

2022年度愛知県立大学大学院情報科学研究科

博士論文

顔温度を用いた個人認証に関する研究

A Study on Personal Identification Using Face Temperature

愛知県立大学大学院情報科学研究科

鵜飼大介

2023年3月



# 目次

1. 序論.....	1
1.1. 研究の背景および目的.....	1
1.2. 赤外線の特徴と温度画像の活用事例.....	5
1.3. 関連研究.....	10
1.4. 顔温度変化の内部要因および外部要因.....	11
1.5. 本論文の構成.....	15
2. 顔温度特徴および顔の高温領域を用いた個人認証手法.....	17
2.1. 顔温度特徴の解析.....	17
2.1.1. 顔温度画像の特徴.....	17
2.1.2. 顔温度分布の個人性.....	19
2.1.3. 顔温度と室温の相関.....	21
2.1.4. 異なる室温での顔温度画像の比較方法.....	24
2.1.5. 異なる室温での顔の低温および高温領域.....	26
2.2. 個人認証手法.....	28
2.3. 個人認証実験.....	34
2.4. 考察.....	35
2.4.1. 室温変化に対するロバスト性.....	35
2.4.2. 経年変化による影響.....	38
2.4.3. 化粧による影響.....	41
3. 顔温度変化の内部要因および外部要因に対する高温領域のロバスト性.....	45

3.1.	内部要因（精神的ストレス）による影響.....	45
3.2.	外部要因（風）による影響.....	49
4.	クラス内分散が小さい顔領域の検討および個人認証への応用.....	53
4.1.	各顔部品の温度特徴.....	53
4.1.1.	環境温度変化時における各顔領域の温度推移.....	53
4.1.2.	環境温度との相関が見られる顔領域.....	55
4.1.3.	環境温度の変化に依存しない顔領域.....	59
4.2.	環境温度の変化に依存しない特徴領域を用いた個人認証手法.....	62
4.3.	個人認証実験.....	65
4.4.	考察.....	65
5.	クラス間分散が大きい顔領域の検討および個人認証への応用.....	69
5.1.	主成分分析（PCA）による顔温度特徴の解析.....	69
5.1.1.	主成分分析（PCA）によるサーモ固有顔.....	69
5.1.2.	高温領域とサーモ固有顔の相関.....	72
5.2.	高温領域およびPCAによる特徴領域を用いた個人認証手法.....	74
5.3.	個人認証実験.....	78
5.4.	考察.....	79
6.	考察.....	81
7.	結論.....	83

## 図目次

図 1.1	異なる照明下での顔画像（可視画像）	7
図 1.2	異なる照明下での顔画像（温度画像）	8
図 1.3	異なる室温下での顔画像（温度画像）	9
図 2.1	顔温度画像（擬似カラー表示）の例	18
図 2.2	顔温度画像（擬似カラー表示）の例（4名）	20
図 2.3	異なる室温における顔平均温度の推移	22
図 2.4	被験者 B の顔温度画像	23
図 2.5	正規化した顔温度画像	25
図 2.6	各室温下での低温領域および高温領域	27
図 2.7	各被験者における各室温下での低温領域及び高温領域	28
図 2.8	個人認証フロー	29
図 2.9	顔領域抽出結果	33
図 2.10	処理領域	33
図 2.11	温度画像 $T$	34
図 2.12	高温領域画像 $T''$	34
図 2.13	各室温における顔輝度画像 $F^k$ の一例	36
図 2.14	平均値画像 $\bar{F}$ の一例	37
図 2.15	分散画像 $V$ の一例	37
図 2.16	顔温度画像（2011 年および 2021 年撮影）	39
図 2.17	処理領域画像（2011 年および 2021 年撮影）	40
図 2.18	高温領域画像（2011 年および 2021 年撮影）	40
図 2.19	表面 A（化粧無）および表面 B（化粧有）の温度推移	42
図 2.20	化粧直後，化粧後 30 秒，化粧後 180 秒の温度画像（擬似カラー表	

示)	43
図 3.1 ストレス負荷時の顔温度画像 (擬似カラー表示)	47
図 3.2 ストレス負荷時の高温領域	48
図 3.3 直風時の顔温度画像 (擬似カラー表示)	50
図 3.4 直風時の高温領域	51
図 4.1 温度変化を観測した顔領域	54
図 4.2 被験者 A の外気温と各顔領域の温度	55
図 4.3 外気温と各顔領域の温度の相関の一例	57
図 4.4 各顔領域の温度の分散	60
図 4.5 環境温度の変化に依存しない顔領域抽出領域の一例	63
図 4.6 環境温度の変化に依存しない顔領域抽出結果の一例	64
図 4.7 登録画像との相関の一例 (入力: 室温 25°C 時の被験者 A)	67
図 5.1 可視画像 / サーモ画像による固有顔の一例	71
図 5.2 温度画像と 1 <sup>st</sup> サーモ固有顔の相関係数	73
図 5.3 サーモ固有顔 $E_n$ の一例	76
図 5.4 登録画像の一例	78

## 表目次

表 1.1	個人認証の3要素の概要 .....	3
表 1.2	バイOMETRICS認証（生体認証）の概要 .....	4
表 1.3	熱発生および熱放散の概要 .....	12
表 2.1	サーモビジョンカメラの主な仕様 .....	29
表 4.1	外気温と各顔領域の温度の相関 .....	58
表 4.2	各顔領域の温度の分散 .....	61
表 5.1	温度画像と1 <sup>st</sup> サーモ固有顔の相関係数 .....	73
表 5.2	各手法の識別率 .....	80





# 1. 序論

本章では、まず、非接触型バイオメトリクス市場規模に言及して社会的需要の大きさを説明し、昨今の情報化社会における個人認証の重要性について述べる。次いで、従来の可視画像を用いた顔認証が照明環境に依存してしまうことや、なりすましの問題に対して脆弱であることについて指摘し、それらの課題に対する具体的解法の一つとして顔温度を用いた認証手法を提案し、その優位性と有用性について整理する。とくに、先行研究では明らかにされてこなかった室温変化や風の変化といった外部要因や、精神的ストレス負荷等の内部要因による顔温度変化に対する検証が重要であることを指摘し、これらが生じた状況における顔認証の有効性について確認することが本質的な課題であるとして問題提起する。

## 1.1. 研究の背景および目的

情報化が加速度的に進み社会が成熟する中において、ネットワーク化された情報システムや機器へのアクセスの容易性と同時にセキュリティの頑健性がことさら重要視されている[1]~[3]。とくに、「個人」を基調とする昨今の社会活動においては、有形物としての財産だけでなく、情報や暗号資産など無形物を守るためにも、本人であることの真正性や、他人との識別性といった技術的課題に対する期待は大きいものがある。

これらの技術課題の中心的解決法は個人認証技術であり、ID やパスワードに代わるものとして古くは指紋認証に始まり、最近では顔画像を用いた認証へと技術的進化を遂げてきた[4]。個人を識別する3要素の概要を表1.1にまとめる。一般的に個人認証には、本人のみが知り得る情報を用いた知識認証や、本人の

みが所有する物を用いた所有物認証，人間の行動的もしくは身体的特徴を用いた生体認証（バイオメトリクス認証）の3つに大別できる[5][6].

行動的特徴を用いた生体認証には，署名，音声，歩行などがあり，身体的特徴を用いたバイオメトリクス認証には，指紋，虹彩，顔などがある[7]. それぞれの特徴概要を表 1.2 にまとめる. とくに，初期のころの可視画像を用いた顔認証は，スマートフォン操作時や入退館システムなど，さまざまな分野で実用化されており，非接触で容易に認証できる利点がある. また，新型コロナウイルス感染症（COVID-19）感染拡大に伴い，世界の非接触型バイオメトリクスの市場規模は，2022年の197億米ドルから，2027年までに398億米ドルへと成長する見通しといわれており，さらなる市場規模の増大が見込まれている[8]. 一方で，可視画像を用いた顔認証は，照明環境に依存してしまうという問題があるほか，認証に用いられる特徴は，目，鼻，口といった顔部品の形状的・配置的特徴と輝度的特徴のみで構成されてきたため模倣困難性は必ずしも高くない，なりすましへの対応が難しいという問題もある.

これらの問題への対策として，新たなモダリティとして顔温度を用いた個人認証に関する研究が進められている[9]~[11]. 人間の顔は，中赤外線（3~5 $\mu\text{m}$ ）および遠赤外線（8~12 $\mu\text{m}$ ）の両方の波長帯域を放射する. したがって，中赤外線サーモビジョンカメラや遠赤外線サーモビジョンカメラを用いることで，人の顔温度を計測可能である. サーモビジョンカメラは可視光線の波長に影響を受けないので，可視画像を用いたこれまでの認証手法の弱点を回避することができる. このため，顔温度を用いた個人認証は，照明環境に依存しない手法として期待できる[9]~[11]. また，顔表面の熱源である血管や表情筋等を模倣することは格段に難しいとされているため，なりすましに強い[12][13]，サーモビジョンカメラは，可視光が赤外線に置き換わったと考えることができるため，

顔温度による個人認証では可視画像による個人認証で蓄積されてきた学術的知見や技術的解法をそのまま援用できる面もある。一方で、新たなモダリティとして捉えるならば、新たに発生する研究課題もあると認識すべきであり、本論文はこれらの視点に立ち、新たな課題の発見から論じるものである。具体的には、眼鏡装着の有無や[14]、顔のさまざまな顔の向きおよび表情等の形状的变化に対応した顔認証は報告されているものの[15]、室温変化や風の変化等の外部要因や、精神的ストレス負荷や発汗作用等の内部要因による顔温度変化が生じた状況における顔認証の有効性については明らかにされていない。本論文ではこれらを中心的な課題として論じ、新たなモダリティとしての顔温度の可能性と、これを個人認証に利用した場合の有効性について明らかにすることを目的とする。

表 1.1 個人認証の 3 要素の概要

個人認証 の 3 要素	特徴	代表的な認証
知識	導入費用が安く、利用しやすいが、認証情報の漏洩の危険性が高い	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ パスワード</li> <li>・ 秘密の質問</li> </ul>
所有物	パスワードなどを記憶する必要がないが、認証機器の盗難、紛失の危険性がある	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 磁気カード</li> <li>・ SMS</li> <li>・ マイナンバーカード</li> </ul>
生体	パスワードを記憶する必要がなく、紛失の危険性もないが、生体情報の漏洩時の影響度が大きい（漏洩した生体情報は生涯使うことができない）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 声紋</li> <li>・ 指紋</li> <li>・ 顔</li> </ul>

表 1.2 バイオメトリクス認証（生体認証）の概要

モダリティ	概要（認証手法例）	メリット／デメリット
指紋	指表面の紋様を画像化し，流れの方向や分岐点，端点の座標・型を登録データと照合する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 長年の研究により詳しく解析され，長期安定性が実証されている</li> <li>・ 指表面の荒れにより，利用できない人がいる</li> <li>・ 遺留指紋から指紋を奪われるリスクがある</li> </ul>
虹彩	虹彩（瞳の周りの膜状の器官）にある放射状の模様に対して，ウェーブレット解析して得られた係数を登録データと照合する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 虹彩は幼年期以降終生不変であり，高い認証精度が実証されている</li> <li>・ 視線の安定性や瞼による部分的隠蔽という課題がある</li> </ul>
顔	顔画像を基準座標が重なるように幾何学的に平行移動や回転の補正を行い，登録した顔との照合する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 非接触で被認証者の協力が不要である</li> <li>・ 照明環境に依存したり，プライバシーへの配慮が必要である</li> </ul>
署名	タブレットと専用ペンによる署名動作を行い，ペン先端の3次元位置と速度・ペンの角度・接触圧力を個人特徴として抽出し，登録された特徴と照合する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 他人の署名を装って詐称しようとしても，同一の特徴量を生成することが困難である</li> <li>・ 署名動作に慣れていないと認証に失敗しやすい</li> </ul>
音声	一定の文言を発話して，得られた音声波形を時間と周波数	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 発声器官の構造や動きの特徴を表しており，個人性が</li> </ul>

---

の二次元空間上の特徴（サウンドスペクトログラム）に変換し照合する	高い ・ 同一人物でも時間が経つと発声の速さや調子が変わったり、周囲の環境雑音の影響を受けやすい
----------------------------------	---

---

## 1.2. 赤外線特性と温度画像の活用事例

人の顔温度を計測するために、赤外線カメラやサーモビジョンカメラが用いられている。これらのカメラは、対象物から出ている赤外線放射エネルギーを検出し、見かけの温度に変換して、その温度分布を画像として表示する。赤外線は絶対零度（約 $-273^{\circ}\text{C}$ ）以上の全ての物質から自然に放射されており、温度が高いほどその量が増えるという性質がある。サーモビジョンカメラは、この性質を利用し、対象の温度変化を赤外線量の変化として可視化している。

図 1.1 に、照明が明るい場合と、暗い場合で撮影した顔画像の例をそれぞれ示す。周囲の明るさによって顔の見え方が異なることが確認できる。このように、顔画像を用いた個人認証にとって周囲の照明の変化の影響は大きな課題であり、改善するための手法も提案されているが、図 1.1(b)のように極端に照度が低い場合は、顔と識別すること自体が困難である[16]。

これに対して、サーモビジョンカメラを用いて撮影された温度画像は可視画像とは異なり、物体の温度を画像として表示しているため、照明変化の影響を受けにくい。また、温度データを扱っているため、なりすましの問題やプライバシーの問題を解決できる可能性がある[17][18]。

図 1.2 の温度画像の例は、図 1.1 の可視画像と同じ照明環境で撮影したものであるが、照明の変化の影響をほとんど受けていないことが確認できる。可視画

像に代えて、サーモビジョンカメラで撮影した顔画像を用いることにより、照明環境に依存せず個人認証できる可能性がある。

顔温度画像による個人認証は、照明環境に依存せず個人認証できる可能性を持つが、一方で、図 1.3 に示すように室温が変化した際に顔温度も影響を受けるのではという懸念が生じる。また、物事に集中している時や、精神的な負荷を受けると、鼻の温度が下がるという経験的事実や研究結果が報告されており、単純に可視画像を温度画像に置換して個人認証を行えば済む話でないことは容易に想像できよう。これらの影響を精査した上で顔認証特有の課題に取り組む必要があると考えられる[19]～[21]。

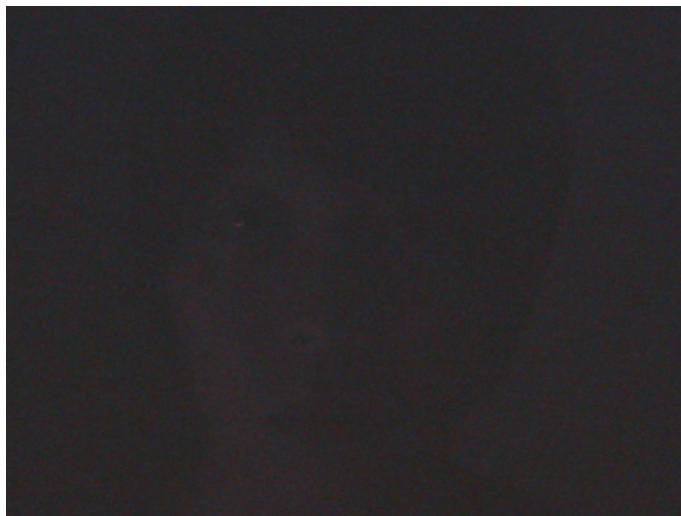
サーモビジョンカメラは、一昔前はカメラ自体が非常に高価であることや可視光カメラと比較して精度が高くなかったことから、実用化に向けた研究はあまり行われていなかった。しかし現在、安価なサーモビジョンカメラの登場や温度分解能の向上などから様々な分野で応用され始めている。

例えば、住宅診断や設備診断など、肉眼では判断が困難な建物の非破壊検査、農作物の生育状況の観測、野生動物の生態調査や監視、食品加工における調理肉製品の品質検査や冷凍食品の適切なパッケージ梱包、顔の温度をモニタリングすることによるインフルエンザや新型コロナウイルス（COVID-19）の感染者検知に用いられており、様々な施設の入退館時に、顔温度を計測することが一般的になっている。また、人の顔温度変化を利用した感性情報抽出や、歩行者検出に代表される ITS への利用などでも利用されている[22]。

このように、サーモビジョンカメラで撮影した温度画像は、通常の可視画像では取得困難な情報を利用することによって、様々な分野への応用が期待できる[23]。

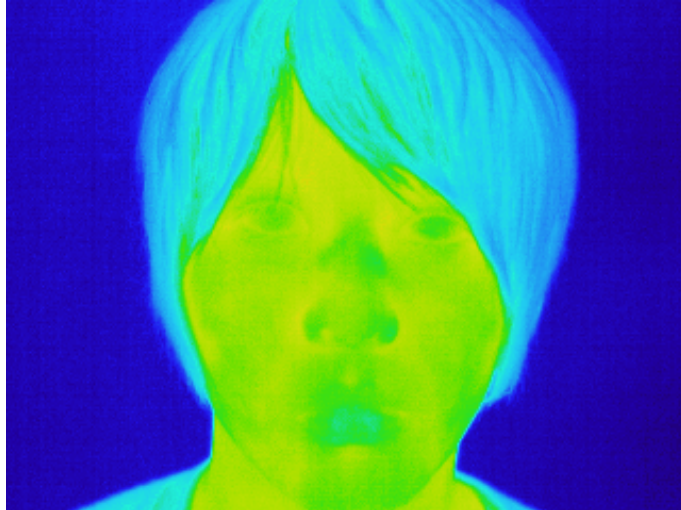


(a) 明るい場合

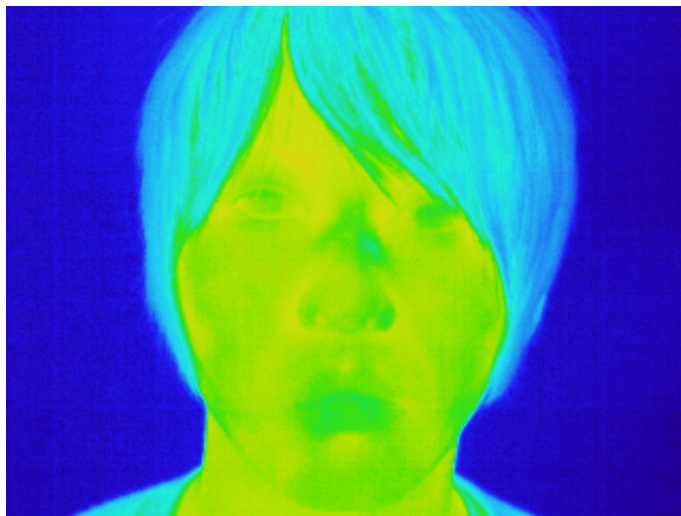


(b) 暗い場合

図 1.1 異なる照明下での顔画像（可視画像）



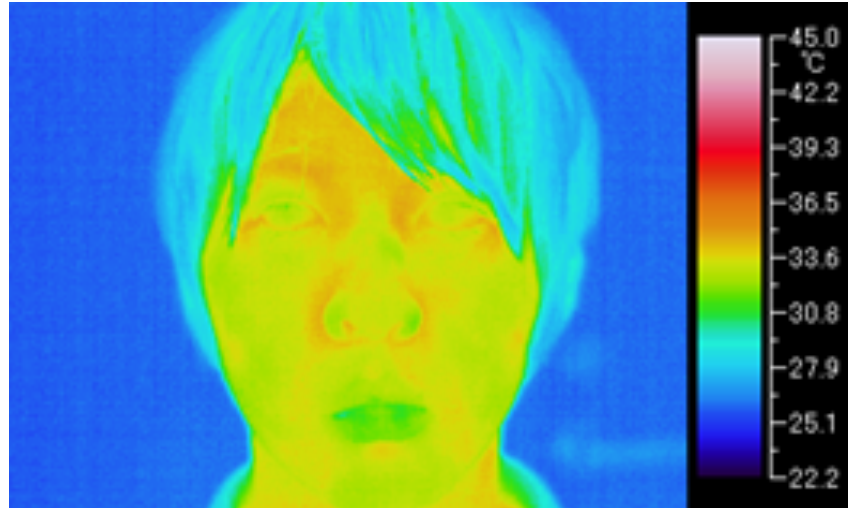
(a) 明るい場合



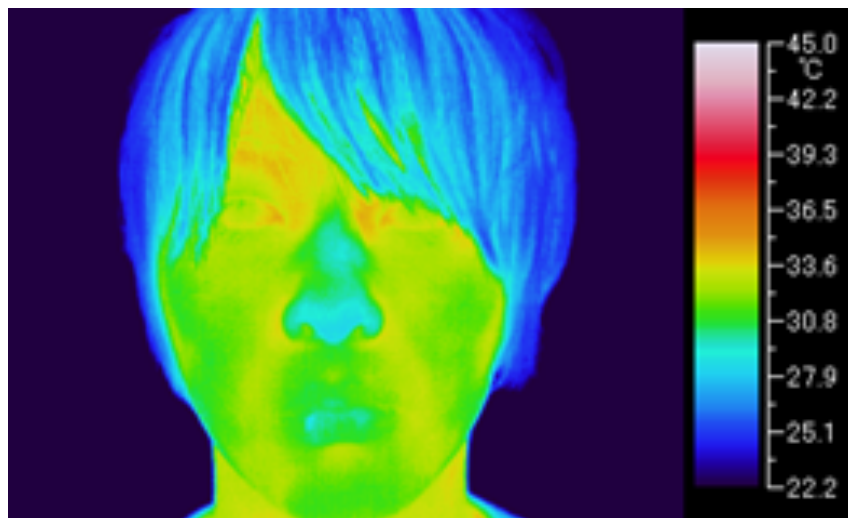
(b) 暗い場合

図 1.2 異なる照明下での顔画像（温度画像）





(a) 室温 28°C



(b) 室温 18°C

図 1.3 異なる室温下での顔画像 (温度画像)

### 1.3. 関連研究

顔認証に関するさまざまな課題への対策として、温度画像を用いた顔認証に関する研究が進められている[9]~[11]. 本節では、関連研究について概説する.

Nithyakalyani らは、サーモビジョンカメラで撮影された顔温度画像から、両目の目頭間の距離や目尻間の距離、鼻の幅を計測し、この計測値が各個人で固有であることを明らかにした[24]. これらの特徴を用いた個人認証手法を提案し、90.39%の認証精度を得ているとともに、この認証手法の実装の容易さを述べている. 一方、顔表面は常に外気に触れていることから環境温度に依存するが、Nithyakalyani らの研究では検証時の環境温度は一定温度であり、室温が変化した時の各顔部品の計測可否性は明らかにしていない[12]. また、精神的なストレス負荷により鼻温度は低下するが、ストレス負荷時における鼻の幅の計測可否性は明らかにしていない[7].

Chen らは、頬と顎それぞれにおける最低温度を示す位置を結んだ矩形領域を特徴領域とし、眼鏡着用での個人認証を実現した[14]. 眼鏡非着用時の認証率は 99.0%であり、眼鏡着用時の認証率は 93.75%である. 一方で、マスク着用時など、頬や顎が隠れる状況における矩形領域の抽出可否性については明らかにしていない. また、顔に風を当てることで顔温度は変化するが、最低温度を示す位置が変わらないことについては明らかにしていない[25][26].

Cutler は、主成分分析 (Principle Component Analysis, PCA) を用いて特徴を抽出し、生成された固有顔が、個人認証に用いることができることを明らかにしている [15]. そこでは、正面顔のみではなくさまざまな顔の向きや、さまざまに表情を変化させた場合にも識別可能であることを検証済みである. しかしながら、環境温度の影響やストレス負荷により、固有顔に影響がないことについては明らかにしていない.

上述したように、眼鏡装着の有無や、顔のさまざまな顔の向きおよび表情等の変化に対応した顔認証は報告されているものの、室温変化や風の変化等の外部要因や、ストレス負荷や発汗作用等の内部要因による顔温度変化が生じた状況における個人認証の有効性については明らかにされていない。

季節変動による顔温度は変化しないものの、室温変化により皮膚は温度変化することから[27]、顔温度の再現性を考慮する際は、室温変化に対するロバスト性を明らかにすべき点であると考えられる。また、風を顔に当てた場合、顔温度変化することがわかっており[26]、肌が露出している状況では風向きによる対流熱伝導率は変わらないものの、風速による影響は受けることから、風に対する影響も確認すべき課題一つである。さらに、精神的ストレスにより顔温度が変化することが報告されていることから[28]、ストレスの影響も解明すべき研究課題と位置づけられる。

#### 1.4. 顔温度変化の内部要因および外部要因

前節にて、室温変化や風に変化等の外部要因や、ストレス負荷や発汗作用等の内部要因に関して、それぞれ個人認証に与える影響について明らかにされていないことを述べた。本節では、顔温度変化する要因を整理する。

顔温度変化する要因としては、体内と顔皮膚との熱交換で顔温度変化する内部要因と、顔皮膚と体外との熱交換で顔温度変化する外部要因に分類できる。内部要因は、筋肉運動や食事誘導性熱産生等による熱産生や、ストレス等による血流変化から起こる温度変化が主たるものである。外部要因は、伝導や対流等による熱放散が主たるものである。熱産生および熱放散の概要を表 1.3 に示す[29]~[31]。

顔温度が環境温度に依存しているのは、顔皮膚が触れている空気との熱交換、

いわゆる伝導により顔皮膚から熱放散するからである。熱放散には、伝導以外に放射や対流、水分蒸発があげられる。例えば、放射として、顔皮膚表面から赤外線となって常に熱が放射されており、放射される熱の量は、皮膚と皮膚周囲の温度差によって規定される。水分蒸発として、成人では1日あたり皮膚表面から500~700mLの水分が蒸発している。対流として、皮膚に接触している空気が温められて上昇し、周囲の冷たい空気と入れ替わることで、連続的に熱が放射される。安静時においては、皮膚の周囲には、対流の過程で体温とほとんど同じ温度の薄い空気の層（限界層）が形成され、この層が熱の放射を防いでいる。限界層が破壊され、周囲の冷たい空気が皮膚と接触することで、熱放射が増大する。

表 1.3 熱産生および熱放散の概要

熱産生／ 熱放散	種類	概要
熱産生	基礎代謝	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生命維持活動に必要なエネルギーを産生する代謝のこと</li> <li>・ 産生された熱量の60~70%が体温保持に利用され、残りは呼吸・循環活動、内分泌活動などに利用される</li> <li>・ 産生される熱量は1日あたり、成人男性で1,500kcal、成人女性で1,200kcal程度</li> <li>・ 熱は全身の細胞で産生されるが、全身で均一に産生されるわけではなく、脳、肝臓、骨格筋で産生が多い</li> <li>・ 経時的な温度変化はない（体温が1℃上昇するごとに代謝量は13%上昇する）</li> </ul>

熱産生	筋肉運動	<ul style="list-style-type: none"> <li>骨格筋における熱産生は、安静時でも全熱産生量の 20%を占めるが、筋肉運動を行うと著しく増加する</li> <li>気温が低下すると骨格筋の不随意的な（意志に基づかない）収縮が起こり熱産生が促進されるが、顔面には現れない</li> </ul>
熱産生	食事誘導性熱産生	<ul style="list-style-type: none"> <li>食事をした後に、安静にしてもエネルギー消費量が増加する現象</li> <li>一般成人の消費エネルギー量の 10%を占めている</li> </ul>
熱産生	内分泌作用	<ul style="list-style-type: none"> <li>甲状腺ホルモンであるサイロキシン，トリヨードサイロニンが全身の細胞の代謝を増大させる</li> <li>アドレナリンは肝でのグリコーゲン分解や糖新生を促し，熱産生を促進させる</li> <li>熱産生は少ない</li> </ul>
熱産生	褐色脂肪組織	<ul style="list-style-type: none"> <li>褐色脂肪組織はミトコンドリアに富み，脂肪を熱に変える働きを持つ</li> <li>新生児期には体温維持に重要な働きを持つが，成人には顔以外の首や背中など限られた部位にわずかしかなく，体温維持にはほとんど寄与しない</li> </ul>
熱放散	放射（輻射）	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱は皮膚表面から赤外線となって常に放散されている</li> <li>放射される熱の量は，皮膚と皮膚周囲の温度差によって規定される</li> <li>衣服を着ていると，まず衣服が体温で暖まり皮膚との温度差が少なくなるため，放射する</li> </ul>

		熱量も少なくなる
熱放散	伝導	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 皮膚と接触している物体が体温で暖まり、熱が放出される（物体の温度が体温より高ければ、体内に熱が流入する）</li> <li>・ 皮膚が接触するのは空気や衣服であることが多く、これらは熱伝導度が小さいため、伝導によって放出される熱量は少ない</li> </ul>
熱放散	対流	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 空気は暖められると上昇するため、皮膚に接触している空気が上昇して周囲の冷たい空気と入れ替わり、連続的に熱が放散される</li> <li>・ 衣服中の空気はほとんど動かないため、衣服を着ている部分では対流による熱放散は非常に少ない</li> <li>・ 皮膚の周囲に、対流の過程で体温とほとんど同じ温度の薄い空気の層（限界層）が形成され、熱の放散を防いでいる</li> <li>・ 限界層の外層にて、伝導によって温められた空気が膨張して軽くなり、対流が起こる</li> </ul>
熱放散	水分蒸発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 環境温が体温より高い時には、水分蒸発が唯一の熱放散手段となる</li> <li>・ 水分蒸発は、不感蒸泄と発汗に分けられる</li> <li>・ 不感蒸泄：成人では 1 日あたり、皮膚表面から 500~700mL，呼気から 150~450mL の水分が常に蒸発している（不感蒸泄に伴う放熱は全放熱量の約 25%）</li> <li>・ 発汗：体内の熱が、他の方法（放射，伝導，対流，不感蒸泄）で放散しきれなくなると発汗が起こる</li> </ul>

## 1.5. 本論文の構成

これまでみてきたように、赤外線特性、あるいは、サーモビジョン画像の特性・特徴を積極的に利用すると個人認証に利用できる可能性はあるものの、可視画像による個人認証で蓄積されてきた学術的知見や技術的解法をそのまま援用できるかどうかは改めて確認する必要がある。とくに、新たなモダリティとして個人認証への利用可能性について論じるためには、これまで可視画像を用いた個人認証が輝度値の空間的分布から顔特徴を抽出し利用してきたように、本研究においても顔の空間的な温度分布特徴を分析し、特徴を明確化することによって個人認証への利用可能性を明らかにするアプローチをとる。

本論文では以下に示すように論点を、(1)顔温度特徴とそれらを利用した顔認証手法、(2)顔温度変化の要因と高温領域のロバスト性、(3)個人認証手法に利用する方法論、の三つに整理し、各々、第2章、第3章、第4章および第5章で詳細に論じる。

第2章では、顔温度特徴の解析を行い、個人性特徴が目、鼻、口、頬といった顔の部品レベルでどの程度含まれているのかを実験的に確認する。個人性特徴抽出のため、外気温を変化させた状況を作り、個人内データでの安定性について検証する。この個人内での安定性は個人認証における本人拒否率の低減に直結する。また、温度的な特徴がすべての人に共通するのであれば個人認証には利用できないので、複数の被験者データから個人間で違いが生じる顔領域、顔部品の有無を検証する。これは個人認証における他人受入率の低減につながる。そして、これらの知見をもとに、顔温度を用いた新たな個人認証手法について提案する。

第3章では、提案手法の有効性を確認するために、顔温度変化に対する要因を内部要因と外部要因に分けて整理する。内部要因の中で、本人の意思に関係

なく発生する精神的ストレス負荷と、外部要因の中で、一時的な温度変化が大きい直風をそれぞれ代表的な要因とし、これらを変化させた実験を通して、顔温度画像のみを用いた認証手法のロバスト性を実験的に検証する。

第4章および第5章では、上記二つの観点から得られた知見を基に、顔温度を用いた個人認証を実現するための方法論について論じる。さまざまな認証状況に適応可能とするためには、個人認証に用いる特徴としては、個人内のクラス内分散が小さく、個人間のクラス間分散が大きいことが望ましいと考え、クラス内分散の小さい領域およびクラス間分散の大きい領域の抽出について検討する。第4章ではクラス内分散が小さい領域について、第5章ではクラス間分散の大きい領域について、各々の特性に合った利用方法について論じる。

そして第6章で一連の研究で得られた知見について考察し、最後に本論文で得られた結論を第7章で総括する。



## 2. 顔温度特徴および顔の高温領域を用いた個人認証手法

本章では、顔温度特徴および顔の高温領域を用いた個人認証手法について述べる。顔温度特徴の解析を行うため、顔の空間的な温度分布と時間的な温度変化に着目し、個人性特徴が顔温度にどの程度含んでいるのかを実験的に確認する。外気温を変化させた状況下で、個人内データの安定性を確認することで、個人認証における本人拒否率低減に直結した特徴領域を抽出する。また、温度的な特徴が万人の共通項である場合、個人認証には利用できないため、複数の被験者データを基に個人間で差異のある顔領域の有無を確認し、個人認証における他人受入率低減に直結した特徴領域を抽出する。そして、これらの知見を基に、顔温度を用いた新たな個人認証手法を提案する。また、個人認証実験による提案手法の評価を行うとともに、室温変化に対するロバスト性、経年変化および化粧による影響について、実験データを基に考察する。

### 2.1. 顔温度特徴の解析

#### 2.1.1. 顔温度画像の特徴

顔温度画像の例を図 2.1 に示す。図 2.1 は、顔温度分布の違いが視覚的にわかりやすいように擬似カラー表示しており、配色は画像右部のカラーバーに示している。顔温度の特徴として、顔温度は背景より比較的溫度が高いこと、毛髪の温度は背景より高く、顔より低いこと、目や鼻周辺の温度が高く、鼻や頬の温度が低いことなどがあげられる。これらのことから、背景より顔温度が高いことを利用すると背景と顔の分離が可能になると考えられる。また、目や鼻周辺の温度が高く、鼻や頬の温度が低いことは、可視画像における濃淡（輝度）

特徴のように個人の特徴として利用できると考えられる．このように，顔温度画像では可視画像とは異なった特徴が見られる[23].

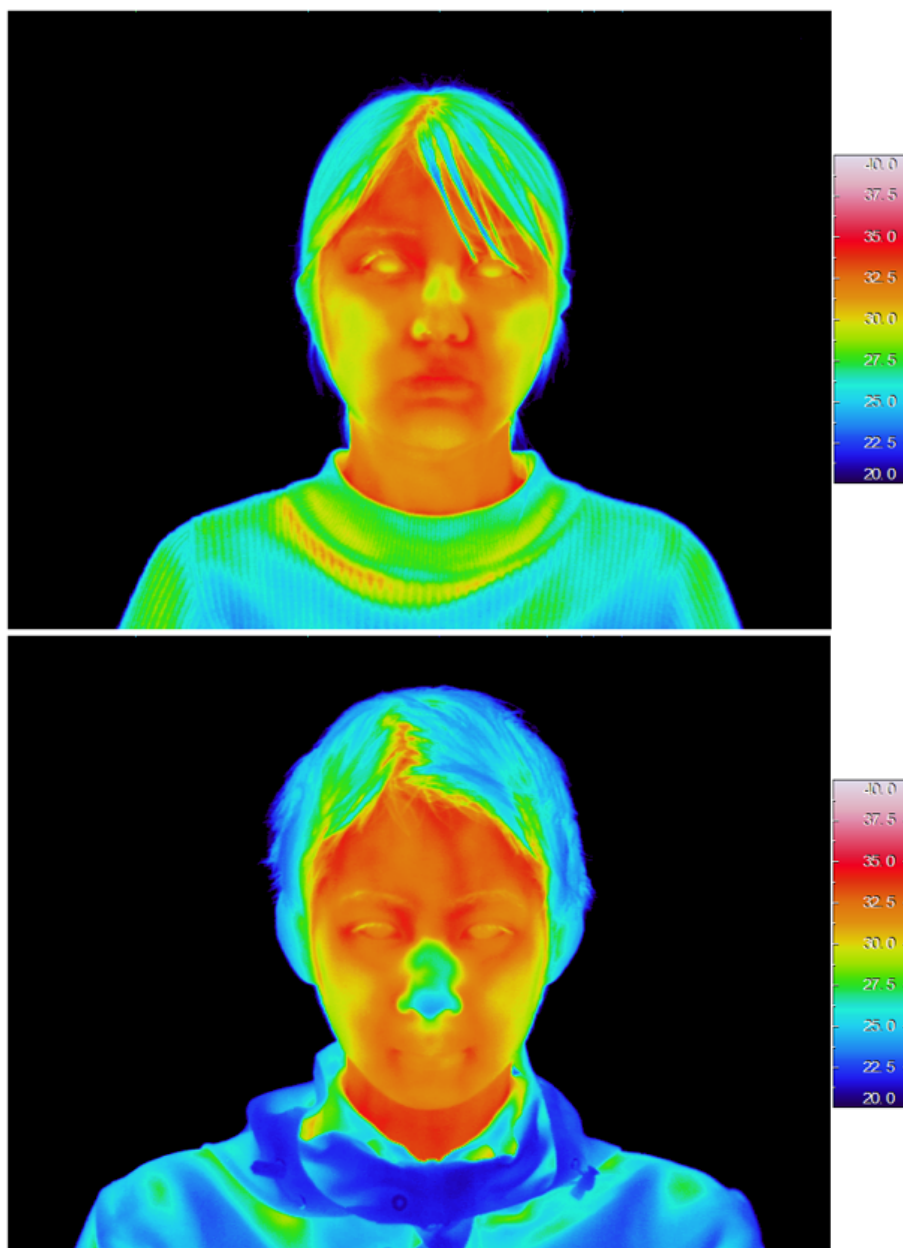
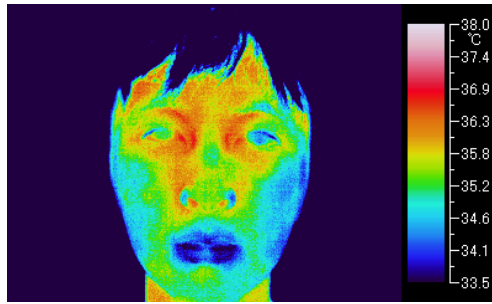


図 2.1 顔温度画像（擬似カラー表示）の例

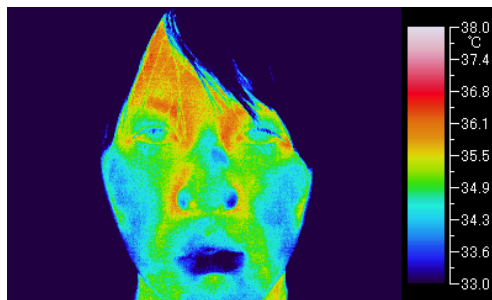
## 2.1.2. 顔温度分布の個人性

図 2.2 に室温 28°C時の 4 人の顔温度画像を示す。それぞれ目や鼻周辺の温度が高く、鼻や口の温度が低いという特徴が見られることに加え、個々人で顔温度分布が異なっていることがわかる。

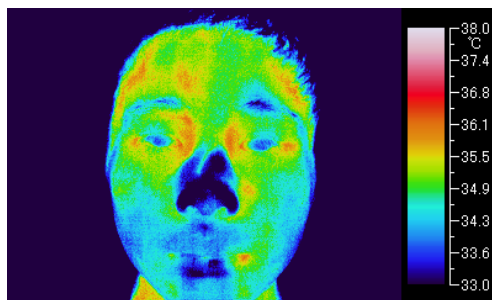
可視画像を見て個人を特定することは容易である。同じように、温度画像を見ても個人を特定できる。一般的に、目や鼻周辺の顔温度が安定して高温であり、鼻や口の温度は低温であるが、個々の顔温度を見比べた場合、顔温度分布に個人差があることがわかる。このことから、顔温度画像を用いて個人認証を実現できる可能性がある。顔温度画像は照明変化に依存しないが、常に外気に触れている顔は、室温変化の影響を受ける懸念がある。つまり、室温が異なる状況下においても同様の温度分布が得られなければ個人認証には利用できない。そのため、室温変化が生じた際の個人の顔温度分布の影響を検証する必要がある。



(a) 被験者 A



(b) 被験者 B



(c) 被験者 C



(d) 被験者 D

図 2.2 顔温度画像（擬似カラー表示）の例（4名）

### 2.1.3. 顔温度と室温の相関

人間は恒温動物であるため、体温を一定に保とうとする生理的機能を持っている。ただし、外気に触れている顔の温度は環境温度（室温）の影響を受けやすいと考えられる。そこで、顔温度と室温の相関を確認するための予備実験を行なった。室温を 18°C, 20°C, 23°C, 25°C, 28°C としたときの顔平均温度をそれぞれ求めた。結果を図 2.3 に示す。どの被験者も室温が上昇するとともに、顔温度も上昇していることがわかる。しかし、被験者 B の顔温度は室温 23°C 時に一時的に下降している。被験者 B の 28°C 時と 23°C 時の顔温度画像を図 2.4 に示す。比較すると、23°C 時の鼻部温度が極端に下がっていることが確認できる。これは、鼻部には AVA と呼ばれる血管が密集して流れており、何らかの精神的影響を受けて血管が収縮し、温度低下を生じたと考えられる[23]。

人間の体内温度は環境温度の変化に対して安定している[29]～[31]。また、室温変化 10°C に対し、顔平均温度は約 2.5°C 以下の変化にとどまっていることから、顔温度は環境温度よりも体内温度の影響を強く受けていることがわかる。これにより、顔温度は室温変化に対して比較的安定していることがわかる[23][32][33]。

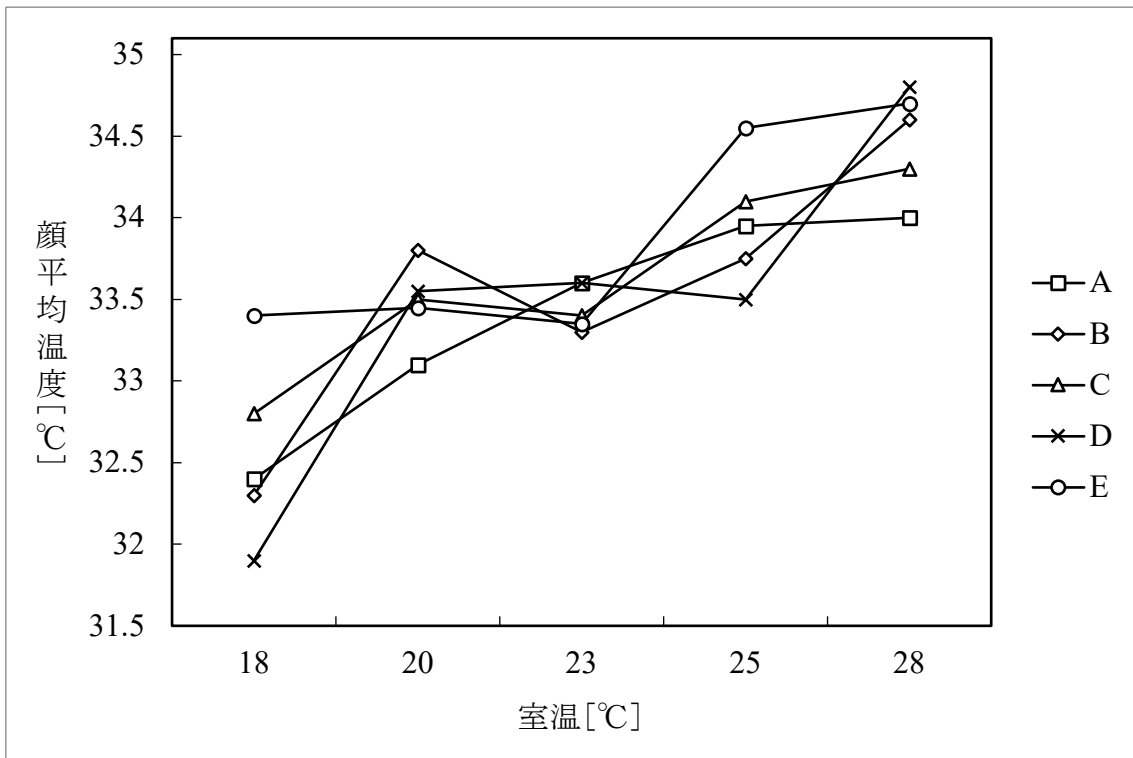
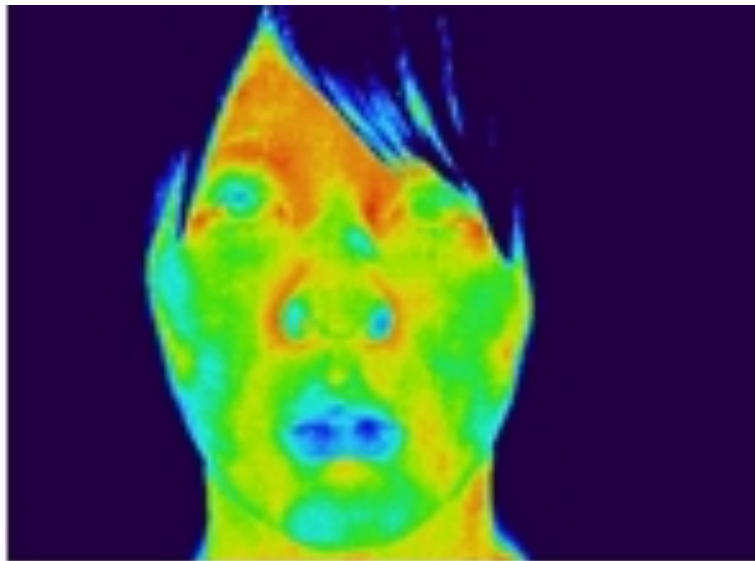


図 2.3 異なる室温における顔平均温度の推移



(a) 室温 23°C



(b) 室温 28°C

図 2.4 被験者 B の顔温度画像

## 2.1.4. 異なる室温での顔温度画像の比較方法

前項で述べたように、顔温度が室温に対して比較的安定しているという結果は得られたが、室温が異なる状況下で顔温度画像を比較するため、温度レンジを一定範囲に正規化することにより、各顔温度画像を比較する。室温 18°C および 28°C 時の顔温度画像に対して、毛髪および呼吸の影響を考慮し、眉毛下から鼻下までの範囲を抽出した顔温度画像  $T$  を生成する。次いで、温度範囲を  $a \leq t \leq b$  から  $a' \leq t' \leq b'$  へと変換し、正規化温度画像  $T'$  を生成した。温度範囲の変換には、線形濃度変換式

$$T'(u, v) = \frac{b' - a'}{b - a} \times (T(u, v) - a) + a' \quad (2.1)$$

を用いた。ここで、 $a$  および  $b$  はそれぞれ 28°C から 38°C の範囲内の最低温度、最高温度とし、 $a'$  を 0、 $b'$  を 255 とする。

正規化した顔温度画像  $T'$  の図 2.5 より、目頭周辺や鼻周辺の高温領域は温度変化が少なく、鼻の低温領域は変化が大きく見られる。





(a) 室温 18°C



(b) 室温 28°C

図 2.5 正規化した顔温度画像

### 2.1.5. 異なる室温での顔の低温および高温領域

図 2.5 の顔温度画像に対し，低温領域および高温領域の抽出結果ならびに，各領域を重畳表示した結果をそれぞれ図 2.6 に示す．低温領域および高温領域を抽出するため，まず，顔温度画像の温度ヒストグラムを作成した．次いで，温度の低い方から温度データ数を加算していき，合計温度データ数の 5%を満たす温度閾値に対して，閾値以下の温度データを抽出した画像を低温領域とした．また，温度の高い方から温度データを加算していき，合計温度データ数の 5%を満たす温度閾値に対して，閾値以上の温度データを抽出した画像を高温領域とした．なお，温度閾値を 5%とすることで，低温領域および高温領域の差が視覚的に確認しやすいことを，予備実験により確認済みである．重畳画像は，各顔温度画像に対して低温領域を青く，高温領域を赤く着色し，モフォロジー演算により細かいノイズを除去している．

異なる室温下において，顔の低温領域は異なる分布を形成していることが視覚的に確認でき，この傾向は他被験者でも見られた．顔の低温領域は，室温変化の影響を受けやすいと考えられる．また，顔の高温領域は，室温を変化させた場合でも比較的類似した分布を形成していることが視覚的に確認でき，この傾向は他被験者でも見られた．被験者 3 名の高温領域を抽出した結果を図 2.7 に示す．高温領域は，異なる室温下でも比較的類似した分布を形成しており，個人間で差があることが確認できる[34]．

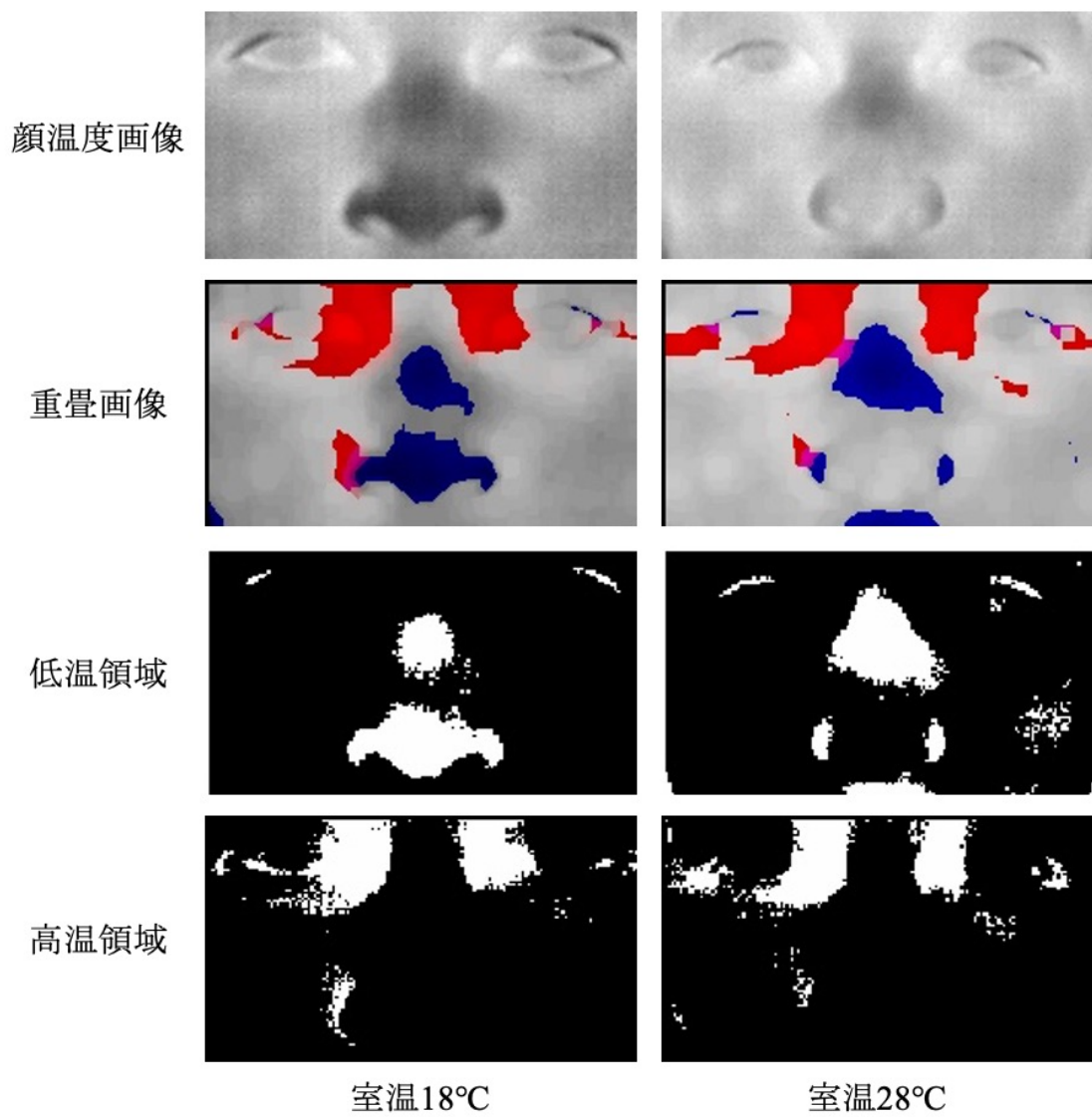


図 2.6 各室温下での低温領域および高温領域

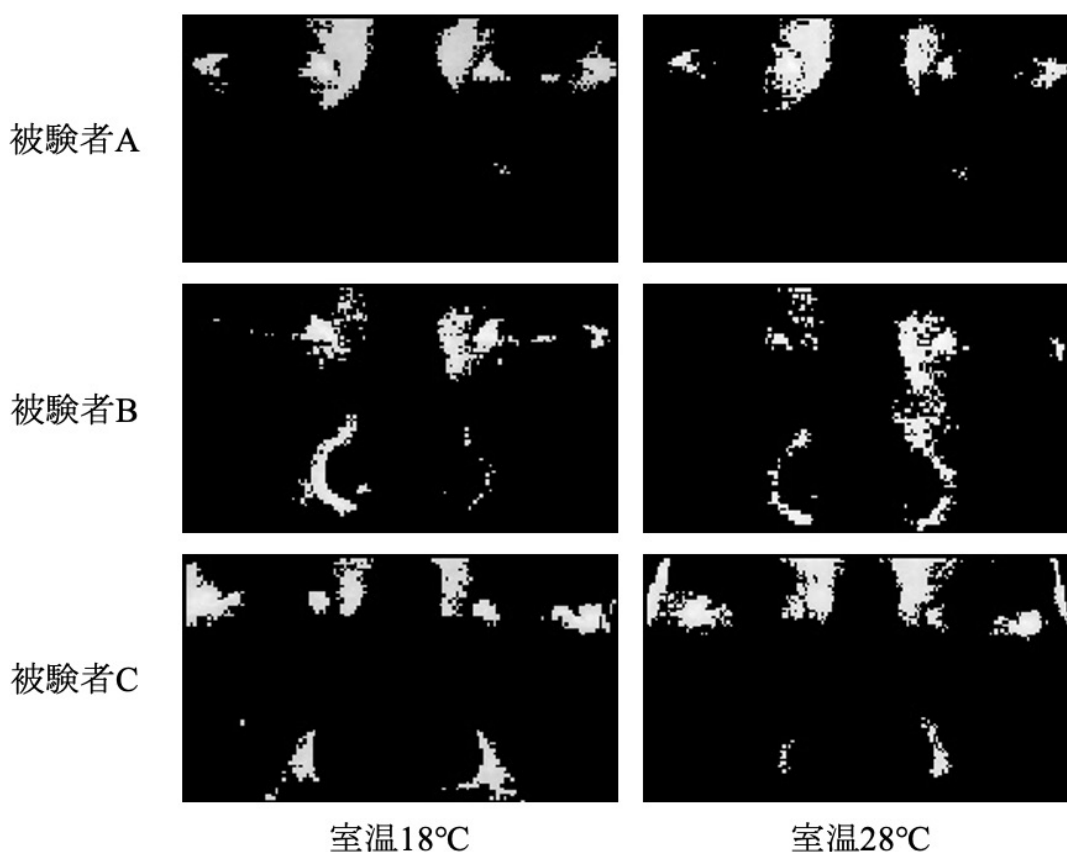


図 2.7 各被験者における各室温下での低温領域及び高温領域

## 2.2. 個人認証手法

前節で述べた，異なる室温下でも比較的類似した分布を形成しており，個人間で差がある高温領域について，当該領域を用いた個人認証手法の認証フローを図 2.8 に示す．本手法は，(1)特徴領域抽出サブシステム，(2)登録サブシステム，(3)識別サブシステムに分かれている．

はじめに，(1)特徴領域抽出サブシステムにて，サーモビジョンカメラより顔温度画像データを取得する．サーモビジョンカメラの主な仕様を表 2.1 に示す．次いで，処理範囲を決定し，高温領域を基にした特徴領域を抽出する．(2)登録サブシステムでは，特徴領域サブシステムにて抽出した特徴領域から，データベースに登録するための画像を生成し，登録する．(3)識別サブシステムでは，

特徴領域抽出サブシステムにて求めた特徴領域を，登録画像と比較し，最も類似している登録画像を出力する．



図 2.8 個人認証フロー

表 2.1 サーモビジョンカメラの主な仕様

製品：日本アビオニクス社製 InfRec R500EX-Pro	
測定波長	8 ～ 14 $\mu\text{m}$
測定温度範囲	-40 ～ 2000 $^{\circ}\text{C}$
温度分解能	0.025 $^{\circ}\text{C}$ at 30 $^{\circ}\text{C}$ (S/N 改善時)
検出器画素数	640(H) × 480(V) 画素
空間分解能	0.87 mrad
測定距離範囲	10 cm ～ $\infty$

各サブシステムの処理フローは以下のとおりである。

#### (1) 特徴領域抽出サブシステム

##### Step1 顔温度画像データの入力

サーモビジョンカメラにて撮影した顔温度画像データを、画素ごとに温度を示した温度情報ファイルに変換する。

##### Step2 顔領域の設定

人の顔温度が背景より比較的高いことを利用して、背景との分離を行う。図 2.9 に顔領域抽出結果の例を示す。

##### Step3 処理範囲の設定

毛髪の影響および呼吸の影響を除去するため、処理領域を設定する。左右の目頭および鼻下部を手動で求め、左右の目頭の幅を  $w$  とし、左右の目頭の中心  $x_1$  を中心として横幅  $x_1 - \alpha w \leq x \leq x_1 + \alpha w$ 、目頭の  $y$  座標  $y_1$  および鼻下部の  $y$  座標  $y_2$  を基に、縦幅  $y_1 - \beta w \leq y \leq y_2 + \gamma w$  の矩形領域を処理範囲とし、この温度画像を  $T$  とする。図 2.10 に処理範囲の例を示し、図 2.11 に温度画像  $T$  の例を示す。ここで、 $\alpha$  を 3.2、 $\beta$  を 1.8、 $\gamma$  を 0.4 とする。

##### Step4 温度範囲の正規化

異なる室温下での顔温度画像を比較するために、温度画像  $T$  に対して、線形濃度変換式(2.1)を用いて温度範囲を  $a \leq t \leq b$  から  $a' \leq t' \leq b'$  へと変換し、正規化温度画像  $T'$  を生成する。ここで、 $a$  および  $b$  はそれぞれ  $28^\circ\text{C}$  から  $38^\circ\text{C}$  の範囲内の最低温度、最高温度とし、 $a'$  を 0、 $b'$  を 255 とする。

##### Step5 平滑化

正規化温度画像  $T'$  に対してメディアンフィルタを施し、細かいノイズ

を除去する.

#### Step6 温度閾値の設定

平滑化された正規化温度画像  $T'$  の温度ヒストグラムを作成する. 画像全体の画素数  $S$  とし, 温度の高い方から画素数を加算した時の画素数を  $S_0$  としたとき,

$$\frac{S_0}{S} = \omega \quad (2.2)$$

を満たす温度を閾値  $t_0$  とする. ここで  $\omega$  を 0.05 とする.

#### Step7 特徴領域の抽出

室温変化に対して安定している高温領域のみを認証に用いるため,

$$T''(u, v) = \begin{cases} T'(u, v) & (T'(u, v) \geq t_0) \\ a' & (T'(u, v) < t_0) \end{cases} \quad (2.3)$$

の非線形変換を平滑化された正規化温度画像  $T'$  に対して施し, 閾値  $t_0$  以下の温度データを一定値  $a'$  とした顔の高温領域画像  $T''$  を生成する. 図 2.11 に高温領域画像  $T''$  の例を示す.

#### Step8 画像サイズの正規化

顔の高温領域画像  $T''$  を, 画像サイズ  $U \times V$  の顔輝度画像  $F$  へ変換する. ここで,  $U$  を 210,  $V$  を 120 とする.

### (2) 登録サブシステム

登録対象者  $i$  の,  $N$  枚の異なる室温の顔輝度画像  $F_l$  ( $l=1, 2, \dots, N$ ) から, 対応する画素ごとに  $N$  個の値の中央値を求めて作成した中央値画像  $M_i$  ( $i=1, 2, \dots, P$ ) を作成し, データベースに登録する. ここで,  $P$  は登録者の人数である.

### (3) 識別サブシステム

識別対象者  $X$  の顔輝度画像  $F_x$  を入力として、各登録者の中央値画像  $M_i$  との類似度をそれぞれ計算し、最も類似度の高い値を持った登録者を出力とする。入力と出力の人物が一致した場合に識別成功とし、類似度の計算には、

$$R_i = \frac{\sum_{v=0}^{V-1} \sum_{u=0}^{U-1} F_x(u, v) M_i(u, v)}{\sqrt{\sum_{v=0}^{V-1} \sum_{u=0}^{U-1} F_x(u, v)^2 \times \sum_{v=0}^{V-1} \sum_{u=0}^{U-1} M_i(u, v)^2}} \quad (2.4)$$

で表される正規化相互相関の値  $R_i$  を用いる。





图 2.9 顔領域抽出結果

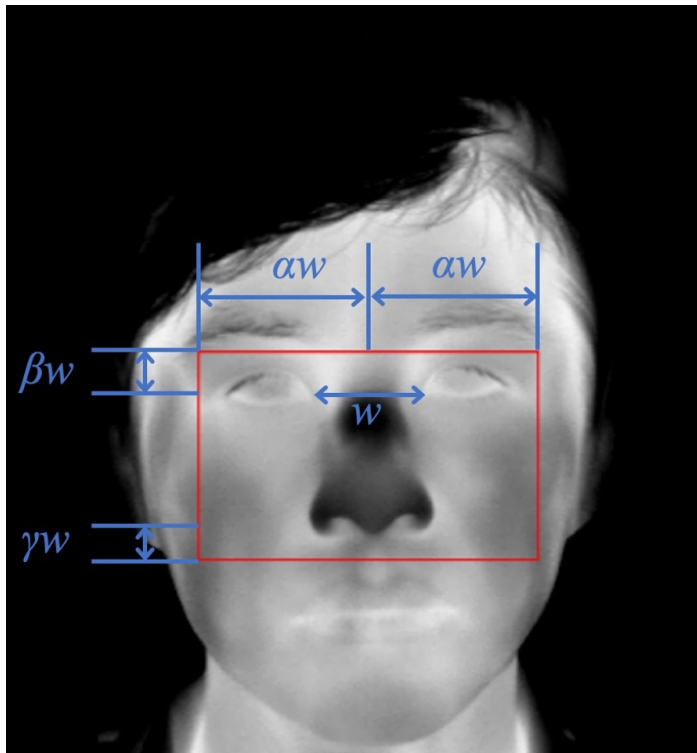


图 2.10 処理領域



図 2.11 温度画像  $T$



図 2.12 高温領域画像  $T''$

### 2.3. 個人認証実験

本節では，顔の高温領域を用いた個人認証手法について，個人認証実験の結果について述べる．提案手法について，室温変化に対するロバスト性を確認するため，*leave-one-out* 方式を用いて個人認証実験を行なった．成人被験者 9 名（男 8 名，女 1 名）を被験者とし，各被験者に対して，6 つの室温時の  $F_i$  から 5 つを選択し，中央値画像  $M_i$  を作成，登録した．また，中央値画像生成に用いなかった  $F_i$  を入力とした．評価値は，

$$\text{識別率} = \frac{\text{識別成功数}}{\text{全ての入力画像数}} \quad (2.5)$$

で表される識別率とした。被験者 9 名，計 54 枚の入力に対して識別を行い，87.0%の識別率を得た。

## 2.4. 考察

本節では，顔の高温領域を用いた個人認証手法に対して，室温変化に対するロバスト性および経年変化に対する影響ならびに化粧による影響について，実験データを基に考察する。

### 2.4.1. 室温変化に対するロバスト性

本節では，室温変化に対するロバスト性について述べる。顔温度分布は，少なからず室温変化の影響を受ける。高温領域を個人認証に用いるためには，室温が変化する状況においても高温領域の分布の分散が少ない必要がある。そのため，室温が異なる状況における高温領域の分散を確認し，室温変化に対する高温領域のロバスト性を確認する。

まず，被験者に対して，6つの室温における顔輝度画像  $F^k$  ( $k=1, 2, \dots, 6$ ) を用いて，各画素の平均値をとった平均画像  $\bar{F}$  を作成する。一例を図 2.13 および図 2.14 に示す。次いで，6つの室温における顔輝度画像  $F^k$  の各画素について，

$$V(u, v) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (F^k(u, v) - \bar{F}(u, v))^2 \quad (2.6)$$

を用いて分散を計算・可視化した分散画像  $V$  を作成する。

ここで得られる分散画像  $V$  は，輝度が高いほど分散が大きく，輝度が低いほど分散が小さいことを表している。そのため， $V$  の輝度が小さく出ているほど，室温変化に対してロバスト性が高いといえる。分散画像の一例を図 2.15 に示す。

すべての被験者に対して，高温領域（目頭周辺や鼻の周辺など）の輝度が小さいことが確認できた．これにより，高温領域は室温変化に対してロバスト性が高いことがわかる．

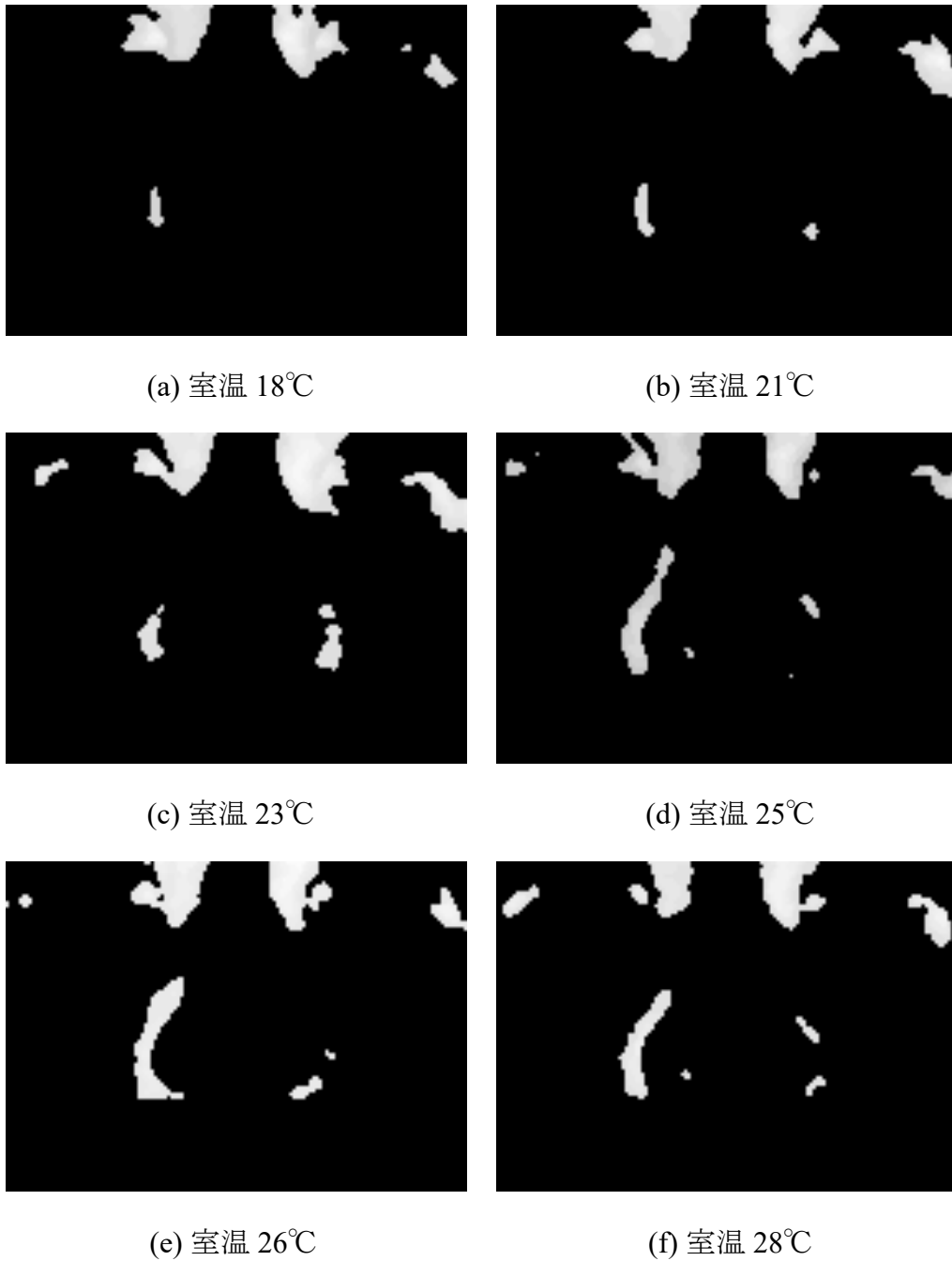


図 2.13 各室温における顔輝度画像  $F^k$  の一例

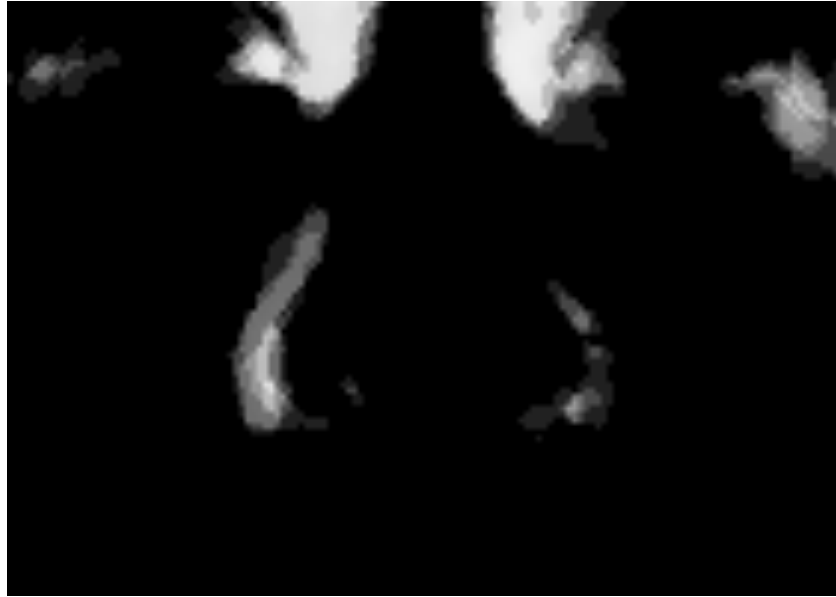


図 2.14 平均値画像  $\bar{F}$  の一例

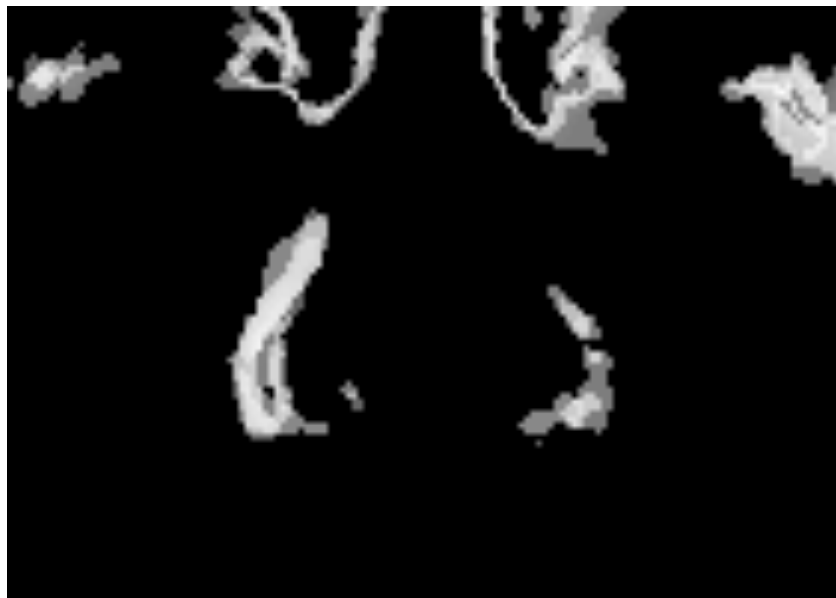
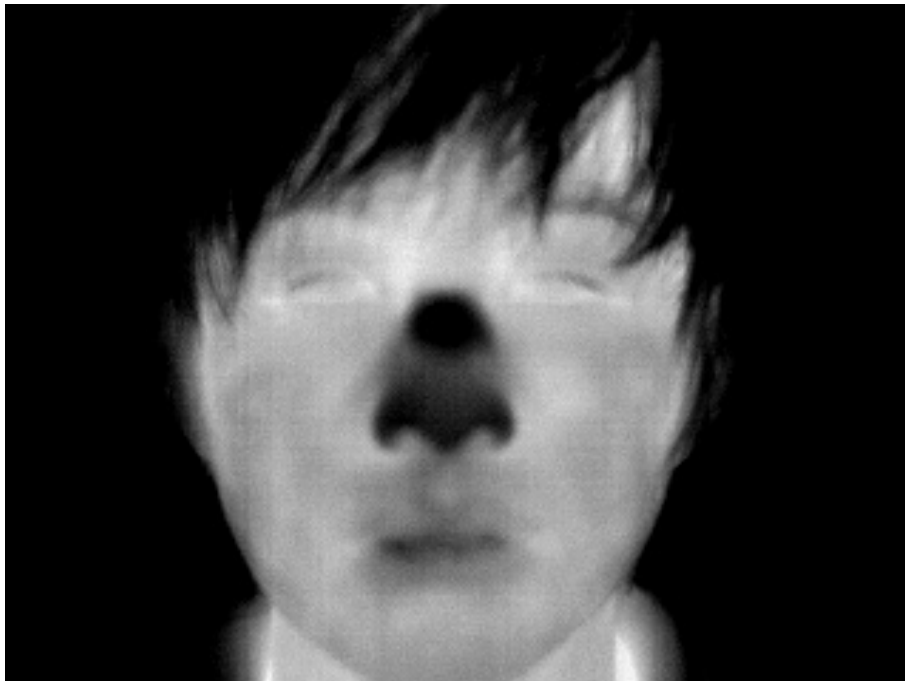


図 2.15 分散画像  $V$  の一例

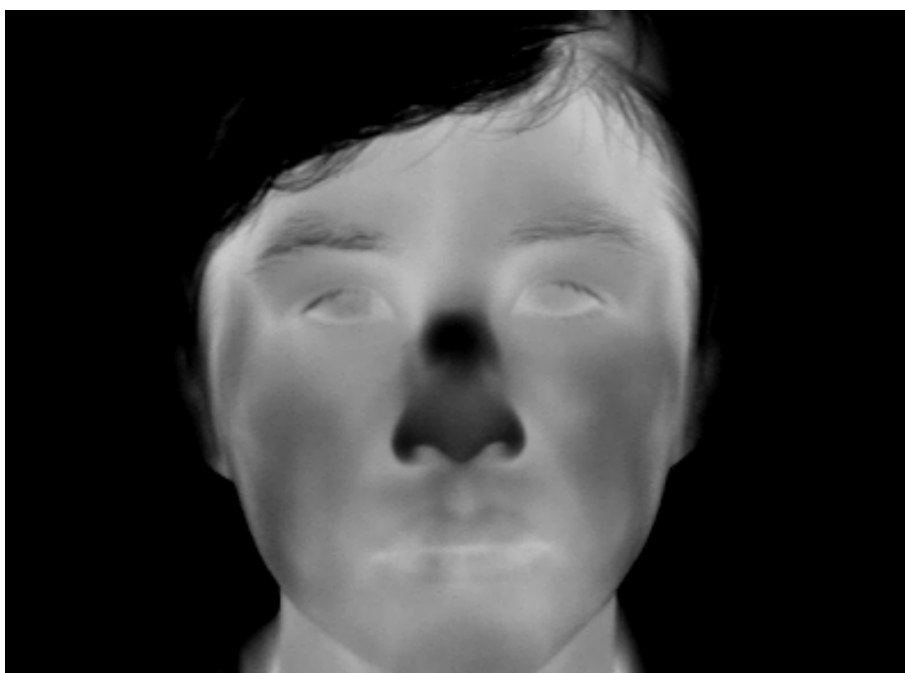
## 2.4.2. 経年変化による影響

本節では、経年変化による影響について述べる。経年変化による影響を確認するため、2011年に撮影した顔温度画像と2021年に撮影した顔温度画像を比較する。それぞれ、顔温度画像を図 2.16 に、処理領域画像を図 2.17 に、高温領域画像を図 2.18 に示す。10年という長期間での経年変化を確認したところ、高温領域画像の経年変化はわずかであることがわかる。また、熱源である筋肉の消失や血管の配置が変わることは考えにくい状況であるため、高温領域画像の短期的変化もわずかである蓋然性が高い。

本手法の実用化を想定した場合、登録画像を定期的に更新することで経年変化に追従できることも考えられることから、本手法は経年変化による影響が少ないといえる。

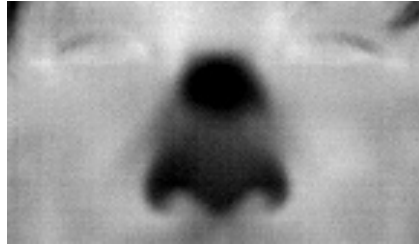


(a) 2011 年撮影



(b) 2021 年撮影

図 2.16 顔温度画像 (2011 年および 2021 年撮影)



(a) 2011 年撮影



(b) 2021 年撮影

図 2.17 処理領域画像 (2011 年および 2021 年撮影)



(a) 2011 年撮影



(b) 2021 年撮影

図 2.18 高温領域画像 (2011 年および 2021 年撮影)



### 2.4.3. 化粧による影響

本節では、化粧による影響について述べる。化粧による影響を確認するため、左腕の表面 B に化粧を施し、化粧された表面 B および化粧されていない表面 A の経時的な温度変化を観測する。化粧された表面と化粧されていない表面を観測しやすいよう、凹凸が少なく経時的な温度変化が少ないと考えられる腕を観測対象とした。温度変化を図 2.19 に示し、化粧直後および化粧後 30 秒ならび化粧後 180 秒の温度画像（擬似カラー表示）をそれぞれ図 2.20 に示す。ここで、化粧には液状タイプの一般的なファンデーションを用いる。

図 2.19 の通り、表面 A の温度は安定している。一方で、表面 B の温度は、化粧品に含まれる成分の揮発により化粧直後は急激な温度低下が見られるものの、次第に温度が上昇し、化粧前と変わらない温度に戻っていることが確認できる。

一般的に、化粧は自宅や人目のつかないパーソナルな場で行われる。本手法の実用化を想定した場合、入退館システムへの実装などが考えられ、化粧直後に個人認証するシーンは想定していないことから、化粧直後の温度変化は問題無いと考えられる。これにより、本手法の化粧による影響は少ないといえる。

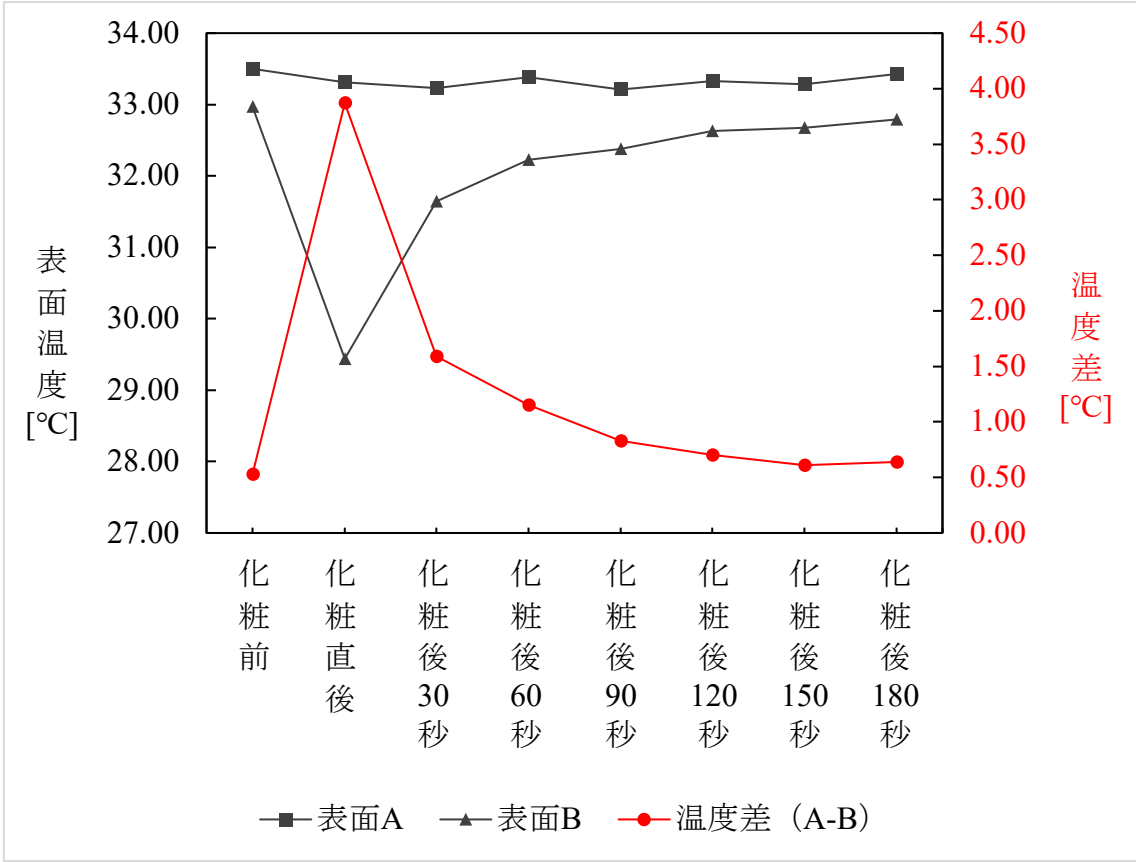
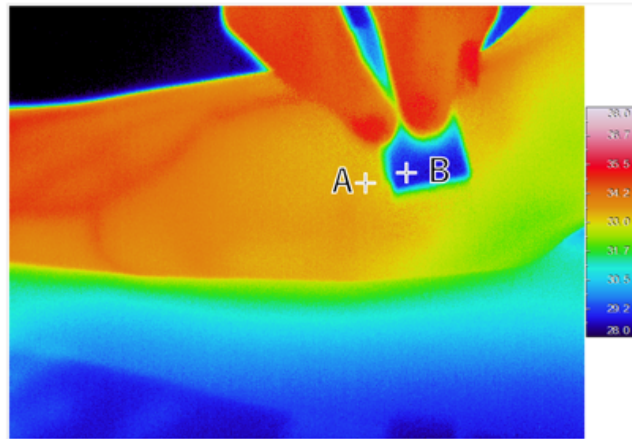
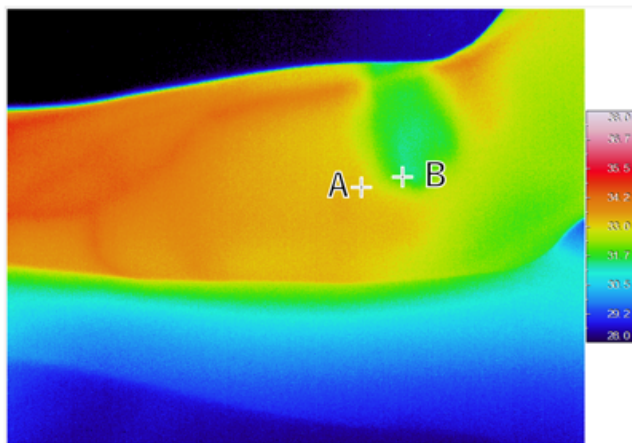


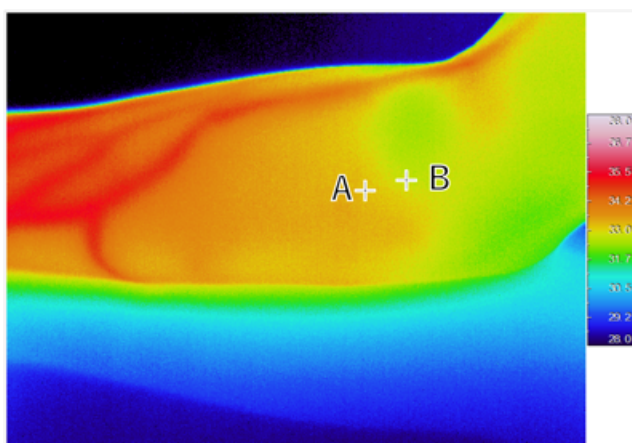
図 2.19 表面 A (化粧無) および表面 B (化粧有) の温度推移



(a) 化粧直後



(b) 化粧後 30 秒



(c) 化粧後 180 秒

図 2.20 化粧直後，化粧後 30 秒，化粧後 180 秒の温度画像（擬似カラー表示）



### 3. 顔温度変化の内部要因および外部要因に対する高温領域のロバスト性

本章では、顔温度変化の内部要因および外部要因に対する高温領域のロバスト性について述べる。前章にて、顔の高温領域は室温変化にロバストであることを示したが、室温変化以外にも顔温度が変化する要因がある。高温領域を用いた個人認証手法の有効性を確認するために、顔温度変化に対する要因を内部要因と外部要因に分けて整理する。内部要因の中で、本人の意思に関係なく発生する精神的ストレス負荷と、外部要因の中で、一時的な温度変化が大きい直風をそれぞれ代表的な要因とし、これらを変化させた実験を通して、提案手法のロバスト性を実験的に検証する。

#### 3.1. 内部要因（精神的ストレス）による影響

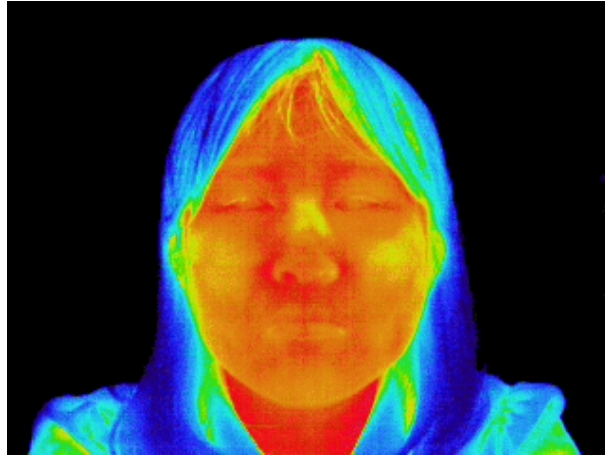
本節では、顔の高温領域に対して、顔温度変化の内部要因の影響を確認する。内部要因の代表的な例として、本人の意思に関係なく発生する精神的ストレスによる影響を確認するため、氷刺激をストレッサーとして用い、被験者の両手に氷を持たせた状態を60秒間維持する。その後、両手から氷を離れた状態で60秒間安静状態とする。これら状態での顔温度を、サーモビジョンカメラにて計測する。入力は、ストレス負荷から60秒後および安静にしてから60秒後の高温領域画像とし、登録は、ストレス負荷前の高温領域画像とする。入力と各登録の正規化相互相関の値を出力し、入力と出力の人物が同一の場合、識別成功とする。

成人被験者12人（男10名、女2名）、計24枚の入力に対して識別を行い、83.3%の識別率を得た。ストレスの負荷前、ストレスを60秒間負荷した際、ス

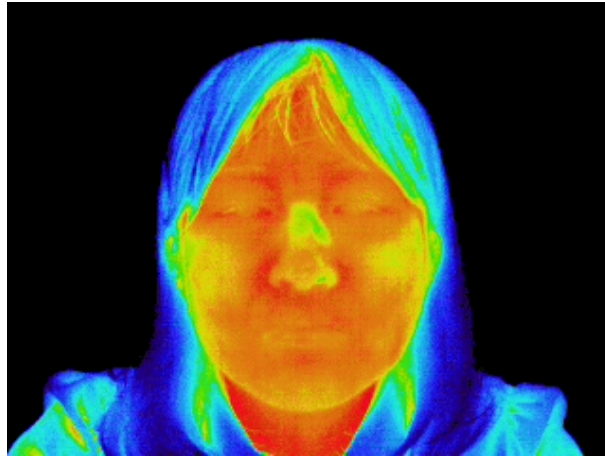
トレスを開放して 60 秒間安静にした際の各顔温度画像（擬似カラー表示）を図 3.1 に、各高温領域を図 3.2 に示す。ストレス負荷により、上唇上部および鼻部の温度だけ低下していることがわかる。上唇上部の温度低下は、発汗による水分蒸発が影響していると考えられる。鼻部の温度低下は、鼻部に通っている動静脈が収縮したことによる低下だと考えられる。

組織の血管を支配している血管運動神経は自律神経からなり、交感神経の血管収縮繊維と副交感神経の血管拡張繊維の 2 種類からなる[28]。心理的变化に伴う自律神経系の活動は、血管を拡張・収縮させ、皮膚血流が主要因の皮膚温度に変化を及ぼす。特に鼻部皮膚温度は、自律神経系の活動による末梢循環系の血流変化を最も反映するといわれている。鼻部の血管系は皮膚と鼻骨の隙間を走っているのに対し、他の顔部分では脂肪層の下を走っている。これにより、鼻部皮膚温度は末梢循環系の血流変化を顕著に反映する。また、動静脈吻合（AVA : Arteriovenous Anastomosis）が鼻部へ集中しており、これは、主に細動脈と細静脈の間に形成される短絡路であり、皮膚温度変化の主要因である表層部毛細血管の血流量を調節する。この調節は自律神経系に支配されているため、鼻部皮膚温度は自律神経系の活動による血管収縮を顕著に反映する。これにより、精神的なストレスがかかると鼻部温度が低下する[35]。

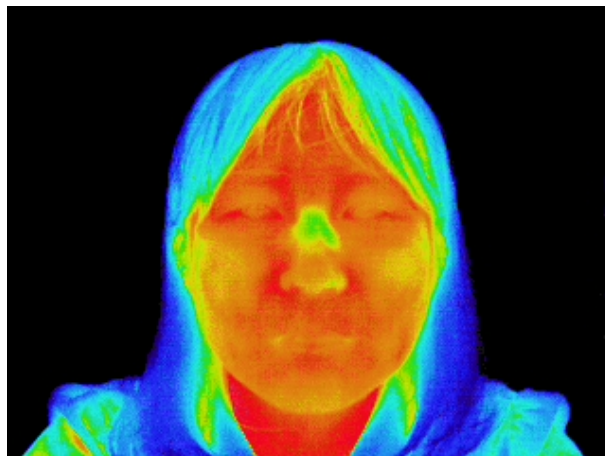
精神的ストレス負荷により顔温度変化するものの、室温変化に安定している高温領域については、温度変化が見られないことから、高温領域を用いた個人認証手法はストレス負荷に依存しないことがわかる。



(a) ストレス負荷前



(b) ストレス負荷 60 秒後



(c) ストレス解除 60 秒後

図 3.1 ストレス負荷時の顔温度画像 (擬似カラー表示)



(a) ストレス負荷前



(b) ストレス負荷 60 秒後



(c) ストレス解除 60 秒後

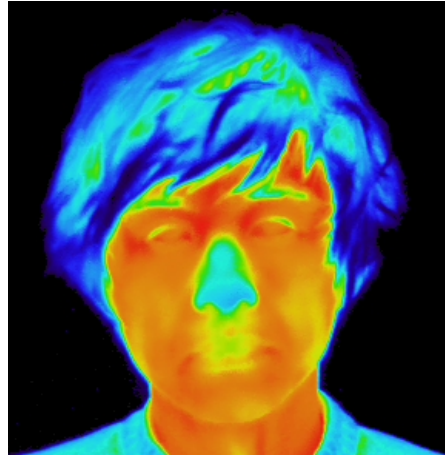
図 3.2 ストレス負荷時の高温領域



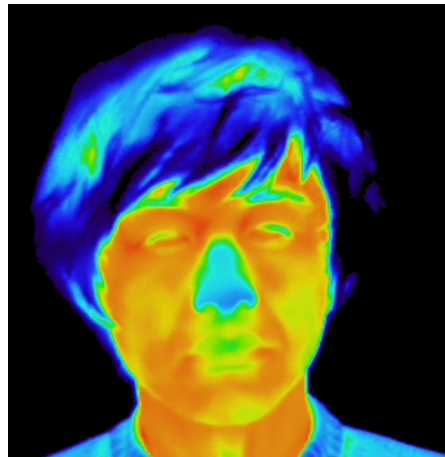
## 3.2. 外部要因（風）による影響

本節では、顔の高温領域に対して、顔温度変化の外部要因の影響を確認する。外部要因の代表的な例として、顔皮膚へ与える一時的な温度変化が大きいと想定される対流による影響を確認するため、各被験者に対して、顔の正面から 60 秒間直風を当てる。風速は、一般的な家庭用扇風機が出力できる強風（3.5～4.0m/s）に設定し、サーモビジョンカメラにて顔温度を計測する。入力、直風から 30 秒後および 60 秒後の高温領域画像とし、登録は、直風前の高温領域画像とする。入力と各登録の正規化相互相関の値を出力し、入力と出力の人物が同一の場合、識別成功とする。

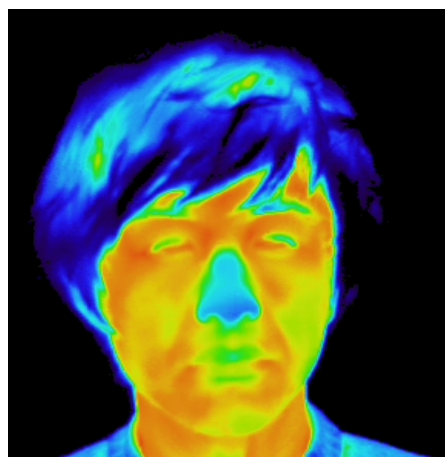
成人被験者 8 人（男 4 名、女 4 名）、計 16 枚の入力に対して識別を行い、75.0%の識別率を得た。直風を当てる前、直風を 30 秒間当てた際、直風を 60 秒間当てた際の各顔温度画像（擬似カラー表示）を図 3.3 に、各高温領域を図 3.4 に示す。図 3.3 より、顔に風を当てると顔表面温度が全面的に下がることがわかった。これは、風により限界層が破壊され、周囲の冷たい空気が皮膚と接触し、熱放散が発生したためと考えられる。一方で、図 3.4 のように、高温領域の分布の変化は少ないことがわかる。対流による熱放散が発生した場合でも高温領域の分布変化は少ないことから、高温領域を用いた個人認証手法は風に依存しないことがわかる。



(a) 直風前



(b) 直風 30 秒後



(c) 直風 60 秒後

図 3.3 直風時の顔温度画像 (擬似カラー表示)



(a) 直風前



(b) 直風 30 秒後



(c) 直風 60 秒後

図 3.4 直風時の高温領域



## 4. クラス内分散が小さい顔領域の検討および個人認証への応用

本章では、クラス内分散が小さい顔領域の検討および個人認証への応用について述べる。前章にて、顔温度変化に対する要因を内部要因および外部要因に分けて整理し、精神的ストレス負荷と鼻部温度の依存関係や、対流による顔全体の温度低下と高温領域の安定性を確認した。これらの知見に加え、個人認証に用いる特徴として、個人内のクラス内分散が小さく、個人間のクラス間分散が大きいことが望ましいことをふまえ、顔温度変化の内部要因および外部要因にロバストかつクラス内分散の小さい領域を検討する。まず、顔部品単位で温度変化を計測し、それぞれ、(1)外気温との相関が見られる領域、(2)外気温変化に依存せず温度変化がほとんど見られない領域、(3)外気温変化に依存せず温度変化する領域、の3カテゴリに分類できることを示し、個人によって分類される顔部品が異なることを明らかにする。これら特徴領域のうち、外気温変化にロバストな(2)の領域のみを用いた個人認証手法を示す。顔領域全体を認証に用いるよりも特徴的な顔領域のみを認証に用いる方がノイズ除去にも有効であり、識別率向上に寄与していることを示す。

### 4.1. 各顔部品の温度特徴

#### 4.1.1. 環境温度変化時における各顔領域の温度推移

本項では、環境温度変化時における各顔領域の温度推移について述べる。各顔領域と外気温との相関を調べるため、外気温が 18°C, 22°C, 23°C, 25°C, 26°C, 28°Cの各状態で、被験者 8 人の顔部品ごとの顔平均温度の推移を測定した。顔領域は、前額、眉毛、まつ毛、瞳、白目、目頭、目尻、眼窩下部、眉間、

鼻尖，法令線，人中，口，顎，頬の 15 箇所とした．これらの位置を図 4.1 に示す．また，ノイズの影響を緩和するため，領域内の温度の平均値を算出した．一例として，被験者 A の結果を図 4.2 に示す．いずれの顔領域においても，外気温変化にともない，それぞれ特徴的な温度変化していることがわかる．

変化の傾向には(1)白目のように，外気温変化に依存せず温度変化がほとんどみられない領域，(2)頬領域のように，外気温変化に依存し何らかの相関がありそうな領域，(3)口領域のように，外気温変化に依存せず温度変化する領域，の 3 つのカテゴリに分類できることがわかる．

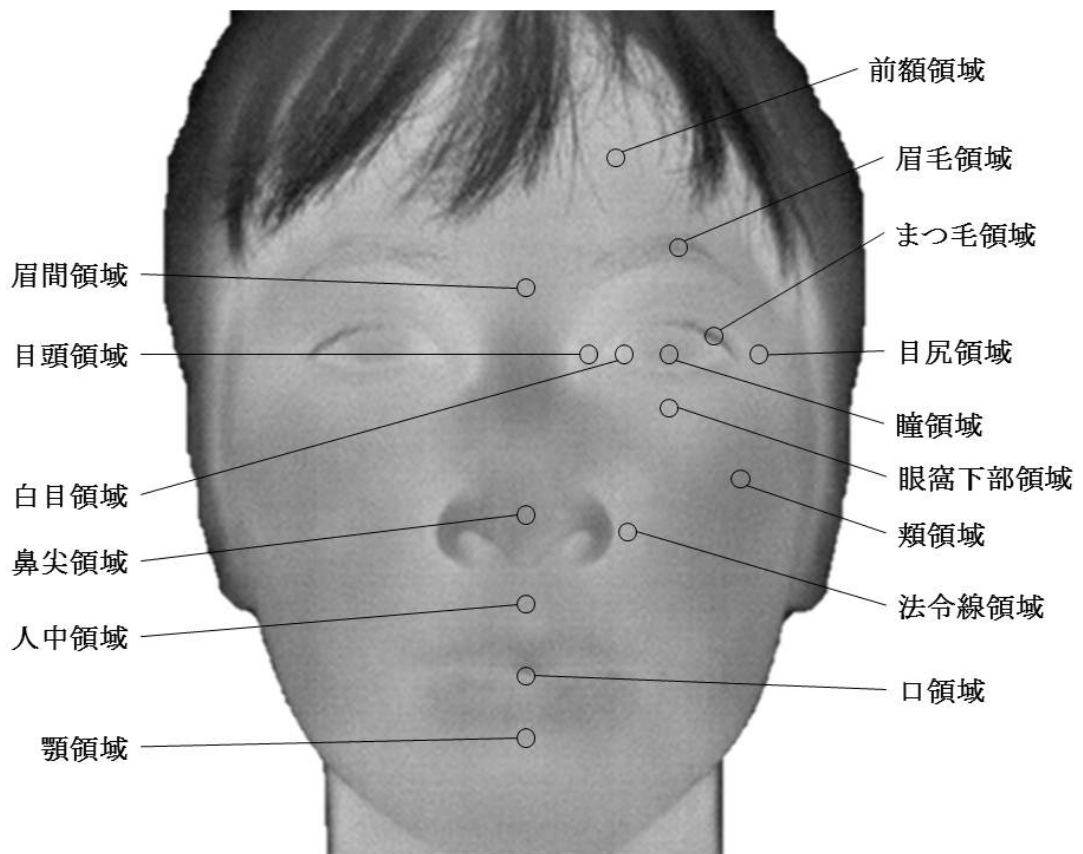


図 4.1 温度変化を観測した顔領域

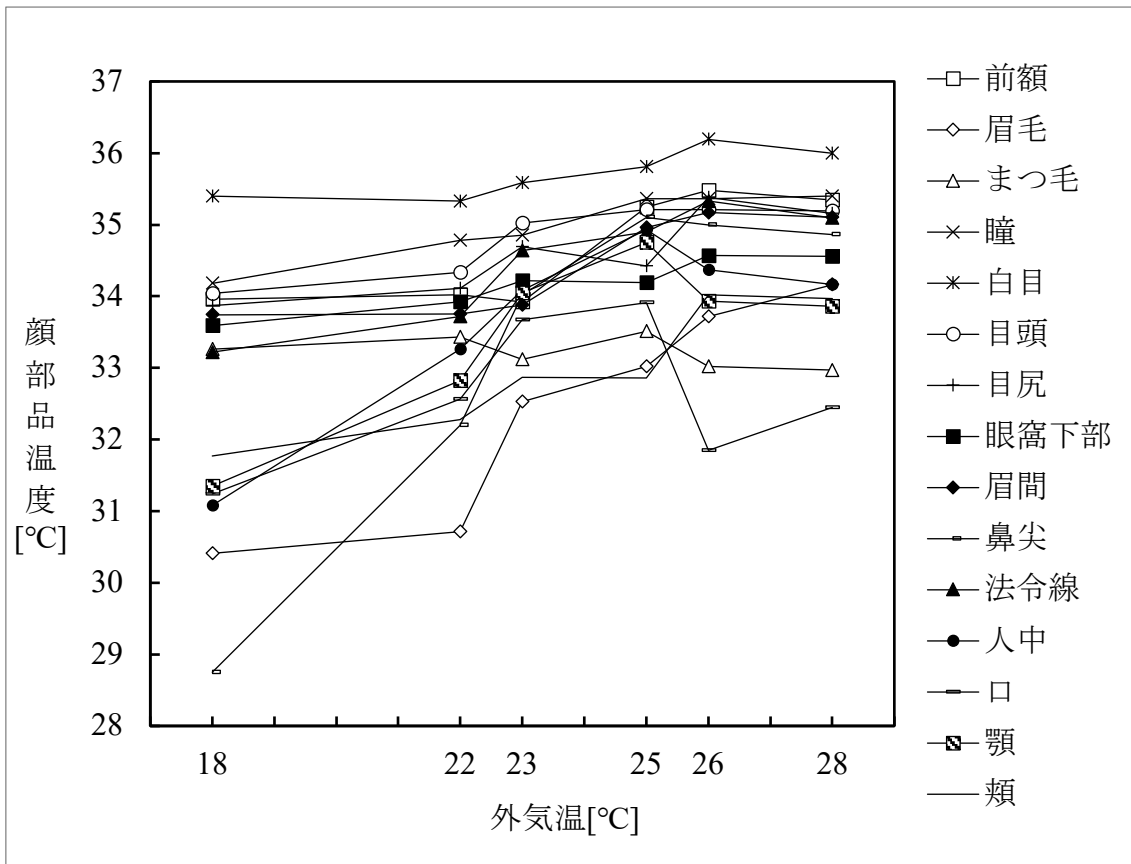


図 4.2 被験者 A の外気温と各顔領域の温度

#### 4.1.2. 環境温度との相関が見られる顔領域

本項では、環境温度との相関が見られる顔領域について述べる。外気温に対する各顔領域の温度変化の度合いを精査した。実験は 8 人 ( $i=1, 2, \dots, 8$ ) の 15 個の顔領域 ( $j=1, 2, \dots, 15$ ) について、異なる環境温度下で  $K$  回 ( $k=1, 2, \dots, K$ ) 行った。それぞれの顔領域の温度を  $T_{i,j}^k$ 、外気温を  $T_{i,out}^k$  と表すものとする。

外気温が変わったとき、つまり、 $k$  を変えたときの顔領域温度  $T_{i,j}^k$  と外気温  $T_{i,out}^k$  との相関  $R_{i,j}$  を計算すると、外気温の変化に伴い温度がどのように変化する傾向を知ることができる。相関が高いということは、外気温変化に依存して温度変化しているということであり、外気温に応じて補正することによって個人認証に利用できる可能性がある。一方、相関が低いということは、外気温

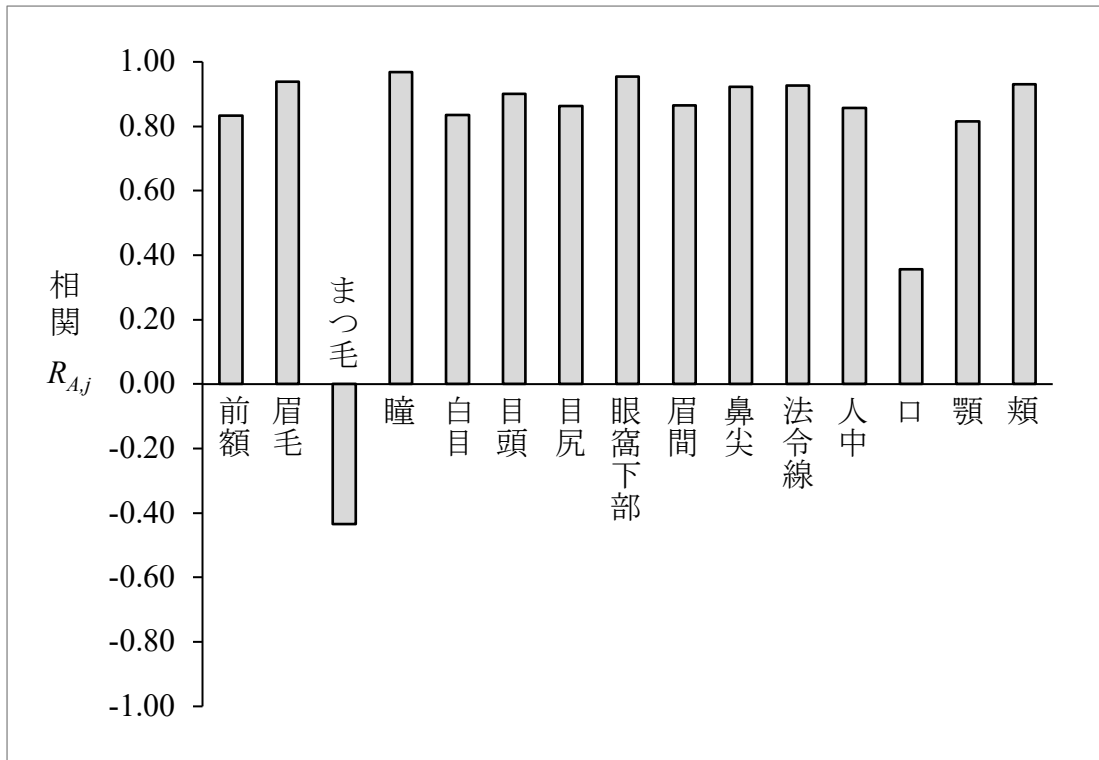
変化に依存しないということであり，補正などによる対処は困難であると考えられる．そこで，顔領域ごとの相関  $R_{i,j}$  を，

$$R_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^K (T_{i,j}^k - \bar{T}_{i,j})(T_{i,out}^k - \bar{T}_{i,out})}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (T_{i,j}^k - \bar{T}_{i,j})^2 \times \sum_{k=1}^K (T_{i,out}^k - \bar{T}_{i,out})^2}} \quad (4.1)$$

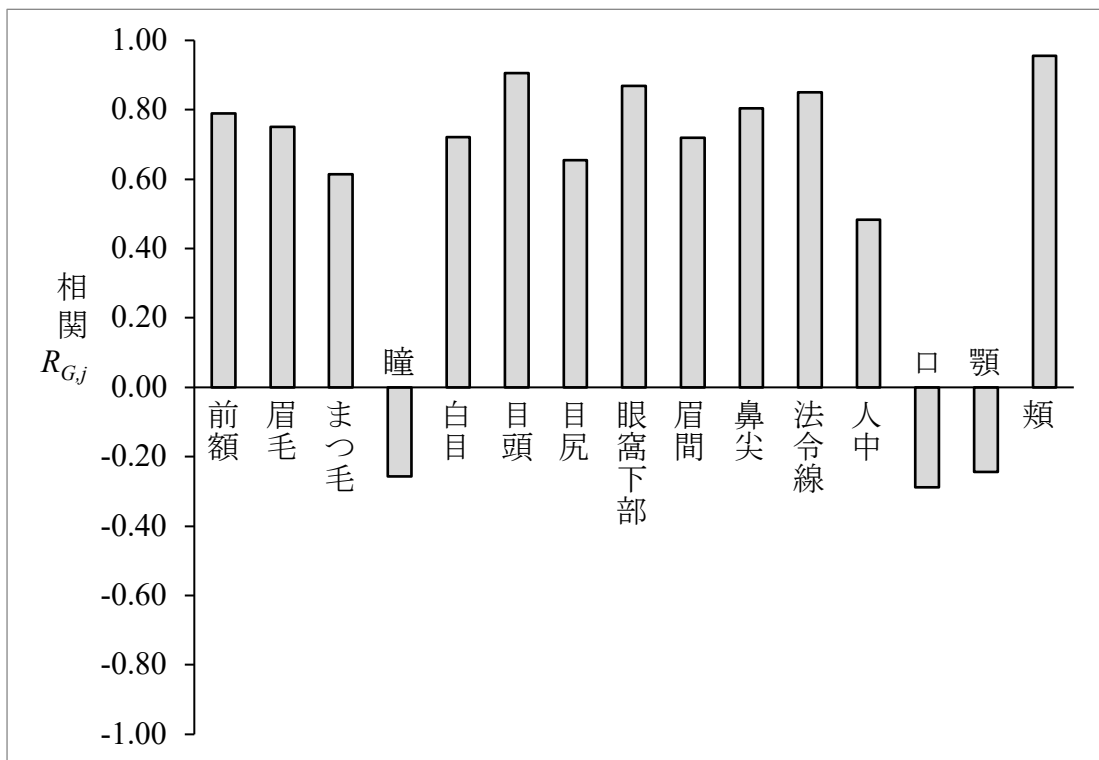
のように計算する．ここで， $\bar{T}_{i,out}$  は  $T_{i,out}^k$  の平均値である．顔領域ごとに相関を求めた結果を表 4.1 に，一例を図 4.3 に示す（図や表では便宜的に番号ではなく，顔領域名称で記述している）．

図 4.3(a)の被験者 A の例では，まつ毛領域と口領域以外は大きい相関値が得られ，外気温と相関があることがわかる．それに対して，図 4.3(b)の被験者 G の例では，瞳領域，鼻の下領域，口領域，顎領域では外気温との相関がみられず，被験者 A では相関のみられなかったまつ毛領域で，ある程度の相関値が得られている．このように個人で違う特徴があることは，他の被験者でも同様であり，全く同じ特徴となる被験者はいなかった．





(a) 被験者 A



(b) 被験者 G

図 4.3 外気温と各顔領域の温度の相関の一例

表 4.1 外気温と各顔領域の温度の相関

被験者	A	B	C	D	E	F	G	H
前額	0.83	0.93	0.97	0.84	0.42	0.98	0.79	0.80
眉毛	0.94	0.95	0.88	0.93	0.62	0.55	0.75	0.85
まつ毛	-0.43	0.81	0.98	0.76	0.48	0.72	0.61	0.78
瞳	0.97	-0.31	0.92	0.45	0.34	0.21	-0.26	0.75
白目	0.84	0.08	0.96	0.81	0.09	0.77	0.72	0.74
目頭	0.90	0.86	0.95	0.90	0.79	0.97	0.91	0.74
目尻	0.86	0.87	0.87	0.68	0.67	0.96	0.65	0.69
眼窩下部	0.96	0.81	0.99	0.75	0.71	0.93	0.87	0.72
眉間	0.86	0.98	0.98	0.88	0.35	0.95	0.72	0.74
鼻尖	0.92	0.90	0.87	0.87	0.94	0.60	0.80	0.69
法令線	0.93	0.82	0.95	0.76	0.74	0.60	0.85	0.57
人中	0.86	0.73	0.83	0.90	0.83	0.36	0.48	0.52
口	0.36	0.24	0.87	0.69	0.84	0.65	-0.29	0.36
顎	0.81	0.36	0.83	0.75	0.79	0.65	-0.24	0.72
頬	0.93	0.8	0.85	0.84	0.80	0.92	0.95	0.68

### 4.1.3. 環境温度の変化に依存しない顔領域

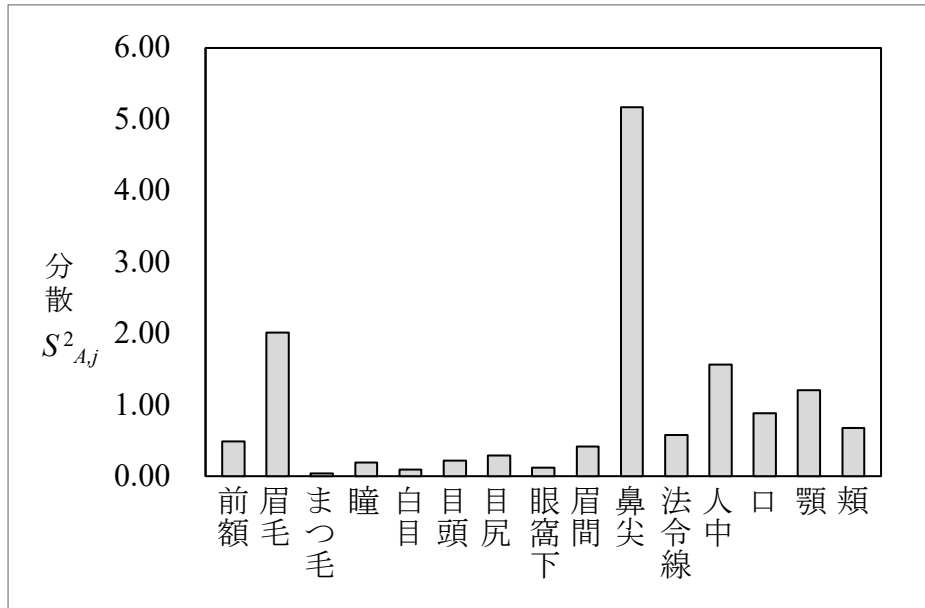
本項では、環境温度の変化に依存しない顔領域について述べる。顔領域の温度が、外気温の変化に依存せず常に安定していれば、その領域の絶対温度は外気温に依存しない個人の特徴を表すことになり、個人認証に利用できる可能性がある。外気温を変化させたときの顔領域温度 $T_{i,j}^k$ の分散 $S_{i,j}^2$ を計算すると、外気温の影響を受けやすいかを判断する目安にできる。そこで、顔領域ごとの分散を、

$$S_{i,j}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (T_{i,j}^k - \bar{T}_{i,j})^2 \quad (4.2)$$

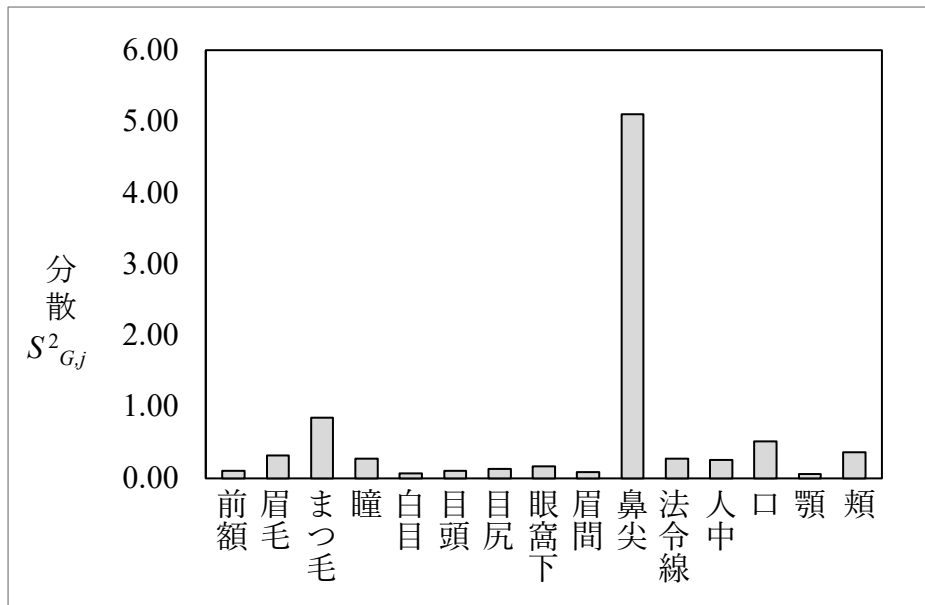
のように計算した。ここで、 $\bar{T}_{i,j}$ は $T_{i,j}^k$ の平均値である。被験者 A と被験者 G の顔領域ごとの分散を図 4.4 に示す（図 4.3 と同様に顔領域名称で記述している）。また、表 4.2 に被験者 8 人分の顔領域ごとの分散を示す。図 4.4(a)より、例えば、外気温変化が最大 10°Cある状況で、まつ毛領域の分散はわずか 0.04 の値をとり、常に安定した温度であることがわかる。また、眉毛や鼻頂点では大きく変化するものの、その他の各顔領域においては比較的安定した温度であることがわかる。特に、瞳領域や白目領域、鼻の横領域などは分散が微小であり、外気温に依存せずほぼ一定の温度であることがわかる。別の図 4.4(b)の被験者 G と比べてみると、目尻領域や目の下領域、頬領域などにおいて類似した分散値をとることがわかるが、被験者 A では分散が 2.0 程度あった眉毛領域が、被験者 G ではわずか 0.3 程度の値となっている。第 4.1.2 節と同様に、個人で異なる特徴が得られたことは他の被験者でもみられ、同一の特徴をもつ被験者はみられなかった。

複数の環境温度下において、顔温度の分散が微小な領域はクラス内分散が小

さい領域である。また、分散が微小である瞳領域や白目領域、鼻の横領域は、比較的高温領域であることから、顔温度変化の内部要因および外部要因にロバストである。次項にて、分散が微小な瞳領域や白目領域、鼻の横領域を用いた個人認証手法を提案する。



(a) 被験者 A



(b) 被験者 G

図 4.4 各顔領域の温度の分散

表 4.2 各顔領域の温度の分散

被験者	A	B	C	D	E	F	G	H
前額	0.49	0.34	1.22	0.18	0.31	0.27	0.10	0.83
眉毛	2.01	0.36	1.59	0.44	0.36	0.15	0.32	0.64
まつ毛	0.04	0.41	1.60	0.95	0.33	0.25	0.85	1.13
瞳	0.19	0.40	0.93	0.14	0.26	0.74	0.27	0.75
白目	0.10	0.12	0.73	0.06	0.21	0.23	0.07	0.72
目頭	0.22	0.19	0.92	0.13	0.85	0.26	0.11	0.99
目尻	0.29	0.16	0.67	0.10	0.22	0.33	0.13	0.59
眼窩下部	0.12	0.18	0.74	0.16	0.34	0.29	0.17	1.02
眉間	0.42	0.37	1.13	0.18	0.27	0.32	0.09	1.11
鼻尖	5.17	1.67	2.62	1.04	3.71	2.12	5.10	8.11
法令線	0.58	0.15	0.74	0.19	0.36	0.17	0.28	1.25
人中	1.56	0.33	0.7	0.23	0.78	0.71	0.26	1.35
口	0.88	0.24	1.00	0.14	0.67	1.40	0.52	0.68
顎	1.21	0.17	0.56	0.41	0.86	0.44	0.06	0.67
頬	0.67	0.39	0.95	0.40	0.51	0.23	0.36	1.91

## 4.2. 環境温度の変化に依存しない特徴領域を用いた個人認証手法

本節では、環境温度の変化に依存しない特徴領域を用いた個人認証手法について述べる。基本的な認証フローは、第 2.2 節で述べた高温領域を用いた個人認証の認証フローと同様であり、(1)特徴領域サブシステム、(2)登録サブシステム、(3)識別サブシステムで構成している。各サブシステムの処理フローは以下のとおりである。

### (1) 特徴領域抽出サブシステム

#### Step1 顔温度画像データの入力

サーモビジョンカメラにて撮影した顔温度画像データを、画素ごとに温度を示した温度情報ファイルに変換する。

#### Step2 特徴的な顔領域の決定

目領域である瞳領域および白目領域に加え、鼻領域を手動で特定し、領域内の温度の平均値を算出する。異なる外気温下で Step 1 および Step 2 を繰り返し、それぞれの平均温度の分散結果が 0.2 以下となった顔領域を特徴的な顔領域とする。

#### Step3 顔領域抽出

Step1 で取得した温度情報ファイルに対して、人の顔温度が背景より比較的高いことを利用して、背景との分離を行う。

#### Step4 温度範囲の正規化

異なる室温下での顔温度画像を比較するために、温度範囲を  $a \leq t \leq b$  から  $a' \leq t' \leq b'$ へと変換し、正規化温度画像を生成する。ここで、 $a$  および  $b$  はそれぞれ 28°C から 38°C の範囲内の最低温度、最高温度とし、 $a'$

を 0,  $b'$  を 255 とする.

#### Step5 特徴的な顔領域の抽出

##### (1) 目とその周辺の特徴的な領域

左右の目頭の  $x$  座標と  $y$  座標を手動で定め, 横幅が  $\alpha$ , 縦幅が  $(\beta + \gamma)$  とした範囲を特徴領域として抽出する. 図 4.5 に抽出領域の一例を示し, 抽出結果の一例を図 4.6(a), (b) に示す.

##### (2) 鼻の横の特徴的な領域

左右の鼻翼の付け根をそれぞれ始点として, 横幅を  $\alpha'$ , 縦幅を  $\beta'$  とした範囲を特徴領域として抽出する. 図 4.5 に特徴領域の一例を示し, 抽出結果の一例を図 4.6(c), (d) に示す.

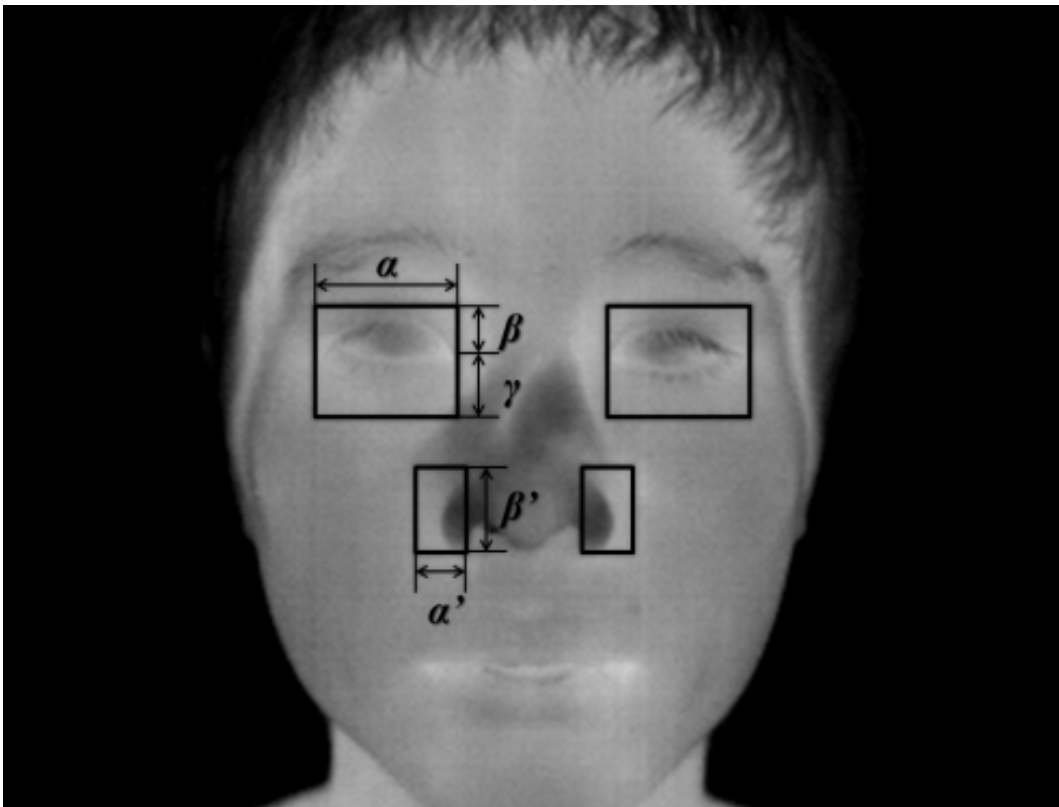


図 4.5 環境温度の変化に依存しない顔領域抽出領域の一例

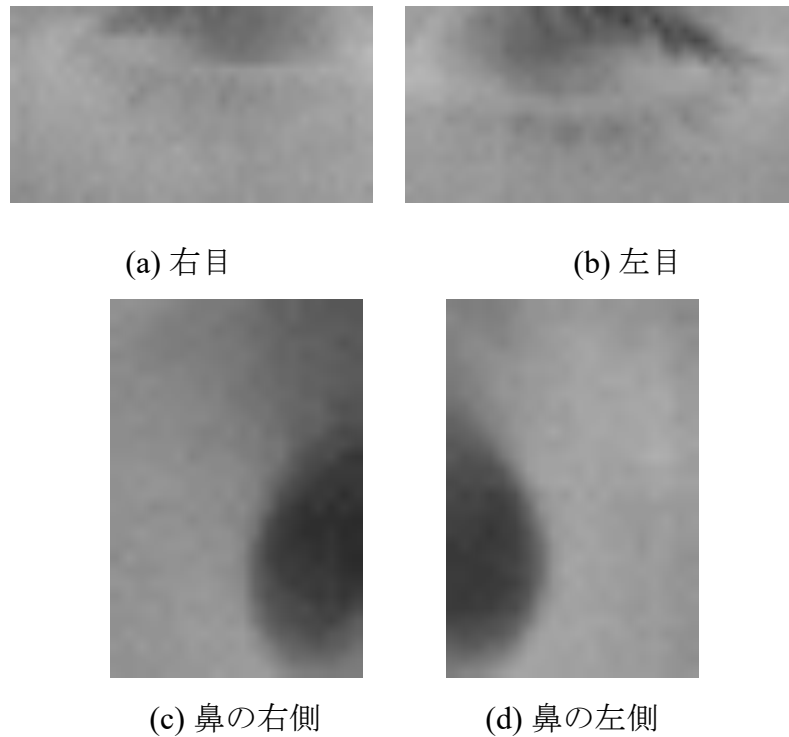


図 4.6 環境温度の変化に依存しない顔領域抽出結果の一例

### (2) 登録サブシステム

各顔部位  $j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ とする) において,  $K$ 個の異なる室温 ( $k=1, 2, \dots, K$ とする) での特徴的な画像  $F_{ij}^k$  から, 対応する画素ごとに  $K$ 個の値の中央値を求めて作成した中央値画像  $M$  を作成する. これを登録者  $i$  ( $i=1, 2, \dots, P$ とする) ごとに作成し,  $M_{ij}$ としてデータベースに登録する.

### (3) 識別サブシステム

識別対象者  $X$  の顔輝度画像  $F_{x,j}$  を入力として, 各登録者の中央値画像との類似度をそれぞれ計算し, 最も類似度の高い値を持った登録者を出力とする. 入力と出力の人物が一致した場合に識別成功とし, 類似度の計算には,



$$R_{i,j} = \frac{\sum_{v=0}^{V-1} \sum_{u=0}^{U-1} F_{x,j}(u,v) M_{i,j}(u,v)}{\sqrt{\sum_{v=0}^{V-1} \sum_{u=0}^{U-1} F_{x,j}(u,v)^2 \times \sum_{v=0}^{V-1} \sum_{u=0}^{U-1} M_{i,j}(u,v)^2}} \quad (4.3)$$

で表される正規化相互相関の値  $R_{i,j}$  を用いる。

### 4.3. 個人認証実験

本節では、環境温度の変化に依存しない特徴領域を用いた個人認証手法について、個人認証実験の手法および結果について述べる。個人認証実験は、*leave-one-out* 方式を用いて行い、各被験者に対して、6 つの室温時の  $F_{ij}^k$  から 5 つを選択し、中央値画像  $M_{ij}$  を作成、登録した。また、中央値画像生成に用いなかった  $F_{ij}^k$  を入力とした。評価値は、第 2.3 節で用いた式(2.5)で表される識別率とした。被験者 8 名のうち、特徴的な顔部品を持つ被験者 5 名の計 30 枚の入力に対して識別を行い、90.0%の識別率を得た。

### 4.4. 考察

バイオメトリクス認証では、クラス内分散が小さく、クラス間分散が大きい特徴を用いることが望ましい。第 4.1 節では、クラス内分散が小さい領域を抽出するため、顔部品単位で領域の特徴を観測しており、第 4.2 節では、環境温度の変化に依存しない特徴領域を用いた個人認証手法について述べている。ここでは、環境温度の変化に依存しない特徴領域のみを個人認証に用いる優位性について述べる。

第 4.2 節の被験者において、環境温度の変化に依存しない特徴領域を持つ被験者は、以下の 3 カテゴリに分類してデータベースに登録している。

- a) 目および目の周辺領域に特徴を持ち，鼻の横領域に特徴を持たない
- b) 目および目の周辺領域に特徴を持たず，鼻の横領域に特徴を持つ
- c) 目および目の周辺領域に特徴を持ち，鼻の横領域に特徴を持つ

第 4.2 節の実験では，被験者 A，G は a) に分類され，被験者 F は b) に分類され，被験者 B，D は c) に分類されている．ここで，個人認証に各々の特徴的な（環境温度の変化に依存しない）顔領域だけを用いることの有効性を示すため，特徴的な領域以外を用いている高温領域を用いた個人認証手法との比較実験を行った．図 4.7 に入力を室温 25°C 時の被験者 A としたときの結果を示す．縦軸を相関係数，横軸を比較した顔領域としている．目および目の周辺領域の A が一番高い相関値を得られ，出力が A であることがわかる．これにより，特徴的な顔領域のみを用いた時が，高温領域を用いる時より高い相関が得られていることがわかる．この傾向は，すべての入力時でみられた．よって，特徴的な顔領域のみを認証に用いれば，特徴的でない顔領域による誤認識のリスクを軽減できると考えられる[36][37]．

本章では，環境温度の変化に依存しない特徴領域のみを個人認証に用いたが，環境温度に相関のある顔領域についても，環境温度を基に正規化を行うことで認証に利用できる可能性がある．そのため，識別率の精度向上や，より強固ななりすまし対策を求める状況において，当該顔領域が有効活用できる．

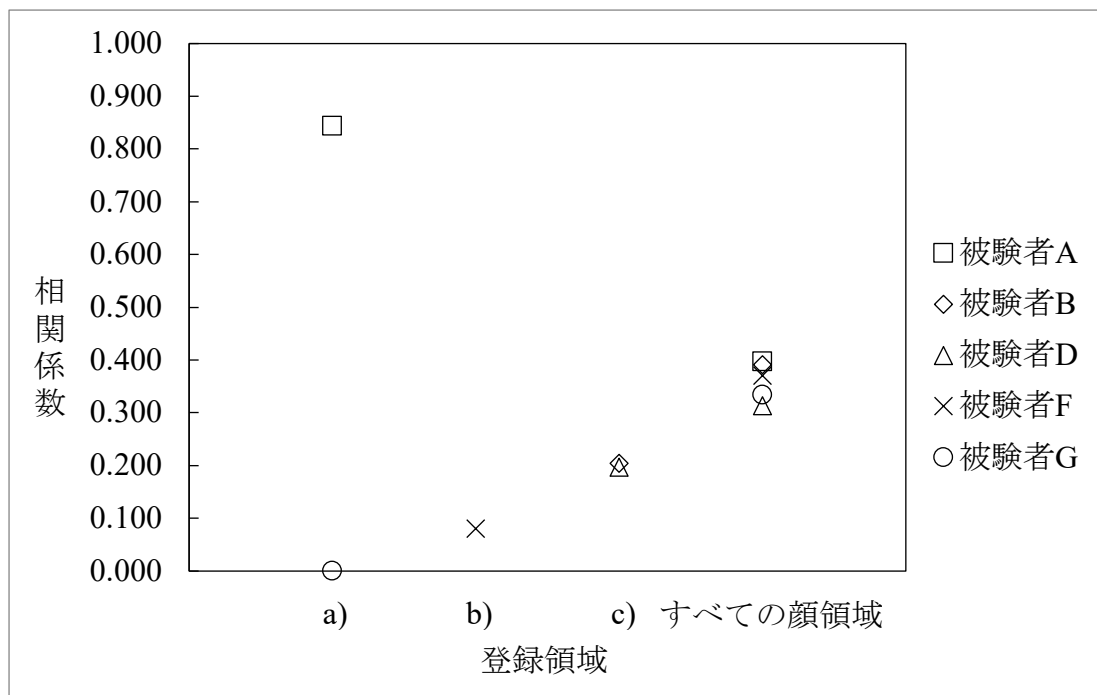


図 4.7 登録画像との相関の一例（入力：室温 25°C時の被験者 A）



## 5. クラス間分散が大きい顔領域の検討および個人認証への応用

本章では、クラス間分散が大きい顔領域の検討および個人認証への応用について述べる。第3章にて、顔温度変化に対する要因を内部要因および外部要因に分けて整理し、ストレス負荷と鼻部温度の依存関係や、対流による顔全体の温度低下と高温領域の安定性を確認した。これらの知見に加え、個人認証に用いる特徴として、個人内のクラス内分散が小さく、個人間のクラス間分散が大きいことが望ましいことをふまえ、クラス間分散の大きい領域を検討する。まず、主成分分析（PCA）を用いて顔温度の特徴領域について分析し、目や口周りの部分に個人性特徴が多く含まれることを明らかにする。顔の高温領域を用いた個人認証手法の精度向上のため、主成分分析を用いて生成したサーモ固有顔を併用することにより、認識率向上を実現した個人認証手法を提案する。

### 5.1. 主成分分析（PCA）による顔温度特徴の解析

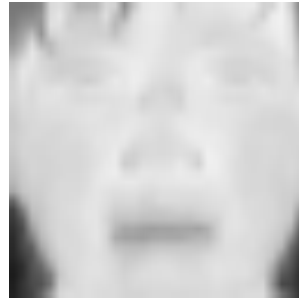
#### 5.1.1. 主成分分析（PCA）によるサーモ固有顔

本項では、主成分分析（PCA）によるサーモ固有顔について述べる。顔認証に主成分分析を用いた研究は多くあるが、特に、M.TurkによるEigenfaces（以下、固有顔）の方法[38][39]が有名である。M.Turkによる固有顔の方法は、最初に顔画像を、画素値を成分とするベクトルとみなし、主成分分析を行い、顔画像の特徴をもった比較的低次元の部分空間を得、認識処理をこの部分空間の中で行う。この方法は主成分分析を次元数の削減に用いた例である。次元数の削減は計算量とテンプレートのメモリ容量の削減に効果があり、さらに主成分分析による次元圧縮を用いた場合には、一般に認識率の向上が見られる[38]。

ここでは、顔領域のどの部分に個人性が表れるか確認するため、同時刻に撮影された顔の可視画像と温度画像に対してそれぞれ PCA をかけた。結果を図 5.1 に示す。入力画像は、被験者 46 名に対して撮影し、 $32 \times 32$  ピクセルに正規化した可視画像 46 枚および温度画像 46 枚である。温度画像より生成された固有顔（以下、サーモ固有顔）は、画素値が大きいほど明るく表示されており、分散が大きいことから、個人性を多く含んでいる。図 5.1 より、目や口周りの部分が明るく表示されており、個人性が多く含まれることがわかる。この領域を個人認証に用いることができれば、高い認証率を持った個人認証ができる可能性がある[21].



(a) 入力データ例 (可視画像)



(b) 入力データ例 (サーモ画像)



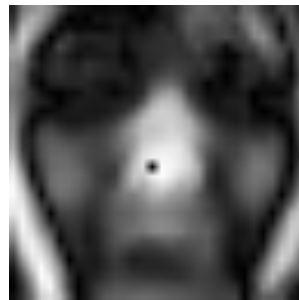
(c) 1<sup>st</sup>固有顔



(d) 1<sup>st</sup>サーモ固有顔



(e) 2<sup>nd</sup>固有顔



(f) 2<sup>nd</sup>サーモ固有顔



(g) 3<sup>rd</sup>固有顔



(h) 3<sup>rd</sup>サーモ固有顔

図 5.1 可視画像/サーモ画像による固有顔の一例

### 5.1.2. 高温領域とサーモ固有顔の相関

本項では、高温領域とサーモ固有顔の相関について述べる。顔の比較的高温領域は個人で安定し、サーモ固有顔の特徴領域は個人性を多く含んでいる。ここでは、高温領域とサーモ固有顔の特徴領域との関係性を確認するため、温度画像と 1st サーモ固有顔の相関を求めた。結果を図 5.2 および表 5.1 に示す。縦軸は相関係数を、横軸は入力画像の室温を表している。被験者 8 人に対して、室温を 18°C~28°C に変化させたときの温度画像を用いた。PCA の入力データには被験者ごとに 1 枚の中央値画像を用いており、中央値画像は 6 枚の異なる室温時に撮影された画像から、各画素値の中央値を割り当てて生成した。サーモ固有顔は、第一主成分のみを相関係数の計算に用い、画素値は特徴の表れている領域ほど高い値を割り当てている。

図 5.2 および表 5.1 より、被験者 H のように、ある程度の相関が安定して得られている被験者もいれば、被験者 A の室温 25°C 時のように、相関があまり得られないときもある。つまり、高温領域と個人性を多く含む領域は、安定して相関があるわけではないことがわかる。個人認証する際、高温領域に対して、サーモ固有顔の特徴領域を加えることで、認証率向上を図れる可能性がある[21]。



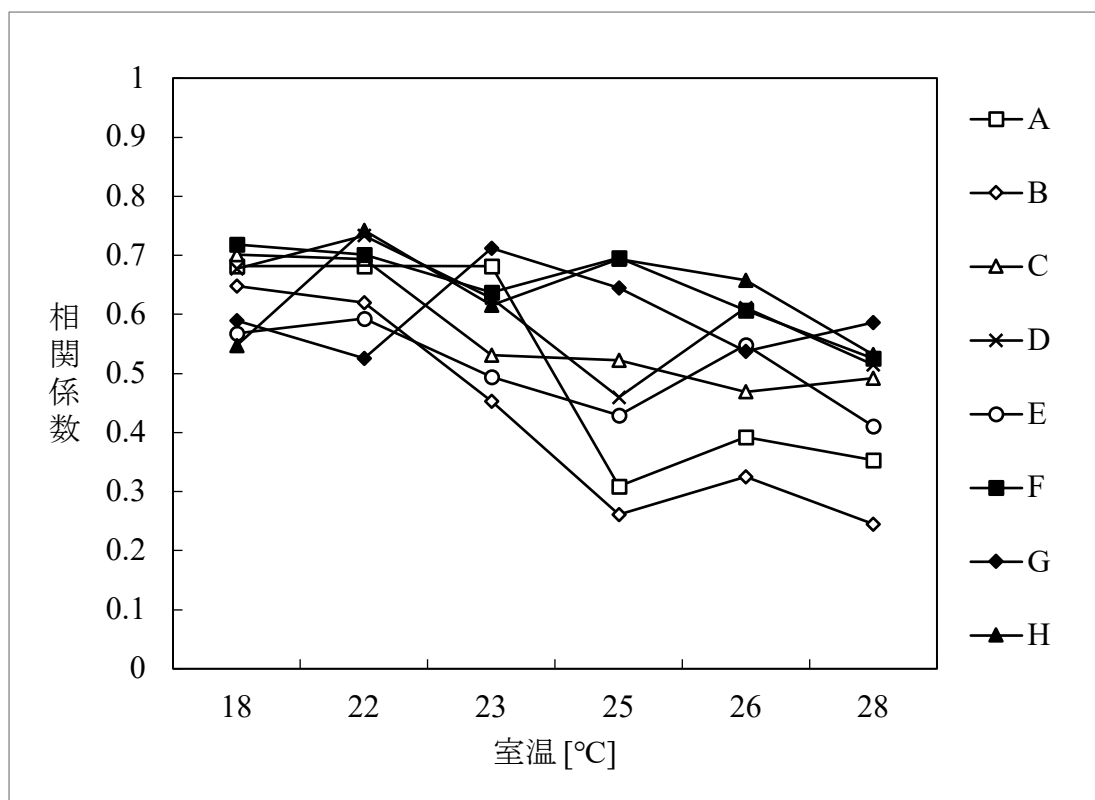


図 5.2 温度画像と 1<sup>st</sup>サーモ固有顔の相関係数

表 5.1 温度画像と 1<sup>st</sup>サーモ固有顔の相関係数

	室温 [°C]					
	18	22	23	25	26	28
被験者 A	0.68	0.68	0.68	0.31	0.39	0.35
被験者 B	0.65	0.62	0.45	0.26	0.33	0.25
被験者 C	0.70	0.69	0.53	0.52	0.47	0.49
被験者 D	0.68	0.73	0.63	0.46	0.61	0.51
被験者 E	0.57	0.59	0.49	0.43	0.55	0.41
被験者 F	0.72	0.70	0.64	0.70	0.61	0.53
被験者 G	0.59	0.53	0.71	0.64	0.54	0.59
被験者 H	0.55	0.74	0.62	0.69	0.66	0.53

## 5.2. 高温領域および PCA による特徴領域を用いた個人認証手法

本節では、高温領域および PCA による特徴領域を用いた個人認証手法について述べる。基本的な認証フローは、第 2.2 節で述べた高温領域を用いた個人認証フローと同様であり、(1)特徴領域抽出サブシステム、(2)登録サブシステム、(3)識別サブシステムで構成している。各サブシステムの処理フローは以下のとおりである。

### (1) 特徴領域抽出サブシステム

#### Step1 顔温度画像データの入力

サーモビジョンカメラにて撮影した顔温度画像データを、画素ごとに温度を示した温度情報ファイルに変換する。

#### Step2 顔領域の設定

人の顔温度が背景より比較的高いことを利用して、背景との分離を行う。

#### Step3 処理範囲の設定

毛髪の影響および呼吸の影響を除去するため、処理領域を設定する。左右の目頭および鼻下部を手動で求め、左右の目頭の幅を  $w$  とし、左右の目頭の中心  $x_1$  を中心として横幅  $x_1 - \alpha w \leq x \leq x_1 + \alpha w$ 、目頭の  $y$  座標  $y_1$  および鼻下部の  $y$  座標  $y_2$  を基に、縦幅  $y_1 - \beta w \leq y \leq y_2 + \gamma w$  の矩形領域を処理範囲とし、この温度画像を  $T$  とする。ここで、 $\alpha$  を 3.2、 $\beta$  を 1.8、 $\gamma$  を 0.4 とする。

#### Step4 温度範囲の正規化

異なる室温下での顔温度画像を比較するために、温度画像  $T$  に対して、線形濃度変換式(2.1)を用いて温度範囲を  $a \leq t \leq b$  から  $a' \leq t' \leq b'$  へと変換し、正規化温度画像  $T'$  を生成する。ここで、 $a$  および  $b$  はそれぞれ  $28^{\circ}\text{C}$  から  $38^{\circ}\text{C}$  の範囲内の最低温度、最高温度とし、 $a'$  を 0,  $b'$  を 255 とする。

#### Step5 平滑化

正規化温度画像  $T'$  に対してメディアンフィルタを施し、細かいノイズを除去する。

#### Step6 画像サイズの正規化

平滑化された正規化温度画像  $T'$  を、画像サイズ  $U \times V$  の顔輝度画像  $F$  へ変換する。ここで、 $U$  を 32,  $V$  を 32 とする。

### (2) 登録サブシステム

#### Step1 登録画像の生成

登録対象者  $i$  の、 $N$  枚の異なる室温の顔輝度画像  $T_i^k$  ( $k=1, 2, \dots, N$ ) から、対応する画素ごとに  $N$  個の値の中央値を求めて作成した中央値画像  $M_i$  ( $i=1, 2, \dots, P$ ) を作成し、データベースに登録する。ここで、 $P$  は登録者の人数である。

#### Step2 サーモ固有顔の生成

登録者  $P$  人すべての登録画像  $M_i$  に対して PCA を施し、サーモ固有顔  $E_n$  ( $n=1, 2, \dots, U \times V$ ) を生成する。サーモ固有顔は、特徴が強く表れている領域ほど、画素値の値を高く割り当てている。図 5.3 にサーモ固有顔  $E_n$  の一例を示す。



(a) 1<sup>st</sup> サーマ固有顔  $E_1$



(b) 2<sup>nd</sup> サーマ固有顔  $E_2$



(c) 3<sup>rd</sup> サーマ固有顔  $E_3$

図 5.3 サーマ固有顔  $E_n$  の一例

### (3) 識別サブシステム

#### Step1 顔輝度画像の生成

識別対象者  $X$  の顔輝度画像  $F_x$  を生成する.

#### Step2 閾値の決定

$p$ -tile 法により, 顔輝度画像  $F_x$ , 登録画像  $M_i$ , 1<sup>st</sup> サーマ固有顔  $E_1$  のそ

それぞれの閾値  $t_x$ ,  $t_i$ ,  $t_e$  を求める.

### Step3 非線形変換

入力画像および登録画像に対して, それぞれ

$$F'_x(u, v) = \begin{cases} a' & (F_x(u, v) < t_x, E_1(u, v) < t_e) \\ F_x(u, v) & (\textit{otherwise}) \end{cases} \quad (5.1)$$

$$M'_i(u, v) = \begin{cases} a' & (M_i(u, v) < t_i, E_1(u, v) < t_e) \\ M_i(u, v) & (\textit{otherwise}) \end{cases} \quad (5.2)$$

の非線形変換を用いて入力画像  $F'_x$  と登録画像  $M'_i$  を生成する. ここで, 2つの閾値以下の領域には一定値  $a'$  を割り当てている. 図 5.4 に登録画像  $M'$  の一例を示す.

### Step4 出力

識別対象者  $X$  の入力画像  $F'_x$  を入力として, 各登録者の登録画像  $M'_i$  との類似度をそれぞれ計算し, 最も類似度の高い値を持った登録者を出力とする. 入力と出力の人物が一致した場合に識別成功とし, 類似度の計算には, 正規化相互相関の値  $R_i$  を用いる.

$$R_i = \frac{\sum_{v=0}^{V-1} \sum_{u=0}^{U-1} F'_x(u, v) M'_i(u, v)}{\sqrt{\sum_{v=0}^{V-1} \sum_{u=0}^{U-1} F'_x(u, v)^2 \times \sum_{v=0}^{V-1} \sum_{u=0}^{U-1} M'_i(u, v)^2}} \quad (5.3)$$



(a) 被験者 A



(b) 被験者 B



(c) 被験者 C

図 5.4 登録画像の一例

### 5.3. 個人認証実験

本節では，高温領域および PCA による特徴領域を用いた個人認証手法について，個人認証実験の手法および結果について述べる．個人認証実験は，*leave-one-out* 方式を用いて行い，各被験者に対して，6つの室温時の  $F_i^k$  から 5つを選択し，中央値画像  $M_i$  を作成，登録した．また，中央値画像生成に用いなかった

$F^k$  を入力とした．評価値は，第 5.2 節で用いた式(5.3)で表される識別率とした．被験者 8 名，計 48 枚の入力に対して識別を行い，79.0%の識別率を得た．

## 5.4. 考察

バイオメトリクス認証では，クラス内分散が小さく，クラス間分散が大きい特徴を用いることが望ましい．第 5.1 節では，クラス間分散が大きい領域を抽出するため，主成分分析 (PCA) を用いて特徴抽出しており，第 5.2 節では，高温領域に加えて PCA を用いた特徴領域を活用した個人認証手法を述べている．第 5.3 節では，提案手法を用いた個人認証実験結果について示し，本節では，PCA を用いた特徴領域を個人認証に用いる優位性について述べる．

個人認証に，高温領域のみを用いる手法よりも，PCA による特徴領域も加えた手法の優位性を確認するため，同一の温度画像を用いて個人認証実験を行う．個人認証実験には，被験者 8 人の登録画像を用いたときと，被験者 50 人の登録画像を用いたときの 2 つを行い，画像サイズを  $32 \times 32$  ピクセルとする．予備実験により，高温領域の割合を 5%，1st サーマ固有顔の特徴領域の割合を 76%としたときの個人認証実験結果を表 5.2 に示す．登録人数に関わらず，高温領域のみや特徴領域のみの 1 つの領域を用いた個人認証手法よりも，2 つの領域を併用した手法が高い識別率であることがわかる．また，登録人数が増えた際，この識別率の差は大きくなり，2 つの領域を併用した手法が約 17%高い識別率となる．

表 5.2 各手法の識別率

認証に用いた領域	登録人数 8 人の時	登録人数 50 人の時
高温領域のみ	68.8%	60.4%
PCA を用いた特徴領域のみ (累積寄与率 : 98.7%, 96.4%)	75.0%	60.4%
高温領域+PCA を用いた特徴領域	79.2%	77.1%



## 6. 考察

本論文では、新たなモダリティとしての顔温度の導入と個人認証に利用した場合の有効性について論じた。現在、顔温度画像の実用化のためには、さまざまな研究課題が存在している。一方で、実用化のシーンに合わせて本手法をカスタマイズし、従来の認証手法と併用することで、より強固かつ利便性を向上した認証を実現できる可能性がある。顔温度画像は、非接触で被認証者の意識的な協力が不要であるため、従来の個人認証と組み合わせやすく、多要素認証に向いている。例えば、被験者が少ない状況であれば個人内で安定しているクラス間分散の小さい領域が有効だと考えられ、第4章で述べた、環境温度の変化に依存しない特徴領域を用いた個人認証手法を併用する。認証シーンが安定した環境であれば、個人間で差があるクラス間分散の大きい領域が有効だと考えられ、第5章で述べた、PCAによる特徴領域を用いた個人認証手法を併用する。このように、実用化のシーンに合わせて、本手法をカスタマイズし、従来手法と併用することが有効的だと考えられる。

サーモビジョンカメラは、これまでカメラ自体が非常に高価であったことや、精度が悪かったことが起因し、日常生活で見るものが比較的少なかった。近年は、安価なサーモビジョンカメラが登場したことや、技術革新によるカメラの精度向上に加え、新型コロナウイルス（COVID-19）感染防止に伴う需要増大に伴い、日常的にサーモビジョンカメラに触れることが多くなってきた。このため、顔温度画像は今後さまざまな分野で活用される可能性がある。例えば、照明環境に依存しない点やプライバシーに配慮できる利点を活かし、認知症等による夜間徘徊（施設内／外）や高齢者の見守りとして活用される可能性がある。

本論文では、内部要因や外部要因による温度変化が少ないところを活用した

が、経時的な温度変化を積極的に用いた個人認証も検討していく。例えば、高温領域を用いた個人認証手法では、低温領域の情報を活用できていないため、顔温度特徴を十二分に利用できていない可能性がある。低温領域には、鼻や頬が含まれており、前者は血管、後者は脂肪が皮膚付近に多く存在しており、これらはすぐさま配置が変わることや消失することは考えにくく、個人性特徴を含んでいると想定できる。また、ストレス負荷により鼻温度は下がることが確認できているが、温度低下の傾きや低下温度の大きさ、低下範囲は個人で異なり、個人性特徴を含んでいる可能性がある。

また、今後は認証精度向上に向け、より多くの被験者にて個人認証実験と行うことや、処理範囲の自動化、パターン認識手法の再検討、クラス間分散の小さい領域の顔部品追加、可視画像との併用手法などの検討を行う。

## 7. 結論

本論文では、従来のバイオメトリクス認証で多用される可視画像を用いた個人認証手法に対して、顔温度画像という新たなモダリティ導入の可能性を示し、個人認証に利用した場合の有効性について論じた。

第 1 章にて、まず、非接触型バイオメトリクス市場規模に言及して社会的需要の大きさを説明し、昨今の情報化社会における個人認証の重要性について述べた。次いで、従来の可視画像を用いた顔認証が照明環境に依存してしまうことや、なりすましの問題に対して脆弱であることについて指摘し、それらの課題に対する具体的解法の一つとして顔温度を用いた認証手法を提案し、その優位性と有用性について整理した。とくに、先行研究では明らかにされてこなかった室温変化や風の変化といった外部要因や、精神的ストレス負荷等の内部要因による顔温度変化に対する検証が重要であることを指摘し、これらが生じた状況における顔認証の有効性について確認することが本質的な課題であるとして問題提起した。

第 2 章では、顔の空間的な温度分布と時間的な温度変化に着目し、それらの特性・特徴の分析から、(1)顔の高温領域が室温変化に対して安定していること、(2)顔の高温領域は同一ではなく個人間で差があることを実験的に明らかにした。前者は顔の同一性を担保するものであり、本人拒否率の低減に寄与し得る特性である。また、後者は個人間の識別可能性を示すものであり、他人受入率の低減に効果を発揮する特性である。次いで、これら 2 つの知見を基に、顔の高温領域のみを用いた個人認証手法を提案した。個人認証実験の結果、87.0%の識別率が得られ、室温変化に対してロバストであること、経年変化による影響が少ないこと、化粧による影響が少ないことなどの提案手法の優位点を実験データとともに示した。

第 3 章では、提案手法の有効性を確認するために、顔温度変化に対する要因を内部要因と外部要因に分けて整理した。内部要因の中で、本人の意思に関係なく発生するストレス負荷と、外部要因の中で、一時的な温度変化が大きい直風をそれぞれ代表的な要因とし、これらを変化させた実験を通して、顔温度画像のみを用いた認証手法のロバスト性を実験的に示した。ストレスが負荷される状況下では、交感神経活性化による血管収縮作用に伴う顔温度変化がみられるものの、高温領域には影響が少ないことを明らかにした。また、風が顔に放射される状況下では、対流に伴う顔全体の温度変化があるものの、外気温よりも体内の深部温度に依存している高温領域は、比較的安定した温度分布を維持し、高温領域には影響が少ないことを明らかにした。

第 4 章では、クラス内分散の小さい領域を検討するため、顔部品単位で温度変化を計測し、それぞれ、(1)外気温との相関が見られる領域、(2)外気温変化に依存せず温度変化がほとんど見られない領域、(3)外気温変化に依存せず温度変化する領域、の 3 カテゴリに分類できることを示し、個人によって分類される顔部品が異なることを明らかにした。これら特徴領域のうち、外気温変化にロバストな(2)の領域のみを用いた個人認証手法を示した。個人認証実験の結果、(2)の領域を用いた方式では 90%の識別率が得られたことから、顔領域全体を認証に用いるよりも特徴的な顔領域のみを認証に用いることにより、ノイズ除去にも有効であり、識別率向上に寄与していることを示した。

第 5 章では、クラス間分散の大きい領域を検討するため、主成分分析 (PCA) を用いて顔温度の特徴領域について分析した。この結果、目や口周りの部分に個人性特徴が多く含まれることを明らかにした。顔の高温領域を用いた個人認証手法の精度向上のため、主成分分析を用いて生成したサーモ固有顔を併用することにより、認識率向上を実現した個人認証手法を示した。個人認証実験の

結果、高温領域のみを用いた手法で 69%の識別率が得られる状況下において、PCA を用いた特徴領域を併用することで 79%の識別率が得られ、識別率が約 10 ポイント向上することを示した。

最後に、第 6 章にて本論文全体通して考察し、結論を総括した。本論文の独創性は、バイオメトリクス認証において、従来の可視画像のみを用いた個人認証手法に対して、顔温度画像という新たなモダリティを導入している点にある。この提案手法は、可視画像が弱点とする夜間や照明の強過ぎる環境においても個人認証が可能であり、これらの異なるモダリティを組み合わせた手法は、将来的に発展性、有用性が高いと考えられる。また、本論文の新規性は、顔温度を用いた認証に室温変化にロバストな顔領域のみを用いることにより、顔温度変化に対する内的要因である精神的ストレスおよび外的要因である風に左右されない個人認証手法を提案している点にある。とくに、先行研究で明らかにされてこなかった室温変化に対する顔温度の安定性について、顔の高温領域は安定的であることを明らかにしたこと、顔温度変化に対する要因を内的および外的に分けて整理し、それぞれ代表的な例を挙げて、顔温度変化に対しても提案手法のロバスト性を実験的に明らかにしたことは本論文の成果の一つである。



## 謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方々にお世話になりました．全ての方を網羅することはできませんが，特にお世話になった方のお名前を記し，心より厚くお礼申し上げます．

本研究に関して，愛知県立大学 情報科学部 村上和人教授に終始熱心なご指導とご教示を賜りました．村上教授には，社会人大学院生を志すきっかけをいただき，入学後も，会社生活に配慮いただきながら議論の場を設けていただくなど，研究活動を支えていただきました．心よりお礼申し上げます．

本学位論文の作成にあたり，副査として適切なお指導とご教示を賜った愛知県立大学 情報科学部 何立風教授ならびに山村毅教授に心よりお礼申し上げます．

村上研究室の Wyne Wyne Kywe 氏，白石大輝氏，真鍋ひかる氏，秋元孝夫氏，布目裕司氏，加藤和也氏，鈴木陵馬氏，高木俊宏氏，村瀬悠佑，神谷浩平氏，近藤尚希氏，新保勇人氏，山田早紀氏には，さまざまな議論をさせていただく中で，多くの刺激をいただくと共にご協力いただきました．感謝いたします．

社会人大学院生として研究活動に携わることにご理解をいただくとともに，温かいご支援をいただきました，中部電力株式会社 ITシステムセンター 会計・調達システムグループ長 水谷二郎氏，副長 丹羽恒氏，中部電力パワーグリッド株式会社 システム部 課長 日置祥徳氏に感謝の意を表します．

社会人大学院生として挑戦を志す際に，背中をおしていただき，入学後も気にかけていただいた株式会社中電シーティーアイ 経営戦略本部 部長代理 湊秀之氏，中部電力株式会社 ITシステムセンター 主任 吉川由紀氏，中部電力パワーグリッド株式会社 システム部 副長 若原康将氏に感謝いたします．

最後に、社会人大学院生活を支えてくれた妻の優香、両親の順三、俊江、兄弟の涼太、渉平に感謝いたします。



## 参考文献

- [1] 「令和3年版情報通信白書」(総務省)  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/html/nd124000.html>
- [2] 見市 宏敏, 高丸 祐典, 吉田 裕美, 大江 哲浩, “情報セキュリティソリューション“Misty シリーズ”のラインアップと基盤技術”, 三菱電機技報, Vol.96, No.5, pp.27-31, 2022.
- [3] 「日本初」、「新型コロナ対策」防護服着用時の個人認証が可能に,  
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000019.000046740.html>
- [4] 伊藤 康一, 青木 孝文, “バイオメトリクス研究の最新動向”, 日本写真学会誌, Vol.82, No.2, 2019.
- [5] 辻尾 寿彦, 松西 英恭, “情報システムの認証技術について”, 電気設備学会誌, Vol.30, No.10, pp.21-24, 2010.
- [6] 電子政府行政情報化事業 各国バイオメトリクスセキュリティ動向の調査, IPA 独立行政法人 情報処理推進機構, 2004.
- [7] 鷺見 和彦, “バイオメトリクス個人認証システムとコンピュータビジョン”, 映像情報メディア学会誌, Vol.60, No.11, pp.1755-1761, 2006.
- [8] Contactless Biometrics Market by Offering (Multimodal Biometrics Solution, Hardware, Software, Services), Software (Face Recognition, Iris Recognition), Application, Vertical and Region - Global Forecast to 2027, MarketsandMarkets, 2022.
- [9] M. Krišto, and M. Ivašić-Kos, “An overview of thermal face recognition methods”, 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO),

- Opatija, Croatia, pp.21-25, May 2018.
- [10] Jain, R. Bolle, and S. Pankanti, “Biometrics: Personal Identification in Networked Society”, Kluwer Academic Publishers, 1999.
  - [11] Ghiass, R. S., Arandjelovic, O., Bendada, A., and Maldague, X., “Infrared face recognition: A comprehensive review of methodologies and databases”, *Pattern Recognition*, Vol.47, No.9, pp.2807-2824, 2014.
  - [12] 入來 正躬, 体表面温度生理学, *BME*, Vol.3, No.7, pp.9-15, 1989.
  - [13] I. Pavlidis and P. Symosek, “The imaging issue in an automatic face/disguise detection system”, In *Proceedings of IEEE Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum: Methods and Applications*, pp.15-24, Hilton Head Island, South Carolina, USA, 2000.
  - [14] Yuan-Tsung Chen and Ming-Shi Wang, “Human Face Recognition Using Thermal Image”, *Journal of Medical and Biological Engineering*, Vol.22, No.2, pp. 97-102, 2002.
  - [15] Ross Cutler, “Face Recognition Using Infrared Image and EigenFaces”, *Tech. Rep.*, University of Maryland, 1996.
  - [16] 高松正昭, 境隆一, “可変照明を用いた個人認証”, *情報処理学会研究報告, CSEC*, [コンピュータセキュリティ], 2000(68), 167-172, (2000).
  - [17] 水口正治, 齊藤 剛史, 小西亮介, “顔面熱画像を利用した個人認証”, *電子情報学会ソサイエティ大会講演論文集*, 2007年.基礎・境界, pp.81, 2007.
  - [18] 掘込徹郎, 田中久弥, 井出英人, “顔面サーモグラムの DFT 画像を用いた個人識別法”, *電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集*, 2001 年.情報・システムソサイエティ, pp.179, 2001.
  - [19] 隈元美貴子, “ストレスの評価法に関する研究”, *山陽論叢*, 16, pp.39-48,

2009.

- [20] 鵜飼大介, 村上和人, “顔温度の安定領域を用いた個人認証手法”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.36, No.54, pp.13-16, 2012.
- [21] Daisuke Ukai and Kazuhito Murakami, “Facial Identification Using Thermal Features and Eigenfaces”, Proc. of the 2014 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2014), pp.264-267, Thailand, 2014.
- [22] ナイトビジョンシステムの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.13, No.1, 2001.
- [23] DaisukeUKAI and Kazuhito MURAKAMI, “Recognition of Individual Face Based on the Distribution of Temperature”, Proc. of the 2012 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2012), pp.750-755, 2012.
- [24] K.Nithyakalyani and T.Jayanthi, “Face Recognition as a Biometrics Approach Using Thermal Images”, International Journal of Advances in Science Engineering and Technology, Vol.2, Issue-3, July 2014.
- [25] 渡邊 慎一, 堀越 哲美, 石井 仁, 宇野 勇治, 兼子 朋也, 富田 明美, “サーマルマネキンを用いた風速と風向が人体対流熱伝導率に及ぼす影響に関する研究”, 日本建築学会環境系論文集, Vo.73, No.629, pp.887-893, 2008.
- [26] D.A. Socolinsky and A. Selinger, “Thermal face recognition over time”, In Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, Vol.4, pp.23-26, 2004.
- [27] 源野広和, 松本和夫, 福島清司, “顔面皮膚温による温冷感の評価”, 計測制御学会論文集, Vol.31, No.8, pp.973-981, 1995.
- [28] 清水潤, “血流および発汗調節に関する自律神経機能の顔面と四肢の差異について”, 東北大学歯学雑, Vol.26, No.1, T59-T72, 2007.

- [29] 大川洋子, “ヒトの生体における血流による熱移動の仕組みと体温調節”, 日本伝熱学会誌, Vol.44, No.188, pp.7-11, 2005.
- [30] 森本武利, “ヒトの体温調節”, 織消誌, Vol.44, No.5, pp.256-262, 2003.
- [31] 永島計, 中村(松田)真由美, “ヒトにおける体温の意味と意義”, 早稲田大学人間科学学術院人間科学研究, Vol.25, No.1, pp.21-33, 2012.
- [32] 鵜飼 大介, 二宮 裕貴, 村上 和人, “顔温度分布特徴に基づく個人認証の一手法”, 第17回画像センシングシンポジウム (SSII2011) , IS1-17(CD-ROM)(6pages), 2011.
- [33] Wyne Wyne Kywe, Daisuke Ukai, Kazuhito Murakami, “Feature Extraction from Thermo-image for Identification”, Proceedings of 2013 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia(SISA2013), SS-BioX-4(CD-ROM)(6pages), 2013.
- [34] 鵜飼 大介, 村上和人, “室温変化に安定な顔温度画像を用いた個人認証手法の検討”, 精密工学会誌, Vol.89, No.2, pp.xx-xx, 2023. (掲載予定)
- [35] 隈本美貴子, “ストレスの評価法に関する研究—鼻部皮膚温度と心理状態—”, 山陽論業 Vol.16, pp.39-48, 2009.
- [36] Daisuke UKAI and Kazuhito MURAKAMI, “Extraction of Stable Parts from Thermo-image for Face Authentication”, Proc. of the 2013 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2013), pp.934-939, 2013.
- [37] Daisuke UKAI and Kazuhito MURAKAMI, “An Identification Method Using Thermo-image”, The 19th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2013), pp.155-158, 2013.
- [38] M.Turk and A.Pentland, “Face Recognition Using Eigenfaces”, Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.586-591, 1991.

- [39] M.Turk and A.Pentland, "Eigenfaces for Recognition", Journal of Cognitive Neuroscience, Vol.3, No.1, pp71-86, 1991.



## 研究業績

### I. 学術論文（査読付き）

- (1). 鵜飼 大介, 村上和人, “室温変化に安定な顔温度画像を用いた個人認証手法の検討”, 精密工学会誌, 89 巻, 2 号, pp.201-206, 2023 年 2 月. (本論文の第 2 章および第 3 章にて引用)

### II. 国際会議（査読付き）

- (1). Daisuke UKAI and Kazuhito MURAKAMI, “Recognition of Individual Face Based on the Distribution of Temperature”, Proc. of the 2012 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2012), pp.750-755, Vietnam, Jan.2012. (本論文の第 2 章にて引用)
- (2). Daisuke UKAI and Kazuhito MURAKAMI, “Extraction of Stable Parts from Thermo-image for Face Authentication”, Proc. of the 2013 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2013), pp. 934-939, Japan, Jan.2013. (本論文の第 4 章にて引用)
- (3). Daisuke UKAI and Kazuhito MURAKAMI, “An Identification Method Using Thermo-image”, The 19th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2013), pp.155-158, Korea, Jan.2013. (本論文の第 4 章にて引用)
- (4). Wyne Wyne Kywe, Daisuke Ukai, Kazuhito Murakami, “Feature Extraction from Thermo-image for Identification”, Proceedings of 2013 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia(SISA2013), SS-BioX-4(CD-ROM)(6pages), Japan, Oct., 2013. (本論文の第 2 章にて引用)

- (5). Daisuke Ukai and Kazuhito Murakami, “Facial Identification Using Thermal Features and Eigenfaces”, Proc. of the 2014 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2014), pp.264-267, Thailand, Jan.2014.  
(本論文の第 5 章にて引用)

### III. 国内会議（査読付き）

- (1). 鵜飼 大介, 二宮 裕貴, 村上 和人, “顔温度分布特徴に基づく個人認証の一手法”, 第 17 回画像センシングシンポジウム (SSII2011) , IS1-17(CD-ROM)(6pages), 2011.6. (本論文の第 2 章にて引用)

### IV. 国内会議・研究会

- (1). 鵜飼 大介, 二宮 裕貴, 村上 和人, “顔の特徴的溫度領域を利用した個人認証の一手法”, 映像情報メディア学会技術報告, vol.35, no.33, pp.1-4, 2011.8.
- (2). 鵜飼 大介, 村上 和人, “外気温の変化に安定な顔領域の検討とその顔認証への応用について”, 映像情報メディア学会技術報告, vol.36, no.34, pp.69-72, 2012.8.
- (3). 鵜飼 大介, 村上 和人, “顔温度の安定領域を用いた個人認証手法”, 映像情報メディア学会技術報告, vol.36, no.54, pp.13-16, 2012.12.
- (4). 鵜飼 大介, 村上 和人, “温度画像を用いた顔認識システムと外部要因が及ぼす影響に関する考察”, 第 12 回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム (SBRA2022) , I2-10, pp.115-119, 2022.11.



## V. 受賞

優秀研究発表賞：鵜飼 大介「顔温度の安定領域を用いた個人認証手法」，映像情報メディア学会，平成 25 年 12 月 18 日受賞