加齢変化は、頬全体と顎周りのボリュームが増加し、こめかみ、瞼、頬上部のボリュームが減少する。これら体積の変化は、加齢に伴う顔面脂肪の分布に関する先行研究と一致する[148]–[150]。45 歳前後以降で生じる加齢変化は、頬の下部と顎の周りのボリュームの増加、瞼、頬、顎のラインの位置の低下、顎の歪みであった。これらの変化は、顎の歪みは除いて、筋肉、皮下支持帯、真皮結合組織の変化など複合作用によって生じる皮下組織に起因すると考えられる。顎のゆがみは、日常の噛み癖、歯の脱落、笑顔など表出表情の癖が原因だと考えられる。45 歳以上の被験者では、それら日常の行動の蓄積が顔の形態変化として表れたものと考察される。また、加齢に伴い、まず脂肪など皮膚の量が変化し、その後たるみなど皮膚の位置変化が生じることは、臨床報告とも一致する[149]。

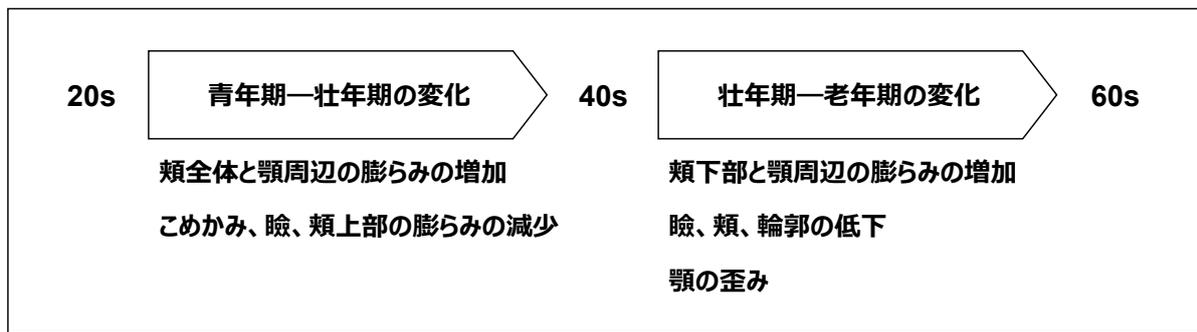


図 6-2-8. 顔の形状の加齢変化

本実験では、標本集団の年代区分を変化させて主成分分析を行うことで、顔の3次元形状の加齢に伴う変化を解析することができた。また、顔表面の形状を計測するだけで、「頬の膨らみ具合」や「皮膚の下垂」といった軟部組織に由来すると考えられる変化だけでなく、「眉骨や顎の前出具合」、「下顎角の変化」といった、前頭骨や顎の骨格の違いに由来する形状的特徴の確認ができることを示した。骨格の変化は、幼少期から青年期の成長過程と60代以降の成熟過程で顕著となるため、今回対象とした60代までの成人女性においては、これら骨格の加齢変化は確認されなかった。しかし、今回抽出された眉骨の突出は、Lambrosの理論による加齢と一致し[151]、顎の突出や下顎角拡大による下顎骨の変化は、Shawらによる報告[15]、[152]と合致していることから、被験者の年齢層を広げることで、本法にて骨格の加齢変化についても解析できると考えられる。骨格の変化の観察方法は、一般的にはX線CTなどに限られ、計測には大規模な施設や技師を必要とする。本手法では、顔の3次元画像を取得するだけで加齢変化する前頭骨や顎の骨格の簡便な計測が行えることが示された。

6-2-3. 実験 6-2 のまとめ

本実験で解析したのは、顔形状の実年齢との関係性である。ヒトが社会活動を円滑に営む上では、他者の顔形状から受け取る見た目の年齢印象も重要であろう。今回用いた主成分分析による顔形状の解析方法は、分散の大きい形状的特徴から抽出していくものであり、ヒトの顔認識メカニズムとも類似している[153], [154]。今後は、今回抽出した形状的特徴が、実際にヒトの受け取る印象にどの程度影響を及ぼすのかについて明らかにしていきたい。

6-3. 第 6 章のまとめと考察

本章では、顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響について検討した。実験 6-1 の結果、顔の観察角度は知覚年齢に影響しており、特に横向きの顔では横方向の角度が大きくなることで知覚年齢が低下することを確認した。また、観察者は年齢を頬部情報から判断している可能性が示唆された。この顔の観察の向きによる知覚年齢への影響が顔の立体形状により生じるといふ仮説のもと、続く実験 6-2 では顔の立体形状の計測と、それが実年齢や観察角度ごとに異なる知覚年齢への影響を調査した。実験 6-2 の結果、顔の 3 次元形状の個人差は全年代で一様ではなく、20 代から 40 代の若齢群と 40 代から 60 代の高齢群とで異なることを確認した。さらに、実年齢との相関性から顔の 3 次元形状の加齢変化も若齢群と高齢群とで異なることが確認された。若齢群では、加齢とともに「頬全体と顎周辺の膨らみの増加」、「こめかみ、瞼、頬上部の膨らみの減少」が生じることを確認した。一方で高齢群では、加齢とともに「頬下部と顎周辺の膨らみの増加」、「皮膚の下垂と顎の歪み」が顕著となることが示された。

さらに、実験 6-2 で確認された高齢群の代表的な主成分について、主成分得点と実験 6-1 で確認された各観察方向からの知覚年齢との関係性を予備的に解析した結果、顔のマクロな形態が観察の向きにより顕著もしくは隠微となることが顔の観察の向きにより生じる知覚年齢の違いの一因であることが示唆された。この予備的解析の代表例を図 6-3-1 に示す。ここでは、高齢群のマクロ形態として第 2 主成分（頬上部の肉付き）に着目して、第 2 主成分得点が上位・下位それぞれ 20% の顔について、正面と下 45 度から観察された際の知覚年齢を示した。第 2 主成分得点の上位グループでは頬上部の肉付きが多く、下位グループでは頬上部の

肉付きが少ない顔となる。このとき、正面からの知覚年齢においては差がないが、下方から観察された場合は下位グループの頬上部の肉付きが少ない顔の方が老けて知覚された。この結果は、頬上部の肉付きが少ない顔ではゴルゴラインなどの頬のマクロな凹凸が確認されるが、このマクロ形態が下方から観察されることで顕在化して老けて知覚されたものと考察される。

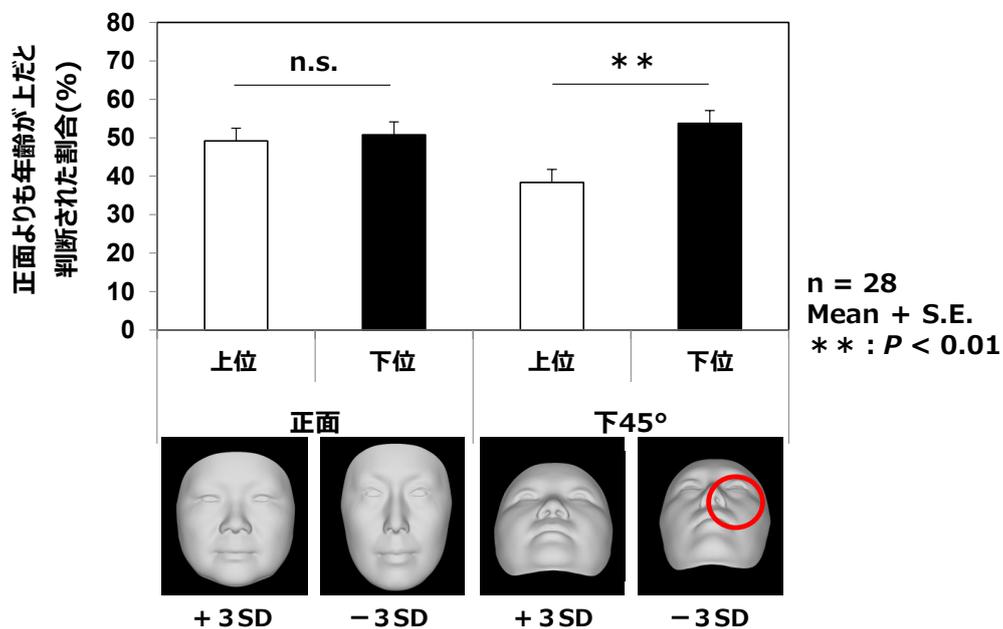


図 6-3-1. 高齢層の第 2 主成分 (頬上部の肉付き) 得点上位・下位の顔に対する観察角度ごとの知覚年齢

第7章 総合的考察

本章では、本論文の各章の実験結果を整理した上で、顔の知覚年齢に及ぼす顔の剛体・非剛体運動の影響についてまとめる。続いて、皮膚科学的な観点で考察し今後の検討課題について述べる。最後に、本論文の成果活用可能性についての展望を示す。

7-1. 実験結果のまとめ

本論文では、先行研究で取り組まれてきた研究対象の条件が静止した正面顔という実生活環境と比較して限定的であるという課題に対して、知覚年齢に対する顔の運動（顔の非剛体運動）と観察の向き（顔の剛体運動）の影響を検証した。本論文は全7章で構成された（図7-1-1）。

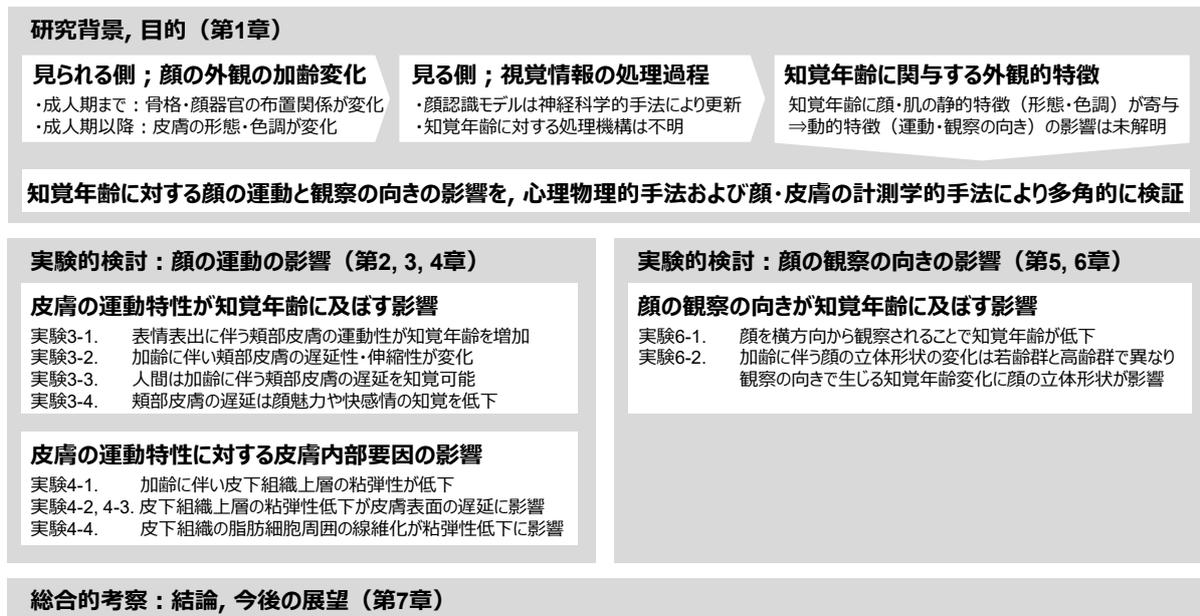


図 7-1-1. 本論文の構成

以下に, 前章までの概要を示す.

第 1 章「序論: 顔の老化研究と知覚年齢に関する実験的研究の概観」

本章においては序論として, 知覚年齢に関する先行研究を概観し本論文の位置づけについて述べた. まず, 顔情報の発信側の観点から顔の外観的特徴の加齢変化を整理した. 次に, 顔情報の受信側の観点から顔知覚における視覚情報の処理過程に関する知見を整理した. 続いて, 顔情報の発信側と受信側双方の観点から知覚年齢に關与する外観的特徴について整理した. 最後に, 先行研究では研究対象の条件が静止した正面顔という実生活環境と比較して限定的であるという課題を示し, 本論文の目的である知覚年齢に対する顔の運動と観察の向きの検証の必要性を示した.

第 2 章「実験的検討概要: 顔の運動が知覚年齢に及ぼす影響」

第 3 章および第 4 章で実施する顔の運動が知覚年齢に及ぼす影響に関する実験的検討の概要を述べた.

第 3 章「実験的検討: 表情表出時の皮膚の動的特性が顔印象に及ぼす影響」

知覚年齢に対する皮膚表面の動的特性の影響を実験的に検討した. 実験 3-1 では, 年齢知覚実験により, 顔運動の有無を操作した視覚刺激を用いて知覚年齢に対する顔運動の影響を調査した. 加えて, 年齢判断している最中の観察者の視線を計測することで年齢印象に寄与する顔の領域を特定した. その結果, 顔の運動は知覚年齢に影響しモデル年齢が増加することで

知覚年齢が増大することを確認した。また、観察者は年齢を頬部情報から判断している可能性が示唆された。実験 3-2 では、実験 3-1 で特定された年齢判断に重要な顔領域（頬領域）について、モデル年齢の増加に伴い知覚年齢が増大する原因を明らかにするためにモデルの頬部皮膚表面の動的特性を計測し、その加齢変化を調査した。その結果、加齢に伴い頬部皮膚表面の運動が表情表出に対して遅延すること、および頬部下部の伸縮性が低下することを確認した。実験 3-3 では、加齢に伴い生じる「頬部運動の遅延」という情報に注目し、同情報を人間が検知可能であるかについて検証を行った。その結果、人間は他者の顔動作（開口運動）を観察する上で、加齢により生じる微少な頬部運動の遅延を知覚可能であった。また、非顔刺激と比べて顔刺激で遅延検出感度が高くなることが確認され、頬部の遅延情報は顔情報処理過程で特異的に処理される可能性が示唆された。実験 3-4 では、実験 3-3 で確認した人間が十分知覚できる頬部の遅延量を付与したワイヤーフレームの顔刺激を用いて、頬部の遅延情報が顔から受ける年齢、魅力、感情（活動性および快不快）の印象に与える影響について調査した。その結果、加齢で生じる頬部遅延は知覚年齢に直接的には影響しないものの、モデル顔から知覚される魅力度や快感情を低下させることで対人印象を悪化させる可能性が示された。本結果から、知覚年齢においてはワイヤーフレームでは表現できないシワやたるみといった皮膚表面テクスチャの運動による見え方が寄与することが考察できた。本章の結果から、加齢に伴い生じる頬部皮膚の運動の遅延が知覚年齢の増加をはじめとする対人印象悪化の要因となることが示唆された。

第 4 章「実験的検討：表情表出時の皮膚の動的特性に対する皮膚内部要因の影響」

第3章で確認された加齢に伴う皮膚表面の動的特性について、その要因を明らかにするために、皮膚内部状態の計測学的検討を実施した。実験4-1では、皮膚表面の動的特性への寄与が想定される皮膚内部の粘弾性を計測し、その加齢変化およびBMIとの関係性を調査した。その結果、真皮下層の粘弾性が加齢とともに低下すること、皮下組織上層の粘弾性は、加齢とともに低下しBMIが高くなると増加することが示された。実験4-2では、本論文で確認された加齢に伴う皮膚表面の遅延量の増加(実験3-2)と皮下組織上層の粘弾性の低下(実験4-1)との関係性を確認するために、両実験を実施した被験者を対象として、皮膚表面の遅延量と皮下組織上層の粘弾性との間の相関性を確認した。その結果、皮膚表面の遅延量と皮下組織上層の粘弾性との間に有意な相関関係を確認した。実験4-3では、皮膚表面の遅延の要因が皮下組織上層の粘弾性低下であることを明らかにするために、実験4-1で確認された皮膚物性を基にコンピュータシミュレーションにて若齢皮膚モデルと高齢皮膚モデルを再現し、両モデルに表情表出を模した運動を生じさせた際に皮膚表面の遅延が生じることを検証した。その結果、皮下組織上層の粘弾性低下により皮膚表面の遅延が生じるという因果性が確認された。実験4-4では、皮下組織上層の粘弾性低下の原因を調査するために、若齢ドナーと高齢ドナーの摘出皮膚を用いて皮下組織を走査型電子顕微鏡にて観察した。その結果、加齢に伴い皮下脂肪細胞周囲に線維化を生じることを確認した。以上、本章の結果から、第3章で確認された顔印象に寄与する頬部皮膚運動の遅延が加齢に伴う皮膚皮下脂肪層の粘弾性の低下により生じること、および粘弾性の低下が加齢に伴う皮下組織の脂肪細胞周囲の線維化により生じることが示唆された。

第5章「実験的検討概要：顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響」

第6章で実施する顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響に関する実験的検討の概要を述べた。

第6章「実験的検討：顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響」

顔の観察の向きが知覚年齢に及ぼす影響について検討した。実験 6-1 では、年齢知覚実験により、顔の観察方向を操作した視覚刺激を用いて知覚年齢に対する顔の観察方向の影響を調査した。加えて、年齢判断している最中の観察者の視線を計測することで知覚年齢に寄与する顔の領域を特定した。その結果、顔の観察角度は知覚年齢に影響しており、特に顔が加齢するに伴い横向きの顔で知覚年齢が低下することを確認した。また、観察者は年齢を頬部情報から判断している可能性が示唆された。顔の観察の向きによる知覚年齢への影響が顔の立体形状により生じるという仮説のもと、続く実験 6-2 を実施した。実験 6-2 では顔 3 次元形状の個人差について 20 代から 60 代の日本人を対象に主成分分析により評価した。加えて、各主成分得点と実年齢との相関性から顔の 3 次元形状の加齢変化について考察した。その結果、顔の 3 次元形状の個人差は全年代で一様ではなく、20 代から 40 代の若齢群と 40 代から 60 代の高齢群とで異なることを確認した。若齢群では、加齢とともに「頬全体と顎周辺の膨らみの増加」、「こめかみ、瞼、頬上部の膨らみの減少」が生じることを確認した。一方で高齢群では、加齢とともに「頬下部と顎周辺の膨らみの増加」、「皮膚の下垂と顎の歪み」が顕著となることが示された。さらに、高齢群の主成分得点と実験 6-1 で確認された各観察方向からの知覚年

齡との関係性について予備的に解析した結果, 頬のマクロな形態が観察の向きにより顕著となることが顔の観察の向きにより生じる知覚年齢増加の一因であることが示唆された.

7-2. 知覚年齢に及ぼす顔の運動と観察の向きとの関与

以上の各実験で示された動的な顔の知覚年齢の規定要因を図 7-1-2 に整理する。

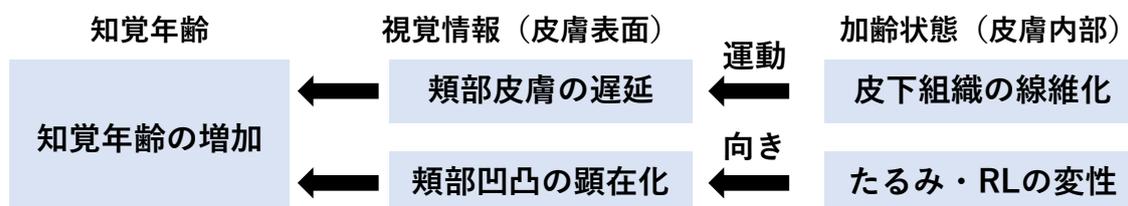


図 7-1-2. 本論文で示唆された動的な顔の知覚年齢の規定要因

知覚年齢に対する顔の運動の影響に関する検討から、人間は対面した顔の頬部皮膚の遅延からその顔に対して老けた印象や魅力の低下、快感情の低下を感じる事が示唆された。さらに、頬部皮膚が遅延する要因は皮下組織上層の脂肪細胞周囲の線維化に起因する粘弾性の低下であることが確認された。また、知覚年齢に対する顔の観察の向きの影響に関する検討からは、顔の加齢に伴うマクロな凹凸形態が観察される向きによって顕在化もしくは隠微となり、知覚年齢を変化させる可能性が確認された。このマクロな凹凸形態は後述する皮膚のたるみや RL の変性といった皮膚内部の老化により顕在化することが示唆される。

7-3. 皮膚科学的考察

本項では、動的な顔の知覚年齢の規定要因について皮膚科学的な考察を行い、今後の検討課題について述べる。

7-3-1. 頬部運動の加齢変化

本論文から、加齢によって表情表出に伴う頬部の動的特性が変化すること、およびその要因として、皮下組織上層の脂肪細胞周囲の線維化に伴う粘弾性低下が寄与していることが明らかとなった。このとき、表情表出時の皮膚の挙動は、皮膚深部の表情筋の可動が皮膚内部を伝搬して皮膚表面に動的特徴量として生じていることが想定される。そのため、皮膚表面の動的特性が皮膚と表情筋の間に位置し真皮の約5倍もの厚みを有する皮下組織であることは納得性が高い。さらに、肥満の研究においては低酸素状態が線維化の一因であると報告されており、皮膚の低酸素状態は線維化の促進因子として注目されている[3]。したがって、皮下組織の線維構造や酸素環境の変化は、柔らかく弾力性のある皮膚を維持するとともに、顔の運動を若々しく保つ鍵だと考えられる。しかしながら、これら機構の真否を明らかにするためには、今後皮膚細胞を用いて培養中の酸素環境を操作して、線維化関連因子の発現を確認するといった生化学的な検討が必要である。

7-3-2. 頬部形態の加齢変化

顔の観察の向きによって加齢に伴う頬部の凹凸などマクロな形態の見え方が変化し、観察の向きによる知覚年齢の変化が生じることが示唆された。外観に最も影響すると考えられる頬部の凹凸の主要因は、Midface grooveと呼ばれる頬部を鼻の付け根から下方外側へハの字に走行する溝である[155]。この溝は加齢に伴い、頬部皮膚が重力に抗えず下垂すること、さらに骨や筋肉と皮膚とを繋ぐRLと呼ばれる腱構造が部分的にアンカーとして機能して局所的に吊り下がることで生じる。そのため、観察の向きにより顕在化する老化印象の規定要因を明らかにするためには、頬部のたるみや、アンカーとなるRLの量的・質的变化に関してより詳細な検討が必要だと考える。

7-4. 成果の活用可能性

本論文で得られた知見から, 展開し得る活用可能性について述べる. 本論文で明らかにした「皮膚表面の特徴」, 「皮膚内部の特徴」, および「皮膚表面の特徴と皮膚内部の特徴との関係性」の3つの観点で活用可能性を議論する.

7-4-1. 皮膚表面特徴からの活用

皮膚表面の特徴として明らかにした, 知覚年齢に対する頬部皮膚の遅延や頬部凹凸の影響からは, 日常生活下で顔から高精度にその人の年齢を同定するシステムの開発や, 他者へより若々しく魅せる視覚的な改善方策の提案が可能となると考える. 具体的には, 年齢同定システムにおいては, 実生活環境において表情や発語, 顔向きなど時々刻々と変化する顔の状態変化に対して頑健な年齢同定システムの開発が可能となると考える. また, 若々しく魅せる方策としては, 皮膚の外観を光学的に制御することで若々しい印象を与えるメイクアップ製品の開発が可能となると考える. さらに, Covid-19 感染拡大を契機として浸透した Web 会議など画面越しでの対面コミュニケーション機会において, 本論文の知見を工学的に実装することで顔の運動性や立体性を制御し, 相手に対して若々しく魅せる方策にも展開可能だと考える.

7-4-2. 皮膚内部特徴からの活用

皮膚の運動性や凹凸に寄与することが示唆された皮膚内部構造体の知見からは、同構造体の老化抑制によって若々しい印象を実現することが可能となると考える。具体的には、皮膚の運動性への寄与が確認された皮下組織の線維化、および皮膚の凹凸に寄与することが示唆されたたるみやRLの変性について、皮膚内部要因の変化を予防もしくは改善する有効成分を探索することで、美容産業やヘルスケア産業における身体的な老化改善方策の提案が可能となると考える。

7-4-3. 皮膚表面特徴と皮膚内部特徴との関係性の活用

上述した「皮膚表面の特徴」と「皮膚内部の特徴」の両者間の関係性からは、例えば顔の外観を撮影することで皮膚内部の老化状態を推定する技術が導出できると考える。本論文では頬の運動の遅延という顔の動的な特徴量と皮膚深部皮下組織の線維構造の悪化との関連性が示唆された。このとき顔の動的特徴量はモーションキャプチャにより被験者の顔にマーカーを設置し取得した。今後、オプティカルフロー法やマーカーレスのモーションキャプチャ法など顔の動画から簡便に動的特徴量を取得する方策の検討、そして取得された動的特徴量を独立変数、皮下組織の線維構造の状態を目的変数とした学習機の構築を行うことで、顔の動画から生体の老化状態を簡便に推定する方策などが提案できるものと考えられる。

本論文の成果の活用可能性を図 7-1-3 にまとめる。

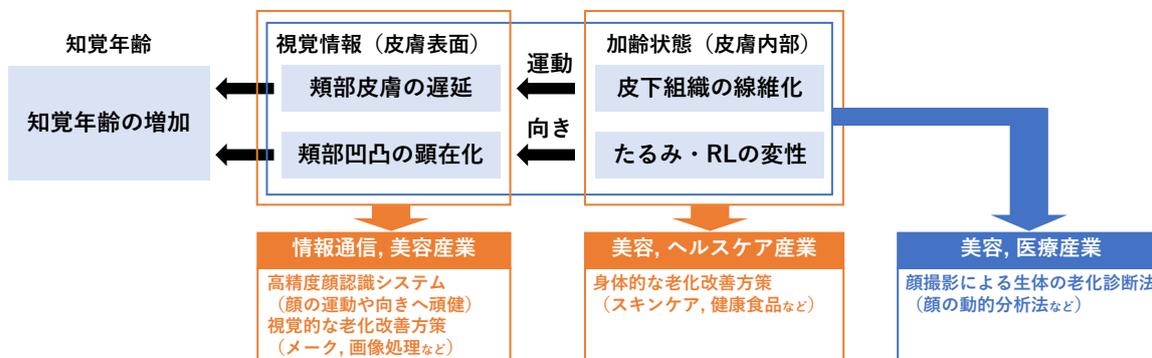


図 7-1-3. 成果の活用可能性

昨今, センシング技術の発達や IoT の浸透とともに, 新たな価値提供の手法も「マス」への展開から年齢や居住地など「個人」に合わせた形へ移行している. 本論文で導出した顔の動的特性を考慮した知覚年齢に対する研究成果は, それら個人的属性を超えて, 日常における様々なシーンや状況といった「トキ」に即して, より正確に状態を把握することや, より多様な自己表現を支援するなど, 新たなパーソナライゼーションのあり方を提案できるものと考えている.

おわりに

顔から知覚される「老けた」もしくは「若々しい」印象を規定する要因を明らかにするために、先行研究の多くは静的な顔、すなわち無表情の正面顔を対象に検討がなされてきた。しかしながら、日常における顔は、表情や発語により動的に変形（顔の非剛体的運動）しており、また観察者はその顔を様々な方向から捉えるために印象を形成する顔の向き（顔の剛体的運動）が異なる。従来検討されてきた顔認識モデルにおいては、年齢は個人同定の一要素であり、顔の非剛体・剛体運動の影響は排除、もしくは独立して処理されるべきものとして考えられてきた。

本論文では、心理物理実験により顔の知覚年齢に対する顔の運動および観察の向きの影響を検討することで、顔の非剛体・剛体運動が知覚年齢に影響することを明らかにした。すなわち、ヒトが顔認識過程で顔の動的特性を年齢推定に活用していることが示唆された。加えて、顔や皮膚の計測学的な実験を通して、動的な顔に対する知覚年齢を左右する皮膚科学的な要因について検討し、これまで対処されてこなかった動的な老化徴候を明らかにすることができた。

今後は、本知見を基に工学的・光学的な実装により正確な知覚年齢の推定や、知覚年齢の改善方策の提案、さらには皮膚科学的なメカニズムを解明することで若々しさを維持・改善する方策の提案に繋がると考える。

引用文献

- [1] C. Rezlescu, B. Duchaine, C. Y. Olivola, and N. Chater, “Unfakeable facial configurations affect strategic choices in trust games with or without information about past behavior,” *PLoS One*, vol. 7, no. 3, 2012, doi: 10.1371/journal.pone.0034293.
- [2] H. Ellis, “Are Faces Special?,” in *Handbook of research on face processing*, North Holland, 1989, pp. 1–26. doi: 10.1093/oxfordhb/9780199559053.013.0009.
- [3] R. S. Malpass and J. Kravitz, “Recognition for faces of own and other race,” *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 13, no. 4, pp. 330–334, 1969, doi: 10.1037/h0028434.
- [4] 伊師 華江, 蒲池 みゆき, 瀧川 えりな, 細井 聖, “顔の年齢推定に関する心理学的検討：評定者年齢による推定特性の違いを中心に(ヒューマンコミュニケーション),” *電子情報通信学会論文誌 A, 基礎・境界*, vol. 89, no. 11, pp. 1004–1011, 2006.
- [5] 長崎 芙美, 村上 泉子, “見た目年齢判断に影響する要因—30代と40代女性の素顔での検討—,” *日本化粧品技術者会誌*, vol. 50, no. 1, pp. 17–24, 2016, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [6] L. S. Mark, J. B. Pittenger, H. Hines, C. Carello, R. E. Shaw, and J. T. Todd, “Wrinkling and head shape as coordinated sources of age-level information,” *Percept. Psychophys.*, vol. 27, no. 2, pp. 117–124, 1980, doi: 10.3758/BF03204298.
- [7] D. A. Gunn *et al.*, “Why some women look young for their age,” *PLoS One*, vol. 4, no. 12, p. e8021, 2009, doi: 10.1371/journal.pone.0008021.
- [8] B. Fink and P. J. Matts, “The effects of skin colour distribution and topography cues on the perception of female facial age and health,” *J. Eur. Acad. Dermatology Venereol.*, vol. 22, no. 4, pp. 493–498, 2008, doi: 10.1111/j.1468-3083.2007.02512.x.

- [9] A. Nkengne *et al.*, “Influence of facial skin attributes on the perceived age of Caucasian women,” *J. Eur. Acad. Dermatology Venereol.*, vol. 22, no. 8, pp. 982–991, 2008, doi: 10.1111/j.1468-3083.2008.02698.x.
- [10] 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,” *Evol. Hum. Behav.*, vol. 27, no. 6, pp. 433–442, 2006, doi: 10.1016/j.evolhumbehav.2006.08.007.
- [11] A. Porcheron, E. Mauger, and R. Russell, “Aspects of Facial Contrast Decrease with Age and Are Cues for Age Perception,” *PLoS One*, vol. 8, no. 3, p. e57985, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0057985.
- [12] K. Lorenz, “Die angeborenen Formen möglicher Erfahrung,” *Z. Tierpsychol.*, vol. 5, no. 2, pp. 235–409, 1943, doi: 10.1111/j.1439-0310.1943.tb00655.x.
- [13] M. R. Cunningham, “Measuring the Physical in Physical Attractiveness. Quasi-Experiments on the Sociobiology of Female Facial Beauty,” *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 50, no. 5, pp. 925–935, 1986, doi: 10.1037/0022-3514.50.5.925.
- [14] J. B. Pittenger and R. E. Shaw, “Aging faces as viscal-elastic events: implications for a theory of nonrigid shape perception,” *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 1, pp. 374–382, 1975.
- [15] J. T. Todd, L. S. Mark, R. E. Shaw, and J. B. Pittenger, “The perception of human growth,” *Sci. Am.*, vol. 242, no. 2, pp. 132–145, 1980.
- [16] R. E. Scammon, “The measurement of the body in childhood,” in *The measurement of man*, University of Minnesota Press, 1930, pp. 173–215.

- [17] F. K. Kozak, J. C. Ospina, and M. F. Cardenas, “Characteristics of Normal and Abnormal Postnatal Craniofacial Growth and Development,” in *Cummings Pediatric Otolaryngology*, Elsevier, 2014, pp. 55–80. doi: 10.1016/B978-0-323-35671-8.00006-2.
- [18] Y. Takahashi, Y. Fukushima, K. Kondo, and M. Ichihashi, “Facial skin photo-aging and development of hyperpigmented spots from children to middle-aged Japanese woman,” *Ski. Res. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 613–618, 2017, doi: 10.1111/srt.12380.
- [19] J. P. Ortonne, “Pigmentary changes of the ageing skin,” *Br. J. Dermatol.*, vol. 122, pp. 21–28, 1990, doi: 10.1111/j.1365-2133.1990.tb16121.x.
- [20] 小島伸俊, 沖山夏子, 上村隆明, 堀公彦, “独立成分分析法を用いた肌色解析とそのシミ解析への応用,” *オレオサイエンス*, vol. 7, no. 7, pp. 273–277, 2007.
- [21] H. Ohshima *et al.*, “Melanin and facial skin fluorescence as markers of yellowish discoloration with aging,” *Ski. Res. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 496–502, 2009, doi: 10.1111/j.1600-0846.2009.00396.x.
- [22] Y. Nishimori, A. D. Pearse, C. Edwards, and R. Marks, “Elastotic degenerative change and yellowish discolouration in photoaged skin,” *Ski. Res. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 79–82, 1998, doi: 10.1111/J.1600-0846.1998.TB00090.X.
- [23] M. Gonzalez-Ulloa and E. S. Flores, “Senility of the face-basic study to understand its causes and effects,” *Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 36, no. 2, pp. 239–246, 1965, doi: 10.1097/00006534-196508000-00013.
- [24] R. G. Glogau, “Aesthetic and anatomic analysis of the aging skin,” *Semin. Cutan. Med. Surg.*, vol. 15, no. 3, pp. 134–138, 1996, doi: 10.1016/S1085-5629(96)80003-4.

- [25] H. Nagashima, K. Hanada, and I. Hashimoto, "Correlation of skin phototype with facial wrinkle formation," *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.*, vol. 15, no. 1, pp. 2–6, 1999, doi: 10.1111/j.1600-0781.1999.tb00044.x.
- [26] K. Tsukahara *et al.*, "Comparison of age-related changes in wrinkling and sagging of the skin in Caucasian females and in Japanese females," *J. Cosmet. Sci.*, vol. 55, no. 4, pp. 373–385, 2004, doi: 10.1111/j.1467-2494.2004.00245_5.x.
- [27] K. Tsukahara, Y. Takema, T. Fujimura, S. Moriwaki, T. Kitahara, and G. Imokawa, "Determination of age-related changes in the morphological structure (sagging) of the human cheek using a photonumeric scale and three-dimensional surface parameters," *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 22, no. 4, pp. 247–258, 2000, doi: 10.1046/j.1467-2494.2000.00033.x.
- [28] E. C. Naylor, R. E. B. Watson, and M. J. Sherratt, "Molecular aspects of skin ageing," *Maturitas*, vol. 69, no. 3, pp. 249–256, 2011, doi: 10.1016/j.maturitas.2011.04.011.
- [29] Y. Nishimori, C. Edwards, A. Pearse, K. Matsumoto, M. Kawai, and R. Marks, "Degenerative alterations of dermal collagen fiber bundles in photodamaged human skin and UV-irradiated hairless mouse skin: Possible effect on decreasing skin mechanical properties and appearance of wrinkles," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 117, no. 6, pp. 1458–1463, 2001, doi: 10.1038/jid.2001.2.
- [30] F. Flament *et al.*, "Solar exposure(s) and facial clinical signs of aging in Chinese women: Impacts upon age perception," *Clin. Cosmet. Investig. Dermatol.*, vol. 8, pp. 75–84, 2015, doi: 10.2147/CCID.S72244.
- [31] G. G. Hillebrand, K. Miyamoto, B. Schnell, M. Ichihashi, R. Shinkura, and S. Akiba, "Quantitative evaluation of skin condition in an epidemiological survey of females living in northern versus southern Japan," *J. Dermatol. Sci.*, vol. 27, pp. 42–52, 2001, doi: 10.1016/s0923-1811(01)00118-9.

- [32] K. Mizukoshi, K. Yonekura, M. Futagawa, T. Nakamura, K. Hirayama, and K. Takahashi, "Changes in dermal papilla structures due to aging in the facial cheek region," *Ski. Res. Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 224–231, 2015, doi: 10.1111/srt.12180.
- [33] O. Kuwazuru, K. Miyamoto, N. Yoshikawa, and S. Imayama, "Skin wrinkling morphology changes suddenly in the early 30s," *Ski. Res. Technol.*, vol. 18, no. 4, pp. 495–503, 2012, doi: 10.1111/j.1600-0846.2011.00598.x.
- [34] T. B. Fitzpatrick, "The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI," *Arch. Dermatol.*, vol. 124, no. 6, pp. 869–871, 1988, doi: 10.1001/archderm.124.6.869.
- [35] V. Bruce and A. Young, "face recognition," in *British journal of psychology*, vol. 77, no. 3, 1986, pp. 305–327.
- [36] J. V. Haxby, E. A. Hoffman, and M. I. Gobbini, "The distributed human neural system for face perception," *Trends Cogn. Sci.*, vol. 4, no. 6, pp. 223–233, 2000, doi: 10.1016/S1364-6613(00)01482-0.
- [37] J. V Haxby and M. I. Gobbini, "Distributed Neural Systems for Face Perception," in *Oxford Handbook of Face Perception*, 2012. doi: 10.1093/oxfordhb/9780199559053.013.0006.
- [38] G. A. Homola, S. Jbabdi, C. F. Beckmann, and A. J. Bartsch, "A Brain Network Processing the Age of Faces," *PLoS One*, vol. 7, no. 11, p. e49451, 2012, doi: 10.1371/journal.pone.0049451.
- [39] A. L. Jones, R. S. S. Kramer, and R. Ward, "Signals of personality and health: The contributions of facial shape, skin texture, and viewing angle," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 38, no. 6, pp. 1353–1361, 2012, doi: 10.1037/a0027078.

- [40] 深井寛修, 滝本裕則, 満倉靖恵, 田中聡久, 福見稔, “複数特徴に基づく見た目年齢推定,” *電気学会研究会資料. IIC / 電気学会産業計測制御研究会 [編]*, vol. 2009, no. 135, pp. 85–89, 2009.
- [41] N. Samson, B. Fink, and P. J. Matts, “Visible skin condition and perception of human facial appearance,” *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 32, no. 3, pp. 167–184, 2010, doi: 10.1111/j.1468-2494.2009.00535.x.
- [42] D. M. Burt and D. I. Perrett, “Perception of Age in Adult Caucasian Male Faces: Computer Graphic Manipulation of Shape and Colour Information,” *Proc. R. Soc. London. Ser. B Biol. Sci.*, vol. 259, no. 1355, pp. 137–143, 1995, doi: 10.1098/rspb.1995.0021.
- [43] M. G. Kamachi, T. Chiba, M. Kurosumi, and K. Mizukoshi, “Perception of human age from faces: Symmetric versus asymmetric movement,” *Symmetry (Basel)*, vol. 11, no. 5, p. 650, 2019, doi: 10.3390/sym11050650.
- [44] F. Franz, E. Edgar, G. Albert, and B. Axel, “G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences,” *Behav. Res. Methods*, vol. 39, no. 2, pp. 175–191, 2007.
- [45] R. A. McFarland, R. G. Domey, A. B. Warren, and D. C. Ward, “Dark adaptation as a function of age: I. A statistical analysis,” *J. Gerontol.*, vol. 15, no. 2, pp. 149–154, 1960, doi: 10.1093/geronj/15.2.149.
- [46] P. Ekman, “Facial Action Coding System,” in *Environmental Psychology & Nonverbal Behavior*, Consulting Psychologists Press, 1978. doi: 10.4135/9781483381411.n178.
- [47] M. C. Voelkle, N. C. Ebner, U. Lindenberger, and M. Riediger, “Let me guess how old you are: Effects of age, gender, and facial expression on perceptions of age,” *Psychol. Aging*, vol. 27, no. 2, pp. 265–277, 2012, doi: 10.1037/a0025065.

- [48] A. Olsen, "The Tobii I-VT fixation filter," *Tobii Technol.*, vol. 21, pp. 4–19, 2012.
- [49] S. M. Luria and M. S. Strauss, "Comparison of eye movements over faces in photographic positives and negatives," *Perception*, vol. 7, no. 3, pp. 349–358, 1978.
- [50] R. Groner, F. Walder, and M. Groner, "Looking at Faces: Local and Global Aspects of Scanpaths," *Adv. Psychol.*, vol. 22, pp. 523–533, 1984, doi: 10.1016/S0166-4115(08)61874-9.
- [51] G. J. Walker-Smith, A. G. Gale, and J. M. Findlay, "Eye movement strategies involved in face perception," *Perception*, vol. 42, no. 11, pp. 1120–1133, 2013, doi: 10.1068/p060313n.
- [52] C. Blais, R. E. Jack, C. Scheepers, D. Fiset, and R. Caldara, "Culture shapes how we look at faces," *PLoS One*, vol. 3, no. 8, p. e3022, 2008, doi: 10.1371/journal.pone.0003022.
- [53] A. E. Mayes *et al.*, "Ageing appearance in China: Biophysical profile of facial skin and its relationship to perceived age," *J. Eur. Acad. Dermatology Venereol.*, vol. 24, no. 3, pp. 341–348, 2010, doi: 10.1111/j.1468-3083.2009.03418.x.
- [54] H. Rexbye and J. Povlsen, "Visual Signs of Ageing: What are we Looking at?," *Int. J. Ageing Later Life*, vol. 2, no. 1, pp. 61–83, 2007, doi: 10.3384/ijal.1652-8670.072161.
- [55] W. James, *The principles of psychology*. Cosimo, Inc., 2007. doi: 10.30936/1606-951x-2018-20-3/4-27-64.
- [56] N. Krueger, S. Luebberding, M. Oltmer, M. Streker, and M. Kerscher, "Age-related changes in skin mechanical properties: A quantitative evaluation of 120 female subjects," *Ski. Res. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 141–148, 2011, doi: 10.1111/j.1600-0846.2010.00486.x.
- [57] V. Marcos-Garcés *et al.*, "Age-related dermal collagen changes during development, maturation and ageing - a morphometric and comparative study," *J. Anat.*, vol. 225, no. 1, pp. 98–108, 2014, doi: 10.1111/joa.12186.

- [58] H. Dibeklioglu, T. Gevers, A. A. Salah, and R. Valenti, “A smile can reveal your age: Enabling facial dynamics in age estimation,” in *MM 2012 - Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimedia*, 2012, pp. 209–218. doi: 10.1145/2393347.2393382.
- [59] T. Weise, S. Bouaziz, and H. L. M. Pauly, “Realtime performance-based facial animation,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 30, no. 4, 2011, doi: 10.1145/1964921.1964972.
- [60] W. Zhang, Q. Wang, and X. Tang, “Real time feature based 3-D deformable face tracking,” in *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, vol. 5303, no. 2, pp. 720–732. doi: 10.1007/978-3-540-88688-4_53.
- [61] H. Huang, X. Tong, H. T. Wu, and J. Chai, “Leveraging Motion Capture and 3D Scanning for High-fidelity Facial Performance Acquisition,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 30, no. 4, pp. 1–10, 2011, doi: 10.1145/2010324.1964969.
- [62] B. Bickel, M. Lang, M. Botsch, M. A. Otaduy, and M. Gross, “Pose-space animation and transfer of facial details,” in *Computer Animation 2008 - ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium, SCA 2008 - Proceedings*, 2008, pp. 57–66.
- [63] D. Sibbing, M. Habbecke, and L. Kobbelt, “Markerless reconstruction and synthesis of dynamic facial expressions,” *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 115, no. 5, pp. 668–680, 2011, doi: 10.1016/j.cviu.2010.11.022.
- [64] R. G. Glogau, “Aesthetic and anatomic analysis of the aging skin,” *Seminars in Cutaneous Medicine and Surgery*, vol. 15, no. 3. Frontline Medical Communications, pp. 134–138, 1996. doi: 10.1016/S1085-5629(96)80003-4.
- [65] K. Tsukahara *et al.*, “Comparison of age-related changes in wrinkling and sagging of the skin in Caucasian females and in Japanese females,” *J. Cosmet. Sci.*, 2004, doi: 10.1111/j.1467-2494.2004.00245_5.x.

- [66] C. Te Liao, H. J. Chuang, C. H. Duan, and S. H. Lai, "Learning spatial weighting for facial expression analysis via constrained quadratic programming," *Pattern Recognit.*, vol. 46, no. 11, pp. 3103–3116, 2013, doi: 10.1016/j.patcog.2013.03.017.
- [67] D. Fortun, P. Bouthemy, and C. Kervrann, "Optical flow modeling and computation: A survey," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 134, pp. 1–21, 2015, doi: 10.1016/j.cviu.2015.02.008.
- [68] K. Zhang, Y. Huang, Y. Du, and L. Wang, "Facial Expression Recognition Based on Deep Evolutional Spatial-Temporal Networks," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 26, no. 9, pp. 4193–4203, 2017, doi: 10.1109/TIP.2017.2689999.
- [69] H. S. Ryu, Y. H. Joo, S. O. Kim, K. C. Park, and S. W. Youn, "Influence of age and regional differences on skin elasticity as measured by the Cutometer®," *Ski. Res. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 354–358, 2008, doi: 10.1111/j.1600-0846.2008.00302.x.
- [70] H. Ohshima *et al.*, "Relevance of the directionality of skin elasticity to aging and sagging of the face," *Ski. Res. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 101–107, 2011, doi: 10.1111/j.1600-0846.2010.00474.x.
- [71] J. Y. Lee *et al.*, "Loss of elastic fibers causes skin wrinkles in sun-damaged human skin," *J. Dermatol. Sci.*, vol. 50, no. 2, pp. 99–107, 2008, doi: 10.1016/j.jdermsci.2007.11.010.
- [72] K. Mizukoshi, T. Nakamura, and A. Oba, "The relationship between dermal papillary structure and skin surface properties, color, and elasticity," *Ski. Res. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 295–304, 2016, doi: 10.1111/srt.12260.
- [73] T. Besins, "The 'R.A.R.E.' Technique (Reverse and Repositioning Effect): The Renaissance of the Aging Face and Neck," *Aesthetic Plast. Surg. 2004 283*, vol. 28, no. 3, pp. 127–142, 2004, doi: 10.1007/S00266-004-3002-0.

- [74] M. G. Brandt, A. Hassa, K. Roth, B. Wehrli, and C. C. Moore, "Biomechanical properties of the facial retaining ligaments," *Arch. Facial Plast. Surg.*, vol. 14, no. 4, pp. 289–294, 2012, doi: 10.1001/archfacial.2011.1533.
- [75] B. C. Mendelson, A. R. Muzaffar, and W. P. Adams, "Retaining ligament_Surgical Anatomy of the Midcheek and Malar Mounds," *Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 110, no. 3, pp. 885–896, 2002, doi: 10.1097/00006534-200209010-00026.
- [76] K. Miyamoto *et al.*, "Characterization of comprehensive appearances of skin ageing: An 11-year longitudinal study on facial skin ageing in Japanese females at Akita," *J. Dermatol. Sci.*, vol. 64, no. 3, pp. 229–236, 2011, doi: 10.1016/j.jdermsci.2011.09.009.
- [77] P. Thompson, "Margaret Thatcher: A new illusion," *Perception*, vol. 9, no. 4, pp. 483–484, 1980, doi: 10.1068/p090483.
- [78] T. Valentine, "Upside-down faces: A review of the effect of inversion upon face recognition," *Br. J. Psychol.*, vol. 79, no. 4, pp. 471–491, 1988, doi: 10.1111/j.2044-8295.1988.tb02747.x.
- [79] J. H. Langlois and L. A. Roggman, "Attractive faces are only average," *Psychol. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 115–121, 1990, doi: 10.1111/j.1467-9280.1990.tb00079.x.
- [80] K. Grammer and R. Thornhill, "Human (*Homo sapiens*) facial attractiveness and sexual selection: the role of symmetry and averageness.," *J. Comp. Psychol.*, vol. 108, no. 3, pp. 233–242, 1994, doi: 10.1037/0735-7036.108.3.233.
- [81] R. L. Terry and J. S. Davis, "Components of Facial Attractiveness," *Percept. Mot. Skills*, vol. 42, no. 3, pp. 918–918, 1976, doi: 10.2466/pms.1976.42.3.918.
- [82] R. Russell, "Sex, beauty, and the relative luminance of facial features," *Perception*, vol. 32, no. 9, pp. 1093–1107, 2003, doi: 10.1068/P5101.

- [83] B. Fink, K. Grammer, and R. Thornhill, "Human (*Homo sapiens*) facial attractiveness in relation to skin texture and color.," *J. Comp. Psychol.*, vol. 115, 2016, pp. 92–99, 2001, doi: 10.1037/0735-7036.115.1.92.
- [84] M. Honma and Y. Osada, "The effect of the dynamic property of a face on the recognition of facial expressions and eye movements," *J. Vis.*, vol. 4, no. 8, pp. 910–910, 2004, doi: 10.1167/4.8.910.
- [85] H. Ohshima, S. Kinoshita, M. Oyobikawa, M. Futagawa, A. Ishiko, and H. Kanto, "age-related changes in the skin elasticity of the cheek," no. 5, pp. 238–242, 2013, doi: 10.1111/j.1600-0846.2012.00634.x.
- [86] A. Tosti, G. Compagno, M. L. Fazzini, and S. Villardita, "A ballistometer for the study of the plasto elastic properties of skin," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 69, no. 3, pp. 315–317, 1977, doi: 10.1111/1523-1747.ep12507753.
- [87] G. G. Barbarino, M. Jabareen, and E. Mazza, "Experimental and numerical study on the mechanical behavior of the superficial layers of the face," *Ski. Res. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 434–444, 2011, doi: 10.1111/j.1600-0846.2011.00515.x.
- [88] A. Sakata, K. Abe, K. Mizukoshi, T. Gomi, and I. Okuda, "Relationship between the retinacula cutis and sagging facial skin," *Ski. Res. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 93–98, 2018, doi: 10.1111/srt.12395.
- [89] U. Zaleska-Dorobisz, K. Kaczorowski, A. Pawluś, A. Puchalska, and M. Inglot, "Ultrasound elastography - review of techniques and its clinical applications," *Adv. Clin. Exp. Med.*, vol. 23, no. 4, pp. 645–655, 2014, doi: 10.17219/acem/26301.

- [90] R. M. S. Sigrist, J. Liao, A. El Kaffas, M. C. Chammas, and J. K. Willmann, "Ultrasound elastography: review of techniques and clinical applications," *Theranostics*, vol. 7, no. 5, pp. 1303–1329, 2017, doi: 10.7150/thno.18650.
- [91] O. Osanai, M. Ohtsuka, M. Hotta, T. Kitaharai, and Y. Takema, "A new method for the visualization and quantification of internal skin elasticity by ultrasound imaging," *Ski. Res. Technol.*, vol. 17, no. 3, pp. 270–277, 2011, doi: 10.1111/j.1600-0846.2010.00492.x.
- [92] M. Bouer, M. C. Chammas, M. C. L. Messina, I. R. S. De Oliveira, and G. G. Cerri, "Clinical and ultrasonographic correlation in localized cutaneous scleroderma," *Radiol. Bras.*, vol. 41, no. 2, pp. 87–91, 2008, doi: 10.1590/S0100-39842008000200006.
- [93] J. M. Sorrell and A. I. Caplan, "Fibroblast heterogeneity: more than skin deep," *J. Cell Sci.*, vol. 117, no. 5, pp. 667–675, 2004, doi: 10.1242/jcs.01005.
- [94] M. Denda and M. Takahashi, "Measurement of facial skin thickness by ultrasound method," *J. Soc. Cosmet. Chem. Japan*, vol. 23, no. 4, pp. 316–319, 1990.
- [95] Y. Takema, Y. Yorimoto, M. Kawai, and G. Imokawa, "Age-related changes in the elastic properties and thickness of human facial skin," *Br. J. Dermatol.*, vol. 131, no. 5, pp. 641–648, 1994, doi: 10.1111/j.1365-2133.1994.tb04975.x.
- [96] V. P. Werth, X. Shi, E. Kalathil, and C. Jaworsky, "Elastic fiber-associated proteins of skin in development and photoaging," *Photochem. Photobiol.*, vol. 63, no. 3, pp. 308–313, 1996, doi: 10.1111/j.1751-1097.1996.tb03032.x.
- [97] T. Ezure, E. Yagi, S. Amano, and K. Matsuzaki, "Dermal anchoring structures: Convex matrix structures at the bottom of the dermal layer that contribute to the maintenance of facial skin morphology," *Ski. Res. Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 152–157, 2016, doi: 10.1111/srt.12242.

- [98] M. Satoh, S. Mori, H. Nojiri, N. Yoshizuka, and Y. Takema, "Age-associated changes in the amount of subcutaneous tissue in the face evaluated in the ultrasonic B mode," *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 27, no. 2, pp. 133–134, 2005, doi: 10.1111/j.1467-2494.2005.00260_3.x.
- [99] R. J. Rohrich and J. E. Pessa, "The fat compartments of the face: Anatomy and clinical implications for cosmetic surgery," *Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 119, no. 7, pp. 2219–2227, 2007, doi: 10.1097/01.prs.0000265403.66886.54.
- [100] P. Schroeder, S. M. Schieke, and A. Morita, "Premature skin aging by infrared radiation, tobacco smoke and ozone," in *Skin Aging*, Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 45–53. doi: 10.1007/3-540-32953-6_5.
- [101] P. Schroeder, J. Haendeler, and J. Krutmann, "The role of near infrared radiation in photoaging of the skin," *Exp. Gerontol.*, vol. 43, no. 7, pp. 629–632, 2008, doi: 10.1016/j.exger.2008.04.010.
- [102] F. Terranova, E. Berardesca, and H. Maibach, "Cellulite: Nature and aetiopathogenesis," *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 28, no. 3, pp. 157–167, 2006, doi: 10.1111/j.1467-2494.2006.00316.x.
- [103] P. G. Agache, C. Monneur, J. L. Leveque, and J. De Rigal, "Mechanical properties and Young's modulus of human skin in vivo," *Arch. Dermatol. Res.*, vol. 269, no. 3, pp. 221–232, 1980, doi: 10.1007/BF00406415.
- [104] R. G. Wells, "Tissue mechanics and fibrosis," *Biochim. Biophys. Acta - Mol. Basis Dis.*, vol. 1832, no. 7, pp. 884–890, 2013, doi: 10.1016/j.bbadis.2013.02.007.
- [105] R. M. Valentim Da Silva *et al.*, "Effect of capacitive radiofrequency on the fibrosis of patients with cellulite," *Dermatol. Res. Pract.*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/715829.
- [106] J. Foucher *et al.*, "Diagnosis of cirrhosis by transient elastography (FibroScan): a prospective study," *Gut*, vol. 55, no. 3, pp. 403–408, 2006, doi: 10.1136/gut.2005.069153.

- [107] N. Halberg *et al.*, “Hypoxia-Inducible Factor 1 α Induces Fibrosis and Insulin Resistance in White Adipose Tissue,” *Mol. Cell. Biol.*, vol. 29, no. 16, pp. 4467–4483, 2009, doi: 10.1128/mcb.00192-09.
- [108] N. Ikenaga *et al.*, “Selective targeting of lysyl oxidase-like 2 (LOXL2) suppresses hepatic fibrosis progression and accelerates its reversal,” *Gut*, vol. 66, no. 9, pp. 1697–1708, 2017, doi: 10.1136/GUTJNL-2016-312473.
- [109] A. Puente *et al.*, “LOXL2—A new target in antifibrogenic therapy?,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 20, no. 7, p. 1634, 2019, doi: 10.3390/ijms20071634.
- [110] D. M. Gilkes, G. L. Semenza, and D. Wirtz, “Hypoxia and the extracellular matrix: Drivers of tumour metastasis,” *Nat. Rev. Cancer*, vol. 14, no. 6, pp. 430–439, 2014, doi: 10.1038/nrc3726.
- [111] M. G. Jones *et al.*, “Nanoscale dysregulation of collagen structure-function disrupts mechano-homeostasis and mediates pulmonary fibrosis,” *Elife*, vol. 7, p. e36354, 2018, doi: 10.7554/eLife.36354.
- [112] K. Sun, C. M. Kusminski, and P. E. Scherer, “Adipose tissue remodeling and obesity,” *J. Clin. Invest.*, vol. 121, no. 6, pp. 2094–2101, 2011, doi: 10.1172/JCI45887.
- [113] A. Xiong and Y. Liu, “Targeting hypoxia inducible factors-1 α as a novel therapy in Fibrosis,” *Front. Pharmacol.*, vol. 8, p. 326, 2017, doi: 10.3389/fphar.2017.00326.
- [114] X. Li *et al.*, “The role of metformin and resveratrol in the prevention of hypoxia-inducible factor 1 α accumulation and fibrosis in hypoxic adipose tissue,” *Br. J. Pharmacol.*, vol. 173, no. 12, pp. 2001–2015, 2016, doi: 10.1111/bph.13493.

- [115] D. M. T. Burt and D. I. Perrett, "Perception of age in adult Caucasian male faces: Computer graphic manipulation of shape and colour information," *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 259, no. 1355, pp. 137–143, 1995, doi: 10.1098/rspb.1995.0021.
- [116] J. L. Bradshaw and B. E. McKenzie, "Judging Outline Faces: A Developmental Study," *Child Dev.*, vol. 42, no. 3, p. 929, 1971, doi: 10.2307/1127459.
- [117] C. W. Eriksen, R. M. Hamlin, and C. Daye, "Aging adults and rate of memory scan," *Bull. Psychon. Soc.*, vol. 1, no. 4, pp. 259–260, 1973, doi: 10.3758/BF03333363.
- [118] M. S. Cooke, D. Orth, and S. H. Y. Wei, "The reproducibility of natural head posture: a methodological study," *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, vol. 93, no. 4, pp. 280–288, 1988, doi: 10.1016/0889-5406(88)90157-6.
- [119] N. S. Raju, K. G. Prasad, and V. P. Jayade, "A modified approach for obtaining cephalograms in the natural head position," *J. Orthod.*, vol. 28, no. 1, pp. 25–28, 2001, doi: 10.1093/ORTHO/28.1.25.
- [120] T. T. H. Tng, T. C. K. Chan, M. S. Cooke, and U. Hägg, "Effect of head posture on cephalometric sagittal angular measures," *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, vol. 104, no. 4, pp. 337–341, 1993, doi: 10.1016/S0889-5406(05)81330-7.
- [121] L. Zebrowitz, *Reading faces: Window to the soul?* Routledge, 2018.
- [122] L. Penke *et al.*, "Symmetric faces are a sign of successful cognitive aging," *Evol. Hum. Behav.*, vol. 30, no. 6, pp. 429–437, 2009, doi: 10.1016/J.EVOLHUMBEHAV.2009.06.001.
- [123] M. Kurosumi and K. Mizukoshi, "Principal component analysis of three-dimensional face shape: Identifying shape features that change with age," *Ski. Res. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 213–222, 2018, doi: 10.1111/srt.12416.

- [124] O. E. Linden, J. Kit He, C. S. Morrison, S. R. Sullivan, and H. O. B. Taylor, "The relationship between age and facial asymmetry," *Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 142, no. 5, pp. 1145–1152, 2018, doi: 10.1097/PRS.00000000000004831.
- [125] K. Lorenz, "Die angeborenen Formen möglicher Erfahrung," *Z. Tierpsychol.*, vol. 5, no. 2, pp. 235–409, 1943, doi: 10.1111/J.1439-0310.1943.TB00655.X.
- [126] J. M. Ritter, R. J. Casey, and J. H. Langlois, "Adults' Responses to Infants Varying in Appearance of Age and Attractiveness," *Child Dev.*, vol. 62, no. 1, pp. 68–82, 1991, doi: 10.1111/J.1467-8624.1991.TB01515.X.
- [127] S. Windhager, P. Mitteroecker, I. Rupić, T. Lauc, O. Polašek, and K. Schaefer, "Facial aging trajectories: A common shape pattern in male and female faces is disrupted after menopause," *Am. J. Phys. Anthropol.*, vol. 169, no. 4, pp. 678–688, 2019, doi: 10.1002/AJPA.23878.
- [128] H. Hill and V. Bruce, "Effects of Lighting on the Perception of Facial Surfaces," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 22, no. 4, pp. 986–1004, 1996, doi: 10.1037/0096-1523.22.4.986.
- [129] W. L. Braje, "Illumination encoding in face recognition: Effect of position shift," *J. Vis.*, vol. 3, no. 2, pp. 161–170, 2003, doi: 10.1167/3.2.4.
- [130] W. L. Braje, D. Kersten, M. J. Tarr, and N. F. Troje, "Illumination effects in face recognition," *Psychobiology*, vol. 26, no. 4, pp. 371–380, 1998.
- [131] J. A. Biller and D. W. Kim, "A contemporary assessment of facial aesthetic preferences," *Arch. Facial Plast. Surg.*, vol. 11, no. 2, pp. 91–97, 2009, doi: 10.1001/ARCHFACIAL.2008.543.
- [132] S. Jeong, B. N. Lemke, R. K. Dortzbach, Y. G. Park, and H. K. Kang, "The Asian Upper Eyelid: An Anatomical Study With Comparison to the Caucasian Eyelid," *Arch. Ophthalmol.*, vol. 117, no. 7, pp. 907–912, 1999, doi: 10.1001/ARCHOPHT.117.7.907.

- [133] K. Watanabe, "Measurement method of upper blepharoplasty for orientals," *Aesthetic Plast. Surg.* 1993 171, vol. 17, no. 1, pp. 1–8, 1993, doi: 10.1007/BF00455042.
- [134] J. Y. Choi, J. H. Park, H. Javidnia, and J. M. Sykes, "Effect of various facial angles and measurements on the ideal position of the nasal tip in the Asian patient population," *JAMA Facial Plast. Surg.*, vol. 15, no. 6, pp. 417–421, 2013, doi: 10.1001/jamafacial.2013.1244.
- [135] J. K. Wong, "Aesthetic surgery in asians," *Curr. Opin. Otolaryngol. Head Neck Surg.*, vol. 17, no. 4, pp. 279–286, 2009, doi: 10.1097/MOO.0B013E32832CBD04.
- [136] Y. S. J. Aquino and N. Steinkamp, "Borrowed beauty? Understanding identity in Asian facial cosmetic surgery," *Med. Heal. Care Philos.*, vol. 19, no. 3, pp. 431–441, 2016, doi: 10.1007/s11019-016-9699-0.
- [137] D. H. Enlow and J. Bostwick, "Handbook of Facial Growth," *Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 59, pp. 116–117, 1977, doi: 10.1097/00006534-197701000-00025.
- [138] C. A. M. Sutherland, X. Liu, L. Zhang, Y. Chu, J. A. Oldmeadow, and A. W. Young, "Facial First Impressions Across Culture: Data-Driven Modeling of Chinese and British Perceivers' Unconstrained Facial Impressions," *Personal. Soc. Psychol. Bull.*, vol. 44, no. 4, pp. 521–537, 2018, doi: 10.1177/0146167217744194.
- [139] M. Walker, F. Jiang, T. Vetter, and S. Sczesny, "Universals and cultural differences in forming personality trait judgments from faces," *Soc. Psychol. Personal. Sci.*, vol. 2, no. 6, pp. 609–617, 2011, doi: 10.1177/1948550611402519.
- [140] T. S. H. Wingenbach, C. Ashwin, and M. Brosnan, "Sex differences in facial emotion recognition across varying expression intensity levels from videos," *PLoS One*, vol. 13, no. 1, p. e0190634, 2018, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0190634.

- [141] J. A. Hall, "Gender Effects in Decoding Nonverbal Cues," *Psychol. Bull.*, vol. 85, no. 4, pp. 845–857, 1978.
- [142] M. E. Kret and B. De Gelder, "A review on sex differences in processing emotional signals," *Neuropsychologia*, vol. 50, no. 7, pp. 1211–1221, 2012. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.12.022.
- [143] A. E. Thompson and D. Voyer, "Sex differences in the ability to recognise non-verbal displays of emotion: A meta-analysis," *Cogn. Emot.*, vol. 28, no. 7, pp. 1164–1195, 2014, doi: 10.1080/02699931.2013.875889.
- [144] M. Mochimaru, M. Kouchi, N. Miyata, and Y. Yoshida, "Dhaiba: Functional human models to represent variation of shape, motion and subjective assessment," *SAE Tech. Pap.*, 2006.
- [145] B. Guyuron, D. J. Rowe, A. B. Weinfeld, Y. Eshraghi, A. Fathi, and S. Iamphongsai, "Factors contributing to the facial aging of identical twins.," *Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 123, no. 4, pp. 1321–31, 2009, doi: 10.1097/PRS.0b013e31819c4d42.
- [146] G. N. Wade and J. M. Gray, "Gonadal effects on food intake and adiposity: A metabolic hypothesis," *Physiology and Behavior*, vol. 22, no. 3, pp. 583–593, 1979.
- [147] S. Harris and B. Dawson-Hughes, "Rates of change in bone mineral density of the spine, heel, femoral neck and radius in healthy postmenopausal women," *Bone Miner.*, vol. 17, no. 1, pp. 87–95, 1992.
- [148] J. W. Little, "Volumetric perceptions in midfacial aging with altered priorities for rejuvenation.," *Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 105, no. 1, pp. 252–266, 2000.

- [149] S. R. Coleman and R. Grover, "The anatomy of the aging face: Volume loss and changes in 3-dimensional topography," *Aesthetic Surg. J.*, vol. 26, no. 1 SUPPL., pp. S4–S9, 2006, doi: 10.1016/j.asj.2005.09.012.
- [150] A. K. Gosain, M. H. Klein, P. V. Sudhakar, and R. W. Prost, "A volumetric analysis of soft-tissue changes in the aging midface using high-resolution MRI: Implications for facial rejuvenation," *Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 115, no. 4, pp. 1143–1152, 2005, doi: 10.1097/01.PRS.0000156333.57852.2F.
- [151] J. Pessa, "An algorithm of facial aging: verification of Lambros's theory by three-dimensional stereolithography, with reference to the pathogenesis of midfacial aging, scleral show, and the lateral suborbital trough deformity," *Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 106, no. 2, pp. 479–488, 2000, doi: 10.1097/00006534-200008000-00040.
- [152] J. B. Pittenger, R. E. Shaw, and L. S. Mark, "Perceptual information for the age level of faces as a higher order invariant of growth.," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 5, no. 3, pp. 478–493, 1979.
- [153] T. Valentine and V. Bruce, "Recognizing familiar faces: the role of distinctiveness and familiarity.," *Can. J. Psychol.*, vol. 40, no. 3, pp. 300–305, 1986.
- [154] T. Valentine and V. Bruce, "The effects of distinctiveness in recognising and classifying faces.," *Perception*, vol. 15, no. 5, pp. 525–535, 1986, doi: 10.1068/p150525.
- [155] M. Alghoul and M. a Codner, "Retaining ligaments of the face: review of anatomy and clinical applications," *Aesthet. Surg. J.*, vol. 33, no. 6, pp. 769–82, 2013, doi: 10.1177/1090820X13495405.

付記

倫理審査

本論文の遂行にあたり人が参加した全ての実験はヘルシンキ宣言に基づきポーラ化成工業株式会社の倫理委員会で承認を得た。また、知覚実験の顔モデルおよび評定者からは書面による同意を得た上で実験に参加頂いた。

初出一覧

本論文の一部は、下記の通り既発表・既公刊内容に基づき、共著者及び著作権者の許諾を得て学位論文として再構成されたものである。

実験 3-1 は下記論文として刊行している。

Motonori Kurosumi, Koji Mizukoshi, Maya Hongo, Miyuki G. Kamachi. “Does age-dynamic movement accelerate facial age impression? Perception of age from facial movement: Studies of Japanese women.” *PLoS ONE* 16.8 (2021): e0255570. 2021 年 8 月 5 日発行

実験 3-2, 実験 4-2 および実験 4-3 は下記の国際学会発表内容に基づいて構成され、国際誌に投稿中である。

Motonori Kurosumi, Yoshihiro Hamanaka, Maya Hongo, Mari Kuribayashi, Jiro Yabuzaki, Kenya Hirayama, Miyuki G. Kamachi, Koji Mizukoshi. “How do we estimate the age of others?”

Where do we look more in the face of others? An unpredicted discovery on the moving face.”

30th IFSCC Congress. 2018年9月18日-21日 (Munich)

実験 3-3 および実験 3-4 は下記論文として刊行している。

黒住元紀, 瓜生田翔歩, 蒲池みゆき. “表情表出時の頬部運動の遅延が視覚知覚に及ぼす影響.” *電子情報通信学会論文誌D* 105.3 (2022). 2022年3月1日発行

実験 4-1 は下記論文として刊行している。

Koji Mizukoshi, Mari Kuribayashi, Kenya Hirayama, Jiro Yabuzaki, Motonori Kurosumi, Yoshihiro Hamanaka. “Examination of age-related changes of viscoelasticity in the dermis and subcutaneous fat layer using ultrasound elastography.” *Skin Research and Technology* 27.4 (2021): 618-626. 2021年1月7日発行

実験 4-4 は下記の国際学会発表内容に基づいて構成され, 国際誌に投稿中である。

Yoshihiro Hamanaka, Motonori Kurosumi, Koji Mizukoshi. “Structural changes of cheek adipose tissue associated with aging.” *7th joint meeting of SSSR & SCUR*. 2018年10月3日-5日 (Hokkaido)

実験 6-1 は下記論文として刊行している。

Motonori Kurosumi, Koji Mizukoshi, Maya Hongo, Miyuki G. Kamachi. “Effect of observation angles on facial age perceptions: A case study of Japanese women.” *PLoS ONE* 17.12 (2022): e0279339. 2022年12月27日発行

実験 6-2 は下記論文として刊行している。

Motonori Kurosumi, Koji Mizukoshi. “Principal component analysis of three-dimensional face shape: Identifying shape features that change with age.” *Skin Research and Technology* 24.2

(2018): 213-222. 2017 年 11 月 15 日発行

謝辞

本論文の一連の研究は、著者が工学院大学大学院工学研究科博士後期課程在学中に、同大学の蒲池みゆき教授の指導のもとに実施したものです。蒲池先生には、著者が所属するポーラ化成工業(株)と共同研究を開始した2014年よりご指導を賜り、顔研究の面白さや奥深さを教えて頂きました。研究者・教育者として、心から尊敬と感謝をいたします。

ポーラ化成工業(株)の水越興治氏、本郷麻耶氏、故平山賢哉氏、藪崎次郎氏、大島宏氏、濱中祥弘氏、栗林麻里氏、二川朝世氏、および当時工学院大学の学生であった瓜生田翔歩氏には本論文に関わる研究チームとして多大なるご支援を頂きました。心より感謝申し上げます。特に水越氏には、本論文に関わる研究プロジェクトを通して時に家族よりも多くの時間を過ごし、一研究者としての心構えからご指導頂くとともに、博士後期課程進学のご支援を頂きました。深く感謝いたします。

工学院大学の真鍋義文教授、大和淳司教授、田中久弥教授および千葉大学の溝上陽子教授には副査をお引受け頂き、研究内容から成果活用まで有益なご助言を賜り、最終的な論文に仕上げる事ができました。心より感謝申し上げます。

会社業務と並行しての研究生活を理解し支えてくれた家族には感謝してもしきれません。平日の終業後や休日など家事や育児を引き受けて常に暖かく励ましてくれた妻、博士課程在籍中に生まれ無垢な言動でいつも癒しと活力を与えてくれた息子、離れていますがいつも支えてくれる両親にあらためて感謝いたします。

最後に, 本論文は, 実験にご協力いただいた被験者の皆様, 学会で交流した研究者の皆様, 認知情報学研究室の皆様をはじめ, ここに記しきれない多くの方々のご支援を得て成立していることを記し, 深く感謝いたします.

黒住 元紀