

顔面皮膚温を指標とした画像色表現の
客観的評価法に関する研究

1996年6月

源野 広和

目次

論文題目

顔面皮膚温を指標とした画像色表現の

客観的評価法に関する研究

源野 広和

目次

第1章 序論	1
1. 1 本研究の目的と従来研究	1
1. 2 論文の構成	4
第2章 フラクタルブロック符号化による画像の正確な色表現	8
2. 1 まえがき	8
2. 2 カラーコピーシステムの概要	8
2. 3 フラクタルブロック符号化による画像圧縮	9
2. 3. 1 フラクタルブロック符号化の概要	10
2. 3. 2 フラクタルブロック符号化の高速化	11
2. 3. 3 圧縮復元の結果	16
2. 4 まとめ	20
第3章 ファジィ推論を用いた画像色彩の感性表現	21
3. 1 まえがき	21
3. 2 色彩感性の定量表現	21
3. 2. 1 均等知覚色空間	21
3. 2. 2 ファジィ集合による好ましさの定量的表現	22
3. 3 ファジィ推論を用いた色変換	25
3. 3. 1 色変換処理の流れ	25
3. 3. 2 色変換のファジィルール	27
3. 3. 3 色変換の結果	31
3. 4 まとめ	32
第4章 顔面皮膚温の非接触計測	33
4. 1 まえがき	33
4. 2 システム構成と原理	33
4. 3 人物の抽出手法	35

4. 3. 1	赤外画像による人物候補領域の抽出	36
4. 3. 2	カラー情報の付加による人物領域の抽出	40
4. 4	顔面内特定部位の皮膚温計測手法	42
4. 4. 1	顔面内部位認識	42
4. 4. 2	特定部位の皮膚温計測	46
4. 5	まとめ	47
第5章	顔面皮膚温の物理的及び生理的基本変動特性	48
5. 1	まえがき	48
5. 2	温熱刺激に伴う皮膚温変動	49
5. 2. 1	温熱刺激付加実験	49
5. 2. 2	皮膚温と皮膚血流量と深部温の変動	51
5. 2. 3	平均皮膚温と深部温の統合による温冷感の推定	55
5. 3	温熱刺激とストレスに伴う顔面皮膚温変動	58
5. 3. 1	温熱刺激とストレスの同時付加実験	59
5. 3. 2	温冷感の変動	61
5. 3. 3	顔面皮膚温の変動	65
5. 3. 4	顔面皮膚温による温冷感の推定	71
5. 4	まとめ	76
第6章	顔面皮膚温による感覚の客観的評価	77
6. 1	まえがき	77
6. 2	顔面皮膚温によるストレス推定	77
6. 2. 1	ストレス付加実験	78
6. 2. 2	ストレス推定式の作成	81
6. 2. 3	ストレス推定式の検証	84
6. 3	顔面皮膚温による疲労推定	85
6. 3. 1	疲労付加実験	86
6. 3. 2	疲労推定式の作成	90
6. 3. 3	疲労推定式の検証	91

6. 4	まとめ	93
第7章	顔面皮膚温による画像色表現の客観的評価	94
7. 1	まえがき	94
7. 2	画像刺激実験	94
7. 3	画像の好ましさの評価	96
7. 4	まとめ	98
第8章	結言	100
	謝辞	103
	参考文献	104
	学術研究論文等研究業績一覧	108

第1章 序論

1. 1 本研究の目的と従来研究

本研究は、非接触で計測した顔面皮膚温から人間感覚を推定する手法を開発するとともに、開発した感覚推定手法を用いて、カラーコピー系が出力したカラー画像から受ける人間の色彩感覚を客観的に評価することを試みたものである。

カラー画像を複写するカラーコピー系では、まず、原画像に忠実な色表現を行うことが要求される。原画像に忠実な色表現を行うためには、画像データを正確に記憶し復元する必要があるが、カラー画像データは一般に膨大であるため、通常のカラーコピー系では、画像の圧縮記憶が行われる。したがって、高精度の画像圧縮手法の開発が必要であり、従来から、種々の手法の研究が行われてきた。これらの研究は、1991年に CCITT SG8 と ISO JTC1/SC29/WG10 のグループによって国際標準符号化方式 JPEG¹⁾としてまとめられ、開発競争に一応の決着がつけられた。しかし、JPEG 方式は、画像内近隣画素の自己相関が高いという冗長性を利用した圧縮方式であるため、文字や CG 画像等の高周波成分が含まれる画像の圧縮復元には若干のぼけが生じるという欠点があり、さらなる研究の必要性も認識されていた。

フラクタルブロック符号化方式は、画像をフラクタル画像とみなし、分割したブロックごとに、同一画像内で相似画像を探索して符号語を作成する方式であり、A.E.Jacquin によって提案された²⁾。フラクタル画像は、これに先立って、Mandelbrot により提案されており³⁾、画像の一部が画像全体の自己相似画像で表現されることに特徴がある。この画像は、山脈や植物などの自然形状を近似表現できるため、コンピュータグラフィックスや商品デザイン等で広く使用されている。フラクタル画像の生成には、一般に、IFS (Iterated Function System)⁴⁾ が用いられるが、この IFS を画像圧縮に応用した手法が、フラクタルブロック符号化方式である。この方式で圧縮された画像は、原理的に無限の画素密度を持つので、JPEG 方式では高精度な圧縮復元が望めなかった高周波成分の多い画像について

も、高精度で圧縮復元できる。しかし、反面、相似画像を探索する時間がかかりすぎるため、いまだ実用レベルとは言いがたかった。この手法による画像復元は、ほぼリアルタイムで行えるので、実用化のためには、高速で画像圧縮するアルゴリズムの開発が鍵となる。そこで本論文では、このフラクタルブロック符号化における画像圧縮を高速化する手法について記述し、まず、原画像に忠実な色表現を行うことが可能なカラーコピー系を提案する。

カラーコピー系で複写される原画像は、必ずしも実物と等色ではない。例えば、経時変化により変色した原稿や、夕日等の特殊な光源下で撮影された写真は、実物と大きく異なる色彩である。これらの画像については、忠実に色表現するよりも、人間感性に基づいて自動的に色変換して出力する方が望ましい。人間感性を具体化する工学として、感性工学が長町により提案されている⁹⁾が、この感性工学をカラーコピー系に応用した例は著者の知る限り無い。したがって、本論文では、感性工学の手法をカラーコピー系に応用し、原稿よりも好ましいと感じる色表現を行うことが可能なカラーコピー系を提案する。色変換は、人間が知覚する色彩感覚と空間上距離がよく一致する均等知覚色空間 $L^*C_{ab}^*H_{ab}^\circ$ 上でを行い、一般に注目されやすい人物の肌色を変換対象にする。好ましいと感じる肌色に変換するために、まず、官能検査の結果から、空間上各座標において、好ましい肌色をファジィ集合を用いて定量的に表現する。次に、好ましい肌色に変換するために作成したファジィ推論ルールに基づき、上記のファジィ集合を目標として、ファジィ推論による色変換を行う。

しかし、この色変換結果の客観的評価は困難であった。従来研究により、人間感覚を客観的に評価する試みとして、脳波、心電図、皮膚インピーダンス、瞬目等の生理量を計測して評価する手法が提案されている^{6)~10)}が、各種の生理計測が接触式であるため、計測すること自体が被験者に影響を与えるという問題が存在していた。色変換された画像と変色した原画像は、それらを観察する人間に異なるレベルのストレスを与えると考えられるが、電極装着により新たなストレスが付加されれば、正確な評価が困難になる。

したがって、本論文では、比較的動きが少なく非接触計測しやすい顔面皮膚温に着目し、人間に負荷をかけずに顔面皮膚温を自動連続計測する手法と、計測した顔面皮膚温から人間感覚を推定する手法を提案する。

顔面皮膚温は、赤外カメラを用いれば非接触で計測できるが、感覚推定に必要な部位の皮膚温を自動計測するためには、赤外画像の中から人物の顔面を自動認識する技術が必要である。安楽院らは赤外画像から人物領域を抽出する手法を提案している¹¹⁾が、画像内に人物と同じ温度帯域の物体が存在しないという条件が必要である。また、可視画像から人物を認識する方法として、肌色領域のみを認識するクロマキー法¹²⁾がテレビ放送等で使用されているが、画像内に人物と同じ肌色領域が存在しないという条件が必要である。したがって、本論文では、同時に計測した赤外画像と可視画像を用いて、皮膚温領域であり、かつ、肌色領域である領域を顔面領域として認識する手法を提案する。顔面が認識できれば、次に、顔面内で感覚推定に必要な部位を認識する必要がある。舟久保は、認識する部位をあらかじめテンプレート画像として登録しておき、画像内からテンプレート画像と一致度の高い領域を抽出する手法を提案している¹³⁾が、カメラとの位置関係が常に変動する顔面部では、認識すべき部位形状が変化するので、抽出が不可能になる場合がある。したがって、本論文では、可視画像内で輝度値の低い領域を眉毛と目と認識し、それらの部位との相対的な位置関係を利用して特定部位の皮膚温計測を行う。

次に、計測した顔面皮膚温から人間感覚を推定するためには、感覚に伴う顔面皮膚温の変化現象を把握する必要がある。皮膚温は生体からの熱放散反応の結果として決定されるので、環境温度、生体内深部温度、皮膚血流量、発汗量等が皮膚温変化に影響を及ぼす^{14) 15)}。なお、ほぼ中立な温熱環境に空調されている一般オフィス等では、発汗はほとんど生じずに、また、生体内深部温度はほとんど変化しないため、生体からの熱放散量の制御は、主に、皮膚血流量を変化させて行われる。この皮膚血流量の変化は交感神経系の支配を受け、また、各種の感覚は交感神経活動を変化させるため、皮膚温や皮膚血流量を観察すれば、感覚を推定できる可能性がある¹⁶⁾。このような背景の中、各種の刺激を付加した時の皮膚温変化を計測する研究が進められてきた。石井ら¹⁷⁾、岩田ら¹⁸⁾、苗村ら¹⁹⁾は、それぞれ、観劇や騒音などの刺激を加えたときに、鼻部皮膚温が低下することを示唆している。しかし、これらの研究は、刺激下の皮膚温変化傾向を示唆するにとどまっており、皮膚温から感覚を定量的に推定するまでには至っていない。したがって、本論文では、ストレスと疲労を生じさせる実験を行って、主観申告値と

顔面皮膚温間の関係を解析することにより、顔面皮膚温による感覚の定量的評価手法を提案する。また、これに先だって、各種温熱環境下で、各種刺激を付加する実験を行って、顔面皮膚温、皮膚血流量、深部温度の変動特性を把握した結果を報告する。次に、温冷感に関しては、全身の皮膚温を用いて温冷感を評価した例があるが^{20) 21)}、全身皮膚温は、着衣がある場合には非接触皮膚温計測が困難になるという問題がある。また、これらの従来研究は、ストレスのない安静状態で実験を行っているため、ストレスと温冷感の相互関係を把握するまでには至っていない。したがって、本論文では、各種温熱環境下で各種刺激を付加する実験のデータを解析し、ストレスと温冷感の相互関係を明らかにするとともに、ストレスがある状態でも推定可能な顔面皮膚温による温冷感の推定手法を提案する。

本論文で提案する人間に負荷をかけずに顔面皮膚温を自動連続計測する手法と、計測した顔面皮膚温から人間感覚を推定する手法を組み合わせれば、ストレス、疲労、温冷感等の感覚を非接触で評価するシステムを構築できると考えられる。このシステムは、人間に過度のストレスや疲労を付加しない作業環境の設計に役立つだけでなく、ストレスや疲労が原因になる人的事故の防止に役立つと考えられる。また、個人の温冷感を検知して空調の制御を行えば、個々に対応した快適温熱環境の実現が期待できる。

本論文では、顔面皮膚温から人間感覚を推定する手法を用いて、カラーコピー系で原稿よりも好ましいと感じるような色彩に変換した画像を定量的に評価する。色変換された画像と変色した原画像は、それらを観察する人間に異なるレベルのストレスを与えると考えられるため、ここでは、今回提案した顔面皮膚温によるストレスの推定式を用いる。この結果、ストレスの推定値は、色変換した画像と原画像間で有意差が見られ、また、本推定結果と主観申告結果の傾向は一致した。これらの結果から、人間感性に基づいて自動的に色変換を行う技術の有効性が、客観的に実証できたといえる。

1. 2 論文の構成

本論文は、まず、画像を精度よく圧縮復元するフラクタルブロック符号化方式

を高速化する手法を述べ、原画像に忠実な色表現を高速に行うことが可能なカラーコピー系を提案する。次に、変色した原稿を複写する場合を考慮し、人間感性を具体化する感性工学の手法を応用し、人間感性に基づいて自動的に色変換して出力するカラーコピー系を提案する。

次に、このカラーコピー系が出力する色変換後の画像を客観的に評価するために、比較的動きが少なく非接触計測しやすい顔面皮膚温に着目し、人間に負荷をかけずに顔面皮膚温を自動連続計測する手法と、計測した顔面皮膚温から人間感覚を推定する手法を提案する。

最後に、顔面皮膚温による感覚推定手法を用いて、実際に、カラーコピー系で原稿よりも好ましいと感じるような色彩に変換した画像を評価し、人間感性に基づいて自動的に色変換を行う手法の有効性を客観的に実証する。

本論文の構成は、以下の通りである。

第2章では、まず、研究対象としたカラーコピー系のシステム構成を述べる。次に、原画像に忠実な色表現を行うために必要な高精度の画像圧縮手法として、フラクタルブロック符号化方式を取り上げ、この概要と特徴を述べる。この方式は、等分割したブロックごとに、同一画像内で相似画像を探索して符号語を作成するもので、高周波成分の多い画像についても、高精度で圧縮復元ができる。しかし、相似画像を探索する時間がかかりすぎるため、いまだ実用レベルとは言いがたかった。そこで本論文では、フラクタルブロック符号化における画像圧縮を高速化する手法を提案する。この際、復元した画像に知覚できる画質劣化を生じないように、人間の視知覚特性を考慮してアルゴリズムの開発を行った。まず、網膜上の視覚特性を近似する ∇^2G フィルタを用いてエッジ部を検出する。次に、検出したエッジ情報に基づき、4分木手法を用いて可変サイズのブロック分割を行う。ただし、視知覚的に重要度の高いエッジ部は、最小単位でブロック分割する。次に、ブロックの属性を考慮して、選択的に自己相似画像を探索する。また、平坦部の探索には閾値を設定し、誤差を許容した探索を行う。この結果、従来のフラクタルブロック符号化方式と比べて、画像圧縮速度を約2.75倍に高速化でき、圧縮率を約1/1.29倍に改善できた。また、SNRは約0.7dB下がったものの、画像劣化は視覚的に検出できなかった。

第3章では、第2章で提案した忠実な色表現を行うカラーコピー系に、人間感

性に基づいて自動的に色変換して出力する機能を付加する。色変換は、人間が知覚する色彩感覚と空間上距離がよく一致する均等知覚色空間 $L^*Cab^*Hab^\circ$ 上で行い、一般に注目されやすい人物の肌色を変換対象にする。まず、色彩感性を定量化するために、官能検査の結果から、好ましい肌色を示すファジィ集合を定義した。次に、肌色を好ましく見せるための言語表現ファジィルールを作成し、 $L^*Cab^*Hab^\circ$ 空間座標値を用いてルールの数値化を行った。このファジィ推論ルールを、サンプル画像に適用した結果、好ましいと感じる画像が得られた。

第4章では、上記の色変換画像を、顔面皮膚温を用いて客観的に評価するために、まず、人間に負荷をかけずに顔面皮膚温を自動連続計測する手法を提案する。ここでは、開発した非接触皮膚温計測システムの構成と原理を説明した後、続いて、人物を抽出する手法について記述する。人物は、肌色であり、かつ、皮膚温帯域の温度分布を有しているため、同時に計測した赤外画像と可視画像を用いれば、人物領域を抽出できる。次に、人物の顔面内から、感覚推定に必要な部位の皮膚温を自動計測する手法を記述する。眉毛と目は、可視画像内で輝度値の低い領域に該当するため、一定閾値以下の輝度値を有する領域を抽出すれば認識できる。眉毛と目を認識できれば、それらの部位との相対的な位置関係を利用して、感覚推定に必要な部位の温度値を赤外画像から読み取って、特定部位の皮膚温計測を行う。

第5章では、計測した顔面皮膚温から人間感覚を推定する際の基礎となる顔面皮膚温の基本変動特性について記述する。皮膚温は生体からの熱放散反応の結果として決定されるので、環境温度、生体内深部温度、皮膚血流量、発汗量等が皮膚温変化に影響を及ぼす。したがって、まず、環境温度を種々変化させ、これらの生理量を連続計測した結果を述べる。次に、顔面皮膚温による感覚推定の可能性を示唆するために、種々の環境温度下でストレスを付加したときの顔面皮膚温の計測結果について記述する。鼻部の皮膚温は、暑くも寒くもない中立温熱環境下では、ストレスに伴って低下するが、暑い環境や寒い環境下では、ストレスに伴う変動が消失した。この結果は、顔面皮膚温によるストレスの推定が、中立温熱環境以外では不可能であることを示唆するが、一般オフィス環境の空調状況を考慮すれば、利用範囲は広いと考えられる。あわせて、本章では、皮膚温と最も関連する温冷感を取りあげ、ストレスがある場合でも推定可能な顔面皮膚温によ

る温冷感の推定手法を提案する。

第6章では、ストレスと疲労を付加する実験結果について述べ、顔面皮膚温によるストレスと疲労の推定手法を提案する。ストレスを付加する実験の結果、鼻部皮膚温はストレスに伴って低下し、また、額部皮膚温は安静時の鼻部皮膚温の代用値として使用できることが明らかになった。この結果から、額部皮膚温と鼻部皮膚温の差を用いるストレス推定式を提案し、第5章で記述した実験データを用いて本推定式を検証した。この結果、ストレス推定値とストレス主観申告値の関係は、統計的に有意な相関関係にあり、良好にストレスを推定できることがわかった。また、疲労を付加する実験の結果、鼻部皮膚温は作業開始とともに低下し、その後、不規則に変動するものの、安静時のレベルまで復帰することはない。ここでは、ストレスの蓄積によって疲労が生じると仮定し、推定したストレス度の積算値を疲労度と捉えて、疲労推定式を提案する。

第7章では、第6章で提案した顔面皮膚温によるストレス推定手法を用いて、カラーコピー系で原稿よりも好ましいと感じるような色彩に変換した画像を定量的に評価する。色変換された画像と変色した原画像を観察する実験の結果、ストレスの推定値は、色変換した画像と原画像間で有意差が見られ、また、本推定結果と主観申告結果の傾向は一致した。これらの結果から、人間感性に基づいて自動的に色変換を行う技術の有効性が、客観的に実証できたといえる。

最後に、第8章では、本研究の総括と今後の課題について述べる。

第2章 フラクタルブロック符号化による画像の正確な色表現

2.1 まえがき

本章は、画像を精度よく圧縮復元するフラクタルブロック符号化方式を高速化する手法を述べ、原画像に忠実な色表現を高速に行うことが可能なカラーコピー系を提案する。

本章の第2節では、研究対象としたカラーコピー系のシステム構成を述べる。次に、第3節では、原画像に忠実な色表現を行うために必要な高精度の画像圧縮手法として、フラクタルブロック符号化方式を取り上げ、まず、この概要と特徴を述べる。この方式は、等分割したブロックごとに、同一画像内で相似画像を探索して符号語を作成するもので、高周波成分の多い画像についても、高精度で圧縮復元ができる。しかし、相似画像を探索する時間がかかりすぎるため、いまだ実用レベルとは言いがたかった。したがって本節では、フラクタルブロック符号化における画像圧縮を高速化する手法を提案する。

2.2 カラーコピーシステムの概要

研究対象としたカラーコピー系のシステム構成を図2-1に示す。原画像は、カラーキャナによりRGB (Red, Green, Blue) データに分解され、画像圧縮復元部に送信される。画像圧縮復元部では、送信されたRGBデータを符号化し、画像メモリに記憶する。ここで、一枚の画像を単に複写する場合は、カラーキャナで分解したRGBデータを、順次、画像処理部に送信するため、画像の圧縮記憶は不要である。しかし、本システムは、他機器への画像転送や複数枚の画像の合成を行うことを想定しているため、圧縮記憶が不可欠である。一般に、画像の圧縮率を高くするほど、画像メモリは少なくできるが、反面、画質劣化を生じる。したがって、原画像に忠実な色表現を行うカラーコピー系の開発には、種々の画像を

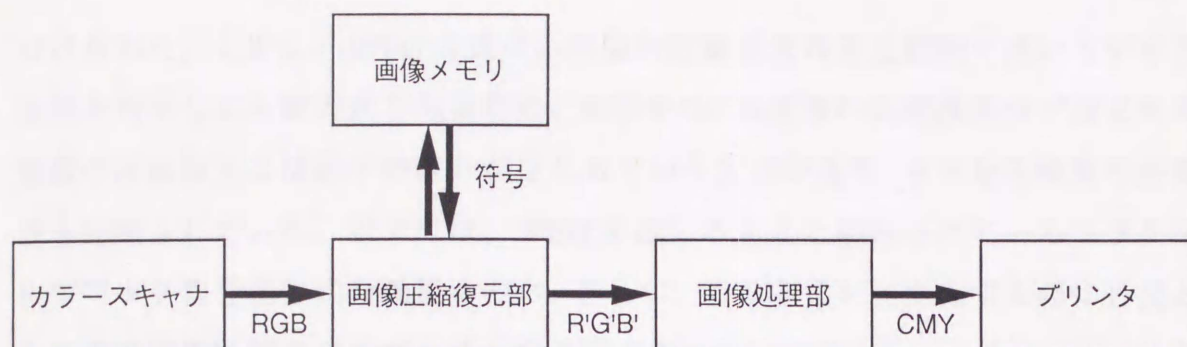


図 2-1 カラーコピーシステムの構成

圧縮復元したときの画質劣化を最小に抑え、かつ、高速、高圧縮率で画像圧縮を行うアルゴリズムが必要になる。このアルゴリズムの詳細は、2.3節で述べる。

復元された画像のR'G'B'データは、画像処理部に転送され、プリンタ入力用のCMY (Cyan, Magenta, Yellow) データに変換された後、プリンタ部へ送信される。本システムでは、この画像処理部で種々の処理が可能であるが、基本的な処理は、R'G'B' → CMY 変換である。カラーキャナのRGBフィルタとプリンタのCMYインクは、完全な補色関係ではないため、一般に、この関係を補正するマスキング処理が行われる²²⁾。また、プリンタの印写特性に応じて、各種の信号処理が行われる。本システムの場合、昇華型熱転写プリンタを使用しているため、主走査方向の不均一印写濃度、サーマルヘッドの電圧降下による低濃度印写、及び、サーマルヘッドの蓄熱状態による印写濃度変化を補正する処理を行っている²³⁾。さらに、本システムでは、人間感性に基づく色変換処理が可能であるが、この詳細は、第3章で述べる。

2.3 フラクタルブロック符号化による画像圧縮

ここでは、原画像を忠実に再現するカラーコピー系の開発を行うために、種々の画像を圧縮復元したときの画質劣化を最小に抑え、かつ、高速、高圧縮率で画像圧縮を行うアルゴリズムの提案を行う。

画像圧縮の研究は、1991年にCCITT SG8とISO JTC1/SC29/WG10のグループによって国際標準符号化方式JPEG¹⁾としてまとめられ、開発競争に一応の決着が

つけられた。しかし、JPEG方式は、画像内近隣画素の自己相関が高いという冗長性を利用した圧縮方式であるため、文字やCG画像等の高周波成分が含まれる画像の圧縮復元には若干のぼけが生じるという欠点があり、さらなる研究の必要性も認識されていた。以下では、JPEGを越える方式と期待されているフラクタルブロック符号化方式の概要をのべ、さらに、この方式を実用化する際に必要となる高速画像圧縮のアルゴリズムを提案する。

2. 3. 1 フラクタルブロック符号化の概要

フラクタル画像（自己相似画像）は、Mandelbrot³⁾により提案され、山脈や植物などの自然形状生成モデルとしてCG等で利用されている。フラクタル画像の生成は、IFS（Iterated Function System）⁴⁾を用いる手法が一般的であるが、この手法を画像圧縮に応用する手法として、フラクタルブロック符号化方式（fractal block coding）²⁾が提案されている。この方式は、図2-2に示すように、一般の画像をフラクタル画像とみなし、等分割したブロック（値域）ごとに、同一画像内で相似画像（変域）を探索して符号語を作成するもので、以下に示すような特長がある。

まず第一の特長は、JPEG方式では高精度な圧縮復元が望めなかった高周波成分の多いカオス的な画像（ディザ画像、スクランブル画像等）についても、高精度な圧縮復元が可能な点である。例えば、2次元平面に投影されたカオスアトラクタはフラクタル性を有しているため、この符号化方式が適している。この場合の符号化は、カオスアトラクタを生成するカオス式を符号化しているとみなせる。

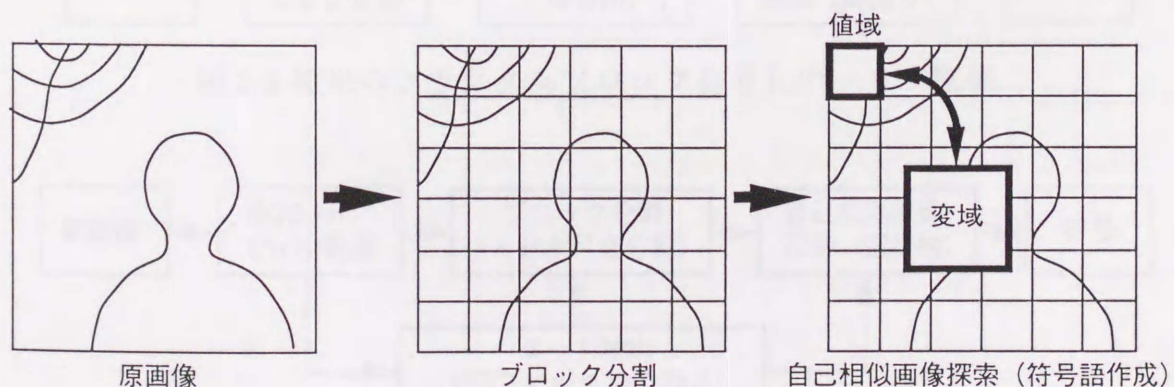


図 2-2 フラクタルブロック符号化の手順

2番目の特長は、復元される画像が、ブロックごとの自己縮小写像を反復して生成されるので、原理的に無限の画素密度をもつ点である。実際には、ディスプレイやプリンタ等の表示ツールの解像度によって、復元される画像の画素密度は制限されるが、拡大復元を行う場合にも緻密な画像が得られるという利点がある。

上記のような特長を持つフラクタルブロック符号化方式を用いて、白黒自然画像(8bpp)の圧縮復元を行った場合、JPEG方式とほぼ同程度の画質、圧縮率が得られている^{24) 25)}。

しかし、反面、相似画像を探索する時間がかかりすぎるため、いまだ実用レベルとは言いがたい。著者は、ITEデジタル標準画像の天気予報²⁶⁾の主要部分256×256画素を輝度データに変換した画像に対し、SUN SPARC station 330を用いて画像圧縮を行ったが、約40時間要した。

この手法による画像復元は、ほぼリアルタイムで行えるので、実用化のためには、高速で画像圧縮するアルゴリズムの開発が鍵となる。そこで以下では、このフラクタルブロック符号化における画像圧縮を高速化する手法を提案する。

2. 3. 2 フラクタルブロック符号化の高速化

画像圧縮の高速化を行う場合、復元した画像に、知覚できる画質劣化を生じないことが必要である。したがって、人間の視知覚特性を考慮したアルゴリズムの開発を行った。従来のフラクタルブロック符号化手法と本手法のフローの概要を図2-3と図2-4に示す。ここで、原画像は、ITEデジタル標準画像の天気予報の主

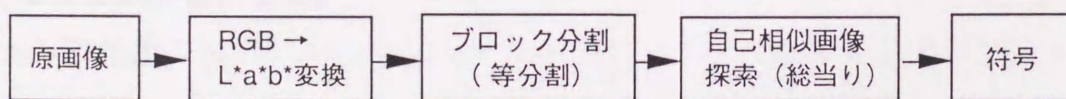


図2-3 従来のフラクタルブロック符号化のフロー概要

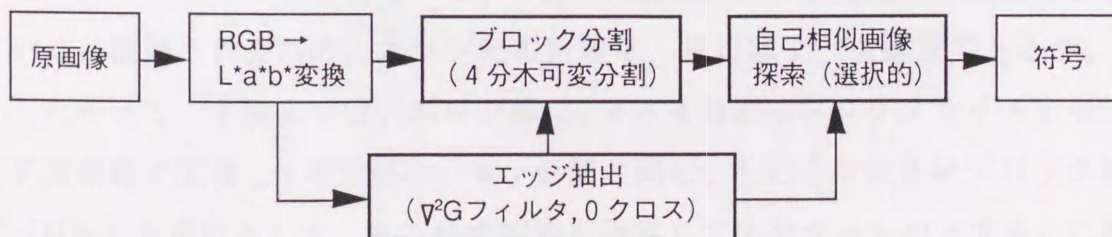


図2-4 本手法を用いたフラクタルブロック符号化のフロー概要

要部分 256 × 256 画素を用いている。以下では、フロー内各処理の詳細を述べる。

(1) RGB → L*a*b* 変換

ITE デジタル標準画像は、人間の視覚特性との一致度が低い RGB 空間上データとして記述されているため、2乗誤差を評価関数に用いても、知覚する画質劣化との対応が不十分である。したがって、視覚特性と一致度の高い CIE (1976) L*a*b*²⁷⁾ の座標値に変換した後に画像圧縮を行う。なお、本節の目的は、本手法の優位性を示すことであるため、従来法との比較は L* (輝度値) のみで行う。a* と b* (色度値) も、同様の手法で圧縮が可能である。

ITE デジタル標準画像を記述している RGB データには、受像管の発光輝度と入力信号との非線形関係を補正する γ 補正が施されているため、そのままでは輝度値に変換できない²⁶⁾。したがって、まず、RGB 値に逆 γ 補正を行い、逆 γ 補正後の R"G"B"を用いて、次式により Y を求める。ここで Y は、XYZ 表色系²⁷⁾ の Y である。

$$Y = 0.2988 R'' + 0.5868 G'' + 0.1144 B'' \quad (2-1)$$

次に、Y から L* への変換は、次式で行う。

$$L^* = 116 (Y / Y_n)^{1/3} - 16 \quad (2-2)$$

ここで、Y_n は標準の光によって決まる係数であり、通常は 100 を用いる。ただし、式 (2-2) の変換と上記の γ 補正は、ほぼ一致しているため、輝度値として、L* を用いなくて、Y の γ 補正值を用いても近似的には問題がない²⁸⁾。

上記の変換により、画像データを、視覚特性との一致度が高い輝度値 L* で表現することが可能になる。

(2) エッジ抽出

フラクタルブロック符号化は、符号化の単位であるブロックサイズが小さいほど、誤差が小さくなるが、反面、圧縮率が低くなるので、通常 4 × 4 画素程度のブロックサイズを単位としている。一方、人間は、エッジ情報から画像を知覚していると推察されるため、エッジ部の再現は、平坦部よりも重要である²⁸⁾。

したがって、本論文では、エッジ部は、4 × 4 画素のブロックサイズを単位として高精度で圧縮し、平坦部は、エッジ部と同じ、もしくは大きいブロックサイズ (可変) を単位として、ある程度誤差を許容して圧縮するものとする。これにより、SN 比は低くなるが、視知覚的な劣化が生じない画像が、従来よりも高圧縮

率で得られると予測できる。また、ブロック数の低減により圧縮時間の短縮が望める。

ここで、人間が知覚するエッジを高精度で検出することが必要になる。

人間の視覚経路には、方向と空間周波数に選択的な4種のチャンネル(N,S,T,U)が存在し、これらは大きさの異なる ∇^2G フィルタで近似される。また、人間が知覚するエッジは、これらの ∇^2G フィルタを畳み込んだ画像の0クロス部を算出することによって求められる²⁹⁾。したがって、本論文では、視覚特性を近似するエッジ検出フィルタとして、この ∇^2G フィルタを用いる。ただし、

$$\nabla^2G(r) = (r^2 - 2\sigma^2) / (2\pi\sigma^6) \cdot \exp(-r^2/2\sigma^2) \quad (2-3)$$

人間が知覚する最小サイズのエッジは、Nチャンネルによって検出されるので、以下では、Nチャンネルを近似する ∇^2G フィルタの大きさ σ を考察する。

∇^2G 演算を行う網膜上の2次元受容野中心部の直径は、Nチャンネルで4.38'であるので、500mm離れて画像を観察する場合、画像上での距離は、

$$D = 500 \tan(4.38') = 0.637 \text{mm} \quad (2-4)$$

画像を6.4dots/mmのプリンタで印写するとして、画像上での距離を画素数で表すと、

$$D = 4.08 \text{dots} \quad (2-5)$$

$D = 2 \cdot 2^{1/2} \sigma$ より、

$$\sigma = 1.44 \text{dots} \quad (2-6)$$

以上より、このサイズの ∇^2G フィルタを畳み込んだ画像の0クロス部を算出すれば、人間が知覚できる最小のエッジを検出することができる。図2-5に輝度画像(原画像)、図2-6に上記の手法により検出したエッジ画像を示す。図2-6から、



図2-5 輝度画像 (原画像)



図2-6 エッジ画像

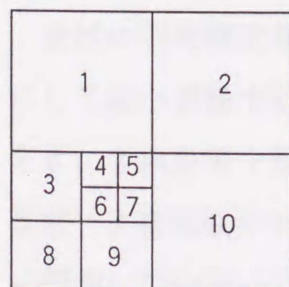
精度良くエッジが検出できていることがわかる。

(3) 4分木可変ブロック分割

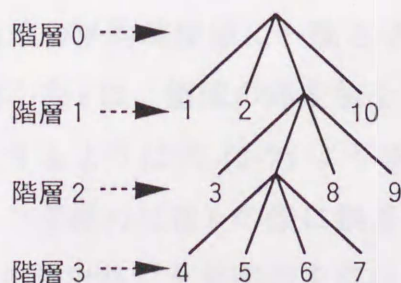
上記したように、本論文では、視知覚的に重要度の高いエッジ部は、 4×4 画素を単位としてブロック分割し、平坦部は、エッジ部と同じ、もしくは大きいブロックサイズ（可変）を単位としてブロック分割する。ここでは、検出したエッジ情報にもとずき、4分木 (quadtree)³⁰⁾³¹⁾を用いて効率よく画像を分割する。今回用いた4分木ブロック分割の手法を以下に示す。

まず、上記の手法で検出したエッジが、画像全体について存在するかどうかを調べ、存在すれば、十字型の4等分割を行う。次に、分割した領域について、順次、エッジが存在するかどうかを調べ、存在すれば、その領域をさらに1/4に分割する。もし、エッジが存在しなければ、その領域は平坦部であるとし、その領域についての分割は打ち切る。この分割操作は、 4×4 画素のブロックサイズ（最下層）になるまで繰り返される。

4分木ブロック分割の例を図2-7に示す。(a)のように画像が分割された場合、(b)に示す4分木構造で一意的に分割状態が表現されるので、(b)に示す数字の順に階層情報のみを記憶しておけば、(a)に示す分割状態を一意的に再構成することができる。したがって、各ブロックの位置情報は不要となり、分割状態を記憶するための情報は、他の方式と比べて少なくなる。例えば、今回用いた原画像は 256×256 画素なので、階層は7段階となり、また、 4×4 画素のブロックサイズ（最下層）においては、エッジ部と平坦部の2種類となる。したがって、これらを区別して分割状態を記憶するために、各ブロックごとに合計3 bitの階層情報のみが



(a) 分割例



(b) 階層と4分木構造

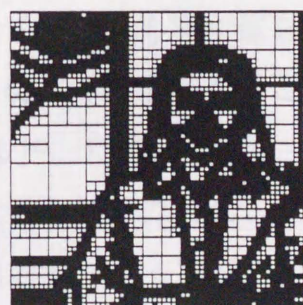


図2-8 4分木ブロック画像

図2-7 4分木ブロック分割の例

必要となる。

以上の手法を用いれば、画像は、一定サイズのエッジブロックと、異なるサイズの平坦ブロックに分割されることになる。図2-6のエッジ情報にもとずいて作成した4分木ブロック画像を図2-8に示す。ここで、エッジブロックは黒ベタで表現している。図2-8から、エッジ部については、小さなブロックサイズで、また、平坦部については、エッジ部と同じ、もしくは大きいブロックサイズで、良好に分割できていることがわかる。

(4) 選択的自己相似画像探索

ここでは、同一画像内でブロックごとの相似画像を探索し、符号語を作成する手法を述べる。基本的には、3次元縮小アフィン変換を順次行って、2乗誤差が最小となる相似画像領域と、最適な3次元アフィン変換のパラメータを求めることになる。具体的には、探索する領域を変域、符号語を作成するブロックを値域と呼ぶことにすると、以下の手順となる。

(a) 変域サイズの縮小

まず、変域サイズを縮小し、値域の画素数と一致させる。本論文では、探索数を制限するため、縮小率は面積比で1/4に固定した。また、変域サイズの縮小には、対象4画素の平均値を用いた。

(b) 変域の画素配列の変換

次に、縮小した変域の画素配列を、左右，上下，第1第2対角線反転、90°，180°，270°回転、無変換の8通りに順次変換し、変換する都度、(c)にそって2乗誤差を算出する。

(c) 変域の輝度値の変換、2乗誤差の算出

変域の平均輝度値を値域の平均輝度値に一致させ、その後、平均輝度値を基準にして縮小変換する。縮小率 r は、値域の輝度値を x_i 、変域の輝度値を f_i としたとき、2乗誤差を最小にするように式(2-7)より求める³²⁾。ただし、 r は、画像復元(3次元縮小アフィン変換の反復)の際に誤差の拡散を防ぐために、 $-1 < r < 1$ に制約している。この r の算出後に2乗誤差を算出する。

$$r = \frac{\sum x_i f_i}{\sum f_i^2} \quad (2-7)$$

以上の手順により、各値域ブロックごとに2乗誤差が最小となる変域およびパラメータが求まる。最終的に得られる符号語は、各値域ブロックごとに、変域の

端点を示すX,Y座標 (8×2bit)、変域の画素配列の変換パターン (3bit)、変域の輝度縮小率 r (8bit)、値域の平均輝度 (8bit)、及び、値域の階層情報 (3bit) の合計 38bit となる。

ここで、上記の探索方法は総当り法であるため、ブロックサイズを4×4画素に固定した従来手法を用いる場合、約 2.03×10^9 回の探索回数となり、膨大な計算時間が必要であった。

そこで、本論文では、すでに得られているエッジ情報にもとずき、選択的に自己相似画像を探索する手法を提案する。

すなわち、値域にエッジを含む場合は、エッジを含む変域のみを探索し、値域にエッジを含まない場合は、平坦部の変域のみを探索する。この選択的探索により、探索回数は約 1/2 になると予想され、圧縮時間の短縮が期待できる。4分木可変ブロック分割とこの手法を併用した手法を、手法 a と呼ぶことにする。

さらに、視知覚的には、平坦部の再現性はエッジ部ほど重要ではないことを利用して、平坦部の探索回数を低減する手法を提案する。

すなわち、平坦ブロックの探索においては、2乗誤差の許容値 (閾値 Th) を設定し、一定閾値 Th 以下の変域を検出すれば以後の探索を打ち切る。この手法により、さらなる圧縮時間の短縮が期待できる。手法 a とこの手法を併用した手法を、手法 b と呼ぶことにする。

2. 3. 3 圧縮復元の結果

フラクタルブロック符号化手法によって符号化された画像は、各値域ブロックごとに記憶された符号語に基づく3次元縮小アフィン変換を、反復して復元される。具体的手法を以下に示す。

まず、初期画像を任意の輝度値で表現する。各値域ブロックごとに平均輝度値を記憶しているので、初期画像がどんな画像であっても、最終的に得られる復元画像には影響しない。

次に、各値域ブロックごとに、対象となる変域の2次元アフィン変換、すなわち、変域サイズの縮小、および、画素配列の変換を行う。続いて、変域の平均輝度値を値域の平均輝度値に一致させ、その後、平均輝度値を基準にして、縮小率 r で縮小変換する。この手順を繰り返すことにより、画像の画素密度は徐々に上

昇し、画像が復元されてゆく。この手順を無限に繰り返せば、原理的には無限の画素密度をもつ画像が復元できるが、ディスプレイやプリンタ等の表示ツールの解像度によって、表現できる画素密度は制限される。

従来法、手法a、手法bを用いて作成した符号語に基づいて画像復元した時の、反復回数とSN比の関係を図2-9に示す。この場合の初期画像は、全画面で輝度値0とした。図2-9より、SN比は、各手法とも4回の反復で、ほぼ最高値に達していることがわかる。

従来法、手法a、手法bを用いて圧縮復元した画像を、図2-10~2-12に示す。これらの画像は、昇華型プリンタを用いて、輝度値 L^* を精度良く再現している²²⁾²³⁾。また、手法bの閾値 Th は、ブロックごとのR.M.S. (Root Mean square) で、3.065 (エッジ部の平均値) に設定した。

図2-10~2-12の各画像は、目視検査では全く見分けがつかない。これより、今

回開発した画像圧縮の高速化手法は、復元画像に知覚できる画質劣化を生じさせない手法であるといえる。

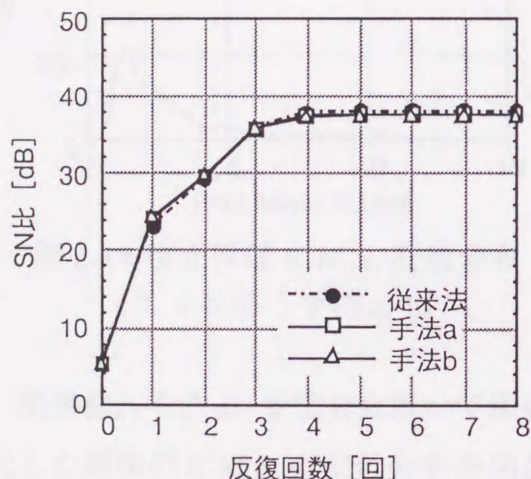


図 2-9 復元時の反復回数と SN 比の関係



図 2-10 復元画像 (従来法)



図 2-11 復元画像 (手法 a)



図 2-12 復元画像 (手法 b)

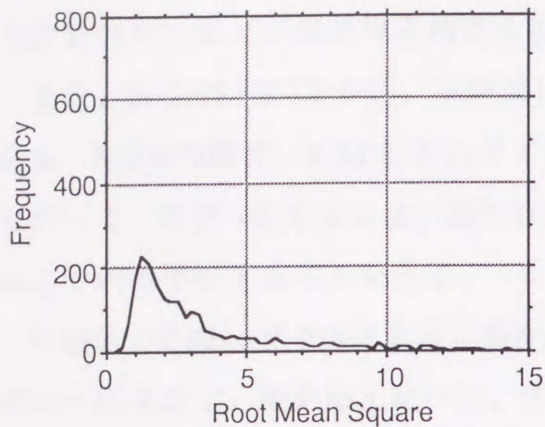


図 2-13 復元画像 R.M.S. 度数分布
(エッジ部：従来法)

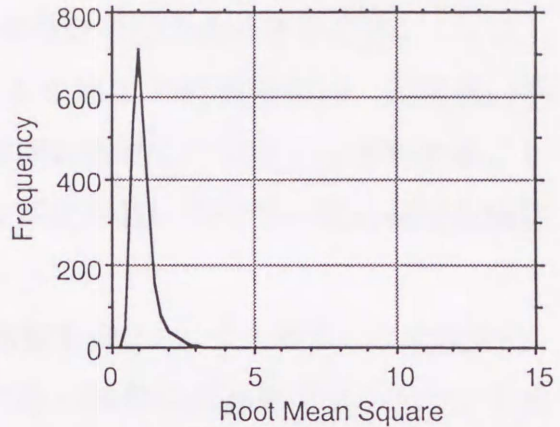


図 2-15 復元画像 R.M.S. 度数分布
(平坦部：従来法)

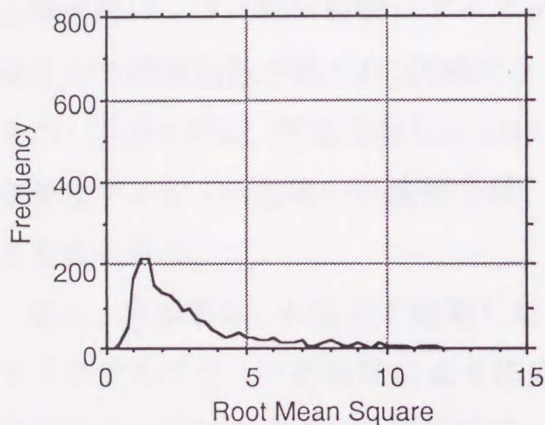


図 2-14 復元画像 R.M.S. 度数分布
(エッジ部：手法 a, b)

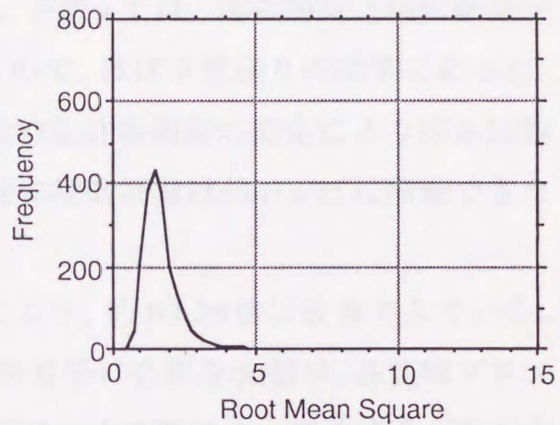


図 2-16 復元画像 R.M.S. 度数分布
(平坦部：手法 a)

従来法、手法 a、手法 b を用いて圧縮復元した画像の R.M.S. の度数分布を図 2-13 ~ 2-17 に示す。ここで R.M.S. は 4×4 画素のブロックサイズごとに算出し、0.25 間隔で度数を数えた。図 2-13 と 2-14 はエッジ部、図 2-15 ~ 2-17 は平坦部の度数分布である。エッジ部における手法 a と手法 b の度数分布は同じであるので、区別せずに示している。

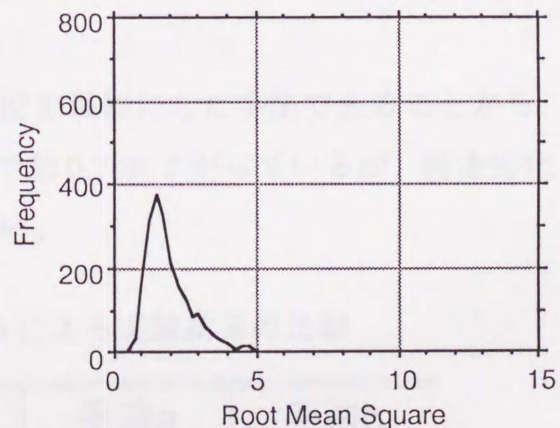


図 2-17 復元画像 R.M.S. 度数分布
(平坦部：手法 b)

図 2-13 と 2-14 から、エッジ部における R.M.S. の度数分布は、各手法ともほぼ同じ分布をしていることがわかる。したがって、手法 a と手法 b は、視知覚的に

重要度の高いエッジ部の復元精度を低下させない手法であるといえる。

また、図 2-15~2-17 から、平坦部における R.M.S. の度数分布は、従来法、手法 a、手法 b の順で、R.M.S. が大きくなる方向に推移していることがわかる。したがって、手法 a と手法 b は、視知覚的に重要度の低い平坦部の復元精度を犠牲にしている手法であるといえる。

従来法、手法 a、手法 b による実験結果の比較を表 2-1 にまとめる。この表から、画像圧縮速度は、従来法と比べて、手法 a で約 1.96 倍に高速化でき、また、手法 b で約 2.75 倍に高速化できていることがわかる。フラクタルブロック符号化における画像圧縮は、各値域に対する自己相似画像の探索に最も時間を要するので、圧縮速度は、ほぼ探索回数によって決まる。手法 a では、選択的自己相似画像探索により探索回数が約 1/2 に削減できているので、ほぼ予想通りの結果であった。また、手法 b では、平坦部値域における 2 乗誤差許容閾値の設定により探索回数が増えるが、今回用いた閾値では、結果的に探索回数は約 1/2.75 に削減できたと考えられる。

次に、圧縮率は、本論文で提案した手法により、約 1/1.29 倍に改善できている。フラクタルブロック符号化により作成した符号語に必要な bit 数は、各値域ブロックごとに一定であるので、圧縮率は、値域ブロックの数によって決まる。本手法 a, b の値域ブロックの分割は、上記の 4 分木可変ブロック分割により行っているため、従来法と比べて平坦部の値域ブロック数が少なくなっており、この結果、圧縮率が改善できたといえる。

また、SN 比は、本手法が平坦部の再現精度を犠牲にした手法であることから、従来法と比べて、手法 a で約 0.5dB、手法 b で約 0.7dB 下がっているが、画像劣化は視覚的に検出できていないので問題はない。

表 2-1 従来法、手法 a、手法 b による実験結果の比較

	従来法	手法 a	手法 b
SNR[dB]	38.1	37.6	37.4
圧縮時間[時間]	40.2	20.5	14.6
圧縮率	1/3.66	1/4.71	1/4.71
主観評価	良	良	良

なお、今回提案した手法をハードウェア化する場合、例えば Multiplier-Accumulator チップ (TRW LSI Products 製) を並列に用いる構成なら、約 100 秒以内で画像圧縮できる試算が得られている。したがって、図 2-1 に示したカラーコピー系で、他機器への画像転送や複数枚の画像の合成を行う場合、最大 100 秒の待ち時間で処理が完了する。本手法による画像復元はリアルタイムで行えるため、本手法の実用性は高いといえる。

2. 4 まとめ

本章では、研究対象としたカラーコピー系のシステム構成を述べるとともに、原画像に忠実な色表現を行うために必要な高精度の画像圧縮手法として、フラクタルブロック符号化方式を取り上げ、この高速化手法を提案した。この結果、知覚できる画質劣化を生じずに、画像圧縮速度を従来法と比べて約 2.75 倍に高速化できることが明らかになった。今回提案した手法をハードウェア化すれば、他機器への画像転送や複数枚の画像の合成を行う場合でも、最大 100 秒の待ち時間で処理が完了するシステムが構築できると推察できる。本手法による画像復元はリアルタイムで行えるため、本手法の実用性は高いといえる。

次章では、本章で提案した忠実な色表現を行うカラーコピー系に、人間感性に基づいて自動的に色変換して出力する機能を付加する提案を行う。

第3章 ファジィ推論を用いた画像色彩の感性表現

3.1 まえがき

第2章では、原画像に忠実な色表現を行うことが可能なカラーコピー系を提案した。しかし、カラーコピー系で複写される原画像は、必ずしも実物と等色ではなく、これらの画像については、忠実に色表現するよりも、人間感性に基づいて自動的に色変換して出力する方が望ましい。したがって本章では、人間感性を具体化する感性工学の手法を応用し、カラーコピー系に、人間感性に基づいた色変換機能を付加する提案を行う。この色変換は、人間が知覚する色彩感覚と空間上距離がよく一致する均等知覚色空間 $L^*Cab^*Hab^\circ$ 上で行い、一般に注目されやすい人物の肌色を変換対象にする。

本章の第2節では、まず、好ましい肌色という色彩感性を定量化するために、官能検査の結果から、 $L^*Cab^*Hab^\circ$ の各座標上で、好ましい肌色を示すファジィ集合を定義する。このファジィ集合は、必ずしも実際の肌色の分布集合ではなく、人間が好ましいと感じる肌色を示す集合である。第3節では、定義した肌色集合を目標として、ファジィ推論を用いた色変換手法を提案する。この色変換の目的は、原画像や実物の肌色を再現することではなく、人間が見て好ましく感じる肌色を表現することである。具体的には、肌色を好ましく変換するための言語表現ファジィルールを作成し、 $L^*Cab^*Hab^\circ$ 空間座標値を用いてルールの数値化を行う。また、最後に、今回提案した色変換手法をサンプル画像に適用し、処理結果の検証を行う。

3.2 色彩感性の定量表現

3.2.1 均等知覚色空間

カラーコピー系で好ましいと感じる印写物を得るためには、まず、人間がどの

ような色彩に対して好ましいと感じるかを分析し、好ましいと感じる色彩を定量的に表現しておく必要がある。この際に使用する色空間は、人間の知覚する色の心理差と空間上での数的色差がよく一致するものを選ばなければならない。

したがって、本論文では、国際照明委員会が均等知覚色空間として推奨する CIE (1976) $L^*a^*b^*$ 空間の円筒座標系である

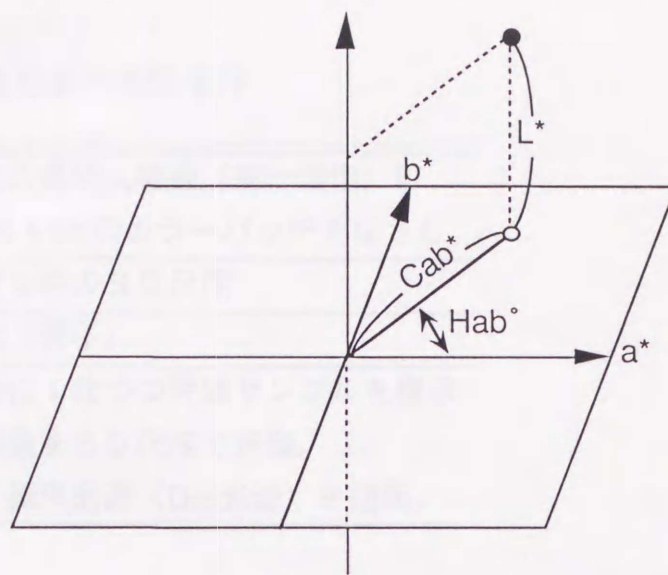


図 3-1 $L^*Cab^*Hab^\circ$ 空間の概要

$L^*Cab^*Hab^\circ$ 空間²⁷⁾上で、色彩感性の定量化を行う。図 3-1 にこの空間の概要を示す。 L^* 、 Cab^* 、 Hab° の各座標は、それぞれ明度（輝度）、彩度、色相を表す。以下では、色彩感性の定量化法について述べる。

3. 2. 2 ファジィ集合による好ましさの定量的表現

本論文では、人物の肌色を変換対象にするため、まず、 $L^*Cab^*Hab^\circ$ 空間上で肌色に相当する 24 枚のマンセルカラーパッチ³³⁾を選び、50 名の被験者を対象に官能検査⁵⁾を行った。官能検査の実験条件を表 3-1 に、使用したカラーパッチの $L^*Cab^*Hab^\circ$ 値を表 3-2 に、また、SD 尺度を図 3-2 に示す。SD 尺度とは、ある対象のもつ内容を多次元的に表現するために、数種の形容詞反対語対を両端においた評定尺度により、ある対象の印象を各尺度上に評定するものである。ここで、各尺度の中央がどちらとも言えない値、中央より離れるにしたがって強い印象となる。評点は、一番左を 5 点、一番右を 1 点とした。

本論文では「好ましい肌色—好ましくない肌色」のテスト結果のみを処理対象とし、数量化理論 I 類を用いて解析した。数量化理論 I 類は、1 つの目的変数といくつかの説明変数とのあいだで、重回帰分析を行う理論である。今回、SD 尺度の 5 段階評点を目的変数、 L^* 、 Cab^* 、 Hab° の各値を説明変数として解析した結果、次式のような重回帰式を得た。

表 3-1 官能検査の実験条件

評価サンプル	24枚の透明人物画（同一画像）に、 5 cm×4 cmのカラーパッチをはさむ。
使用した尺度	4尺度5件のSD尺度
被験者	50名（男子）
検査方法	被験者に1枚ずつ評価サンプルを提示し、印象をSD尺度で評価。 照明は標準光源（D65光源）を使用。

表 3-2 使用したカラーパッチのL**Cab***Hab*° 値

カラーパッチ No.	L*	Cab*	Hab°	カラーパッチ No.	L*	Cab*	Hab°
1	90.46	12.76	62.97	13	90.47	12.91	75.28
2	81.12	9.87	62.50	14	81.59	25.03	73.69
3	81.12	22.54	65.57	15	72.58	24.84	70.90
4	81.12	33.43	64.03	16	62.29	24.52	70.09
5	71.31	23.18	63.34	17	91.18	10.02	48.32
6	61.46	23.39	61.79	18	81.08	21.08	46.21
7	90.85	10.62	58.89	19	71.67	20.14	46.08
8	80.89	9.77	57.50	20	62.60	20.94	46.21
9	80.89	22.24	56.43	21	90.71	14.63	82.85
10	80.89	33.53	55.05	22	81.15	26.27	81.24
11	71.88	22.05	57.04	23	81.25	18.03	30.49
12	61.43	21.07	54.51	24	82.14	18.61	38.32

5 4 3 2 1

好ましい肌色 好ましくない肌色
 健康的な肌色 健康的でない肌色
 若々しい肌色 若々しくない肌色
 気品ある肌色 気品のない肌色

図 3-2 使用したSD尺度

$$\begin{aligned}
Y = & -0.9754X_{11} - 0.2422X_{12} + 0.5495X_{13} + 0.4255X_{14} \\
& - 0.7143X_{21} + 0.8597X_{22} - 0.0667X_{23} \\
& - 0.5143X_{31} - 0.3143X_{32} + 0.5857X_{33} + 0.6857X_{34} + 0.3357X_{35} - 0.1143X_{36} - 0.6643X_{37} \\
& + 2.5192
\end{aligned} \tag{3-1}$$

ここで、Yは、好ましさの推定値であり、 $X_{11} \sim X_{14}$ 、 $X_{21} \sim X_{23}$ 、 $X_{31} \sim X_{37}$ は、説明変数がそれぞれL*、Cab*、Hab°の時のダミー変数である。各ダミー変数の値を表3-3～3-5に示す。

式(3-1)において、各ダミー変数Xに掛かる係数はスコアと呼ばれ、好ましい

表3-3 L*に関するダミー変数の値

L*の範囲	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
5.5 < L* ≤ 6.5	1	0	0	0
6.5 < L* ≤ 7.5	0	1	0	0
7.5 < L* ≤ 8.5	0	0	1	0
8.5 < L* ≤ 9.5	0	0	0	1

表3-4 Cab*に関するダミー変数の値

Cab*の範囲	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃
5 < Cab* ≤ 15	1	0	0
15 < Cab* ≤ 25	0	1	0
25 < Cab* ≤ 35	0	0	1

表3-5 Hab°に関するダミー変数の値

Hab°の範囲	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	X ₃₅	X ₃₆	X ₃₇
2.8 < Hab° ≤ 3.6	1	0	0	0	0	0	0
3.6 < Hab° ≤ 4.4	0	1	0	0	0	0	0
4.4 < Hab° ≤ 5.2	0	0	1	0	0	0	0
5.2 < Hab° ≤ 6.0	0	0	0	1	0	0	0
6.0 < Hab° ≤ 6.8	0	0	0	0	1	0	0
6.8 < Hab° ≤ 7.6	0	0	0	0	0	1	0
7.6 < Hab° ≤ 8.4	0	0	0	0	0	0	1

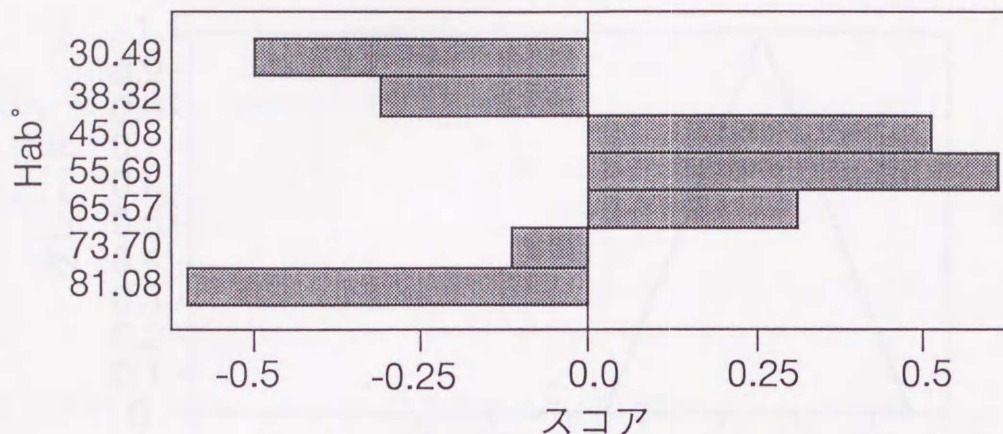


図 3-3 説明変数が Hab° 値のときのスコア

肌色に対する度合いを示す。すなわち、この値が大きければ、その説明変数値において、好ましい肌色であると感じる度合いが大きくなる。説明変数が Hab° 値のときのスコアを図 3-3 に示す。この図より、Hab° 値が 55.69 のときに最も好ましい肌色の印象を与え、55.69 より離れるにしたがって好ましさの印象は小さくなることがわかる。説明変数が L* と Cab* 値のときのスコアについてもほぼ同様の結果が得られた。

今回、これらのスコア値から、好ましい肌色という感性を定量化するファジィ集合を定義した。この際、スコアのピークを 1、スコアの傾きをメンバシップ関数の傾きとしている。L*、Cab*、Hab° 値における好ましい肌色を表すファジィ集合を、それぞれ、図 3-4～3-6 に示す。

以上のようにファジィ集合を定義することにより、色彩感性を定量的に扱うことが可能となった。これらのファジィ集合は、以下で述べる人間感性に基づく色変換処理の目標値として使用する。

3. 3 ファジィ推論を用いた色変換

3. 3. 1 色変換処理の流れ

以下では、図 2-1 に示したカラーコピーシステム内の画像処理部で行う、人間感性に基づく色変換処理の詳細を述べる。図 3-7 にカラーコピーシステム内の画像処理部の処理流れを示す。

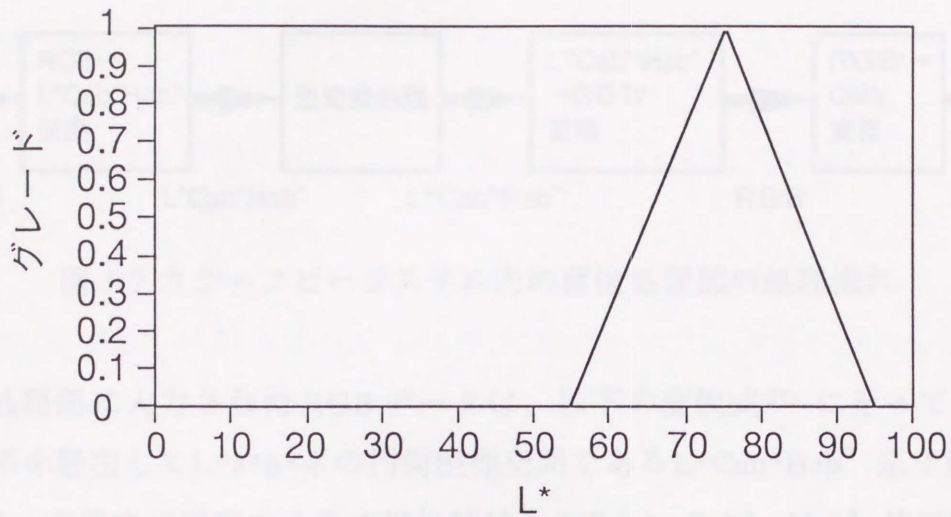


図 3-4 L* における好ましい肌色を表すファジィ集合

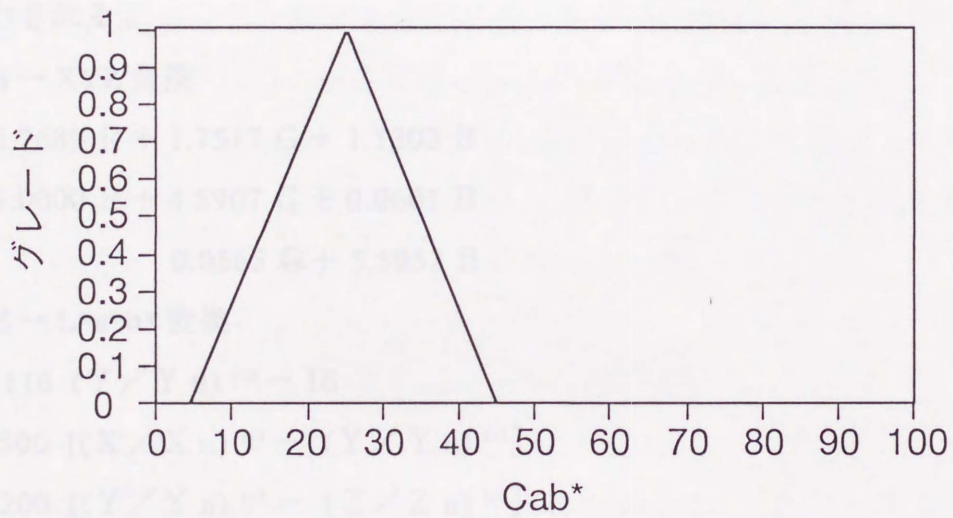


図 3-5 Cab* における好ましい肌色を表すファジィ集合

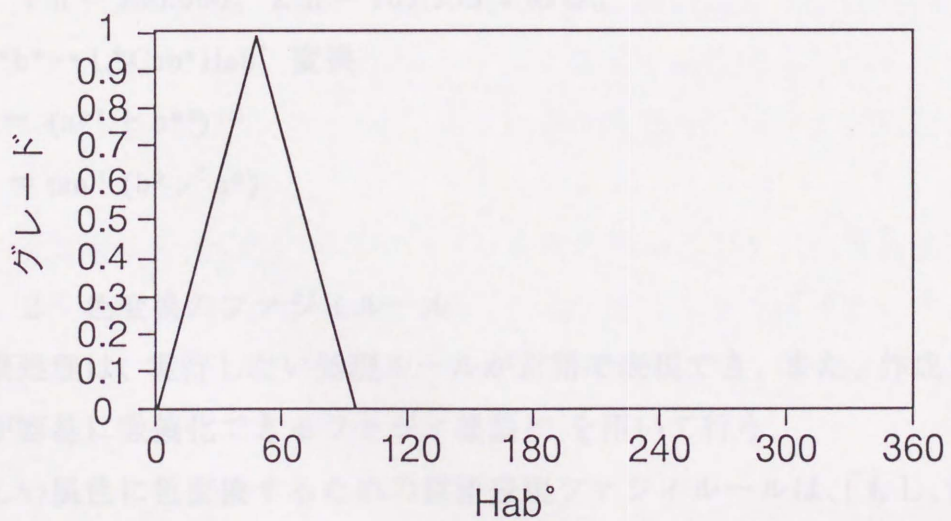


図 3-6 Hab° における好ましい肌色を表すファジィ集合

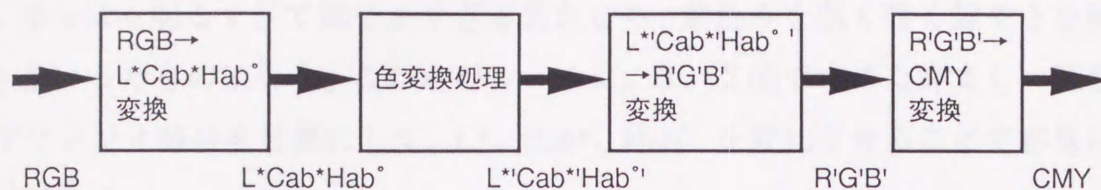


図 3-7 カラーコピーシステム内の画像処理部の処理流れ

画像処理部に入力された RGB データは、以下の変換式²⁷⁾ にそって、XYZ、 $L^*a^*b^*$ 系を経由して $L^*a^*b^*$ 系の円筒座標空間である $L^*Cab^*Hab^\circ$ 系空間値に変換される。本論文で提案する色変換処理は、この L^* 、 Cab^* 、 Hab° 値で行い、処理されたデータは再度 RGB 値に変換された後、CMY 色信号としてカラープリンタに出力される。

(1) RGB → XYZ 変換

$$\begin{aligned} X &= 2.7689 R + 1.7517 G + 1.1302 B \\ Y &= 1.0000 R + 4.5907 G + 0.0601 B \\ Z &= \quad \quad \quad 0.0565 G + 5.5953 B \end{aligned} \quad (3-2)$$

(2) XYZ → $L^*a^*b^*$ 変換

$$\begin{aligned} L^* &= 116 (Y / Y_n)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 [(X / X_n)^{1/3} - (Y / Y_n)^{1/3}] \\ b^* &= 200 [(Y / Y_n)^{1/3} - (Z / Z_n)^{1/3}] \end{aligned} \quad (3-3)$$

ここで、画像を観察する際の光源が、標準的な昼光 (D_{65} 光源) の場合、 $X_n = 94.811$ 、 $Y_n = 100.000$ 、 $Z_n = 107.333$ である。

(3) $L^*a^*b^* \rightarrow L^*Cab^*Hab^\circ$ 変換

$$\begin{aligned} Cab^* &= (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \\ Hab^\circ &= \tan^{-1} (b^* / a^*) \end{aligned} \quad (3-4)$$

3. 3. 2 色変換のファジィルール

色変換処理は、実行したい処理ルールが言語で表現でき、また、作成した言語ルールが容易に数値化できるファジィ推論³⁴⁾ を用いて行う。

好ましい肌色に色変換するための言語表現ファジィルールは、「もし、黄色みがあった暗い鮮やかでない肌色なら、赤みを強く明るく鮮やかにする」とか、「も

し、赤っぽく明るすぎて鮮やかすぎる肌色なら、黄色みを強く暗く鮮やかさを減らす」といったものになる。これらのルールは、3.2節で求めた好ましい肌色を示すファジィ集合を目標にして、 L^* 、 Cab^* 、 Hab° を変化させることで容易に数値化できる。

しかし、人物画像においては、画一的に好ましい肌色領域に変換すれば、肌色領域平均では好ましい肌色となるものの、特徴のうすれたメリハリのない画像になってしまう。すなわち、唇、頬、額などの特徴のある個別領域においては、個々の領域の特徴を考慮した変換を行う必要がある。これらの変換は、化粧方法や化粧効果が参考になる。すなわち、言語表現ファジィルールは、口紅、頬紅、アイシャドー、ファンデーションなどの化粧効果と同じ意味合いを持つように定め、「もし、唇領域の肌色なら、赤みを非常に強く鮮やかにする」とか「もし、頬領域の肌色なら、赤みを少し強く明るくする」といったものにした。

これらの言語ルールを適用して変換する色は、 $L^*Cab^*Hab^\circ$ 空間上の肌色領域であるので、標準光源 (D_{65} 光源) で撮影された各種のカラー写真の肌色分布を調査した。この結果、肌色領域は、以下の範囲であった。

$$\begin{aligned} 10 < L^* < 90 \\ 5 < Cab^* < 55 \\ -20 < Hab^\circ < 90 \end{aligned} \tag{3-5}$$

本論文では、式 (3-5) の肌色領域を 125 領域に細分化し、上記の言語ルールの数値化を行った。肌色領域の細分化は、 L^* 、 Cab^* 、 Hab° の各肌色領域をそれぞれ VS (Very Small)、S (Small)、M (Middle)、L (Large)、VL (Very Large) の 5 つのファジィ集合で表現して行い、ファジィ推論の条件部メンバシップ関数とした。図 3-8~10 に L^* 、 Cab^* 、 Hab° における条件部メンバシップ関数をそれぞれ示す。

ファジィ推論は、ルックアップテーブル方式の簡略化ファジィ推論法³⁴⁾を用いた。入力はある画素ごとの L^* 、 Cab^* 、 Hab° の値、出力はその画素における色変換量 ΔL^* 、 ΔCab^* 、 ΔHab° である。ファジィルールは 125 に分割した各肌色領域ごとに設定しており、以下の形で表される。

ここで、 a_i 、 b_i 、 c_i は定数である。

$$\text{if } L^* = \text{Very Small} \ \& \ Cab^* = \text{Very Small} \ \& \ Hab^\circ = \text{Very Small}$$

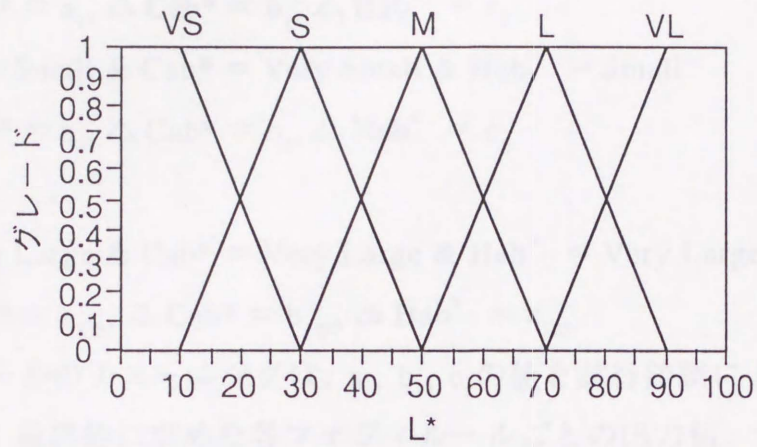


図 3-8 L^* における条件部メンバシップ関数

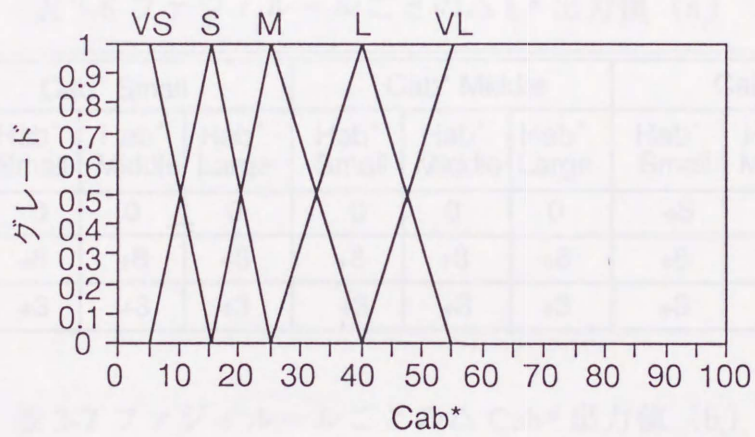


図 3-9 Cab^* における条件部メンバシップ関数

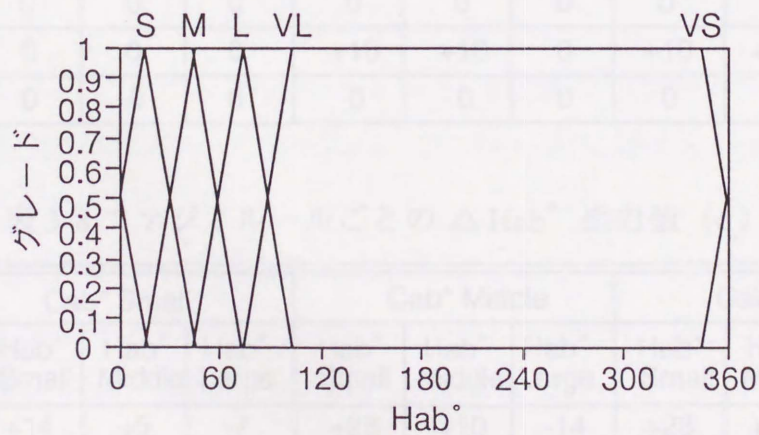


図 3-10 Hab° における条件部メンバシップ関数

then $\Delta L^* = a_1, \Delta Cab^* = b_1, \Delta Hab^\circ = c_1$
 if $L^* = \text{Very Small} \ \& \ Cab^* = \text{Very Small} \ \& \ Hab^\circ = \text{Small}$
 then $\Delta L^* = a_2, \Delta Cab^* = b_2, \Delta Hab^\circ = c_2$
 :
 if $L^* = \text{Very Large} \ \& \ Cab^* = \text{Very Large} \ \& \ Hab^\circ = \text{Very Large}$

$$\text{then } \Delta L^* = a_{125}, \Delta Cab^* = b_{125}, \Delta Hab^\circ = c_{125} \quad (3-6)$$

これらのルールのチューニングは、 a_i, b_i, c_i の値を試行錯誤により最適化することで行った。最終的に求めた各ファジイルールごとの出力値、すなわち a_i, b_i, c_i の値を表3-6~8に示す。なお、本色変換では、肌色領域の境界部で色変換量の連続性が保証されるように、条件部メンバシップ関数にVSもしくはVLが含まれ

表3-6 ファジイルールごとの ΔL^* 出力値 (a_i)

	Cab* Small			Cab* Middle			Cab* Large		
	Hab° Small	Hab° Middle	Hab° Large	Hab° Small	Hab° Middle	Hab° Large	Hab° Small	Hab° Middle	Hab° Large
L* Small	0	0	0	0	0	0	+5	+5	+5
L* Middle	+8	+8	+8	+8	+8	+8	+8	+8	+8
L* Large	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3

表3-7 ファジイルールごとの ΔCab^* 出力値 (b_i)

	Cab* Small			Cab* Middle			Cab* Large		
	Hab° Small	Hab° Middle	Hab° Large	Hab° Small	Hab° Middle	Hab° Large	Hab° Small	Hab° Middle	Hab° Large
L* Small	0	0	0	0	0	0	0	0	-3
L* Middle	0	0	0	+10	+10	0	+10	+10	-10
L* Large	0	0	0	0	0	0	0	0	-3

表3-8 ファジイルールごとの ΔHab° 出力値 (c_i)

	Cab* Small			Cab* Middle			Cab* Large		
	Hab° Small	Hab° Middle	Hab° Large	Hab° Small	Hab° Middle	Hab° Large	Hab° Small	Hab° Middle	Hab° Large
L* Small	+14	+5	-7	+28	+10	-14	+28	+10	-14
L* Middle	+28	+10	-14	0	0	-14	0	0	-14
L* Large	+28	+10	-14	+28	+10	-14	+28	+10	-14

るルールの実出力値は、 a_i 、 b_i 、 c_i とも、すべて0に設定している。したがって、表3-6~8では、条件部メンバシップ関数がS、M、Lであるファジィルールについてのみ出力値を示す。

このファジィルールから、出力 ΔL^* 、 ΔCab^* 、 ΔHab° は、次式のように求められる。

$$\Delta L^* = \sum (\mu_i \cdot \Delta L^*_i) / \sum \mu_i$$

$$\Delta Cab^* = \sum (\mu_i \cdot \Delta Cab^*_i) / \sum \mu_i$$

$$\Delta Hab^\circ = \sum (\mu_i \cdot \Delta Hab^\circ_i) / \sum \mu_i$$

$$\mu_i = \min \{ \mu_{L_i}(L^*), \mu_{C_i}(Cab^*), \mu_{H_i}(Hab^\circ) \}$$

$\mu_{L_i}(L^*)$: i番目のルールに対する L^* の適合度

$\mu_{C_i}(Cab^*)$: i番目のルールに対する Cab^* の適合度

$\mu_{H_i}(Hab^\circ)$: i番目のルールに対する Hab° の適合度

ΔL^*_i : i番目のルールによる L^* の出力

ΔCab^*_i : i番目のルールによる Cab^* の出力

ΔHab°_i : i番目のルールによる Hab° の出力

(3-7)

3. 3. 3 色変換の結果

上記の色変換処理の効果を確認するために、画像電子学会のテストチャートNo.11の色変換を行った。しかし、このテストチャートの人物の肌色は、もともと好ましい肌色であり、そのままの画像に本色変換処理を行っても顕著な変化は見られなかった。したがって、今回は、画像全体を暗いイエロ方向に変色させた画像を原画像として、効果を確認する。

原画像の印写サンプルを図3-11に、色変換処理後の印写サンプルを図3-12に示す。色変換処理後の印写サンプルのほうが、明らかに好ましい印象を与えていると感じられる。

なお、本色変換処理では、前処理で人物認識を行っていないため、人物以外の肌色も同時に色変換されている。しかしながら、画像内で一般に注目される領域は人物領域であるため、影響は少ないと考察される。



図 3-11 原画像の印写サンプル



図 3-12 色変換処理後の印写サンプル

3. 4 まとめ

本章では、第2章で提案した原画像に忠実な色表現を行うカラーコピー系に、人間感性に基づいた色変換機能を付加する提案を行った。この結果、均等知覚色空間 $L^*C_{ab}^*H_{ab}^\circ$ 上で、好ましい肌色という色彩感性をファジィ集合を用いて定量的に定義できた。また、肌色を好ましく見せるための言語表現ファジィルールを作成し、その結果得られたファジィ推論ルールを用いて肌色を好ましく色変換する手法を提案できた。さらに、今回提案した色変換処理をサンプル画像に適用した結果、好ましいと感じる画像が得られた。

しかし、今回提案した色変換処理の客観的評価は、未だ行えていない。したがって、次章ではこの客観的評価を行うために、感覚に起因して変動し、かつ、非接触計測しやすい顔面皮膚温に着目し、まず、人間に負荷をかけずに顔面皮膚温を自動連続計測する手法を提案する。

第4章 顔面皮膚温の非接触計測

4.1 まえがき

第3章では、原画像に忠実な色表現を行うカラーコピー系に、人間感性に基づいた色変換機能を付加する提案を行って、色変換処理をサンプル画像に適用した結果、好ましいと感じる画像が得られた。しかし、この色変換結果の客観的評価は未だ行えていない。そこで、本章では、感覚に起因して変動する顔面皮膚温を用いてこの客観的評価を行うために、まず、人間に負荷をかけずに顔面皮膚温を非接触自動連続計測する手法を提案する。

本章の第2節では、まず、開発した非接触皮膚温計測システムの構成と原理を説明する。次に第3節では、顔面皮膚温を非接触自動連続計測する際の要素技術となる人物を抽出する手法について記述する。人物は、皮膚温の温度帯域と、肌色の色帯域を含んでいるため、同時に計測した赤外画像と可視画像を用いて、人物領域の抽出を行う。次に、第4節では、抽出した人物の顔面内から、感覚推定に必要な部位の皮膚温を自動計測する手法を記述する。目と眉は、可視画像内で輝度値の低い領域に該当するため、一定閾値以下の輝度値を有する領域を抽出して認識する。また、目と眉を認識した後は、それらの部位との相対的な位置関係を利用して、感覚推定に必要な部位の温度値を赤外画像から読み取って、特定部位の皮膚温計測を行う。

4.2 システム構成と原理

図4-1に開発した非接触皮膚温計測システムの構成を示す。赤外カメラ（三菱電機製IR-3000）とカラーカメラ（ソニー製XC-009）によって得られた各画像は、host EWS（サンマイクロシステムズ製 SparcStation10）の指令に基づき、画像処理装置（Datacube 製 MaxVideo20）内で統合処理される。

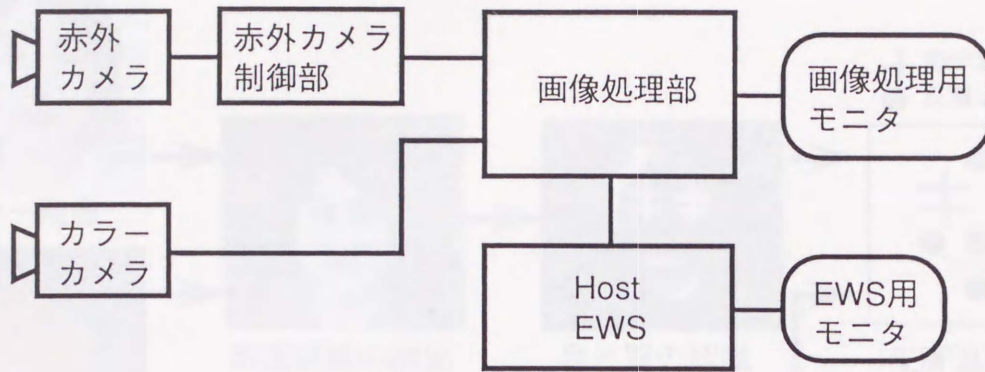


図 4-1 非接触皮膚温計測システムの構成

画像入力部は、図 4-2 に示すように、赤外カメラ、カラーカメラ、及び、両カメラの光軸と光路長を一致させる光学系から構成される。赤外カメラ内には、赤外線センサーが内蔵されており、対象物から放射された赤外線強度に応じて電気信号を生成し、256x256 画素のカラー画像もしくはモノクロ画像として温度分布を表示する。この赤外カメラの温度分解能は 0.2℃である。

光学系においては、まず、赤外カメラとカラーカメラが、同じ視野を撮影できるように、フッ化カルシウム (CaF₂) コーティングを施した赤外透過／可視反射ミラーを用いて、両カメラの光軸を一致させた。次に、同じ視野角を撮影できるように光路長を一致させ、さらに、同じタイミングで撮影できるように、赤外カ

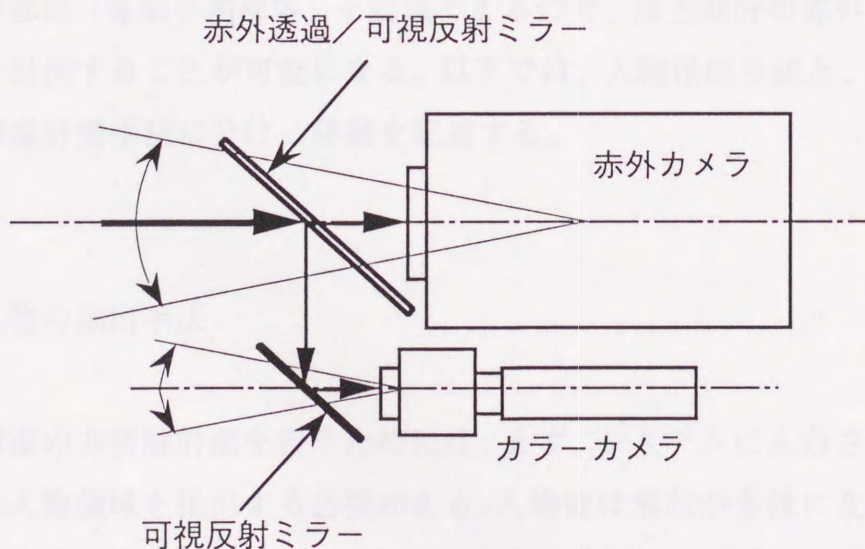


図 4-2 画像入力部の構成

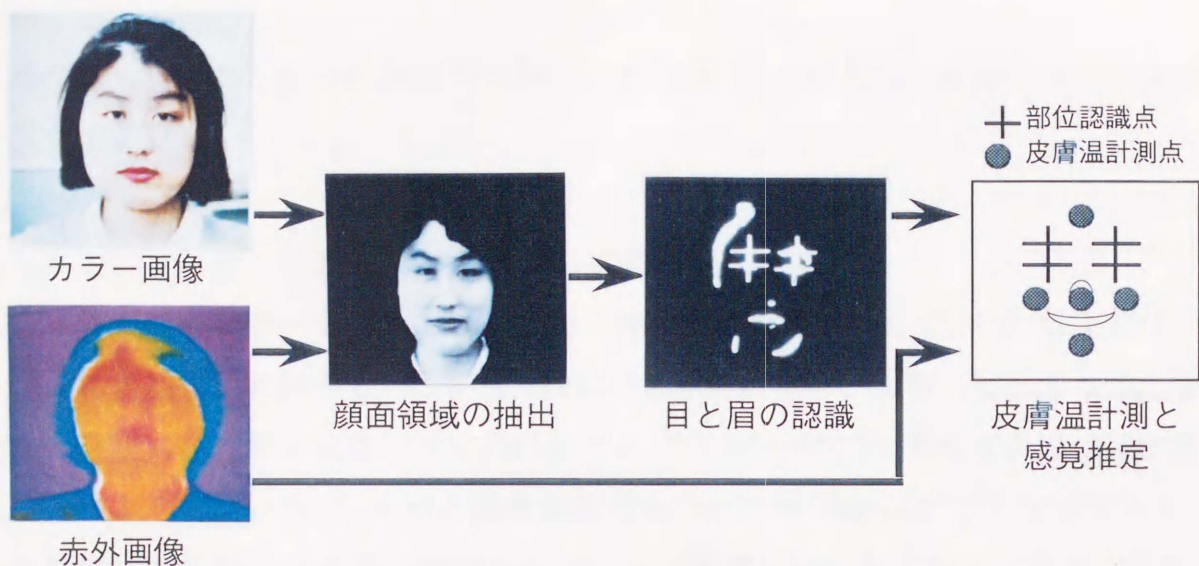


図 4-3 非接触皮膚温計測の原理

メラからビデオ同期信号 (60Hz) を取り出し、カラーカメラに入力させた。以上に示した光学系の構成により、赤外カメラとカラーカメラの撮影画面が全く同一になり、また、ずれ時間なく撮影することが可能になった。

図 4-1 に示した host EWS と画像処理装置で行う処理の基本原則を図 4-3 に示す。まず、カラー画像内に含まれる肌色領域と、赤外画像内に含まれる皮膚温領域を重ね合わせ、重複した部分を抽出することで、顔面等の皮膚領域を抽出する。次に、抽出した顔面領域の中から、輝度値の低い領域を抽出することにより、目と眉を認識する。目と眉を認識できれば、相対的な位置関係を利用して、感覚推定に必要な部位 (鼻部や額部等) を認識できるので、該当部分の赤外画像の値から皮膚温を計測することが可能になる。以下では、人物抽出手法と、顔面内特定部位の皮膚温計測手法に分け、詳細を記述する。

4. 3 人物の抽出手法

顔面皮膚温の非接触計測を行うためには、まず、システムに入力される画像内に含まれる人物領域を抽出する必要がある。人物像は形状が多様に変化し不規則に移動するため、複雑な背景から人物を抽出する事は、コンピュータにとって困難な課題である。そこで今回、赤外画像から得られる人体の温度情報と、カラー

画像から得られる皮膚の色情報を利用して、高信頼度の人物や顔面の抽出手法を提案する。

4. 3. 1 赤外画像による人物候補領域の抽出

赤外画像とカラー画像を用いて人物を抽出するために、まず、赤外画像だけから人物候補領域の抽出を行う。具体的には、赤外画像を、人物に相当する温度領域と環境に相当する温度領域に分けることになる。一般に人物温度帯域は環境温度帯域よりも高いので、人物と環境を分けるための温度閾値を T_h と定義すると、赤外画像内の T_h 以下の温度領域を除去すれば人物候補領域を抽出できる。また、皮膚以外の人物と皮膚を分けるための温度閾値を T_s と定義すると、画像内の T_s 以下の温度領域を除去すれば皮膚候補領域を抽出できる。したがって、本手法においては、精度良く T_h あるいは T_s を求める必要がある。

人物を含むシーンを赤外カメラで撮影し、画像内の各画素の温度をヒストグラ

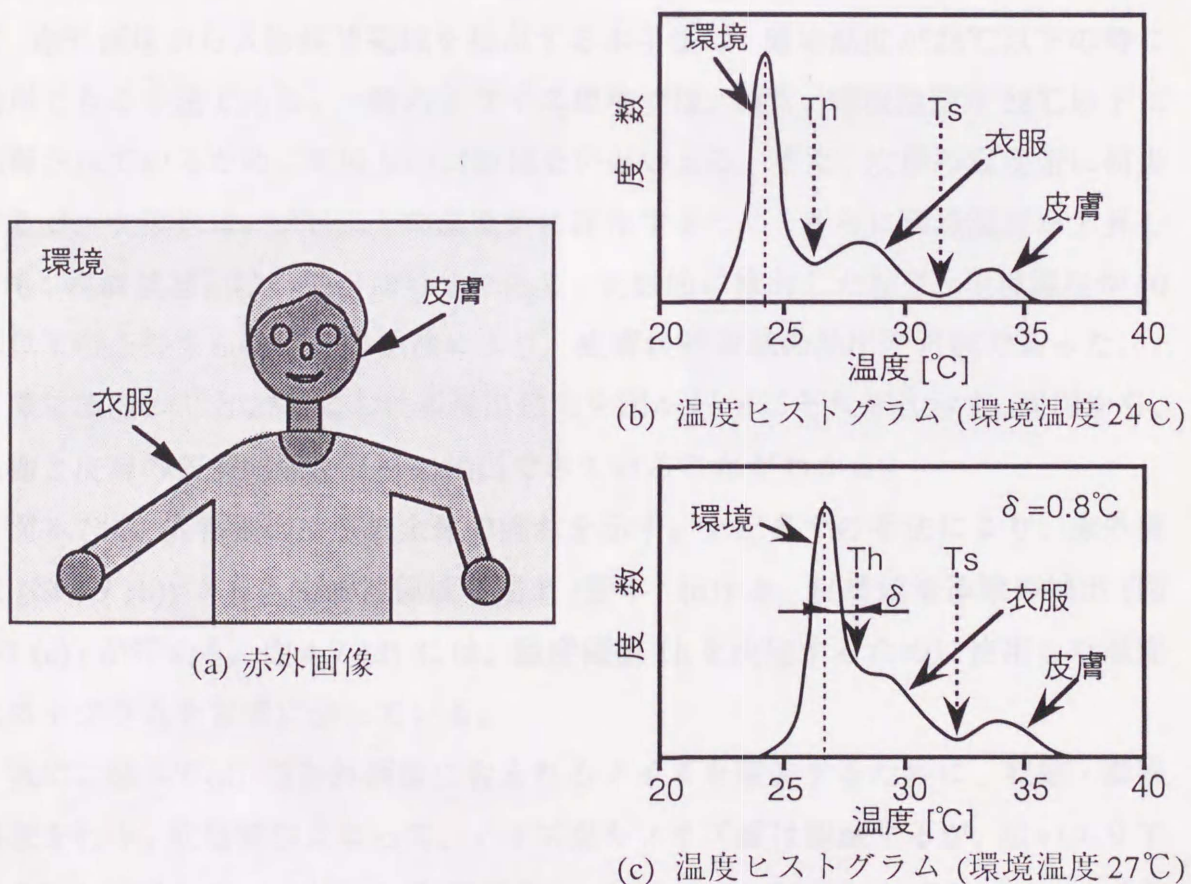


図 4-4 赤外画像と温度ヒストグラムの例 (説明図)

ムで表示すると、典型的な例として図 4-4 (b) のように、環境、衣服、皮膚の温度帯に相当するピーク波形が現れる。このような場合には、比較的容易に T_h や T_s を求めることができる。すなわち、 T_h は、温度ヒストグラムにおける環境と衣服の各ピーク波形の間の領域において、微分値が 0 になった温度とすればよい。 T_s も同様にして求めることができる。

しかし、環境温度が高くなると、図 4-4 (c) のように、温度ヒストグラムにおける環境と衣服の各ピーク波形は接近し、この間の領域に微分値が 0 になる温度が存在しなくなる。この場合には、比較的安定して検出できる環境温度のピーク値を基準とし、一定値 δ を加算して T_h を決定することとした。人物が欠落なく抽出できるように、 δ を実験的に求めた結果、約 0.8°C であった。また、このときの環境温度は $27\sim 28^{\circ}\text{C}$ であり、衣服と皮膚の各ピーク波形の間の領域では、微分値が 0 になる温度が存在していた^{35) 36)}。

環境温度がさらに高くなり、 28°C を越えると、温度ヒストグラムにおける環境と衣服の各ピーク波形は重なり、人物候補領域の抽出が不可能になる。したがって、赤外画像から人物候補領域を抽出する本手法は、環境温度が 28°C 以下の時に適用できる手法である。一般のオフィス環境では、通常、環境温度が 28°C 以下に制御されているため、実用上の問題はないといえる。また、皮膚の温度帯に相当するピーク波形は、 30°C 以上の温度帯に存在するため、さらに環境温度が上昇しても、皮膚候補領域の抽出は可能である。実験的に検討した結果、環境温度が 30°C 以下の条件なら、同様の手法により、皮膚候補領域の抽出が可能であった。

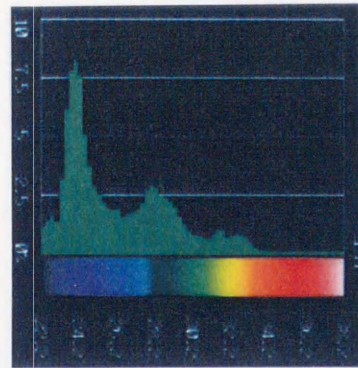
環境温度 24°C と 27°C における抽出結果を図 4-5 と 6 にそれぞれ示す。両図から、人物と皮膚の候補領域が良好に抽出できていることがわかる。

図 4-7 に、人物抽出手法の全体の流れを示す。上記までの手法により、赤外画像 (図 4-7 (b)) から人物候補領域の抽出 (図 4-7 (d)) と、皮膚候補領域の抽出 (図 4-7 (c)) が行える。図 4-7 (d) には、温度閾値 T_h を決定するために使用した温度ヒストグラムを背景に示している。

次に、図 4-7 (d) の赤外画像に含まれるノイズを除去するために、収縮・膨張処理を行う。収縮処理によって、ノイズ点やノイズ線は消滅するが、広いエリアに分布した人物候補領域には影響がない。収縮後に膨張処理を行えば、ノイズを含まないいくつかの人物候補領域のみが再現されるので、今後の処理のために、



(a) 赤外画像



(b) 温度ヒストグラム

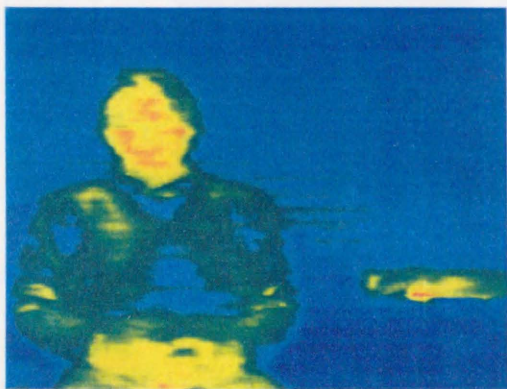


(c) 人物候補領域抽出結果

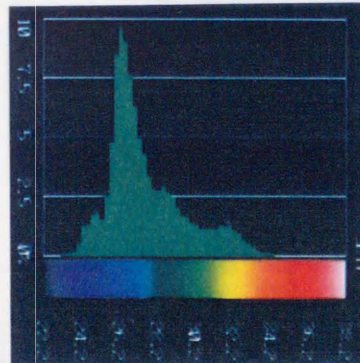


(d) 皮膚候補領域の抽出結果

図 4-5 人物候補領域と皮膚候補領域の抽出結果（環境温度 24℃）



(a) 赤外画像



(b) 温度ヒストグラム



(c) 人物候補領域抽出結果



(d) 皮膚候補領域の抽出結果

図 4-6 人物候補領域と皮膚候補領域の抽出結果（環境温度 27℃）

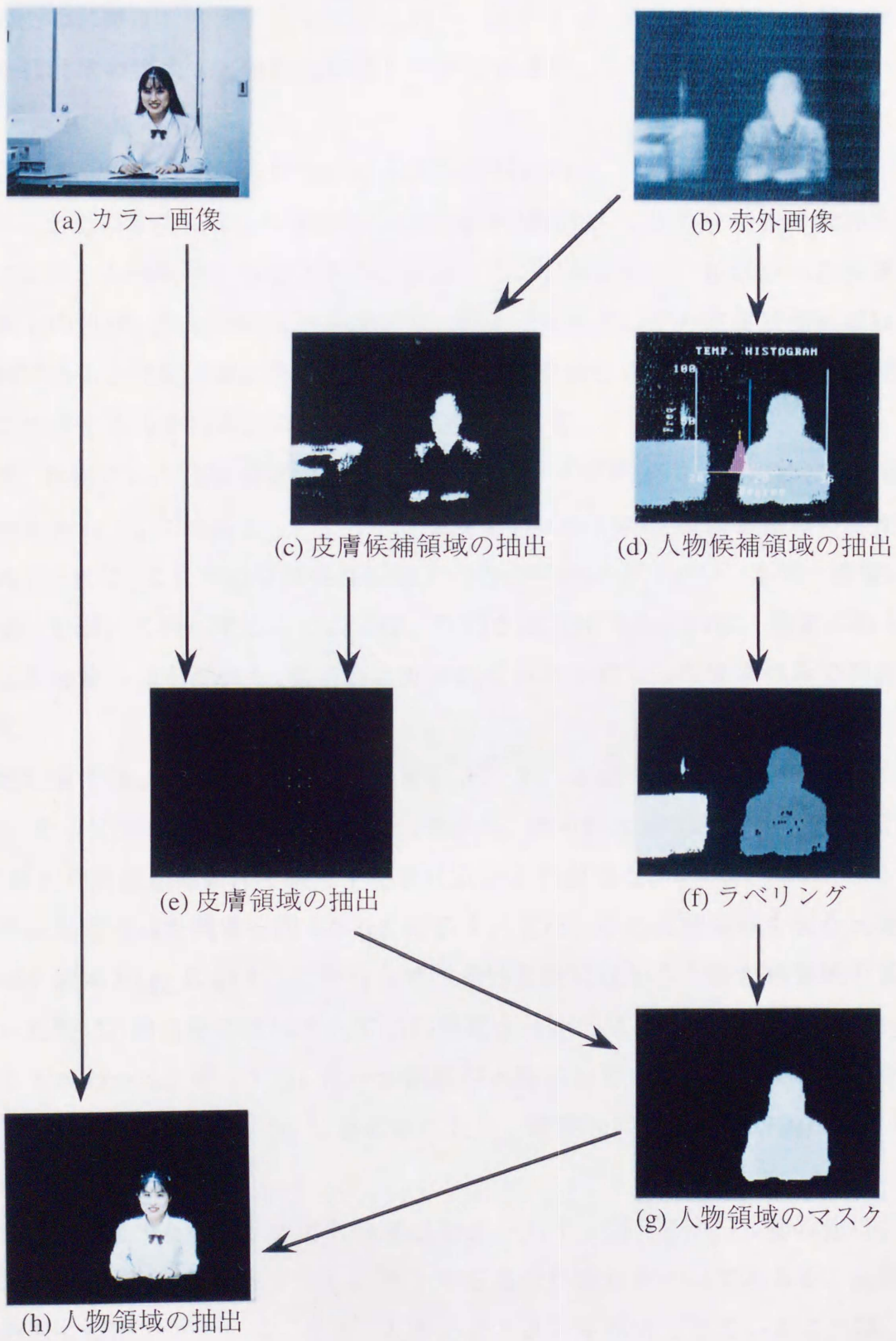


図 4-7 人物抽出手法の流れ

各領域にラベルを付けておく。図4-7 (f) は、異なるラベルが付けられた領域を、確認のために輝度を変えて表している。この時点では、人物領域とともに、通電されたC R Tの領域も人物候補領域として抽出されていることがわかる。

4. 3. 2 カラー情報の付加による人物領域の抽出

次に、上記の手法によって抽出された人物候補領域に、カラー情報を付加することにより、人物領域を抽出する手法を述べる。具体的には、抽出された皮膚候補領域上の色が、肌色かどうかを判別し、肌色であれば、その皮膚候補領域は皮膚領域であると判定する。その後、その皮膚領域を含む人物候補領域を人物領域として抽出するのである。以下では、詳細を述べる。

まず、抽出された皮膚候補領域 (図4-7 (c)) のノイズを除去するために、収縮・膨張処理を行う。この結果、ノイズを含まないいくつかの皮膚候補領域のみが再現される。次に、これらの皮膚候補領域上の色が肌色かどうかを、カラー画像 (図4-7 (a)) を用いて判別する。ここでは、判別を高速化するために、画像に約 100 画素ごとの格子点を配置し、格子点と皮膚候補領域が重なった画素のみで判別を行った。

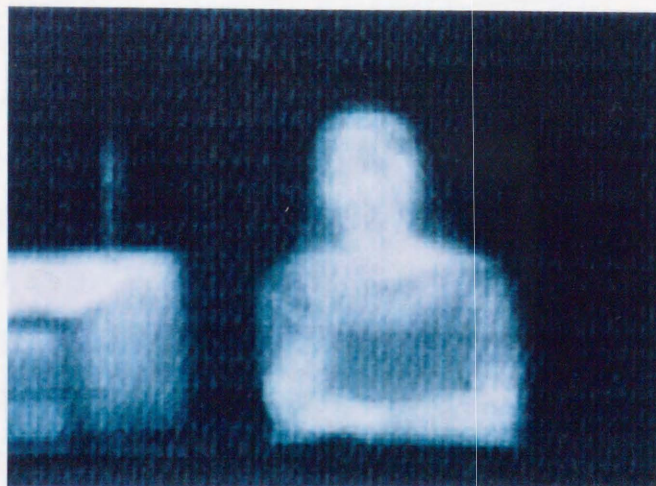
肌色判別では、該当画素のRGB値を、3. 3. 1節で示した変換式 (3-2) ~ (3-4) にそって $L^*Cab^*Hab^\circ$ 系空間値に変換し、得られた $L^*Cab^*Hab^\circ$ 値が式 (3-5) に示した肌色領域条件を満たす場合に肌色と判別した。

この結果得られた画素を図4-7 (e) に示す。また、この皮膚領域を含む人物候補領域を図4-7 (g) に示す。この時点で、赤外画像だけから人物候補領域の抽出を行った際に、間違っただけ抽出されていた通電されたC R Tの領域は、除去されていることがわかる。図4-7 (g) に示す領域が人物領域であるので、この領域をマスクし、カラー画像図4-7 (a) に重ねることで、最終的に人物領域が抽出できる。(図4-7 (h))

図4-8 に、複雑な背景からの人物抽出結果を示す。図4-8 は、人物の他に、人物のポスター、植木、通電されたC R T等を含む複雑なシーンであるが、良好に人物のみを抽出できている。特に、人物のポスターを除去できていることは、本方式の特徴をよく表しているといえる。



(a) カラー画像



(b) 赤外画像



(c) 人物抽出結果

図 4-8 複雑な背景からの人物抽出結果

4. 4 顔面内特定部位の皮膚温計測手法

上記の手法により、人物領域や顔面等の皮膚領域を抽出することが可能になった。ここでは、抽出した顔面領域の中から、比較的認識しやすい目と眉を認識し、それらとの相対的な位置関係を利用して、必要な部位の皮膚温を計測する手法を提案する。

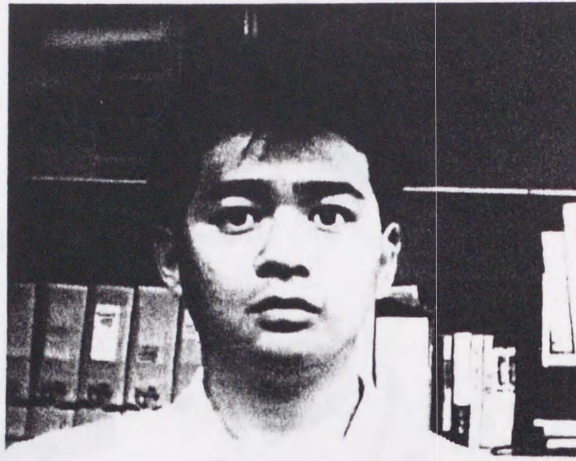
4. 4. 1 顔面内部位認識

顔面は皮膚部とみなせるので、顔面を含むシーンをシステムに入力すれば、上記の手法で、顔面領域を抽出できる。ただし、赤外画像を用いて背景を取り除く際の温度閾値を、皮膚領域のみを残すように設定し抽出処理を行う。図4-9 (a) に可視画像を、図4-9 (b) に顔面領域の抽出結果を示す。良好に、顔面領域が抽出できていることがわかる。次に、顔面領域の中で、輝度値の低い領域を抽出し、目および眉領域が大略長方形の位置関係にあることを利用して、低輝度領域の中から目および眉を認識する。(図4-9 (c)) 以下では、この目および眉を認識する手法の詳細を述べる。

目および眉は、顔面領域内で、比較的輝度値の低い領域に含まれるため、一定の閾値以下の輝度値をもつ画素を抽出すれば、その領域に含まれると考えられる。この閾値は、必ず、目と眉の領域が含まれ、かつ、後処理のために、目と眉の4つの領域が分離されて抽出できるという条件を満たすように設定する必要がある。しかし、可視画像は、照明の強度によって、輝度値が変化するので、各種の可視画像に対して閾値を常に一定に設定すると、この条件を満足することが困難になると推察される。

図4-10 (a) に比較的明るい可視画像と、図4-11 (a) に比較的暗い可視画像を示す。明るい可視画像の顔面領域の輝度ヒストグラムは、図4-10 (b) のようになり高輝度側の度数が多くなる。一方、暗い可視画像の顔面領域の輝度ヒストグラムは、図4-11 (b) のようになり低輝度側の度数が増加する。したがって、目と眉を抽出するための輝度閾値を、両図で一定にすれば、上記の条件を満足できない。

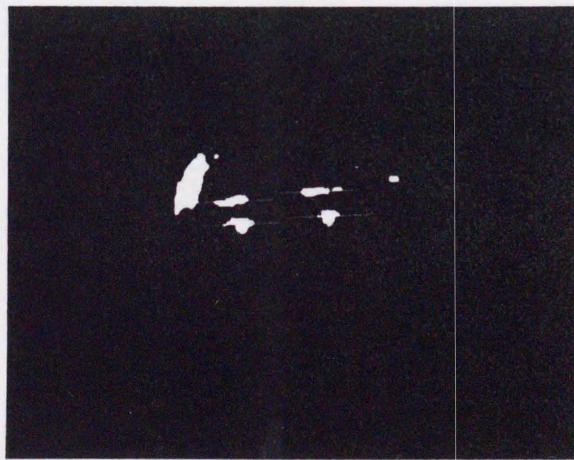
したがって、ここでは、目と眉の領域の面積と顔面全体の面積比が、ほぼ一定



(a) 可視画像



(b) 顔面抽出結果

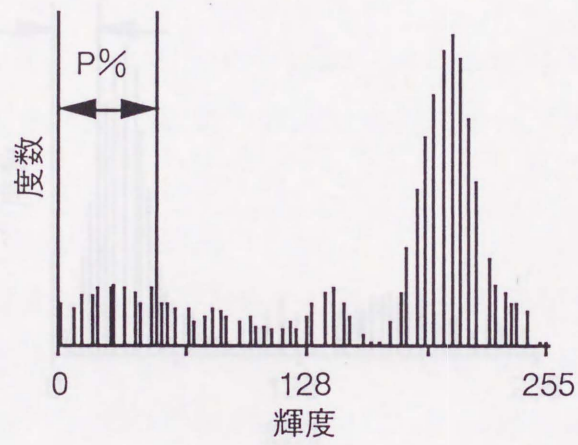


(c) 目と眉の認識結果

図 4-9 顔面内部位認識結果



(a) 可視画像

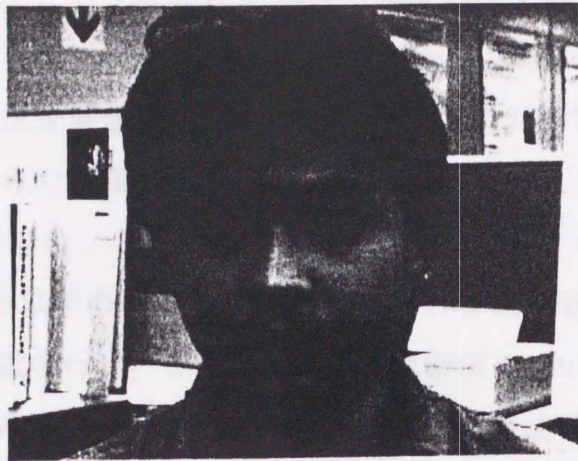


(b) 顔面領域の輝度ヒストグラム (説明図)

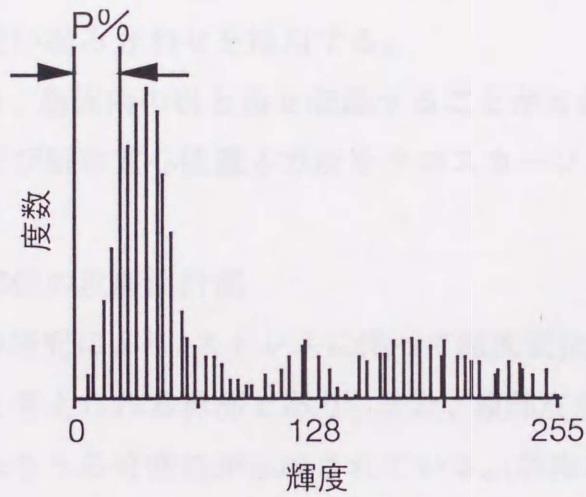


(c) 目と眉の候補領域の抽出結果

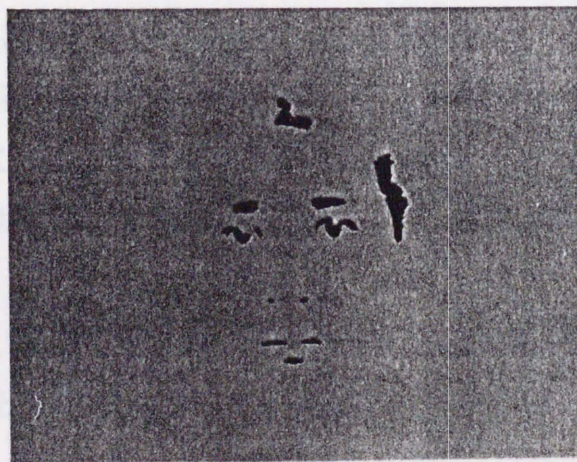
図 4-10 目と眉の候補領域の抽出結果 (比較的明るい可視画像)



(a) 可視画像



(b) 顔面領域の輝度ヒストグラム (説明図)



(c) 目と眉の候補領域の抽出結果

図 4-11 目と眉の候補領域の抽出結果 (比較的暗い可視画像)

であることを利用して、p タイル法を用いて輝度閾値を設定する³⁷⁾。すなわち、顔面領域の輝度ヒストグラムにおいて、低輝度側からP%の画素数をカウントし、P%目の画素の輝度値を閾値に設定する。この手法によって、照明の強度にかかわらず、上記条件をみだす閾値の設定が可能になるといえる³⁸⁾。なお、図4-9～11に示した被験者の場合、Pは約6.2%であった。

次に、得られたP%以下の低輝度画像内に含まれる候補領域間の位置関係を利用して、目と眉の認識を行う。まず、全ての候補領域について重心位置を計算する。次に、各候補領域の重心座標の中で、大略長方形の位置関係にある4つの組み合わせを探索する。探索結果が一意に決まればその4つの領域を目および眉と認識する。複数の組み合わせが見つかった場合には、4つの重心の位置関係がもっとも長方形に近い組み合わせを採用する。

上記の手法により、顔面内の目と眉を認識することが可能になった。図4-9(c)に、認識した目および眉の重心位置4カ所をクロスカーソルで示す。

4. 4. 2 特定部位の皮膚温計測

著者のこれまでの研究により、ストレスに伴って温度変化する顔面内の部位は、末梢部に位置すると考えられる鼻部であり、また、額部皮膚温は、安静時の鼻部皮膚温の代用値になりうる可能性が示唆されている。(詳細は第6章) また、頬、顎、鼻の皮膚温を用いれば、温冷感を評価できる可能性が示唆されている。(詳細は第5章) したがって、顔面皮膚温を用いて、人間の感覚を客観的に評価するためには、これらの部位の皮膚温を計測する必要がある。

これらの部位と上記の手法で認識した目と眉との相対的な位置関係は、ほぼ一定である。したがって、温度計測が必要な部位の画面上位置を、目と眉と同時にシステムに登録しておけば、アフィン変換により、容易に必要な部位の温度計測が可能になる。

本システムの場合、約0.3秒周期で、顔面内の任意の5部位の皮膚温を非接触自動連続計測することが可能になっている。

4. 5 まとめ

本章では、第3章で提案した人間感性に基づく色変換画像を、顔面皮膚温を用いて客観的に評価するために、まず、人間に負荷をかけずに顔面皮膚温を自動連続計測する手法を提案した。この結果、同時に計測した赤外画像と可視画像を用いて、約0.3秒周期で、顔面内の任意の5部位の皮膚温を非接触自動連続計測することが可能になった。

しかし、現在のシステムは、EWSと画像処理装置を用いて処理を行っているため、大型で、また、操作性も良くない等の欠点がある。したがって、今後は、ハードウェア化によりシステムの小型化をはかり、使い勝手のよいシステムに改良してゆく予定である。

第5章では、計測した顔面皮膚温から人間感覚を推定する際の基礎となる顔面皮膚温の基本変動特性について記述する。

第5章 顔面皮膚温の物理的及び生理的 基本変動特性

5. 1 まえがき

第4章では、人間感性に基づく色変換画像を顔面皮膚温を用いて客観的に評価するために、まず、人間に負荷をかけずに顔面皮膚温を自動連続計測する手法を提案した。この結果、約0.3秒周期で、顔面内の任意の5部位の皮膚温を非接触自動連続計測することが可能になった。しかし、計測した顔面皮膚温を用いて画像から受ける感覚を客観的に評価するためには、顔面皮膚温から人間感覚を推定する手法を確立する必要がある。皮膚温は、感覚に起因する交感神経活動の影響を受けて変動するため、感覚推定に有効と考えられるが、感覚に関係なく温熱環境に伴っても変動する。したがって、本章では、まず、感覚だけでなく温熱環境に伴って変動する顔面皮膚温の物理的及び生理的基本変動特性について記述する。あわせて、感覚の中で、基本的で、かつ、温熱環境に直接影響される温冷感を取り上げ、顔面皮膚温による温冷感の推定手法を提案する。

本章の第2節では、被験者に温熱刺激だけを付加した実験の結果を述べる。実験は、約13時間かけて、環境温度を15～40℃の範囲で変動させ、全身皮膚温（顔面を含む16点）、皮膚血流量（顔面を含む5点）、深部温（直腸温、鼓膜温、食道温）の測定を行った。ここでは、まず、皮膚温に影響を及ぼすと推察される環境温度、皮膚血流量、深部温と、皮膚温との関係を考察する。次に、従来、深部温と皮膚温から決定されると言われていた温冷感^{39) 40)}を取り上げ、皮膚温だけから温冷感を推定できる可能性を示唆する。

第3節では、各種の環境温度下でストレスを付加した実験の結果を述べる。実験は、夏期と冬期に行い、環境温度を一日ごとに15、20、25、30℃と変化させ、さらに、計算作業やテレビゲーム等のストレスを付加して、顔面5部位の皮膚温を測定した。ここでは、まず、各種の環境温度下で、ストレスに伴う顔面皮膚温と温冷感の変動を把握する。また、ストレスがある場合にも適用できる顔面皮膚温による温冷感の推定式を作成し、顔面皮膚温だけから温冷感を推定できる可能

性を示唆する。

5. 2 温熱刺激に伴う皮膚温変動

皮膚温は熱放散反応の結果として決定されるが、この反応を制御する際の入力器の一つである温度受容器も皮膚部に存在する²⁰⁾。すなわち、図5-1に示す皮膚温変化の模式図の中で温熱刺激だけを考慮したとしても、皮膚温は出力（図中の皮膚温）と入力（図中の受容器）の役割を合わせ持つため、その挙動は複雑になる。したがって、顔面皮膚温から人間感覚を推定するためには、種々の要因に伴って変動する皮膚温の基本変動特性を把握しておく必要がある。本節では、まず、温熱刺激に限定して皮膚温の変化特性を調査する。

5. 2. 1 温熱刺激付加実験

図5-1に示す皮膚温変化の模式図の中で、皮膚温変化に大きく影響する生理量は、発汗の生じない一般的な温熱環境下では、皮膚血流と深部温であるといわれている¹⁴⁾。なお、呼吸は、鼻穴直下の皮膚にしか影響しないため、一般の皮膚では無視できる。したがって、環境温度を変動させたときの皮膚温と皮膚血流量と深部温を計測し、これらの関係を把握する実験を行った。

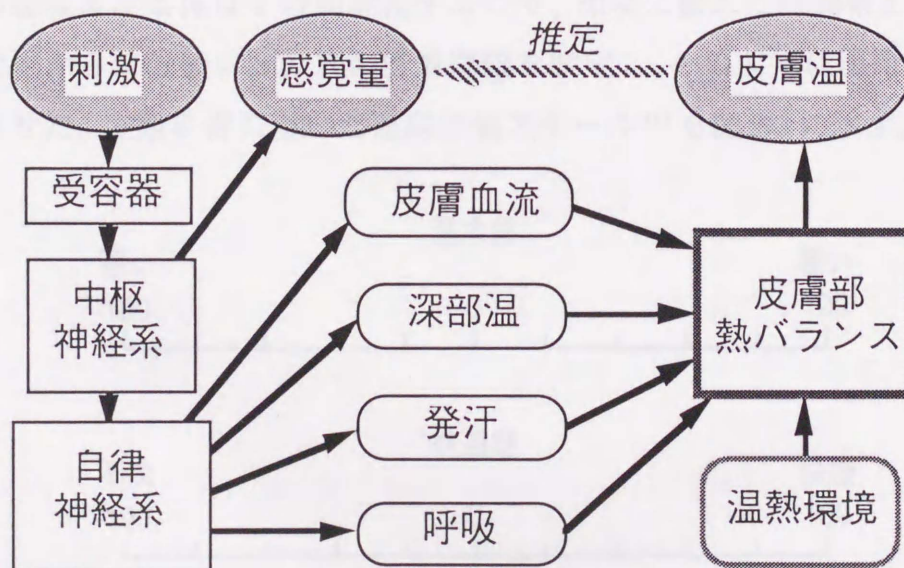


図 5-1 皮膚温変化の模式図

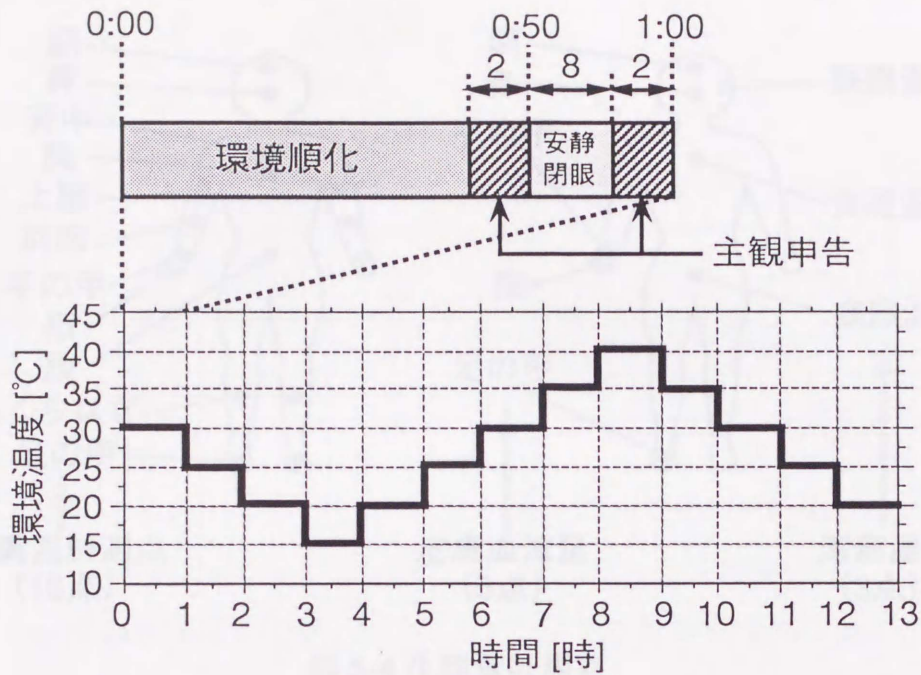


図 5-2 温熱刺激付加実験の流れ

実験の流れを図 5-2 に示す。実験は、恒温恒湿室（タバイエスペック製 TBL-3N1AGDP）にて、約 13 時間かけて行った。環境温度は、最初 30℃ から 15℃ まで低下させた後、40℃ まで上昇させ、その後、20℃ まで低下させた。この温度変更は、1 時間ごとに 5℃ 刻みでおこなった。その他の温熱条件は、湿度 50% 一定、風速 0.1m/sec 以下、輻射制御無し、着衣量約 0.1clo（短パンのみ）、活動量約 0.8met（安静横臥位）である。

1 つの環境温度条件は 1 時間継続するので、環境に慣れた時間帯として、環境温度の変更から 50 分後に 8 分間の安静閉眼を設定し、その前後に温冷感と快適感を申告させた。主観申告に用いた連続評価スケール⁴¹⁾を図 5-3 に示す。温冷感は、

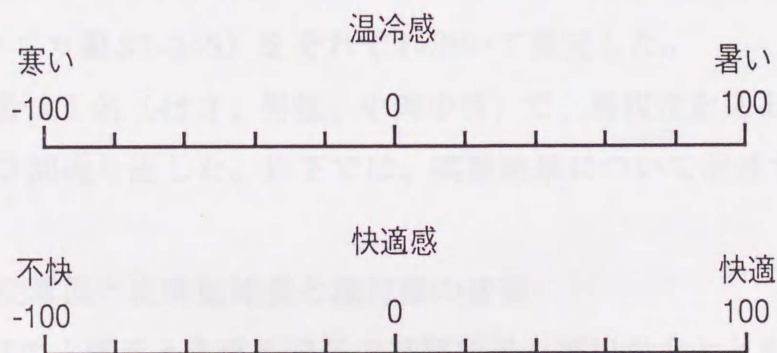


図 5-3 主観申告に用いた連続評価スケール

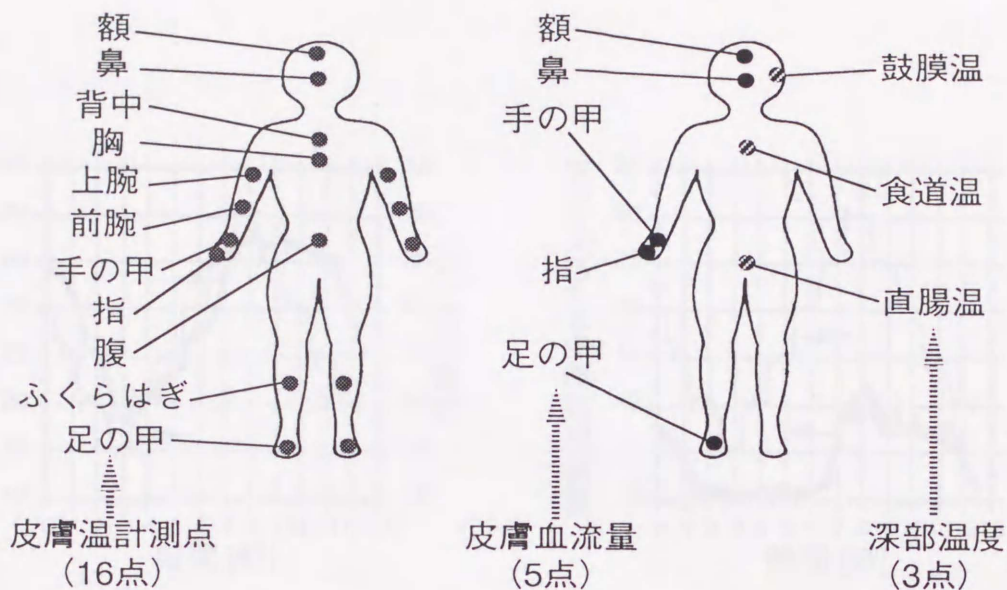


図 5-4 生理量計測点

最も暑いを +100、最も寒いを -100 とし、また、快適感は、最も快適を +100、最も不快を -100 として、自覚する感覚をスケール上にプロットさせた。

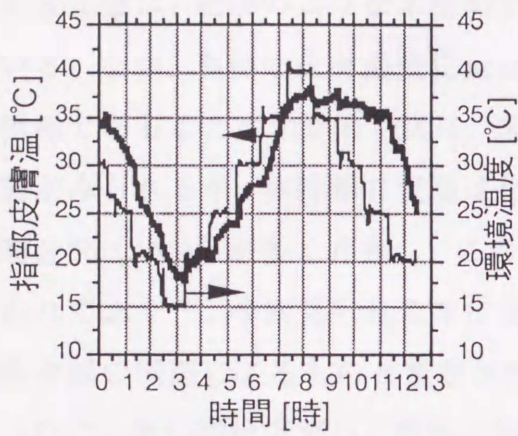
生理量計測点を図 5-4 に示す。生理量は、サンプリング周期 30 秒、約 13 時間連続で、皮膚温 16 点（胸、腹、背中、右上腕、左上腕、右前腕、左前腕、右手甲、左手甲、右足ふくらはぎ、左足ふくらはぎ、右足甲、左足甲、額、鼻、左薬指）、皮膚血流量 5 点（額、右手甲、鼻、右足甲、左薬指）、深部温 3 点（直腸温、鼓膜温、食道温）を測定した。また、同時に、環境温度の測定も行った。

皮膚温と環境温度は、熱電対（ユニークメディカル製 CC-OS94, ϕ 0.2mm）とサーミスタ（テクノセブン製 THR-C）を用いて測定した。また、皮膚血流量は、レーザ血流計（アドバンス製 ALF21）、直腸温はサーミスタ（NIKKISO-YSI 製 401J）、鼓膜温はサーミスタ（センサーテクニカ製 ST-21S）、食道温はサーミスタ（センサーテクニカ製 ST-24S）をそれぞれ用いて測定した。

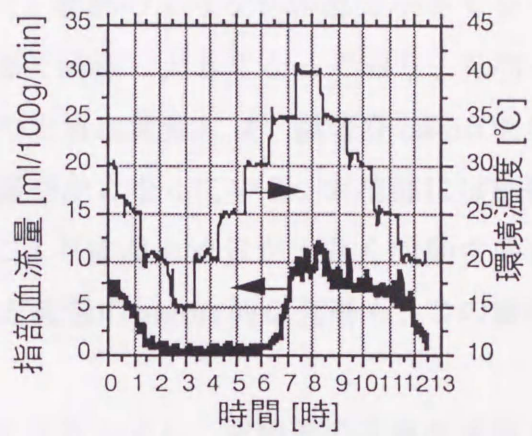
なお、被験者は 1 名（45 才、男性、中肉中背）で、再現性を見るために、日を変えて実験を 3 回繰り返した。以下では、実験結果について記述する。

5. 2. 2 皮膚温と皮膚血流量と深部温の変動

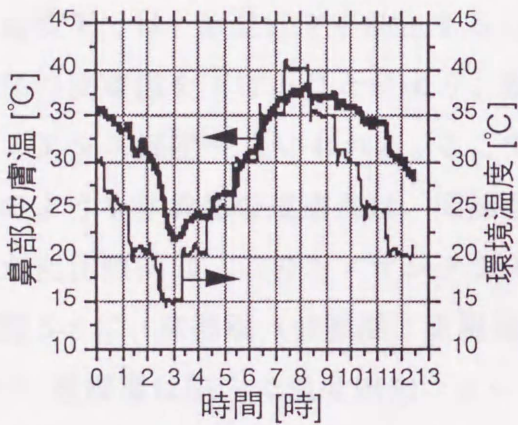
図 5-5 に各部の皮膚温と皮膚血流量の計測結果を環境温度とともに示す。この図では、皮膚温と皮膚血流量は、左軸のスケールで表示し、環境温度は、右軸の



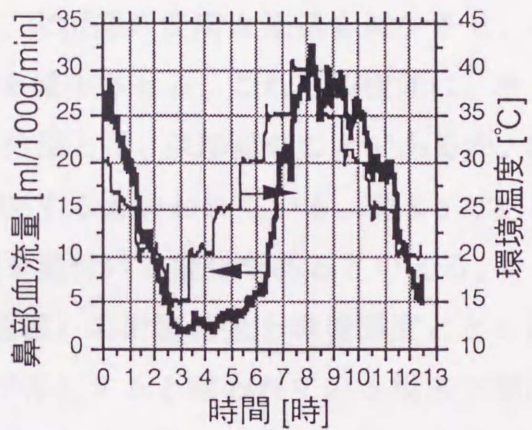
(a) 指部皮膚温の変動



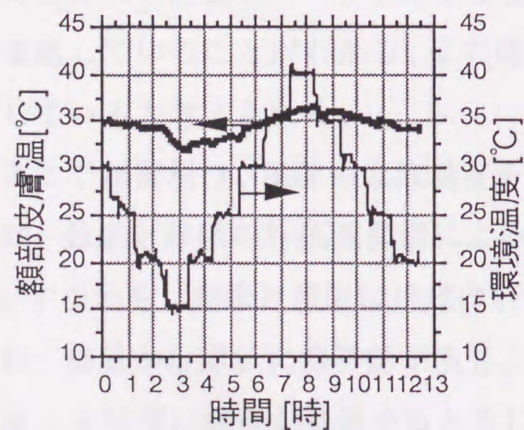
(d) 指部皮膚血流量の変動



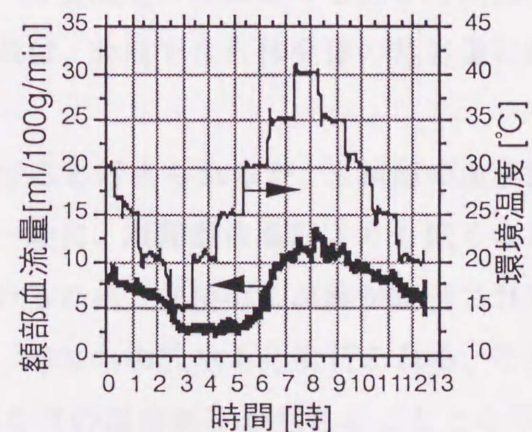
(b) 鼻部皮膚温の変動



(c) 鼻部皮膚血流量の変動



(e) 額部皮膚温の変動



(f) 額部皮膚血流量の変動

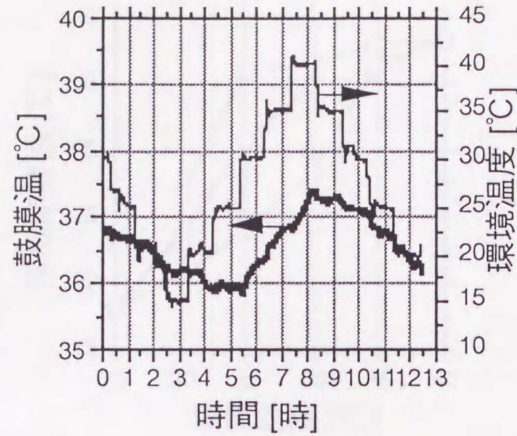
図 5-5 各部の皮膚温と皮膚血流量の計測結果

スケールで表示している。この図から、皮膚温は、部位によって変化量が異なるものの、環境温度の変動にほぼ追従して変動していることがわかる。また、皮膚温の変化量は、指部のような末梢部で大きく、額部のような体幹部で小さくなっている。なお、鼻部の皮膚温変化量は、指部と同様に大きくなっており、鼻部も末梢部であることがわかる。次に、末梢部の皮膚血流量には、顕著な on/off 的な変動がみられるが、体幹部の変動は比較的緩やかになっている。末梢部には動静脈吻合部 (AVA) が多く存在し、この開閉により皮膚血流量が大きく変動するといわれており⁴²⁾、今回見られた末梢部皮膚血流量の on/off 的な変動も、この動静脈吻合部の開閉によるものと推察される。

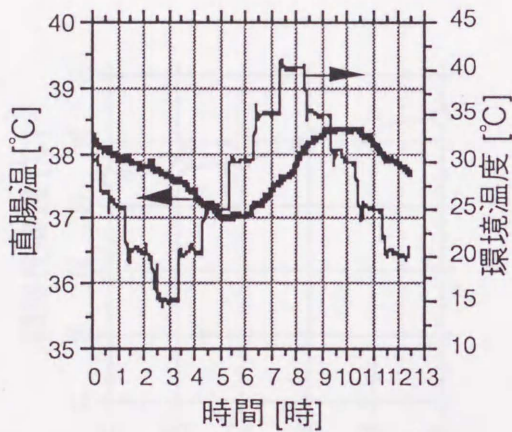
一般に、暑い環境下では、体温上昇を防止するために、末梢部の皮膚血流量を増加させ、末梢部の皮膚温を上げることにより、放熱量を増加させる。また、寒い環境下では、体温低下を防止するために、末梢部の皮膚血流量を減少させ、末梢部の皮膚温を下げることにより、放熱量を減少させる。これらの機能は、ホメオスタシス機能²⁰⁾といわれる。ここでいう体温とは、深部温のことであるが、額部のような体幹部の皮膚温は、深部温を反映するといわれている。図 5-5 で見られた変化傾向は、このホメオスタシス機能を裏付ける変化であるといえる。

図 5-6 に、深部温 (鼓膜温、直腸温、食道温) の計測結果を環境温度とともに示す。鼓膜温は脳内で温度感知ニューロンが存在すると言われている視床下部内の血液温度、直腸温は内臓内の血液温度、食道温は心臓内の血液温度のそれぞれ代用値として計測した²⁰⁾が、各深部温とも、環境温度の変動よりも約 2 時間遅れて変動していることがわかる。この時間遅れは、血液を含む体全体の熱容量に起因していると考えられる。

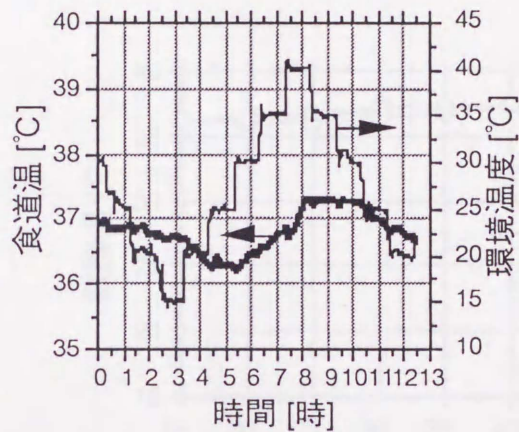
ここで深部温は、深部の血液温度を反映すると考えられるが、末梢部の血液温度は、動脈と静脈の対抗流機構によって、一般に、深部血液温度よりも低くなる⁴³⁾。すなわち、動脈と静脈はほぼ伴行しているため、末梢部に血液が輸送される間に、動脈から静脈に熱移動が生じ、また、環境への放熱も逐次行われる。この結果、末梢部に血液が到達するときにはかなりの温度低下が生じることとなり、この低下量は、環境温度が深部血液温度よりも著しく低いときに大きくなるといえる。このようなしくみにより、図 5-5 に示したように、皮膚血流の変化量が、指部と額部でほぼ等しい場合にも、指部の皮膚温変化量が額部よりも大きくなった



(a) 鼓膜温の変動



(b) 直腸温の変動

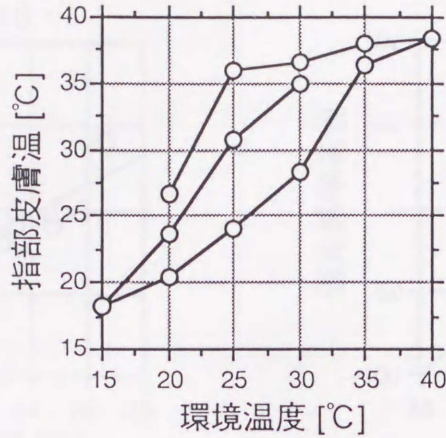


(c) 食道温の変動

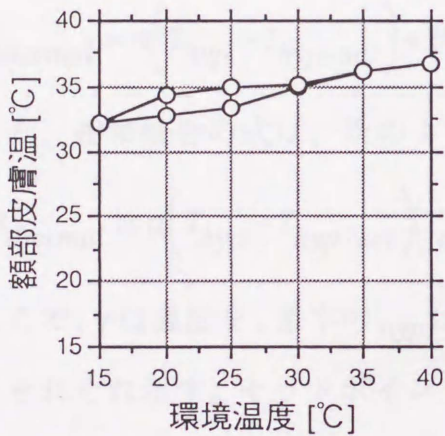
図 5-6 深部温の計測結果

と考えられる。

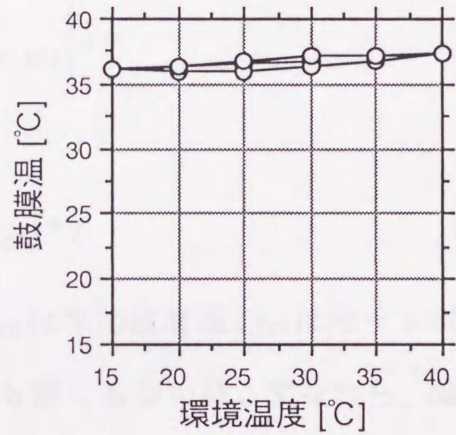
次に、図 5-7 に、安静閉眼時の皮膚温（指部と額部）と鼓膜温を、実験条件の経過順にラインをつなげて示す。この図から、環境温度が同じでも、1 条件前の環境温度が異なれば、指部の皮膚温は大きく変化していることがわかる。一般には、環境と身体との熱収支が定常状態に達すれば、皮膚温も一定値に収束すると考えられる。したがって、この結果から、今回の実験のように環境温度を 5°C 変化させた場合は、50 分の順化時間では、熱収支が定常状態に達しないことが推察される。また、額部皮膚温の変化は小さく、鼓膜温の変化はほとんどないことがわかる。これは上記で述べた深部温を一定に保つというホメオスタシス機能によるものと考察される。



(a) 指部皮膚温の変動



(b) 額部皮膚温の変動



(c) 鼓膜温の変動

図 5-7 安静閉眼時の皮膚温と鼓膜温の計測結果

5. 2. 3 平均皮膚温と深部温の統合による温冷感の推定

温冷感申告値と平均皮膚温の関係を図 5-8 に、温冷感申告値と鼓膜温の関係を図 5-9 に、平均皮膚温と鼓膜温の関係を図 5-10 に、それぞれ示す。ここで、平均皮膚温の算出には、Hardy と Dubois の 7 点法⁴⁴⁾ を用いている。図 5-8 と 9 から、温冷感申告値と平均皮膚温との相関係数は 0.916 と比較的高く、温冷感申告値と鼓膜温との相関係数は 0.779 と比較的低くなっていることがわかる。従来から、温冷感は、皮膚温と深部温との統合によって生じるといわれており^{39) 40)}、今回、これを検証するために、平均皮膚温と鼓膜温による加算統合と相乗統合を行う。

$R_{thermal}$ を温冷感とした場合、加算統合の式は次のように表現される。

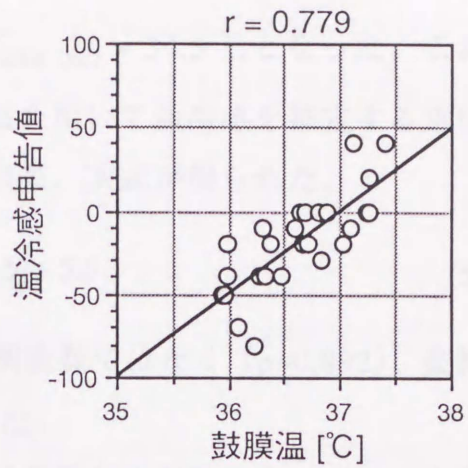
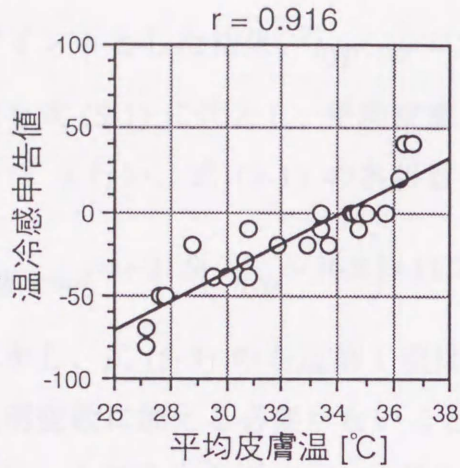


図 5-8 温冷感申告値と平均皮膚温の関係 図 5-9 温冷感申告値と鼓膜温の関係

$$R_{thermal} = \alpha(T_{hyp} - T_{hyp \cdot set}) + \beta(T_{ave} - T_{ave \cdot set}) + \gamma \quad (5-1)$$

また、相乗統合の式は、次のようになる。

$$|R_{thermal}| = \alpha(T_{hyp} - T_{hyp \cdot set})(T_{ave} - T_{ave \cdot set}) + \gamma \quad (5-2)$$

ここで、 T は温度を、添字の hyp は鼓膜温、 ave は平均皮膚温、 set はセットポイントをそれぞれ示す。セットポイントは、暑くも寒くもない時、すなわち、温冷感がほぼ中立の時の温度である。

図5-10内の●印は温冷感がほぼ中立の時であるので、この範囲の平均値をセッ

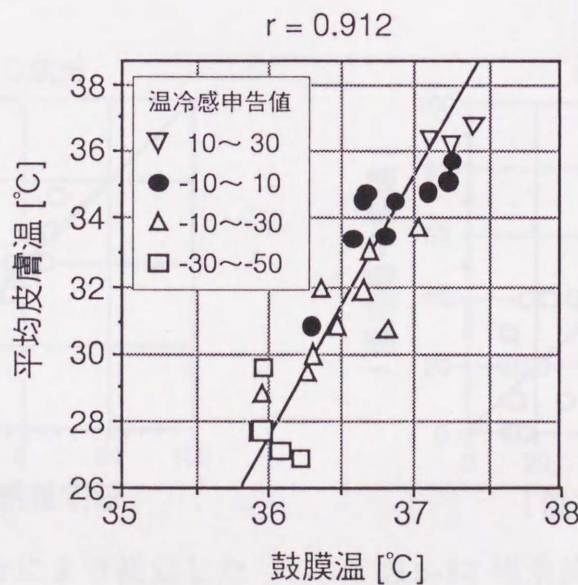


図 5-10 平均皮膚温と鼓膜温の関係

トポイントとした結果、 $T_{hyp.set} = 36.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{ave.set} = 34.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ となった。これらの値を式 (5-1) に代入し、平均皮膚温と鼓膜温を用いて温冷感を推定する重回帰分析⁴⁵⁾ を行い、式 (5-1) の各係数を求めた結果、次式が得られた。

$$R_{thermal} = -21.9(T_{hyp} - 36.8) + 11.7(T_{ave} - 34.5) + 5.5 \quad (5-3)$$

しかし、式 (5-3) の右辺第 1 項は有意な説明変数ではなく ($p=0.892$)、鼓膜温を説明変数に加える必要がないことがわかった。

次に、上記の値を式 (5-2) に代入し、温冷感申告値を目的変数、平均皮膚温と鼓膜温の積を説明変数として回帰分析を行った結果、次式が得られた。

$$|R_{thermal}| = 8.0(T_{hyp} - 36.8)(T_{ave} - 34.5) + 12.5 \quad (5-4)$$

加算統合推定式 (5-3) を用いて推定した温冷感と温冷感申告値との関係を図 5-11 に、相乗統合推定式 (5-4) を用いて推定した温冷感と温冷感申告値との関係を図 5-12 に、それぞれ示す。図 5-11 から、加算統合による推定結果では、相関係数が 0.925 となり、平均皮膚温と温冷感申告値との相関係数 0.916 (図 5-8) よりも上回っていることがわかる。しかし、上記のように鼓膜温は有意な説明変数ではないため、この上昇は見かけ上のことであるといえる。すなわち、別の計測データを使用した場合には、相関係数の上昇が見込めない。したがって、加算統合において鼓膜温は不要であるといえる。また、図 5-12 から、相乗統合による推

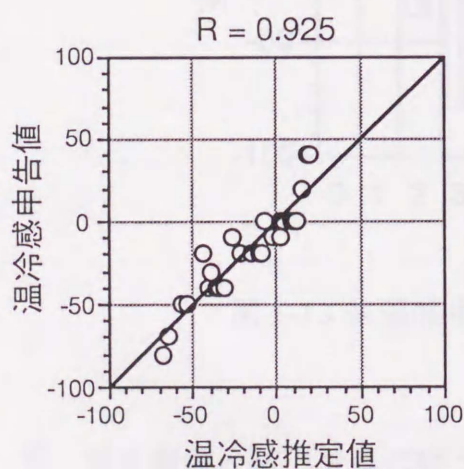


図 5-11 加算統合により推定した温冷感と温冷感申告値との関係

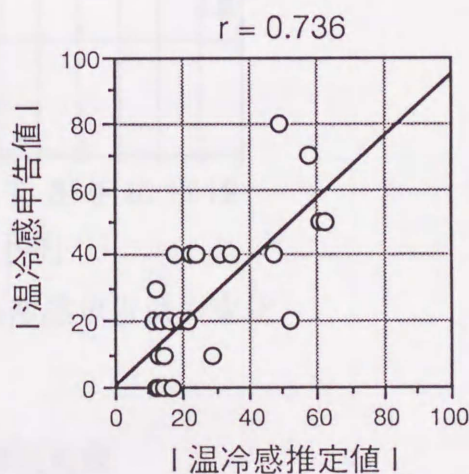


図 5-12 相乗統合により推定した温冷感と温冷感申告値との関係

定結果では、相関係数が0.736となり、平均皮膚温と温冷感申告値との相関係数0.916（図5-8）よりも下回っていることがわかる。すなわち、相乗統合においても鼓膜温は不要であるといえる。

以上の結果から、温冷感の推定には、加算統合と相乗統合の両方式とも、鼓膜温を考慮する必要が無く、皮膚温のみから推定できることが明らかになった。この理由としては、図5-10に示したように、深部温と平均皮膚温の相関が比較的高いことから、深部温の情報が皮膚温に表出しているからだと考えられる。

次に、快適感申告値と温冷感申告値の変化を図5-13に示す。この図から、快適感は、温冷感が0の時に生じていることがわかる。また、寒い環境から暑い環境へ変化するとき生じる快適感は、指部の皮膚血流量と皮膚温が急上昇する時（実験開始から約7時間後）に生じていることがわかる。一方、指部の皮膚血流量と皮膚温が急低下する時（実験開始から約1時間後と約12時間後）は、不快に感じる時期と一致していることがわかる。以上から、快適感も温冷感と同様に、生理量から推定できる可能性が示唆されたといえる。

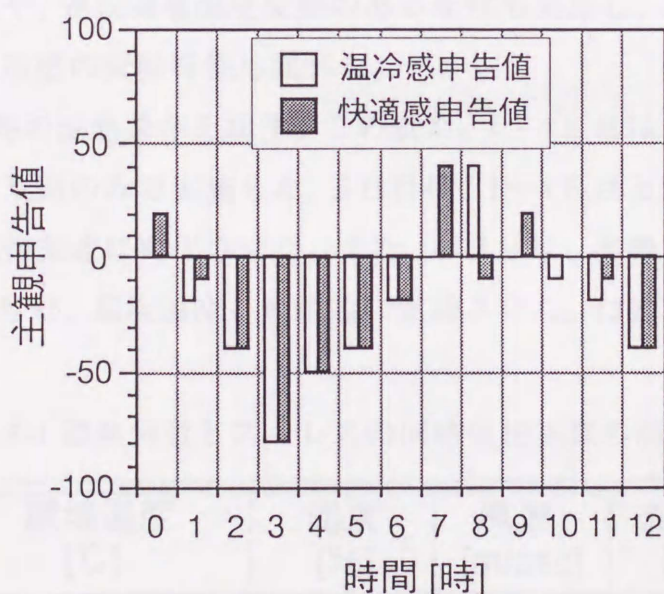


図5-13 快適感申告値と温冷感申告値の変化

5. 3 温熱刺激とストレスに伴う顔面皮膚温変動

上記の検討の結果、温熱刺激に伴う皮膚温、深部温、皮膚血流量の基本的な変

動特性を把握することができ、さらに、皮膚温のみから温冷感を推定できることを明らかにした。しかし、顔面皮膚温から人間感覚を推定するためには、温熱刺激だけでなく、種々の要因に伴って変動する顔面皮膚温の基本変動特性を把握しておく必要がある。したがって、本節では、感覚の中からストレスを取りあげ、温熱刺激とストレスを同時に付加したときの顔面皮膚温の変化特性を調査する。また、ストレスがある場合にも適用できる顔面皮膚温による温冷感の推定式を作成し、顔面皮膚温だけから温冷感を推定できる可能性を示唆する。

5. 3. 1 温熱刺激とストレスの同時付加実験

人間の温冷感や温熱環境に伴う生理反応は、季節の馴化に伴い変動するといわれている²⁰⁾。したがって、季節変化に影響されない顔面皮膚温による温冷感の推定を行うために、冬期（1993年1、2月）と夏期（1993年8、9月）に同様の実験を行った。また、実験ではストレスに伴う温冷感の変化も評価対象にするために、被験者に各種のストレスを付加した。さらに、夏期の実験では、着衣量と活動量が増える条件や、連続環境温度変動のある条件も実施し、これらの条件下での顔面皮膚温と温冷感の変動特性も調べた。

表5-1に実験時の温熱条件を示す。この表で、1～4日目は冬期と夏期で共通にし、5～7日目は夏期のみで実施した。5日目は、1～4日目と比較して着衣を冬服作業着から夏服作業着に変化させた。また、6日目は、姿勢を静座から立位に変化させた。7日目は、環境温度を連続的に変動させた。（25℃→33℃→15℃→33℃）

表5-1 温熱刺激とストレスの同時付加実験の温熱条件

実験日	環境温度 [℃]	湿度 [%]	風速 [m/sec]	着衣量 [clo]	活動量 [met]
1	25	50	0～0.1	1.0	1.0
2	20	50	0～0.1	1.0	1.0
3	15	50	0～0.1	1.0	1.0
4	30	50	0～0.1	1.0	1.0
5	25	50	0～0.1	0.7	1.0
6	25	50	0～0.1	1.0	1.4
7	25→33→15→33	50	0～0.1	1.0	1.0

被験者は冬期と夏期で別の人物とし、冬期と夏期とも25～29才の健常者、男女各3名ずつを用いた。各人とも中肉中背であり、脂肪率も標準的（14.5～24.8Fat%）であった。女性の被験者は、月経日を避けて実験を行い、また、各被験者ともサーカディアンリズム⁴⁶⁾の影響を考慮して、同一時刻に実験を行った。

冬期と夏期の実験の流れを図5-14と15に示す。被験者は実験室に入室後、約45分間で環境に馴れるとともに各種電極を装着され、その後各種のストレスを付加される。ここで、一般にストレスとは、外部からの刺激が加えられたことによって生じた生体内部のさまざまな歪み現象であると定義される⁴⁷⁾が、ここで

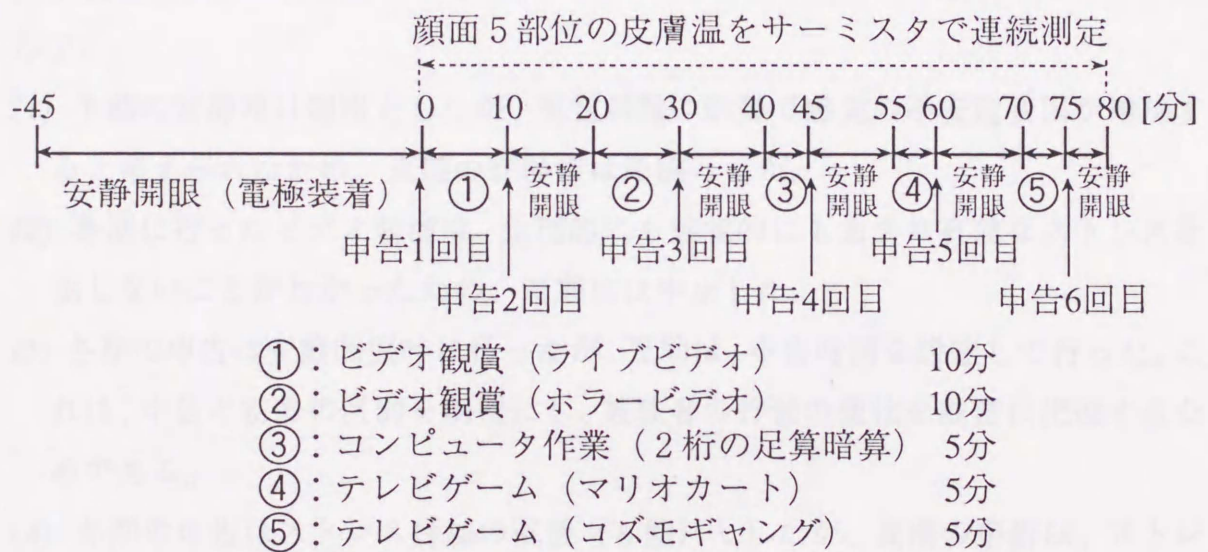


図5-14 温熱刺激とストレスの同時付加実験の流れ (冬期実験)

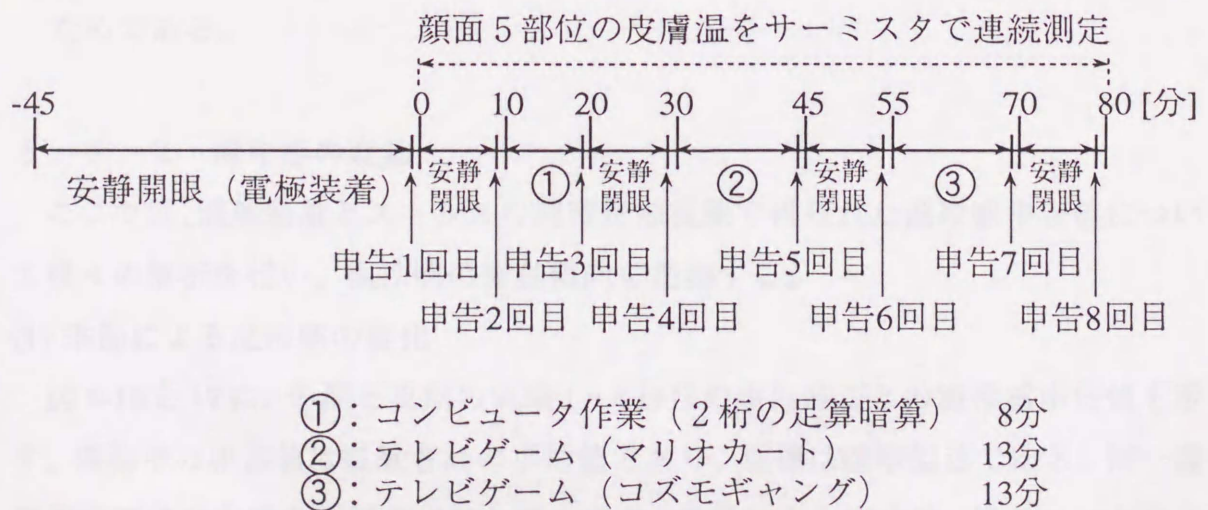


図5-15 温熱刺激とストレスの同時付加実験の流れ (夏期実験)

は、広く解釈してビデオ観賞や各種作業もストレスと呼ぶことにする。

皮膚温は、鼻、額、頬、顎、耳部で、5秒ごとにサーミスタ（テクノセブン製 THR-C）を用いて測定した。温冷感は、図5-14と15に示した申告時に、最も暑いを+100、最も寒いを-100とする連続評価スケール（図5-3）を用いて申告させた。なお、夏期の実験7日目は、ストレスを付加せずに環境温度を連続的に変動させ、温冷感を1分ごとに申告させた。また、環境温度は被験者の近傍50cmの位置で、床面から10、45、80、115、150cmの高さで測定した。

夏期と冬期の実験の流れは、極力同じにするようにところがけたが、冬期の実験で改善が必要と認識された項目については、改善を行った。改善項目を以下に示す。

- (1) 冬期の安静時は開眼としたが、視覚刺激の影響で感覚の不安定要因が増加すると考えられたため、夏期の安静時は閉眼とした。
- (2) 冬期に行ったビデオ刺激は、生理的にも感覚的にもあまり有効なストレスを生じないことがわかったため、夏期には中止した。
- (3) 冬期の申告は安静開眼時に行ったが、夏期は、申告時間を設定して行った。これは、申告と安静の区別を明確にし、被験者の行動の変化を厳密に把握するためである。
- (4) 冬期の申告はストレス付加の直後（6回）としたが、夏期の申告は、ストレス付加および安静閉眼の直後（8回）とした。これは、ストレス付加時の温冷感だけでなく、安静時の温冷感も対象にして、汎用性の高い温冷感推定を行うためである。

5. 3. 2 温冷感の変動

ここでは、温熱刺激とストレスの同時付加実験で得られた温冷感申告値について種々の解析を行い、温冷感の変動傾向を把握する。

(1) 季節による温冷感の変化

図5-16と17に、冬期と夏期の実験1～4日目の申告時ごとの温冷感申告値を示す。両図中の申告値は被験者間の平均値であり、縦棒は標準偏差である。同一環境温度下の温冷感を両図で比較してみると、季節による変化は、ほとんどないことがわかる。実験条件が同一である1回目の温冷感申告値について、季節と環境

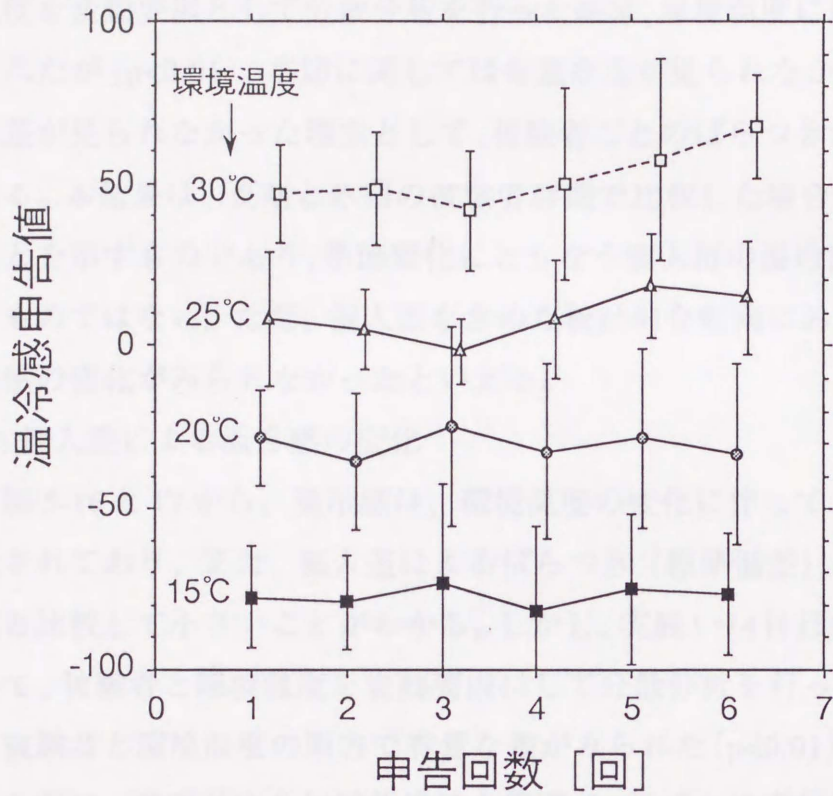


図 5-16 温冷感申告値の変化 (冬期実験)

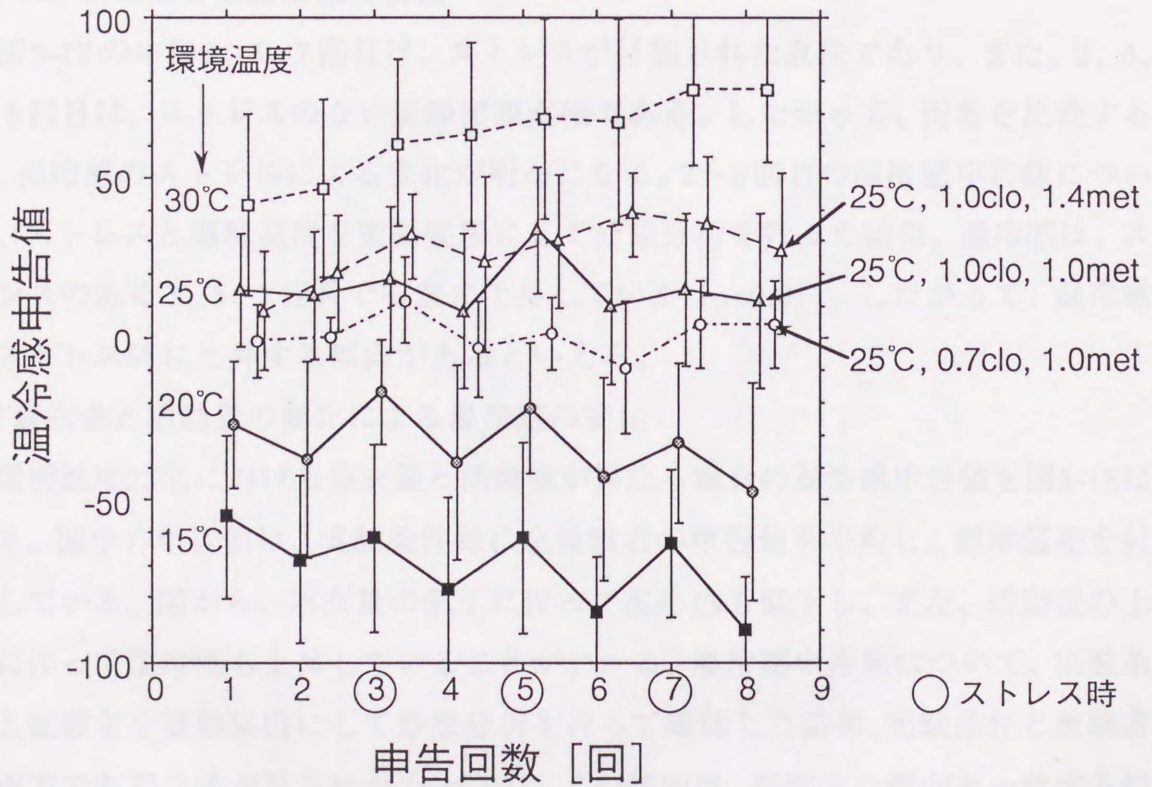


図 5-17 温冷感申告値の変化 (夏期実験)

温度を変動要因として分散分析を行った結果、環境温度に関しては有意な差が見られたが ($p<0.01$)、季節に関しては有意な差が見られなかった。季節に関する有意差が見られなかった理由として、被験者ごとのばらつきが大きいことがあげられる。本結果は、夏期と冬期の被験者群間で比較した場合に、温冷感の差がないことを示すものであり、季節変化にともなう個人毎の温冷感変化がないことを示すものではない。ただ、個人差を含めた統計的な傾向においては、季節による温冷感の変化がみられなかったといえる。

(2) 個人差による温冷感の変化

図5-16と17から、温冷感は、環境温度の変化に伴って、はっきり異なって認識されており、また、個人差によるばらつき（標準偏差）は、環境温度による変化と比較して小さいことがわかる。しかし、実験1～4日目の全温冷感申告値について、被験者と環境温度を変動要因にして分散分析を行った結果、夏期と冬期とも被験者と環境温度の両方で有意な差がみられた ($p<0.01$)。環境温度に関する有意な差は、設定温度を比較的快適な範囲で5℃ごとに変化させているため当然と考えられるが、この結果は、個人差も明らかに存在することを示している。

(3) ストレスによる温冷感の変化

図5-17の申告3、5、7回目は、ストレスが付加された直後であり、また、2、4、6、8回目は、ストレスのない安静閉眼直後である。したがって、両者を比較すると、温冷感のストレスによる変化が明かになる。2～8回目の温冷感申告値について、ストレスと環境温度を変動要因にして分散分析を行った結果、温冷感、ストレスのある3、5、7回目で有意に上昇していた ($p<0.01$)。したがって、温冷感、ストレス時に上昇する傾向があるといえる。

(4) 着衣量と活動量の変化による温冷感の変化

環境温度25℃における着衣量と活動量が異なる場合の温冷感申告値を図5-18に示す。図中の申告値は、実験条件毎に全被験者の申告値を平均し、標準偏差を付加している。図から、着衣量の低下に伴って温冷感も低下し、また、活動量の上昇に伴って温冷感も上昇していることがわかる。温冷感申告値について、実験条件と被験者を変動要因にして分散分析を行って確認した結果、実験条件と被験者の両方で有意な差が見られた ($p<0.01$)。この傾向は、経験的な傾向と一致する傾向である。

(5) 環境温度の連続変動に伴う温冷感の変動

環境温度の連続変動がある時の温冷感申告値を図5-19に示す。また、同図に環境温度の変動も同時に示す。温冷感は、全被験者の1分ごとの申告値の平均値であり、縦棒（破線）はその標準偏差である。また、環境温度は、全被験者の各位置（床面から10、45、80、115、150cmの高さ）で、1分ごとに測定した温度の平均値であり、縦棒（実線）は標準偏差である。この図から環境温度は、25℃（0分：実験開始時）、33℃（約14分後）、15℃（約52分後）、33℃（約80分：実験終了時）の順で、ほぼ直線的に変動していることがわかる。また、環境温度の標準偏差が比較的小さいことから、環境温度は、被験者によらず、また、床面からの距離によらず、精度良く変動していることがわかる。温冷感と環境温度を比較すると、両者の変動はほ

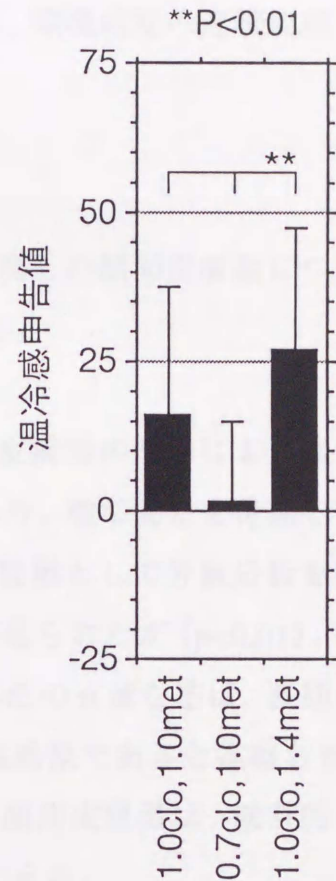


図5-18 着衣量と活動量が異なる場合の温冷感申告値

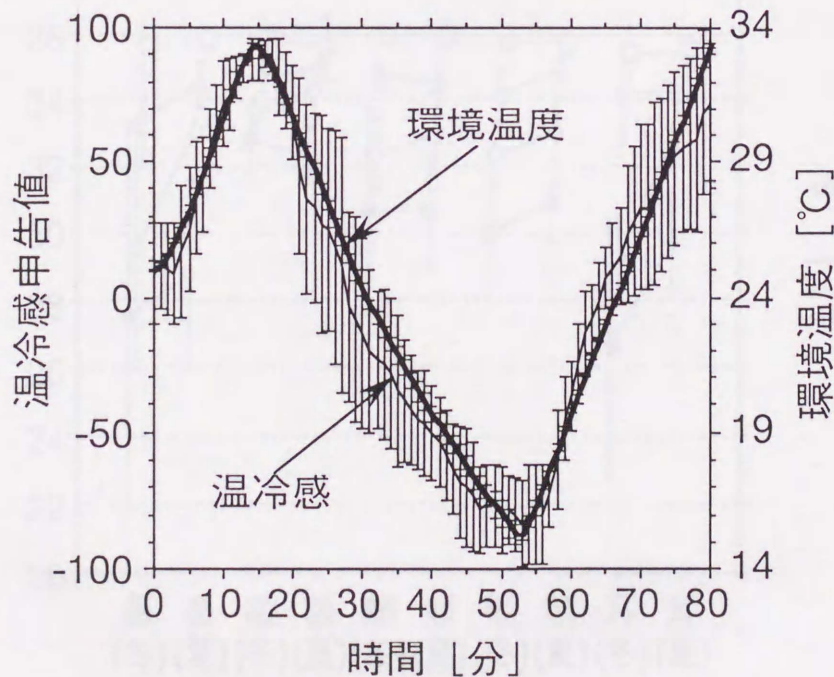


図5-19 環境温度の連続変動がある時の温冷感申告値

ば一致していることがわかる。したがって、温冷感は、環境温度の連続変動にはほぼ同期して変動するといえる。

5. 3. 3 顔面皮膚温の変動

ここでは、温熱刺激とストレスの同時付加実験で計測した顔面皮膚温について種々の解析を行い、顔面皮膚温の変動傾向を把握する。

(1) 季節による顔面皮膚温の変化

実験1~4日目の1回目の申告時における顔面各部の皮膚温の季節による変化を図5-20に示す。図中の皮膚温は、被験者間平均値であり、標準偏差を付加している。顔面各部の皮膚温ごとに、季節と環境温度を変動要因として分散分析を行った結果、全部位において環境温度に関して有意な差が見られたが ($p < 0.01$)、季節に関しては耳部を除き有意な差が見られなかった。耳部の有意な差は、夏期に髪の毛の長い被験者が多かったため、髪が耳にかかった保温効果であると推察される。したがって、総合的に判断すると、同一環境温度下の顔面皮膚温は、統計的な傾向においては、季節による変化が見られなかったといえる。

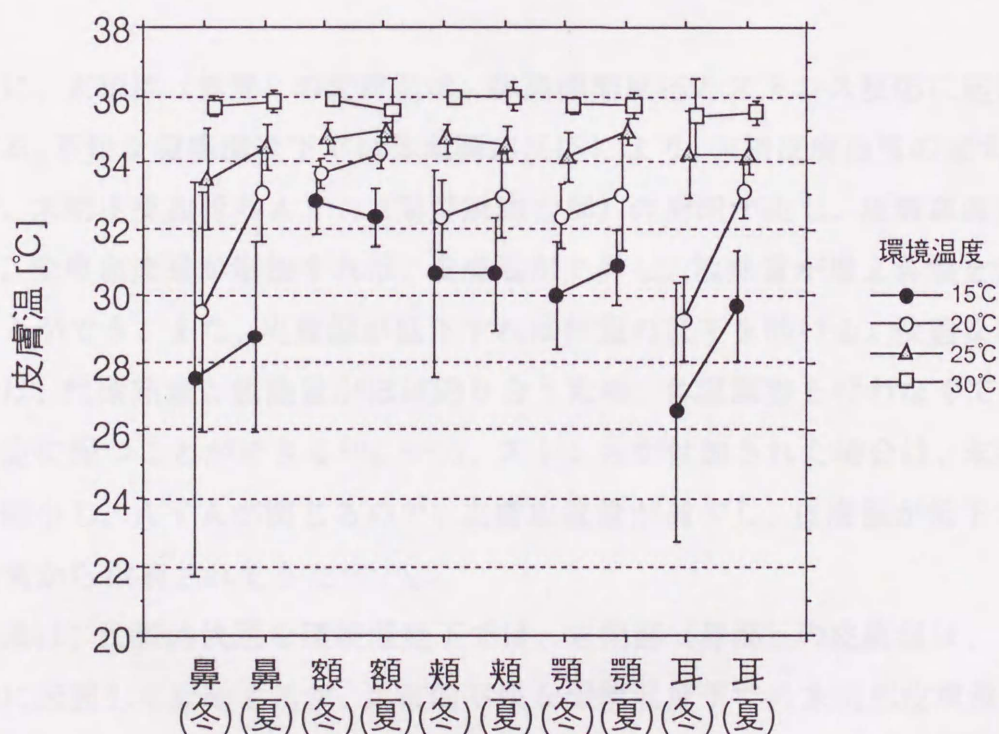


図 5-20 顔面皮膚温の季節による変化

(2) 個人差による顔面皮膚温の変化

図5-20から、顔面各部の皮膚温の個人差によるばらつき（標準偏差）は、環境温度が低くなるに伴って大きくなる傾向があることがわかる。この傾向は、鼻部や耳部の末梢部において顕著であり、額部のような体幹部において顕著でない。したがって、低温環境下における末梢皮膚部の体温調節制御には、かなりの個人差があることが推察される。

次に、実験1～4日目の全申告時に計測した各部の顔面皮膚温について、被験者と環境温度を変動要因にして分散分析を行った結果、夏期と冬期とも全部位において被験者と環境温度の両方で有意な差がみられた($p<0.01$)。環境温度に関する有意な差は、設定温度を5℃ごとに変化させているため当然と考えられるが、この結果は、個人差も明らかに存在することを示している。

(3) ストレスによる顔面皮膚温の変化

冬期の代表的な被験者の鼻部と額部の皮膚温変動を図5-21と22に示す。図中の斜線部は各種のストレスを付加した時間を示す。図5-21から、鼻部皮膚温は、比較的快適な環境温度(20と25℃)ではストレスに伴って低下し、比較的不快な環境温度(15と30℃)ではストレスに伴う低下がほとんど見られないことがわかる。

一般に、末梢部(鼻部)の皮膚温は、体温調節反応とストレス反応に起因して変動する。不快な環境温度下では体温調節反応により、末梢皮膚血管の拡大縮小、および、末梢皮膚血管のAVA(動静脈吻合部)の開閉が生じ、皮膚血流量が変動する。皮膚血流量が増加すれば、皮膚温が上昇し、放熱量が増え体温を低下させることができ、また、皮膚温が低下すれば体温の低下を防げる。快適な環境温度下では、代謝熱量と放熱量がほぼ釣り合うため、体温調整を行わなくても、体温を一定に保つことができる²⁰⁾。一方、ストレスが付加された場合は、末梢皮膚血管が縮小し、AVAが閉じるので、皮膚血流量が減少し、皮膚温が低下することが従来から指摘されてきた^{48~51)}。

本結果は、比較的快適な環境温度下では、末梢部(鼻部)の皮膚温は、ストレス反応に起因して変動するが、比較的不快な環境温度下での末梢部皮膚温は、ストレス反応よりも、体温調整反応を優先して変動することを示唆するものである。

次に、図5-22から、額部皮膚温はいずれの環境温度でもストレスに伴う変動が

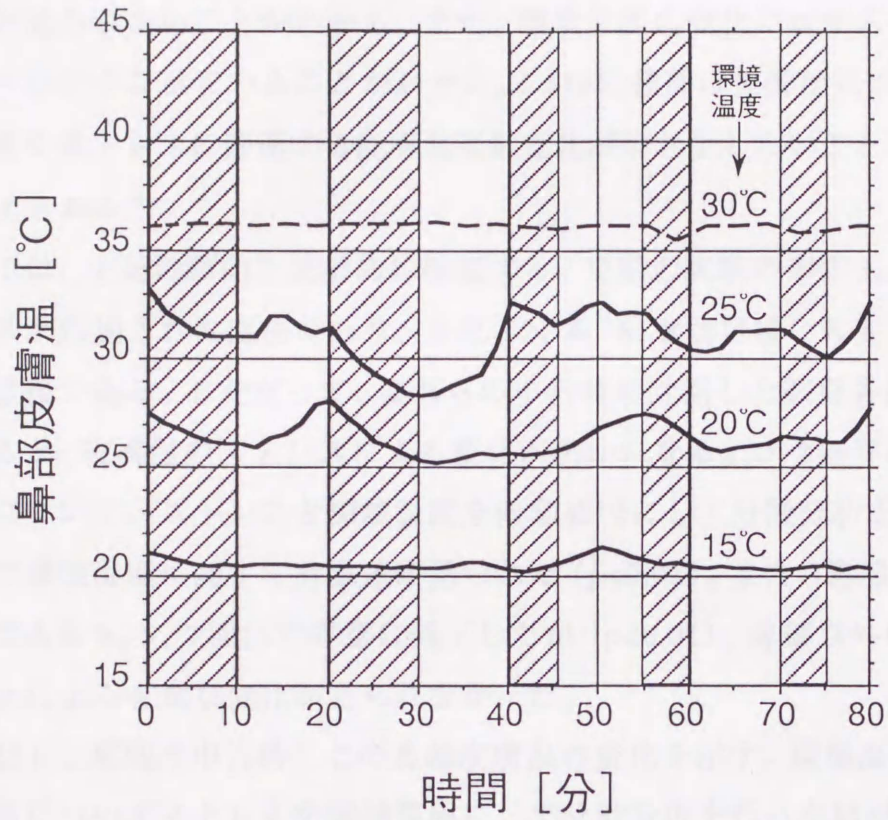


図 5-21 代表的な被験者の鼻部皮膚温変動 (冬期実験)

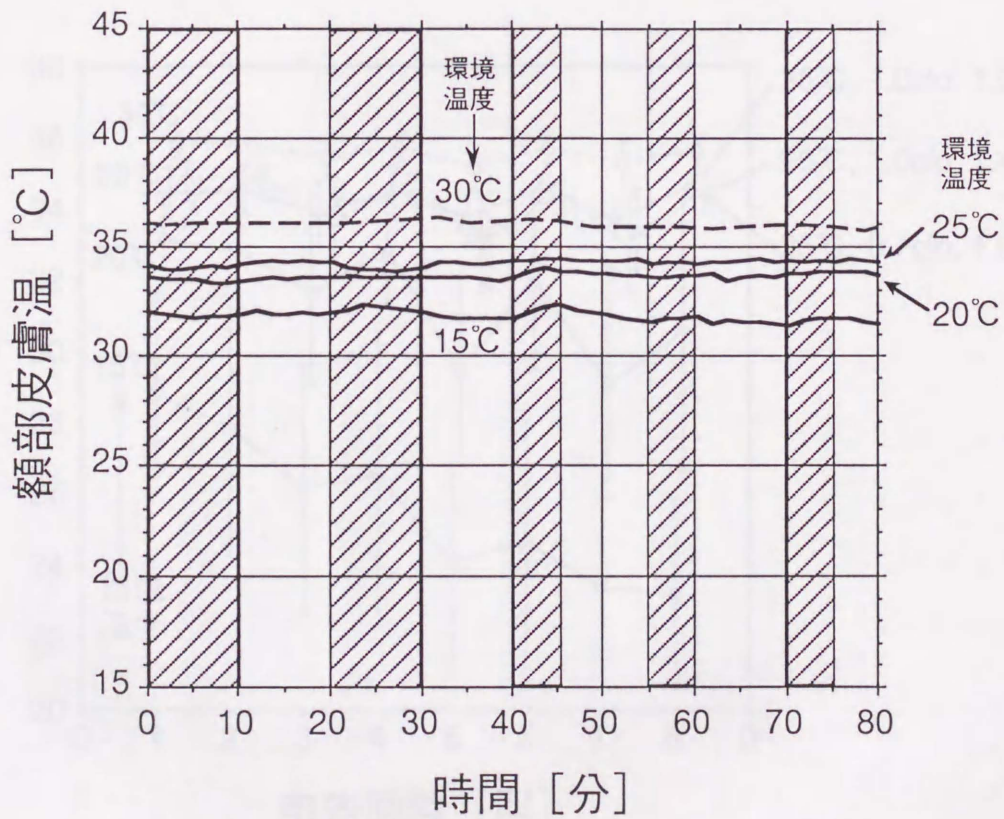


図 5-22 代表的な被験者の額部皮膚温変動 (冬期実験)

ほとんど見られないことがわかる。また、環境温度の変化に対する変化量は、鼻部に比べ小さくなっていることがわかる。これは、額部は体幹部に位置するため、環境温度やストレスに関連する皮膚血流量変化が余り生じないことに起因していると考えられる²⁰⁾。

以下では、上記の傾向を統計的に検証する。夏期の実験の申告3、5、7回目は、ストレスが付加された直後であり、また、2、4、6、8回目は、ストレスのない安静閉眼直後である。したがって、これらの申告時に計測した顔面各部の皮膚温を比較すると、皮膚温のストレスによる変化が明かになる。2～8回目の顔面各部の皮膚温について、ストレスと環境温度を変動要因にして分散分析を行った結果、全部位で環境温度に関する有意差が見られた ($p < 0.01$)。また、鼻部皮膚温は、ストレスのある3、5、7回目で有意に低下したが ($p < 0.01$)、鼻部以外の皮膚温にはストレスによる有意な変化が見られなかった。

図5-23に、夏期の申告時ごとの鼻部皮膚温の変化を示す。環境温度ごとに、鼻部皮膚温についてストレスを変動要因にして分散分析を行った結果、15℃では有意差が見られなかったものの、20℃ ($p < 0.05$)、25と30℃ ($p < 0.01$) で有意差が

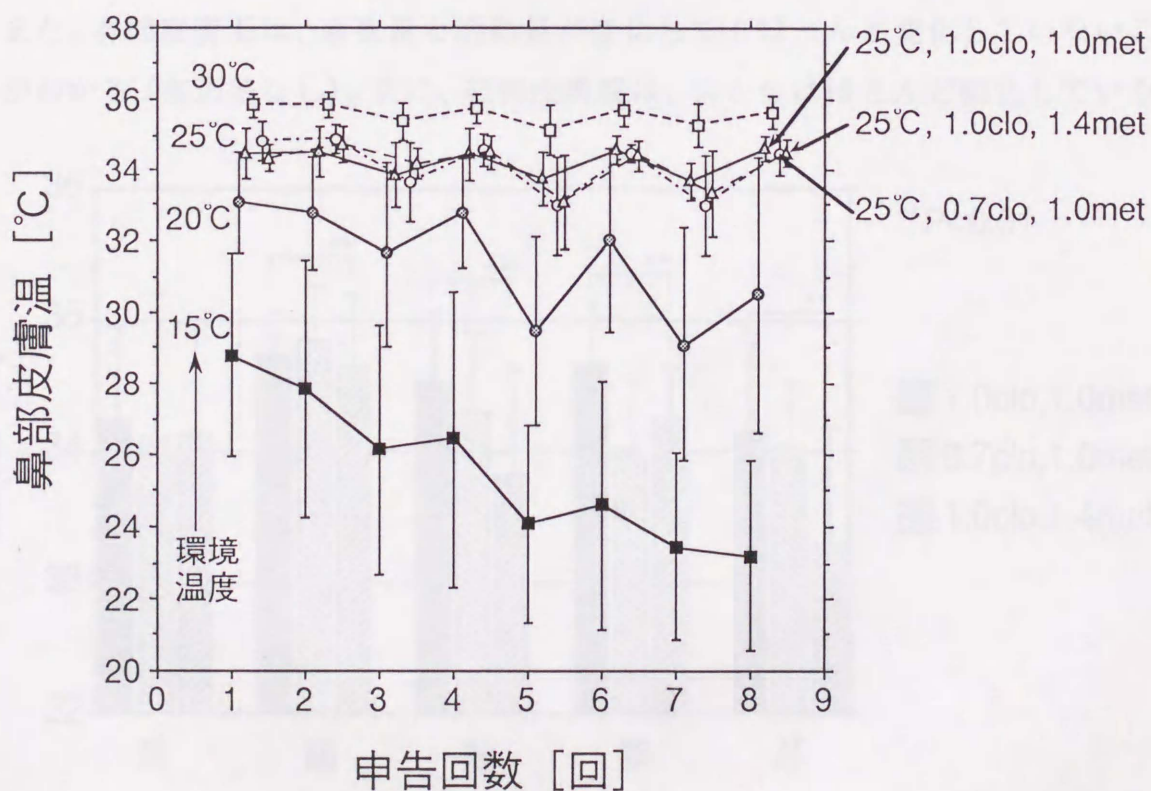


図5-23 申告時ごとの鼻部皮膚温の変化（夏期実験）

見られた。低温環境下で有意差が見られなかった理由としては、低温環境下で体温調整反応が優先することと個人差が大きくなることが上げられる。また、高温環境下で有意差が見られた理由は、高温環境下でも体温調節反応が優先するものの、個人差が小さくなったためであると推察される。

(4) 着衣量と活動量の変化による顔面皮膚温の変化

環境温度25℃における着衣量と活動量が異なる場合の各部の顔面皮膚温を図5-24に示す。図中の皮膚温は、全被験者の申告時の平均値であり、標準偏差を付加している。この図から、頬、顎、耳の各皮膚温は、着衣量の低下に伴って低下し ($p<0.01$)、また、活動量の上昇に伴っても低下していることがわかる ($p<0.01$)。

着衣量が低下すれば、着衣のある皮膚領域からの放熱量が上昇するので、顔面等の着衣の無い領域からの放熱量が低下する。したがって、顔面部の皮膚血流量が減少し、顔面皮膚温が低下したと考えられる。この着衣量の低下に伴う顔面皮膚温の低下は、温冷感申告値の変化傾向と一致している。しかし、活動量の上昇に伴う皮膚温の低下は、逆の傾向である。この理由としては、座位から立位の変化に伴って、顔面の皮膚血流量が重力の影響を受け減少し、皮膚温が低下したからだと考えられる⁵²⁾。

また、鼻部皮膚温は、着衣量と活動量が変わってもほとんど変化していないことがわかる (有意差なし)。次に、額部皮膚温は、図からはほとんど変化していな

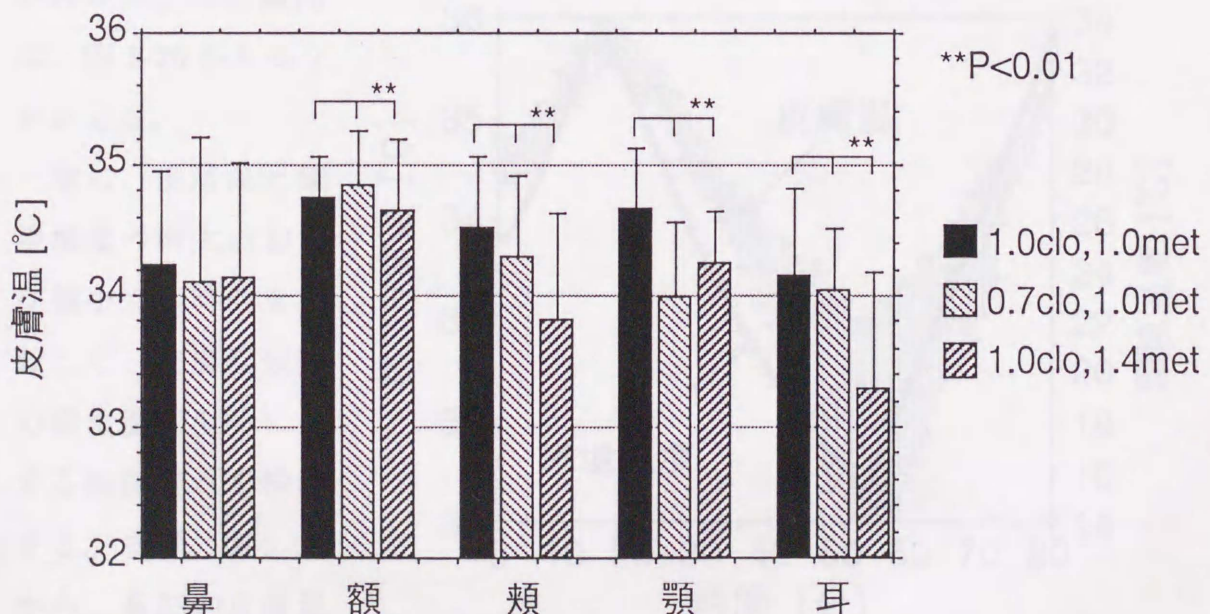


図 5-24 着衣量と活動量が異なる場合の各部の顔面皮膚温

いように見えるが有意差があった ($p < 0.01$)。これは、額部の標準偏差が小さいことに起因していると考えられる。ここで述べた有意差は、実験条件と被験者を変動要因にした分散分析により算出したものであり、被験者については、全分析で有意な差が見られている ($p < 0.01$)。

(5) 環境温度の連続変動に伴う顔面皮膚温の変動

環境温度の連続変動がある時の鼻部（末梢部）と額部（体幹部）の皮膚温変動を図 5-25 と 26 に示す。

両図には環境温度の変動も同時に示す。皮膚温は、1分ごとの申告時の被験者間平均値であり、縦棒（破線）はその標準偏差である。両図から、皮膚温は、環境温度が低くなるに伴って標準偏差が大きくなっていることがわかる。この傾向は、図 5-20 からもうかがえる。

次に、皮膚温と環境温度の極大点および極小点の時間を比較して、皮膚温変動の環境温度変動に対する時間遅れを検討する。まず、図 5-25 から、鼻部の皮膚温は、環境温度が上昇

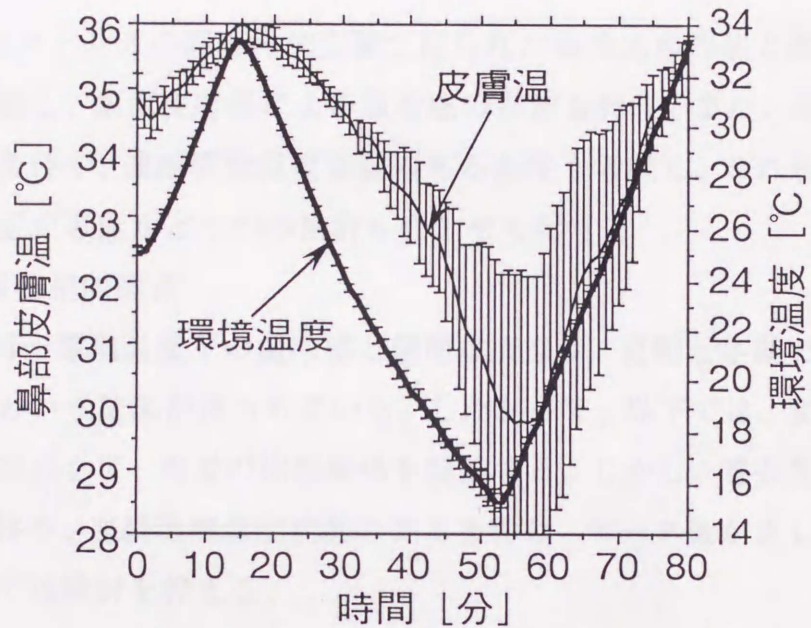


図 5-25 環境温度の連続変動がある時の鼻部皮膚温変動

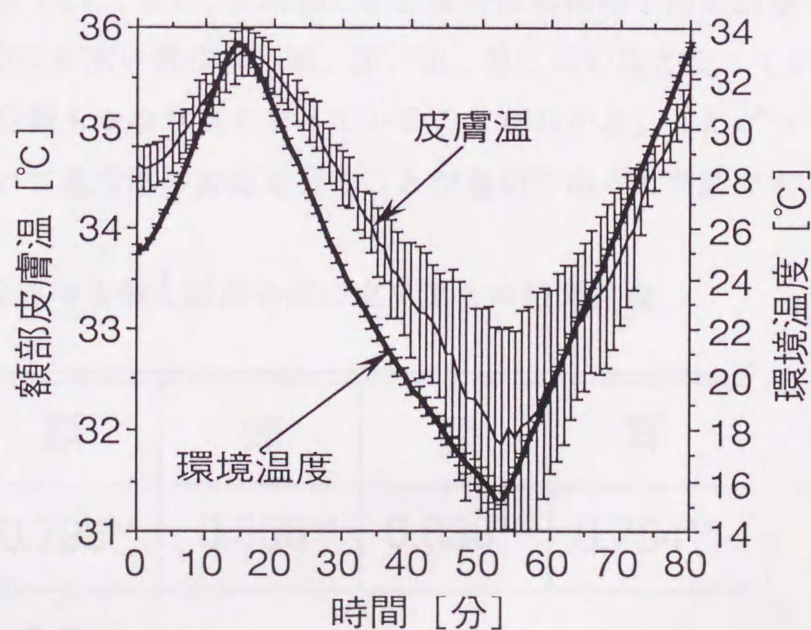


図 5-26 環境温度の連続変動がある時の額部皮膚温変動

から低下に推移する過程では、ほとんど時間遅れなく変動するものの、環境温度が低下から上昇に推移する過程では、約5分の時間おくれが見られている。また、図5-26から、額部の皮膚温は、どちらの過程でも約1～2分の時間おくれが見られている。これらの結果だけでは、部位差に関する議論はできないが、いずれの部位でも時間遅れが生じる傾向はあるようである。

5. 3. 4 顔面皮膚温による温冷感の推定

ここでは、温熱刺激とストレスの同時付加実験で得られた温冷感申告値と顔面皮膚温の相関関係を解析し、顔面皮膚温による温冷感の推定を行う。また、着衣量や活動量が変化する条件や、連続環境温度変動のある条件も考慮し、これらの条件下でも、同様の推定が可能かどうかの検討も合わせて行う。

(1) 温冷感と顔面皮膚温の相関関係

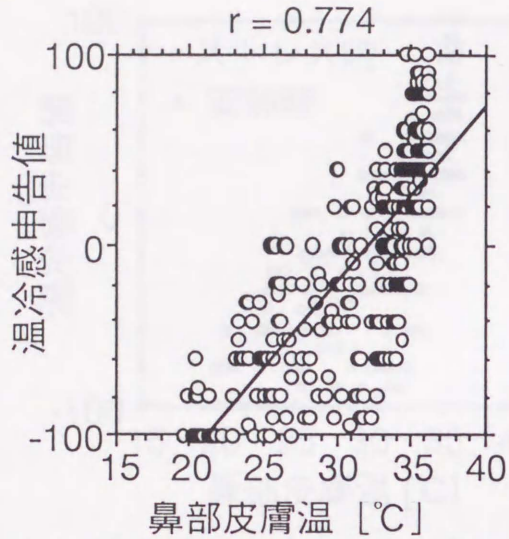
上記の検討の結果、同一環境温度下の温冷感と顔面皮膚温は、夏期と冬期ではほとんど変化しなかったという結論が得られている。したがって、以下では、夏期と冬期の実験データを統合して、両者の相関関係を議論する。しかし、着衣量や活動度の変化がある条件や、連続環境温度変動のある条件は、データ数が乏しいため、相関関係については検討を控える。

夏期と冬期の実験の1～4日目の申告時に得た温冷感と顔面皮膚温の全データから算出した相関係数を表5-2に、また、温冷感と顔面皮膚温の関係を図5-27示す。表5-2から、温冷感と相関が高い部位は、頬、顎、額、鼻、耳の順となっているものの、いずれの相関係数もかなり高くなっていることがわかる。したがって、顔面各部の皮膚温を用いて温冷感の推定を行うことが適切であると判断できる。

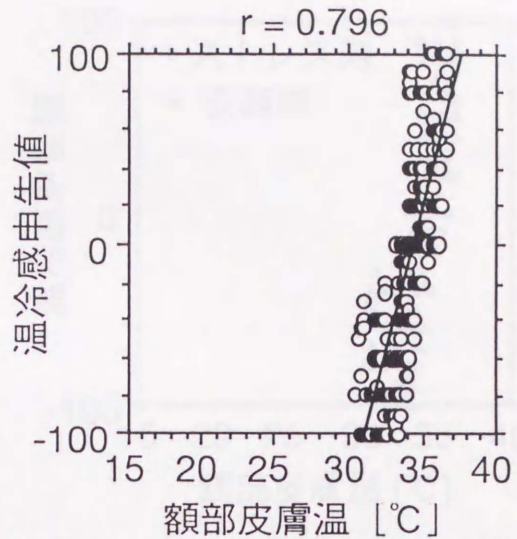
表 5-2 温冷感申告値と顔面各部の皮膚温との相関係数

鼻	額	頬	顎	耳
0.774**	0.796**	0.866**	0.838**	0.754**

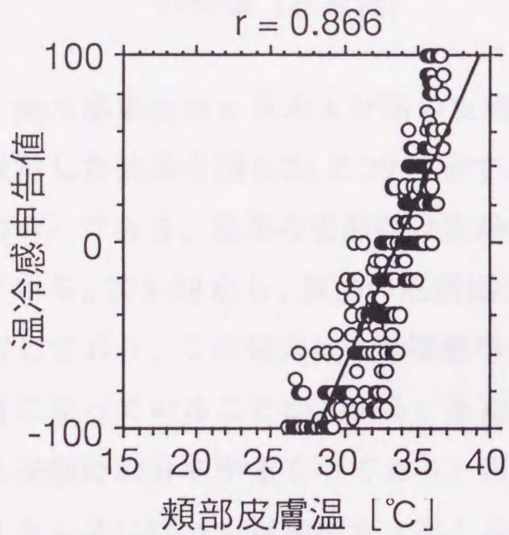
(n=308, **P<0.01)



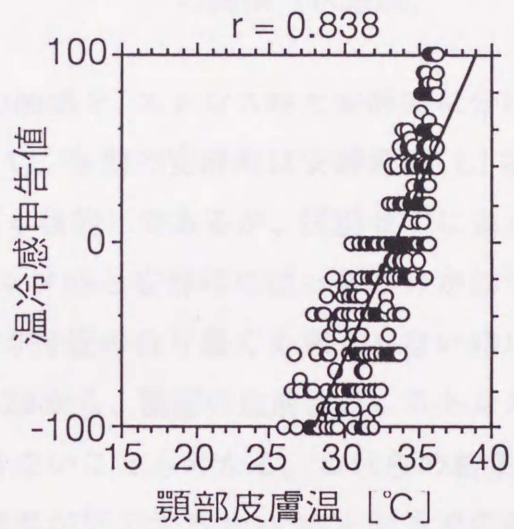
(a) 温冷感申告値と鼻部皮膚温の関係



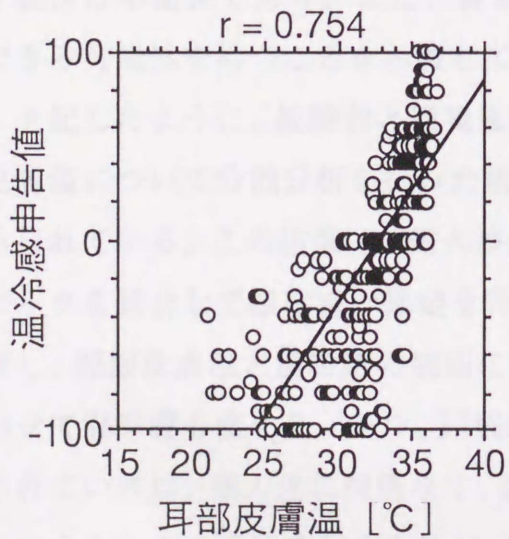
(b) 温冷感申告値と額部皮膚温の関係



(c) 温冷感申告値と頬部皮膚温の関係



(d) 温冷感申告値と顎部皮膚温の関係



(e) 温冷感申告値と耳部皮膚温の関係

図 5-27 温冷感申告値と顔面各部の皮膚温との関係

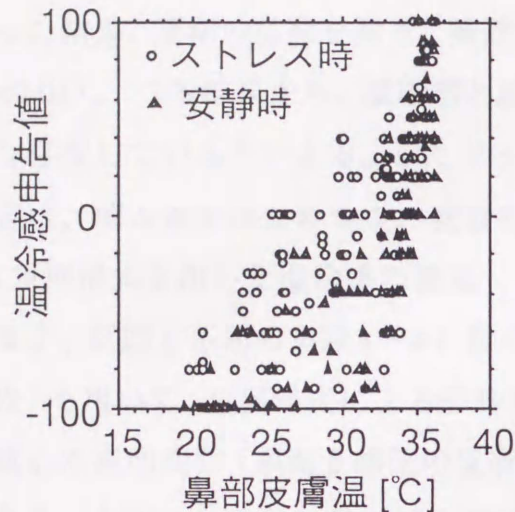


図 5-28 温冷感申告値と鼻部皮膚温の関係 (状態別)

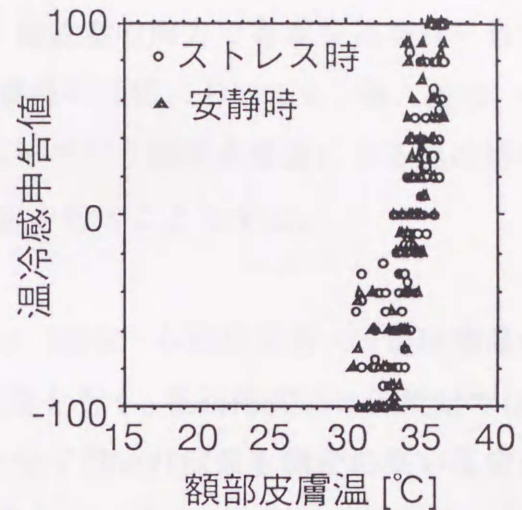


図 5-29 温冷感申告値と額部皮膚温の関係 (状態別)

温冷感申告値と鼻および額の皮膚温との関係を、ストレス時と安静時に分けて表示した結果を図 5-28 と 29 に示す。ここで、冬期の安静時は安静開眼（1 状態のみ）であり、夏期の安静時は安静閉眼（4 状態）であるが、区別せずに表示している。図 5-28 から、鼻部の皮膚温はストレス時と安静時にはっきり分かれて分布しており、この傾向は、温冷感申告値が 0 付近の余り暑くも寒くもない時に顕著になっていることがわかる。また、図 5-29 から、額部の皮膚温は、ストレス時と安静時の分布が重なっており、区別できないこともわかる。これらの結果は、ストレスに伴って温冷感が上昇し鼻部皮膚温が低下するという、上記までの結果を裏付ける結果であり、また、鼻部皮膚温がストレスに伴う温冷感変化を説明できる可能性を持つことを示唆している。

上記したように、被験者と環境温度を変動要因にして、温冷感申告値と各部の皮膚温について分散分析を行った場合、被験者と環境温度の両方で、有意な差がみられている。この結果は、個人差が有意に存在することを示しており、全員のデータを統合して温冷感の推定を行っても意味があるかどうかの疑問が残る。しかし、顔面皮膚温と温冷感の個別には個人差があっても、顔面皮膚温の変化に合わせて温冷感も変化し、かつ、同程度の顔面皮膚温の時、同程度の温冷感が申告されていれば、個人差に関係なく、顔面皮膚温による温冷感の推定が可能になるといえる。この検証を行うために、温冷感申告値を 3 段階の離散尺度に変換し、この離散尺度と被験者を変動要因にして、顔面各部の皮膚温について分散分析を

行った結果、夏期の鼻部を除き、離散尺度と被験者の両方で有意な差がみられた ($p < 0.01$)。この結果から、温冷感と顔面皮膚温の関係においても、個人差は、やはり存在しているといえる。したがって、以下で行う顔面皮膚温による温冷感の推定は、個人差をみとめつつ、統計的な推定を行うこととする。

(2) 重回帰式を用いた温冷感の推定

まず、夏期と冬期の実験1~4日目のデータ(座位・冬服作業着・一定環境温度条件)を用いて、重回帰式による温冷感の推定を行う。重回帰式による推定では、用意した説明変数(顔面5部位の皮膚温)を全て用いれば最も精度の高い推定ができる。しかし、これは見かけ上のことであり、いくつかの説明変数の中には、目的変数の推定に余り寄与しないものも存在している。したがって、これらの説明変数を重回帰式から除去し、できるだけ少ない説明変数を用いて精度の高い推定を行う。ここでは変数減増法を用いる⁴⁵⁾。変数減増法は、すべての説明変数を用いて作成した重回帰式から、有意でない説明変数を減らしてゆく手法である。ただし、一度除去した説明変数は、別の説明変数を除去した際に、再度、説明変数として取り込むかどうかの判定を行い、取り込み基準を満たせば、再度、重回帰式内に取り込む。この説明変数の除去・取り込みを、重回帰式が収束するまで繰り返し行う。この結果得られた重回帰式は、有意な説明変数のみを用いた推定式となる。本報での説明変数を除去するルールは、その説明変数の偏回帰係数が0になる危険率が0.05以上ある場合とし、また、説明変数を再度取り込むルールは、危険率が0.05未満の場合とした。この結果得られた重回帰式を次に示す。

$$y = -695.48 - 2.43 * \text{鼻温} + 14.90 * \text{頬温} + 4.50 * \text{顎温} + 3.70 * \text{耳温} \quad (5-5)$$

ここで、 y は温冷感の推定値である。

この式から額部の皮膚温が除去されており、額部の皮膚温と温冷感の関係は、他の部位の皮膚温を用いて説明できることがわかる。また、この式の鼻部の皮膚温にかかる偏回帰係数は、負になっている。これは、ストレスに伴って、鼻部の皮膚温が低下し、温冷感が上昇するという関係から生じていると理解できる。この式を用いて温冷感を推定した結果を図5-30に示す。温冷感申告値と温冷感推定値との重相関係数 R は0.897であり、高精度で温冷感を推定できる可能性が示唆されている。

以下では、各種条件下のデータを付加した場合の温冷感の推定を行う。推定式

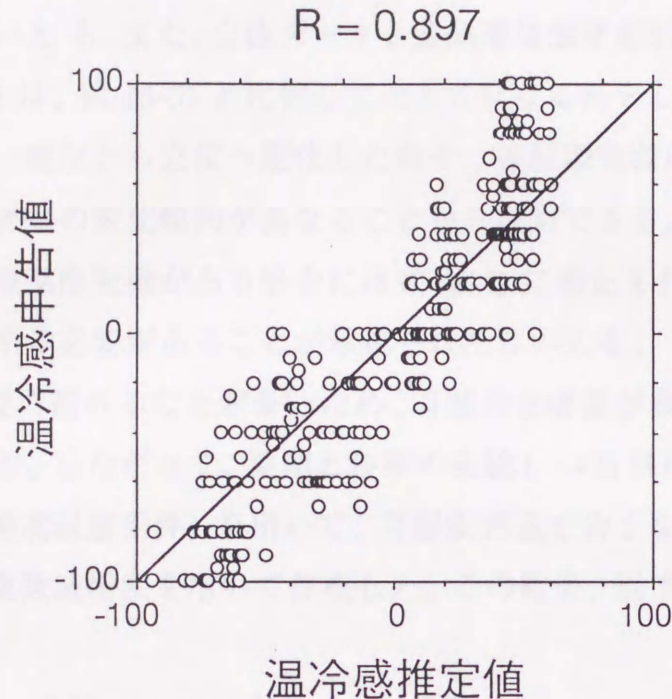


図 5-30 温冷感申告値と温冷感推定値との関係

の作成法は、上記と同じ変数減増法である。式 (5-5) を作成した時のデータ数は 308 データであり、各種条件下のデータを付加した場合は、さらに各 48 データを追加している。

まず、夏服データを付加した場合は、次の推定式が得られた。

$$y = -689.96 - 2.52 * \text{鼻温} + 14.65 * \text{頬温} + 4.76 * \text{顎温} + 3.58 * \text{耳温} \quad (5-6)$$

次に、立位データを付加した場合は、次の推定式が得られた。

$$y = -641.55 + 11.13 * \text{頬温} + 4.35 * \text{顎温} + 3.80 * \text{耳温} \quad (5-7)$$

さらに、連続環境温度変動データを付加した場合は、次の推定式が得られた。

$$y = -722.21 + 5.22 * \text{額温} + 11.76 * \text{頬温} + 4.51 * \text{耳温} \quad (5-8)$$

ここで、上記の推定式 (5-5) ~ (5-8) の分散分析結果は、いずれも有意 ($p < 0.01$) であった。したがって、これらの重回帰式を用いれば、統計的に有意な推定が可能であるといえる。

これら 4 つの式を比較すると、式 (5-5) と (5-6) がほとんど同じ形をしていることがわかる。この結果は、着衣が冬服から夏服へ変化した時の温冷感の低下に追従して、顎や頬や耳部の皮膚温も低下するという上記までの結果から説明できる。したがって、着衣量が変化しても、式 (5-5) を補正無しで使用できる可能性

が示唆されたといえる。また、立位データと連続環境温度変動データを付加した式(5-7)と(5-8)は、式(5-5)と比較して大きく異なる形をしていることがわかる。この結果は、座位から立位へ変化した時や、連続環境温度変動のある時は、温冷感と顔面皮膚温の変化傾向が異なることから説明できる。したがって、活動量変化や連続環境温度変動がある場合には式(5-5)に補正を行う、もしくは、別の推定式を使用する必要があることが示唆されたといえる。

なお、耳部は髪で隠れることが多いため、耳部の皮膚温が非接触計測できない場合が想定される。したがって、夏期と冬期の実験1~4日目のデータ(座位・冬服作業着・一定環境温度条件)を用いて、耳部皮膚温を含まない温冷感の推定式を、上記と同じ変数減増法を用いて作成した。この結果、以下の推定式が得られた。

$$y = -711.41 - 2.39 * \text{鼻温} + 15.33 * \text{頬温} + 8.12 * \text{顎温} \quad (5-9)$$

式(5-9)を用いて温冷感を推定した結果、重相関係数Rは0.886となり、式(5-5)による重相関係数(R=0.897)とほとんど変わらなかった。また、式(5-9)の分散分析結果も有意であり、これらの結果から、耳部が髪で隠れた被験者についても良好に温冷感を推定できる可能性が示唆されたといえる。

5. 4 まとめ

本章では、感覚だけでなく温熱環境に伴って変動する顔面皮膚温の物理的及び生理的基本変動特性について記述し、あわせて、顔面皮膚温による温冷感の推定手法を提案した。この結果、温熱刺激とストレスに起因する顔面皮膚温変化のしくみを把握でき、中立環境温度下では、ストレスに伴う顔面皮膚温変動が存在することが確認できた。また、ストレスがある場合にも、顔面皮膚温だけから、温冷感を推定式できることを示唆できた。

しかし、顔面皮膚温を用いて画像から受ける感覚を客観的に評価するためには、顔面皮膚温から感覚を推定する手法を確立する必要がある。したがって、次章では、顔面皮膚温による感覚の客観的評価手法を提案する。

第6章 顔面皮膚温による感覚の客観的評価

6.1 まえがき

第5章では、感覚だけでなく温熱環境に伴って変動する顔面皮膚温の基本変動特性について記述するとともに、顔面皮膚温による温冷感の推定手法を提案した。この結果、温熱刺激とストレスに起因する顔面皮膚温変化のしくみを把握でき、中立環境温度下では、ストレスに伴う顔面皮膚温変動が存在することが確認できた。しかし、顔面皮膚温を用いて画像から受ける感覚を客観的に評価するためには、顔面皮膚温からストレス等の感覚を推定する手法を確立する必要がある。特に、色変換された画像と変色した原画像は、それらを観察する人間に異なるレベルのストレスを与えると考えられるため、顔面皮膚温によるストレス推定手法の確立が最も重要である。したがって、本章では、まず、顔面皮膚温によるストレスの客観的評価手法を提案し、この評価手法の検証を行って、有効性を確認する。あわせて、ストレスの蓄積によって疲労が生じると仮定し、顔面皮膚温による疲労の客観的評価手法を提案する。

本章の第2節では、まず、中立環境温度下でストレスを付加する実験について述べ、この実験結果から、顔面皮膚温によるストレス推定式を作成する。次に、作成したストレス推定式を、第5章で記述した実験データに適用し、このストレス推定式が有効であることを示唆する。

第3節では、中立環境温度下で疲労を付加する実験について述べ、ストレスの蓄積によって疲労が生じると仮定して、この実験結果から、顔面皮膚温による疲労推定式を作成する。

6.2 顔面皮膚温によるストレス推定

ここでは、人間に全く負荷をかけずに非接触で計測できる顔面皮膚温からスト

レスを推定する手法を提案する。この手法は、人間感性を考慮して好ましいと感じるように色変換した画像の客観的評価に使用できるだけでなく、一般的に、業務効率の低下や健康阻害などの社会的問題の原因となるストレスの評価に使用できるため、極めて有用である。

6. 2. 1 ストレス付加実験

顔面皮膚温によるストレス推定手法を提案するためには、まず、ストレスを付加する実験を行い、ストレスと顔面皮膚温変動との相関データを蓄積する必要がある。以下では、ディスプレイ上でトラング作業を行わせ、また、作業中に予期できない緊急事態を発生させることで、被験者にストレスを付加した実験の概要と結果を述べる。

(1) 実験概要

図6-1にストレス付加実験の流れを示す。被験者は、鼻、額、頬、顎、耳の各部にサーミスタ（テクノセブン製THR-C）を装着した状態で、シールドルームに入室し、21インチの大型モニタに向かって椅子にすわる。その後、5分間の安静閉眼、10分間のトラッキング作業、5分間の安静閉眼の順序で作業を行うとともに、安静閉眼の前後で主観申告を行う。なお、トラッキング作業開始から5分後には、壮絶な警報が鳴りだし画面がクラッシュする緊急事態が発生することがあり、この場合には、あらかじめ教えておいた12文字のパスワードを正確に入力しないと、緊急事態を解除できないようにした。また、トラッキング作業後の主観申告時には、その時点での感覚とともに緊急事態時の感覚を思い出して申告させ

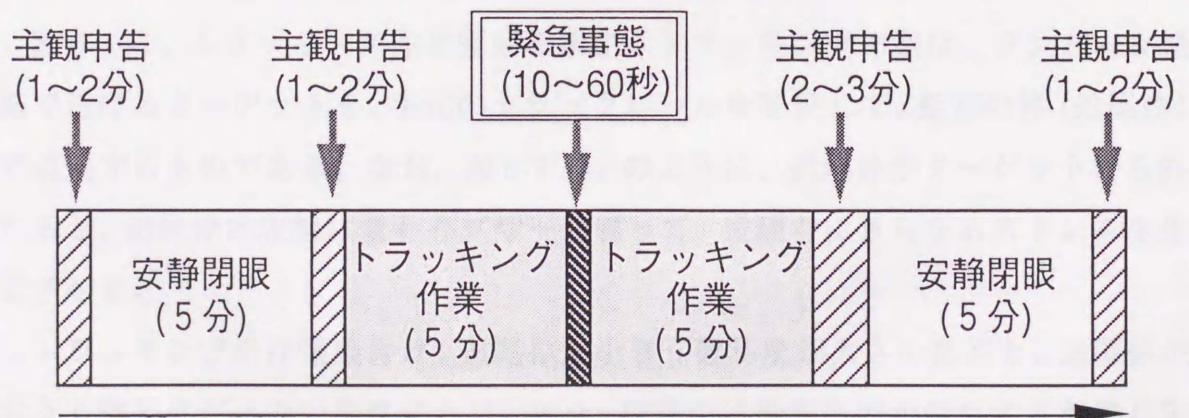


図 6-1 ストレス付加実験の流れ

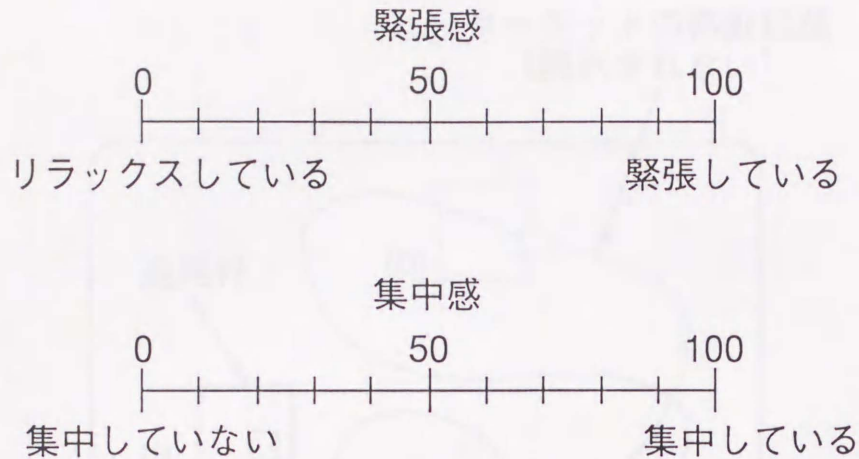


図 6-2 主観申告時に用いた質問項目

た。各被験者は、約 30 分の休憩をはさみ、図 6-1 に示す流れを 2 回繰り返した。

図 6-2 に、主観申告時に用いた質問項目を示す。ストレスという感覚は、概念的であり申告が困難であるので、緊張感と集中感に分け、0～100 までの任意の数字で申告させた⁴¹⁾。緊張感 0 は、最もリラックスしている状態、緊張感 100 は、最も緊張している状態である。また、集中感 0 は、全く集中していない状態、集中感 100 は、最も集中している状態である。このほかに、覚醒感も申告させ、極端に覚醒水準が低いと申告した被験者は、真剣に作業を行っていないと判断し、データから削除した。また、温冷感も申告させ、極端に暑いもしくは寒いと申告した被験者もデータから削除した。これは、第 5 章で記述したように、温冷感の中立でない、顔面皮膚温からストレスを評価できないからである。ただ、シールドルーム内の環境温度は 27～28℃で一定になるように空調し、被験者には各人が暑くも寒くもないと感じる服装を着用させた。

図 6-3 に、トラッキング作業画面を示す。トラッキング作業は、ランダムな経路で逃げるターゲットを、手元のトラックボールを駆使して、矩形の枠（追尾枠）で追尾するものである。なお、図 6-3 (b) のように、追尾枠がターゲットから外れると、追尾枠は波線に変わりブザーが鳴って、被験者にさらなるストレスを生じさせる。

トラッキングの作業条件は、追尾枠が小さく難易度が大きい条件と、追尾枠が大きく難易度が小さい条件にわけ、また、作業中に緊急事態が発生する条件と発生しない条件にわけた。総被験者数は、52 名（18～38 才）である。

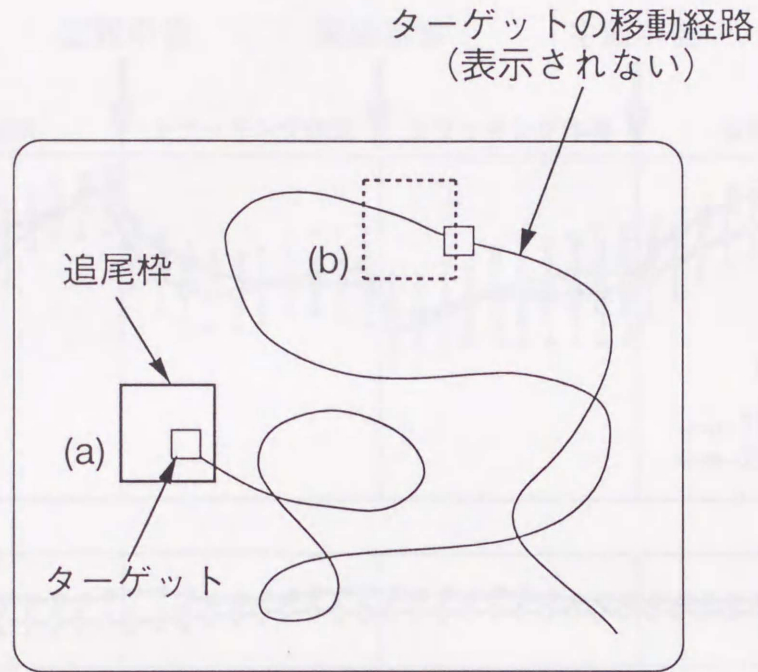


図 6-3 トラッキング作業画面

(2) 実験結果

図 6-4 に、トラッキング作業の難易度が小さく緊急事態が発生する条件で実験を行った被験者 9 名の、鼻部皮膚温と環境温度の変動を示す。図中の温度は、被験者間の平均値であり、標準誤差を付加している。また、全体的な変動傾向をみるために、主観申告時と緊急事態時のデータを除いて各被験者の各作業時刻をそろえてから、30 秒毎に平均化している。

図 6-4 から、鼻部皮膚温は、安静閉眼時に上昇し ($P < 0.01$)、ストレスの生じるトラッキング作業開始時に一過性に低下している ($P < 0.01$) ことがわかる。また、さらにストレスの生じる緊急事態時には、鼻部皮膚温は、一過性に、さらに低下している ($P < 0.01$) ことがわかる。この結果から、鼻部皮膚温はストレス推定に使用できる可能性が示唆されているといえる。また、環境温度は、ほぼ一定になっており、良好に空調できていることがわかる。

顔面の中で、鼻部は、末梢部に位置し、ストレス等の感覚発生に伴う自律神経活動の影響を受けて変動することが、第 5 章で行った検討の結果から明らかになっている。すなわち、ストレス等の感覚が発生すれば、交感神経活動が活性化し、末梢部の皮膚血管が収縮し、その部分の皮膚血流量が低下する。皮膚血流量が低下すれば、その部分の皮膚から放出される熱量が低下し、皮膚温が低下する

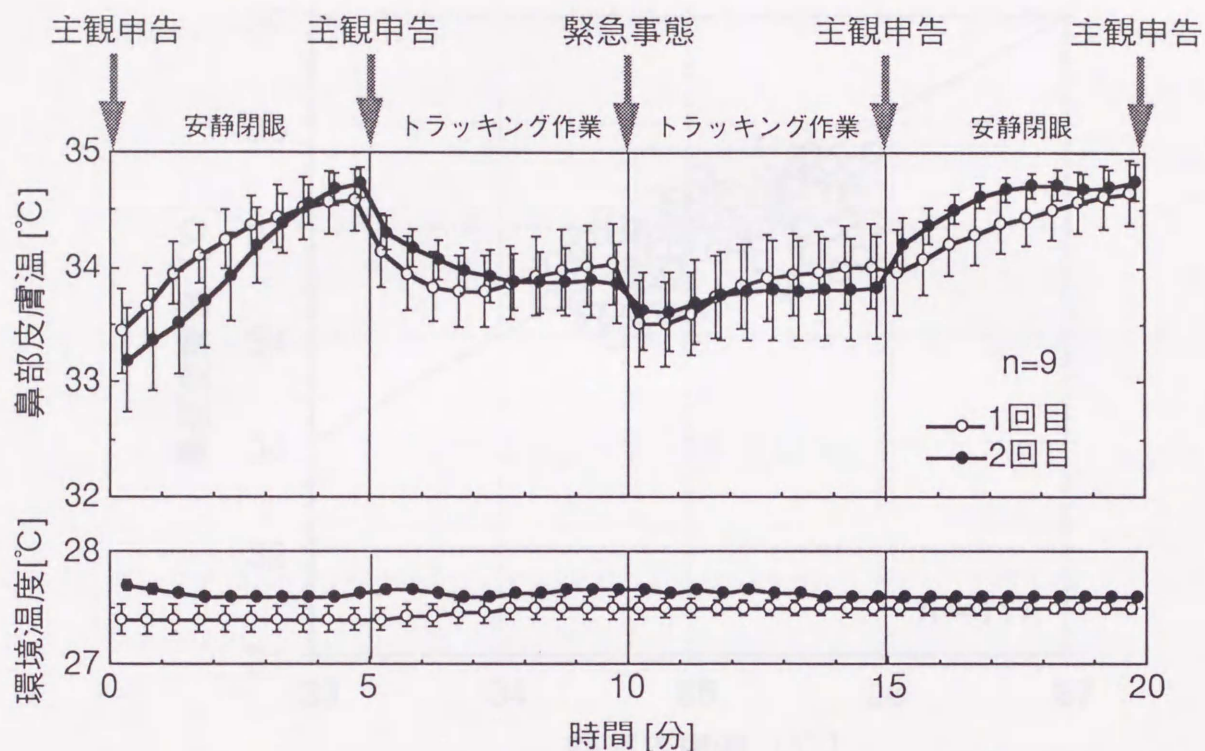


図 6-4 鼻部皮膚温と環境温度の変動

のである。今回得られた結果は、この生理的なメカニズムにより説明できる結果である。

一方、鼻部以外の皮膚温は、ほとんど変化がみられなかった。これは、鼻部以外は、自律神経活動の影響を受けない体幹部に位置しているためだと推察される。

6. 2. 2 ストレス推定式の作成

ストレス付加実験の結果、鼻部皮膚温は、安静閉眼時に最も高くなり、また、ストレスに伴って低下する傾向があることが確認できた。したがって、鼻部皮膚温の安静閉眼時からの低下量を用いれば、ストレスを推定できる可能性がある。しかし、この方法では、安静閉眼時の鼻部皮膚温を計測しておく必要がある。ストレス推定は、できるだけ簡便に行う必要があるため、推定しようとする被験者のおおのみに、安静閉眼を行わせ、その時の鼻部皮膚温を計測しておくという作業は、省略できるほうが望ましい。したがって、以下では、安静閉眼時の鼻部皮膚温の代用値として使用できる皮膚温を有する部位を提案する。

図 6-5 に、安静閉眼時の鼻部皮膚温と額部皮膚温の関係を示す。この図は、ス

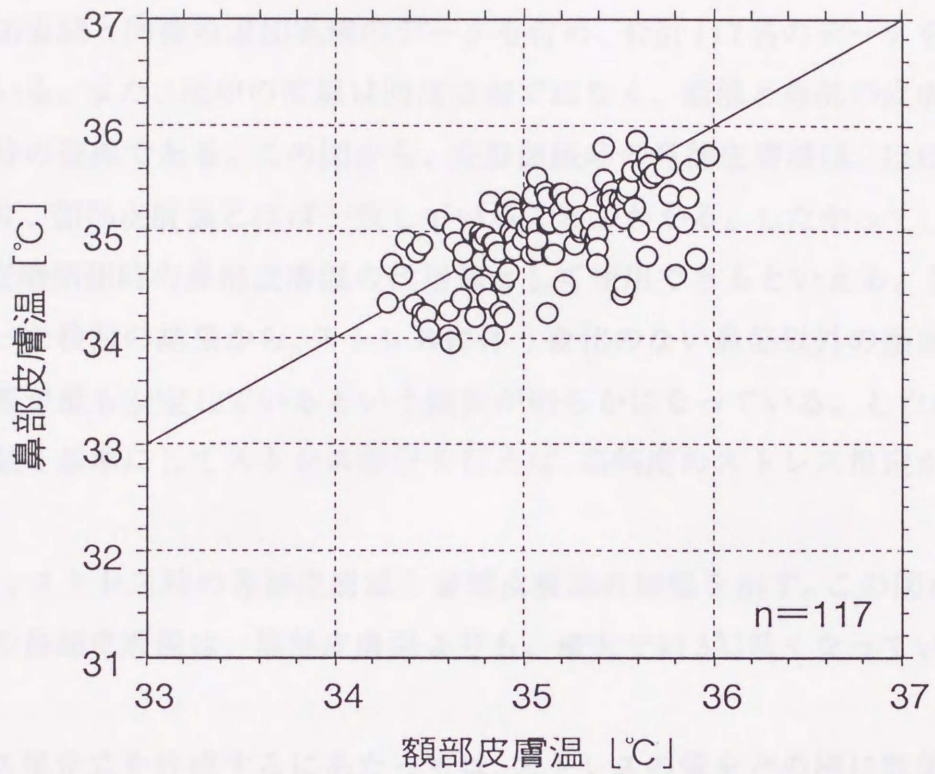


図 6-5 安静閉眼時の鼻部皮膚温と額部皮膚温の関係

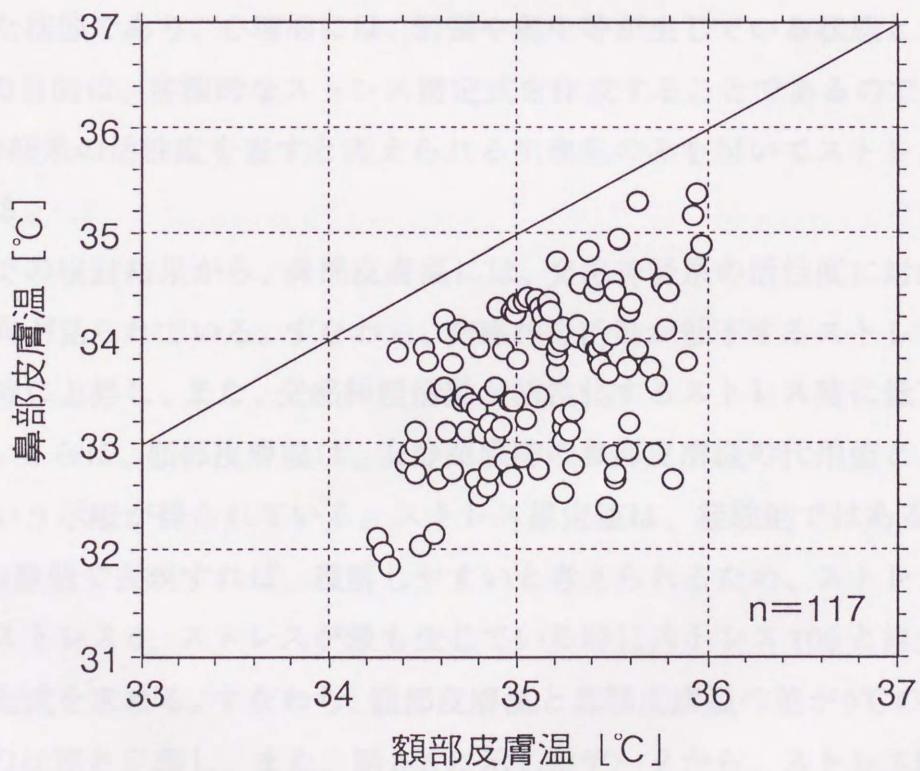


図 6-6 ストレス時の鼻部皮膚温と額部皮膚温の関係

トレス付加実験と同種の追加実験のデータも含め、合計117名のデータを用いて作成している。また、図中の直線は回帰直線ではなく、額部と鼻部の皮膚温が等しくなる時の直線である。この図から、安静閉眼時の鼻部皮膚温は、ほぼこの直線上にあり、額部皮膚温とほぼ一致していることがわかる。したがって、額部皮膚温は、安静閉眼時の鼻部皮膚温の代用値として使用できるといえる。なお、第5章で行った検討の結果から、ストレスに伴う変化のない鼻部以外の顔面皮膚温の内、額部が最も安定しているという傾向が明らかになっている。したがって、額部皮膚温を基準にしてストレス推定を行えば、高精度のストレス推定が期待できる。

図6-6に、ストレス時の鼻部皮膚温と額部皮膚温の関係を示す。この図から、ストレス時の鼻部皮膚温は、額部皮膚温よりも、最大で約3℃低くなっていることがわかる。

ストレス推定式を作成するにあたっては、ストレスの量をどの様に数値化するかが、問題となる。ストレスは、概念的であるため、本来、絶対尺度となるような数値は存在しない。一般には、外部からの刺激が加えられたことによって生じた生体内部のさまざまな歪み現象であると定義され⁴⁷⁾、生理的には交感神経系が活性化した状態であり、心理的には、緊張や集中等が生じている状態と考えられる。本節の目的は、客観的なストレス推定式を作成することであるので、ここでは、交感神経系の活性度を表すと考えられる生理量のみを用いてストレス推定式を作成する。

上記までの検討結果から、鼻部皮膚温には、交感神経系の活性度に対応して変化する傾向が見られている。すなわち、交感神経活動が低下するストレスのない安静閉眼時に上昇し、また、交感神経活動が活性化するストレス時に低下する傾向がある。さらに、額部皮膚温は、安静閉眼時の鼻部皮膚温の代用値として使用できるという示唆が得られている。ストレス推定値は、経験則ではあるが、0～100までの数値で表現すれば、理解しやすいと考えられるため、ストレスの全く無い時にストレス0、ストレスが最も生じている時にストレス100と推定されるように推定式を求める。すなわち、額部皮膚温と鼻部皮膚温の差が0℃の時を、ストレス0の状態と定義し、また、図6-6に示したデータから、ストレス時の額部皮膚温と鼻部皮膚温の差の平均値(1.49℃)を、ストレス50の状態と定義する。

この結果、以下の推定式が得られた。

$$S = 33.59 (Th - Tn) \quad (6-1)$$

ここで、Sはストレス推定値、Thは額部皮膚温、Tnは鼻部皮膚温である。また、

$$S < 0 \text{ の時は } S = 0, S > 100 \text{ の時は } S = 100 \quad (6-2)$$

とする。

ただし、この推定式は、

$$34^\circ\text{C} < Th < 36^\circ\text{C} \quad (6-3)$$

のデータのみを用いて作成したため、この範囲のみで、推定に意味をもつと考えられる。額部皮膚温がこの範囲以外の時は、温熱環境が、暑いもしくは寒い状態であると推察され、この時は、第5章で行った検討の結果から、顔面皮膚温によるストレスの推定は不可能であるといえる。

6. 2. 3 ストレス推定式の検証

ここでは、第5章で述べた温熱刺激とストレスの同時付加実験のデータを用いて、今回作成したストレス推定式を検証する。ただし、検証に用いるデータは、環境温度が20と25℃の静座姿勢で得たデータであり、かつ、被験者の温冷感申告値が-30～30の範囲に含まれるデータのみを使用する。なお、ストレス推定式を作成するために負荷した作業と、検証を行う際の作業は異なるが、ストレスは、作業や刺激が異なっても同様の反応を生じるといわれているため⁵³⁾、問題は無いと考えられる。

ストレスは、心理的には、緊張や集中等が生じている状態と考えられるため、図6-2の申告尺度に申告させた緊張と集中の主観量と、式(6-1)を用いて推定したストレス度を比較する。図6-7に、ストレス推定値と緊張感申告値の関係、図6-8に、ストレス推定値と集中感申告値の関係をそれぞれ示す。両図から、ストレス推定値と主観申告値の関係は、統計的に有意な相関関係($P < 0.01$)にあり、良好にストレスを推定できていることがわかる。したがって、今回作成したストレス推定式は、妥当であったといえ、ストレス評価に使用しても問題はないといえる。

また、両図で、主観申告値が50以下であり、かつ、ストレス推定値が50以上

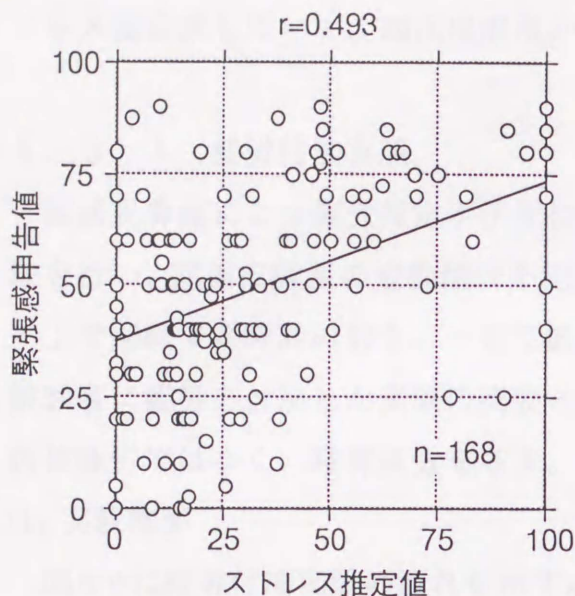


図 6-7 ストレス推定値と緊張感申告値の関係

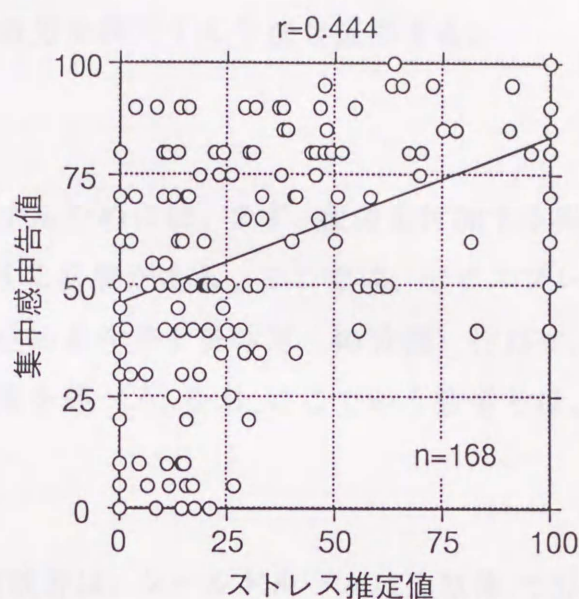


図 6-8 ストレス推定値と集中感申告値の関係

になる領域に含まれるデータ数は、極めて少なくなっていることがわかる。したがって、被験者がストレスを感じていないにも関わらず、ストレスがあると誤推定する可能性は低いといえる。いいかえれば、ストレスを感じていない状態では、額部皮膚温と鼻部皮膚温の差は、ほとんどの被験者で小さくなっているといえる。

しかし、両図で、主観申告値が50以上の時は、ストレス推定値が0~100の範囲で、大きくばらついていることがわかる。したがって、被験者がストレスを感じているにも関わらず、ストレスがないと誤推定する可能性は高いといえる。いいかえれば、ストレスを感じている状態では、必ずしも、額部皮膚温と鼻部皮膚温の差が大きくなっていないといえる。この結果は、ストレス時の鼻部皮膚温低下量に、個人差が含まれることを意味するものである。

今回作成したストレス推定式は、個人差を考慮していないが、統計的には有意な推定が可能であるため、一応の有用性は確認できたといえる。ただ、推定精度の向上には、個人差補正が必要であることを認識できたといえる。

6. 3 顔面皮膚温による疲労推定

ここでは、ストレスの蓄積によって疲労が生じると仮定し、上記で作成したス

トレス推定式を用いて、顔面皮膚温から疲労を推定する手法を提案する。

6. 3. 1 疲労付加実験

顔面皮膚温による疲労推定手法を提案するためには、まず、疲労を付加する実験を行い、顔面皮膚温の変動傾向を把握する必要がある。ここでは、ディスプレイ上で回転する時計の針を、一定位置で止める作業を長時間（40分間）行わせ、被験者に疲労を付加した実験の概要と結果を述べる。なお、ここでいう疲労とは、肉体疲労ではなく、精神疲労をさす。

(1) 実験概要

図6-9に疲労付加実験の流れを示す。被験者は、シールドルームに入室後、5分間の安静閉眼と40分間の単調作業を行う。この単調作業は、長町の提案する時計の針止め作業⁵⁴⁾とし、今回、この作業をディスプレイ上で実施させるシステムを作成した。時計の針止め作業の画面を図6-10に示す。被験者は、回転する針が図中網掛の扇形部分に来た時に、スペースキーを押すだけの単調作業を単に繰り返す。この作業により、効果的に疲労を付加できることが長町により確認されている。

疲労は逐次蓄積してゆくと考えられるので、疲労感の主観申告値は、作業を行わせながらスライダーを操作させて、画面上方の連続評価スケール⁴⁾上に表示させた。連続評価スケール上に表示された矢印は、疲れているを100、元気であるを0とした0～100の間の数値に、自動的に変換され、1分周期で記録される。

時計の針止めの作業条件は、難易度大（針の回転速度がランダムに変化）と難易度小（針の回転速度が一定）に分けたが、回転速度はどちらも約1.6秒/周とした。総被験者数は、26名（20～30才）である。

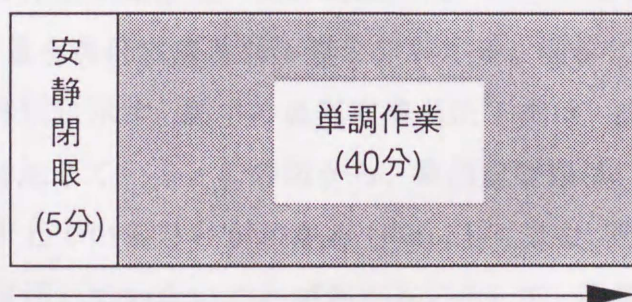


図 6-9 疲労付加実験の流れ

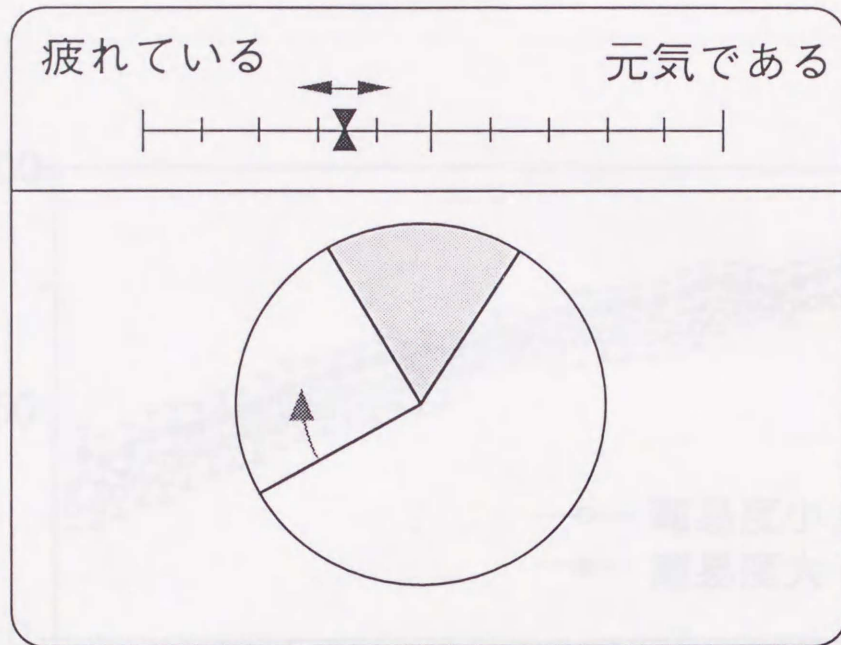


図 6-10 時計の針止め作業の画面

生理量は、鼻、額、頬、顎、耳の顔面皮膚温をサーミスタ（テクノセブン製 THR-C）で計測した。また、この他に、心電図と脳波を多用途脳波計（日本電気三栄製 Synafit1100）で計測した。環境条件は、温度 $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ とし、被験者には各人が暑くも寒くもないと感じる服装を着用させた。

(2) 実験結果

図6-11に疲労感の主観申告値の変動を作業条件別に示す。図中の申告値は、被験者間の平均値であり、標準誤差を付加している。この図から、作業開始から作業終了までで、疲労感が増加していることがわかる ($P < 0.01$)。しかし、作業条件別には有意差が見られていない。このことから、2条件とも同様に疲労を生じさせることがわかる。

今、時計の針止め作業開始直前（安静閉眼直後）の各被験者の鼻部皮膚温を0とし、0からの低下量を鼻部皮膚温低下量と定義する。図6-12に鼻部皮膚温低下量の変動を作業条件別に示す。図中の鼻部皮膚温低下量は、被験者間の平均値であり、標準誤差を付加している。この図から、鼻部皮膚温は、作業を開始するとともに一過性に低下していることがわかる ($P < 0.01$)。また、その後は作業開始時のレベルまでには復帰していないことがわかる。そして、作業条件別には有意差が見られていない。

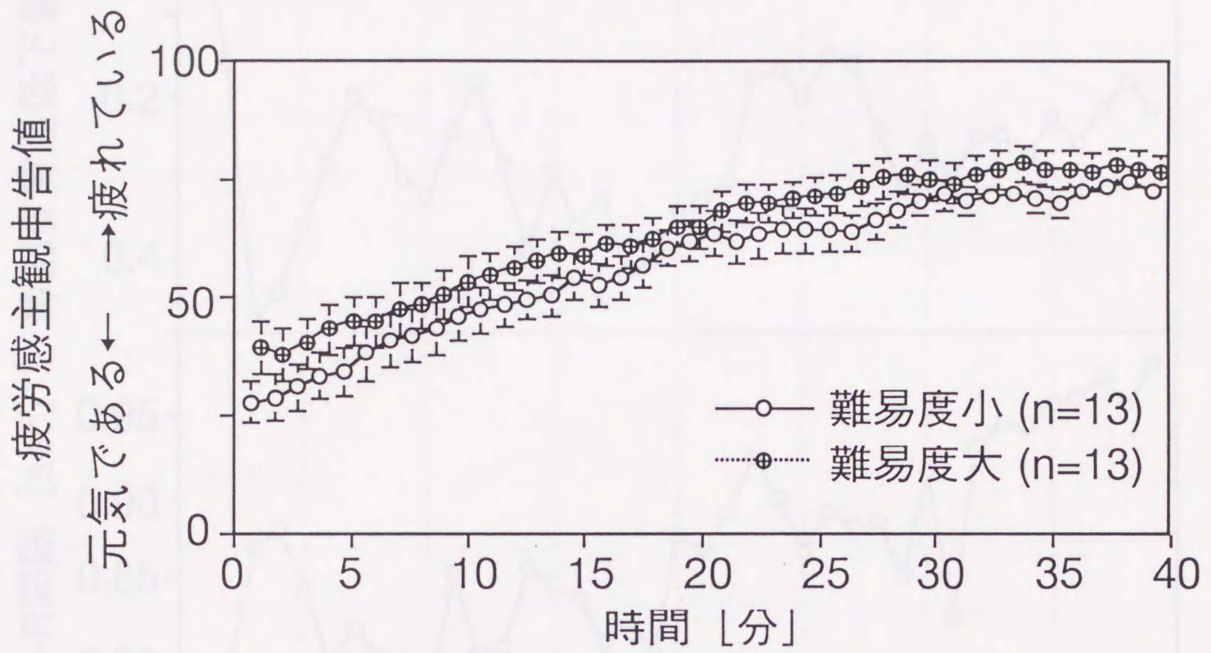


図 6-11 疲労感主観申告値の変動

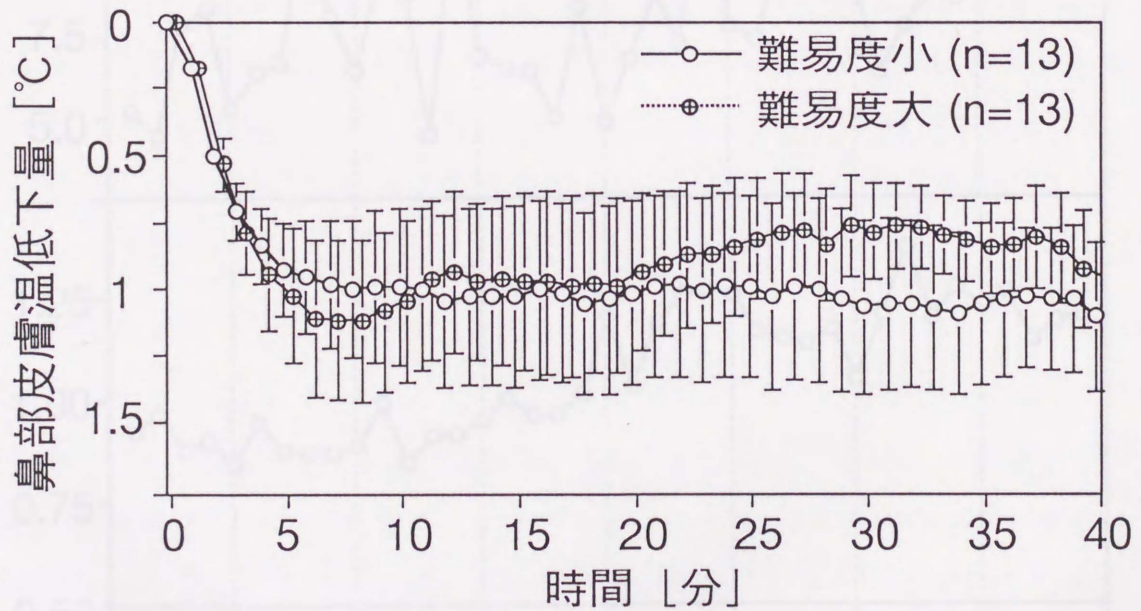


図 6-12 鼻部皮膚温低下量の変動

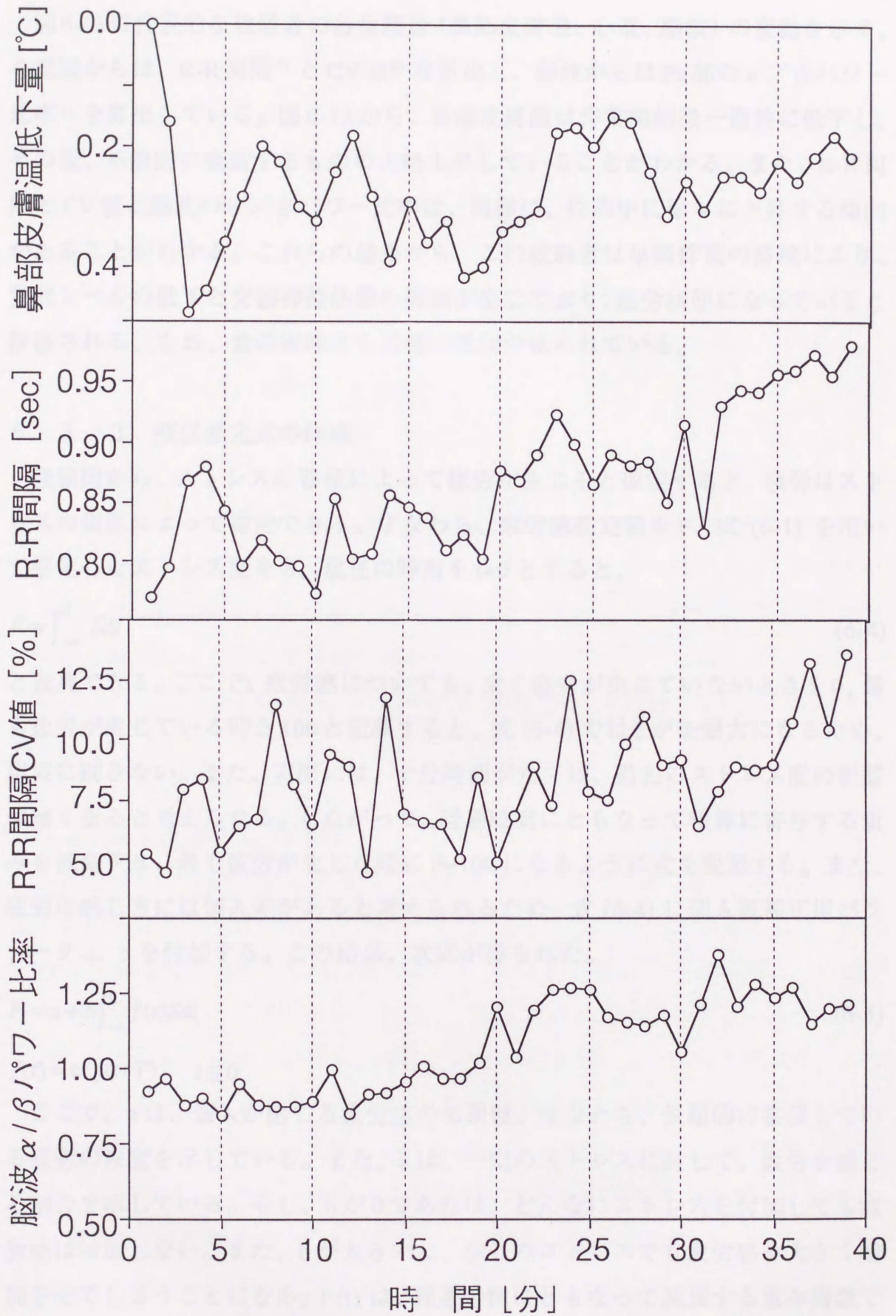


図 6-13 代表的な被験者の各生理量（鼻部皮膚温、心電、脳波）の変動

図6-13に代表的な被験者の各生理量（鼻部皮膚温、心電、脳波）の変動を示す。心電図からは、R-R間隔⁷⁾とCV値⁸⁾を算出し、脳波からはPz部の α/β パワー比率⁶⁾を算出している。図6-13から、鼻部皮膚温は作業開始後一過性に低下し、その後、不規則に変動するものの大略上昇していることがわかる。また、R-R間隔とCV値と脳波の α/β パワー比率は、同様に、作業中に徐々に上昇する傾向があることがわかる。これらの結果から、この被験者は単調作業の持続により、覚醒レベルの低下と交感神経活動の抑制が生じており、疲労状態になっていると推察される。なお、他の被験者も同様の傾向が見られている。

6. 3. 2 疲労推定式の作成

経験則から、ストレスの蓄積によって疲労が生じると仮定すると、疲労はストレスの積算によって推定できる。すなわち、疲労感推定値をF、式(6-1)を用いて推定したストレス度をS、現在の時刻を $t=0$ とすると、

$$F = \int_{-\infty}^0 S dt \quad (6-4)$$

と表現できる。ここで、疲労感についても、全く疲労が生じていないときを0、最も疲労が生じている時を100と定義すると、式(6-4)ではFが無限大になるため、現実に則さない。また、実際には、十分時間がたてば、過去のストレス度の影響は無くなると考えられる。したがって、経過時間にもなって積算に寄与する重みを減衰させ、最も疲労が生じた時に $F=100$ になるように式を変形する。また、疲労の感じ方には個人差があると考えられるため、式(6-4)に個人差補正用パラメータa、bを付加する。この結果、次式が得られた。

$$F = a + b \int_{-\infty}^0 f(t) S dt \quad (6-5)$$

$$f(t) = \exp(t/T), \quad t \leq 0$$

ここで、aは、個人が感じる疲労感の初期値、すなわち、長期的に蓄積している疲労の程度を示している。また、bは、一定のストレスに対して、疲労を感じる割合を示している。もし、bが0であれば、どんなにストレスを付加しても疲労感は増加しない。また、bが大きいと、少しのストレスでも疲労感を大きく増加させてしまうことになる。f(t)は、経過時間にもなって減衰する重み関数であり、ストレスから疲労を生じる際の応答性を時定数Tで表している。この時定

数Tも、個人毎に異なると考えらる。

この時定数Tは、時計の針止め作業を行った時の疲労感主観申告値（図6-11）を用いて、個人毎に求めることができる。すなわち、疲労感推定値をF'、推定される疲労感の初期値をa'とした場合、次式で表される疲労感推定値F'と疲労感申告値との2乗誤差が最小になるTを個人毎に求める。

$$F' = 100 + (a' - 100) \exp(-t/T) \quad (6-6)$$

次に、ここで求めた個人毎の時定数Tを式(6-5)に代入し、疲労感推定値Fと疲労感申告値との2乗誤差が最小になるように、a、bを決定する。この結果、

$$T_{ave} = 39.86 \text{ [min]}, \quad T_{sd} = 28.78 \text{ [min]} \quad (6-7)$$

$$a_{ave} = 41.56, \quad a_{sd} = 16.00 \quad (6-8)$$

$$b_{ave} = 0.1165, \quad b_{sd} = 0.2059 \quad (6-9)$$

となった。ただし、添字のaveは個人間の平均値、sdは個人間の標準偏差を示す。

Tとbの標準偏差は、平均値と比較して極めて大きくなっており、この結果から、汎用的な疲労推定式を作成するのではなく、個人ごとの疲労推定式を作成する方が、精度のよい推定が可能になるといえる。したがって、ここでは、上記の手順に基づいて作成した個人ごとの疲労推定式(6-5)を用いて、以下の議論を進める。

6. 3. 3 疲労推定式の検証

今回作成した疲労推定式は、個人ごとの推定式であるため、同一人物でないと、推定式の検証はできない。また、同一人物であっても、時間が経過すれば、疲労の感じ方も変化すると考えられるため、T、a、bの各値は、一定期間ごとに設定し直す必要があると考えられる。さらに、今回負荷した時計の針止め作業は、一般的な単調作業を模擬したため、作成した疲労推定式も、一般的な単調作業による疲労を近似できると推察されるものの、各種の作業に適用した場合の推定精度は不確定である。これらの課題に対する検討は、未だ不十分であるため、本論文では、基本的には、顔面皮膚温による疲労推定手法を提案するまでにとどめる。

以下では、疲労推定式(6-5)を作成した時の疲労感申告値を用いて、推定値と申告値を比較する。この比較は、式を作成した時と同じデータを用いた比較であるため、ある程度の精度は保証されている。したがって、統計的に有意な相関関

係が得られたとしても、疲労推定式を検証できたとはいえない。しかし、非常に高い相関関係が得られた場合、疲労推定式が有効である可能性は示唆できる。

図6-14に、疲労推定値と疲労感主観申告値との相関係数の度数分布を示す。なお、実験時に覚醒レベルの異常低下を示した被験者が3名いたため、以下の議論では、23名分のデータのみを用いる。この図から、疲労推定値と疲労感主観申告値間の相関係数は、極めて高くなっていることがわかる。

図6-15に、疲労推定値と疲労感主観申告値の関係を示す。ここでは、23名が1分おきに40分間申告した全データを用いているため、図中のデータ数は920個になっている。データ数が多いにも関わらず、相関係数は0.879と非常に高くなっていることがわかる。

以上の結果から、今回作成した疲労推定式が有効である可能性が示唆されたといえる。したがって、疲労を評価しようとする被験者に、一定のテストを行い、個人差補正用パラメータを計測しておけば、疲労を客観的に評価できる可能性がある。しかし、本推定式は、作業中の疲労感を評価するものであり、安静時などの回復過程においても有効であるという保証はない。回復過程における疲労の評

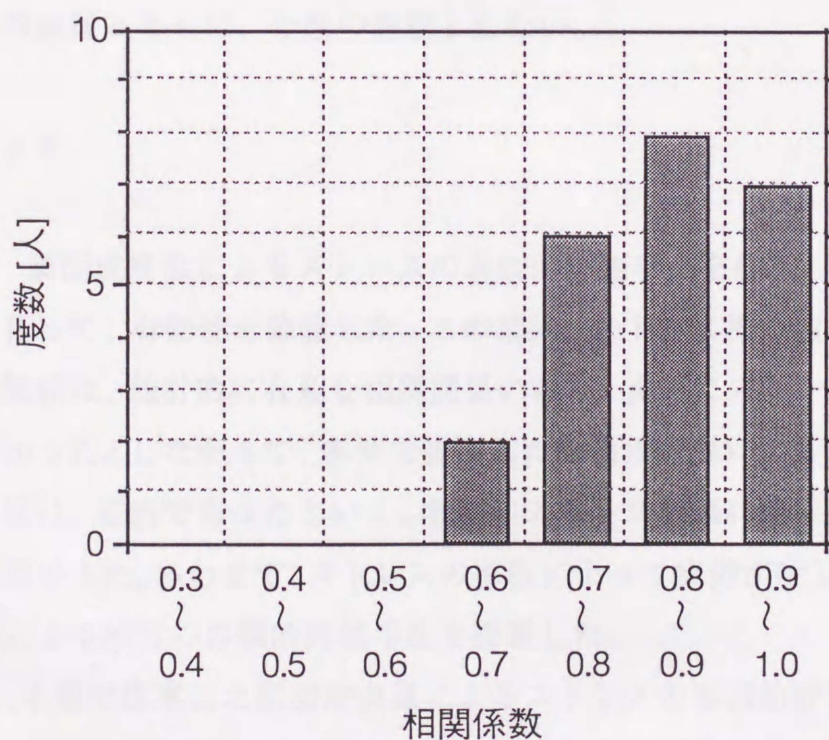


図6-14 疲労推定値と疲労感主観申告値との相関係数の度数分布

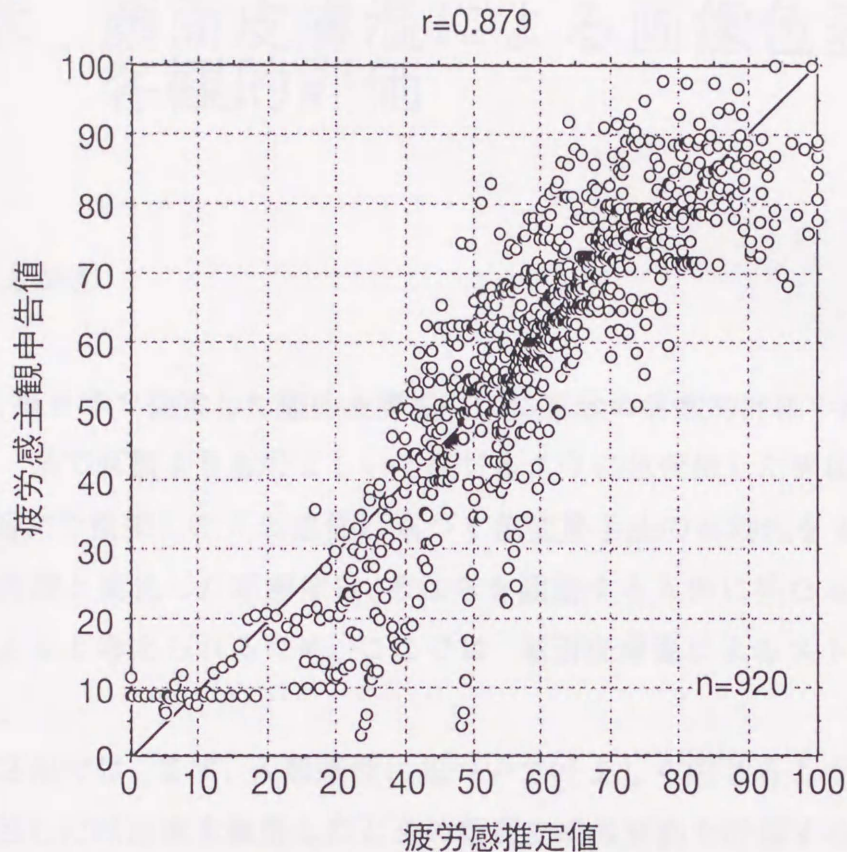


図 6-15 疲労推定値と疲労感主観申告値の関係

価は、上記の課題とともに、今後の課題としたい。

6. 4 まとめ

本章では、顔面皮膚温によるストレスの客観的評価手法を提案し、この評価手法の検証を行って、有効性を確認した。この結果、ストレス推定値とストレス主観申告値の関係は、統計的に有意な相関関係にあり、良好にストレスを推定できることがわかった。したがって、本章で提案した顔面皮膚温によるストレスの客観的評価手法は、妥当であったといえ、各種のストレス評価に使用しても問題ないことが確認できた。あわせて、ストレスの蓄積によって疲労が生じると仮定し、顔面皮膚温による疲労の客観的評価手法を提案した。

次章では、本章で提案した顔面皮膚温によるストレスの客観的評価手法を用いて、カラーコピー系で原稿よりも好ましいと感じるように色変換した画像を定量的に評価し、本論文で提案した人間感性に基づく色変換手法の有効性を実証する。

第7章 顔面皮膚温による画像色表現の客観的評価

7.1 まえがき

本章では、第6章で提案した顔面皮膚温による感覚の客観的評価手法を用いて、カラーコピー系で原稿よりも好ましいと感じるように色変換した画像を定量的に評価し、本論文で提案した人間感性に基づく色変換手法の有効性を実証する。色変換された画像と変色した原画像は、それらを観察する人間に異なるレベルのストレスを与えると考えられるため、ここでは、顔面皮膚温によるストレスの推定式を用いる。

本章の第2節では、まず、人間感性に基づいて好ましく感じるように色変換した画像と変色した原画像を観察したときの顔面皮膚温変動を計測する実験の概要を述べる。第3節では、この実験結果について記述し、主観評価値、鼻部皮膚温の変動量、第6章で提案したストレス推定値の3つの尺度を用いて、両画像から受けるストレス度の比較を行う。

7.2 画像刺激実験

画像刺激実験の目的は、第3章で行った色変換の処理結果を、客観的に評価することである。

実験の流れを図7-1に示す。被験者は、まず、リラックスするために5分間の安静閉眼を行い、その後2分間画像を観察する。引き続き、再度安静閉眼を行った後、別の画像を観察し、最後に2枚の画像から受けた好ましさの印象を主観申告する。ここで用いた2枚の画像は、好ましく色変換した画像(画像A:図3-12)と、オリジナル画像(画像B:図3-11)である。なお、2枚の画像を提示する順序は、被験者ごとにランダムとし、画像を照らす光源には、標準光源(D₆₅光源)を用いた。

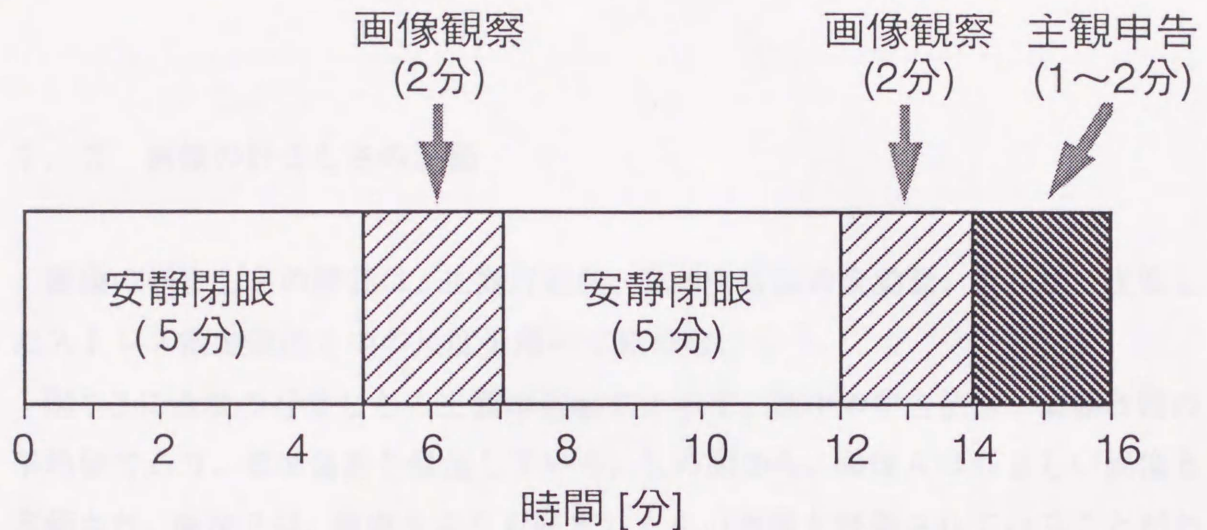


図 7-1 画像刺激実験の流れ

ストレス推定に必要な鼻部と額部の皮膚温は、サーミスタ（テクノセブン製 THR-C）を用いて、サンプリング周期 5 秒で計測した。被験者数は、10 名（20～30 才）である。

図 7-2 に、画像刺激実験の質問項目を示す。-100 を好ましくない、100 を好ましいとする連続評価スケール⁴⁾上にレ点を書かせ、画像 A と B の好ましさを申告させた。また、このほかに、前章までで述べた実験と同様に、覚醒感と温冷感も申告させた。環境条件は、温度 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ とし、被験者には各人が暑くも寒くもないと感じる服装を着用させた。

以下では、画像刺激実験の結果を述べる。

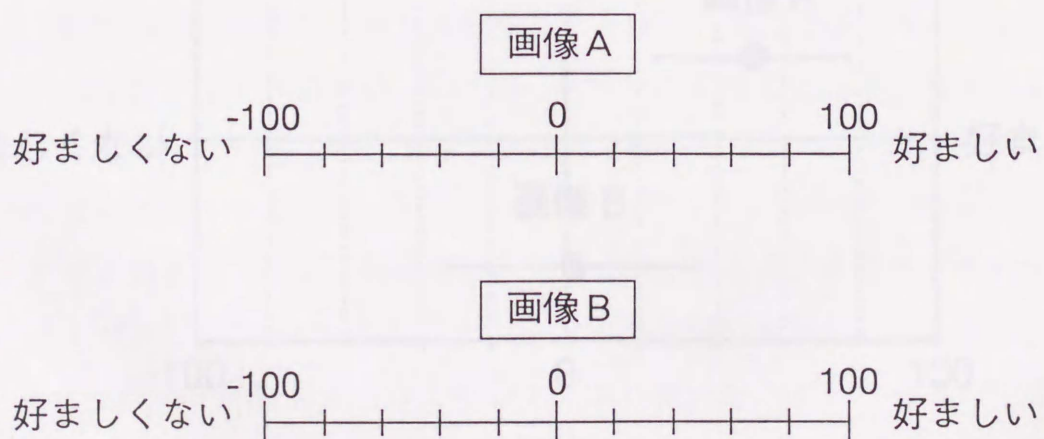


図 7-2 画像刺激実験の質問項目

7. 3 画像の好ましさの評価

画像の好ましさの評価は、主観評価値、鼻部皮膚温の変動量、第6章で提案したストレス推定値の3つの尺度を用いて総合的に行う。

図7-3に画像の好ましさの主観申告結果を示す。図中の申告値は、被験者間の平均値であり、標準偏差を付加している。この図から、画像Aは好ましい画像と評価され、画像Bは、画像Aよりも好ましくない画像と評価されていることがわかる ($P<0.01$)。

ここで、画像観察直前(安静閉眼直後)の各被験者の鼻部皮膚温を0とし、0からの変動量を鼻部皮膚温変動量と定義する。図7-4に、2枚の画像を観察しているときの鼻部皮膚温の変動(鼻部皮膚温変動量)を示す。図中の鼻部皮膚温変動量は、被験者間の平均値であり、標準偏差を付加している。この図から、鼻部皮膚温は、好ましいと主観申告された画像Aの観察時よりも、画像Bの観察時の方が、大きく低下していることがわかる ($P<0.05$)。前章までの検討結果から、鼻部皮膚温は、ストレスに伴って低下することが明らかになっている。したがって、画像Aによって生じるストレスよりも、画像Bによって生じるストレスの方が大きくなっていると推察される。

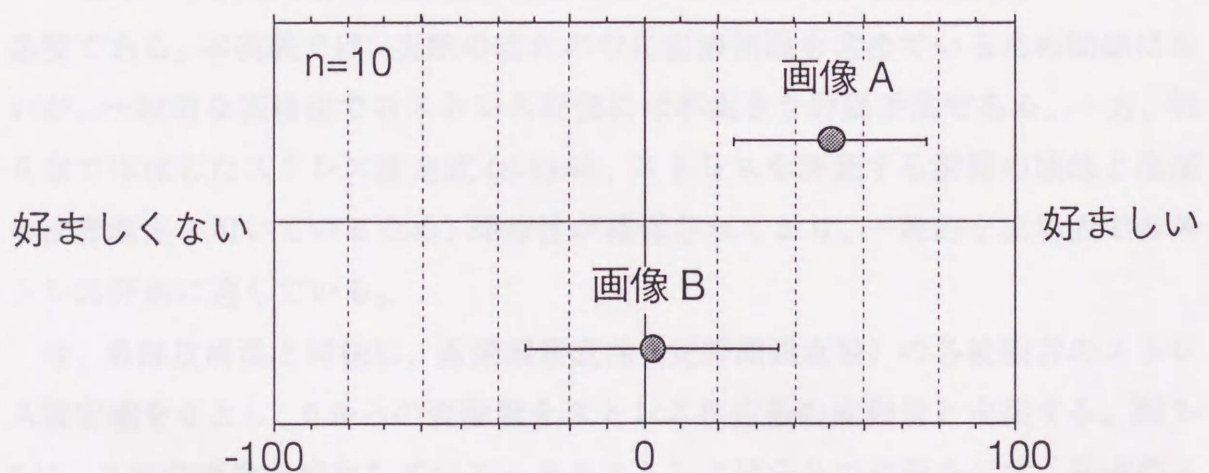


図7-3 画像の好ましさの主観申告結果

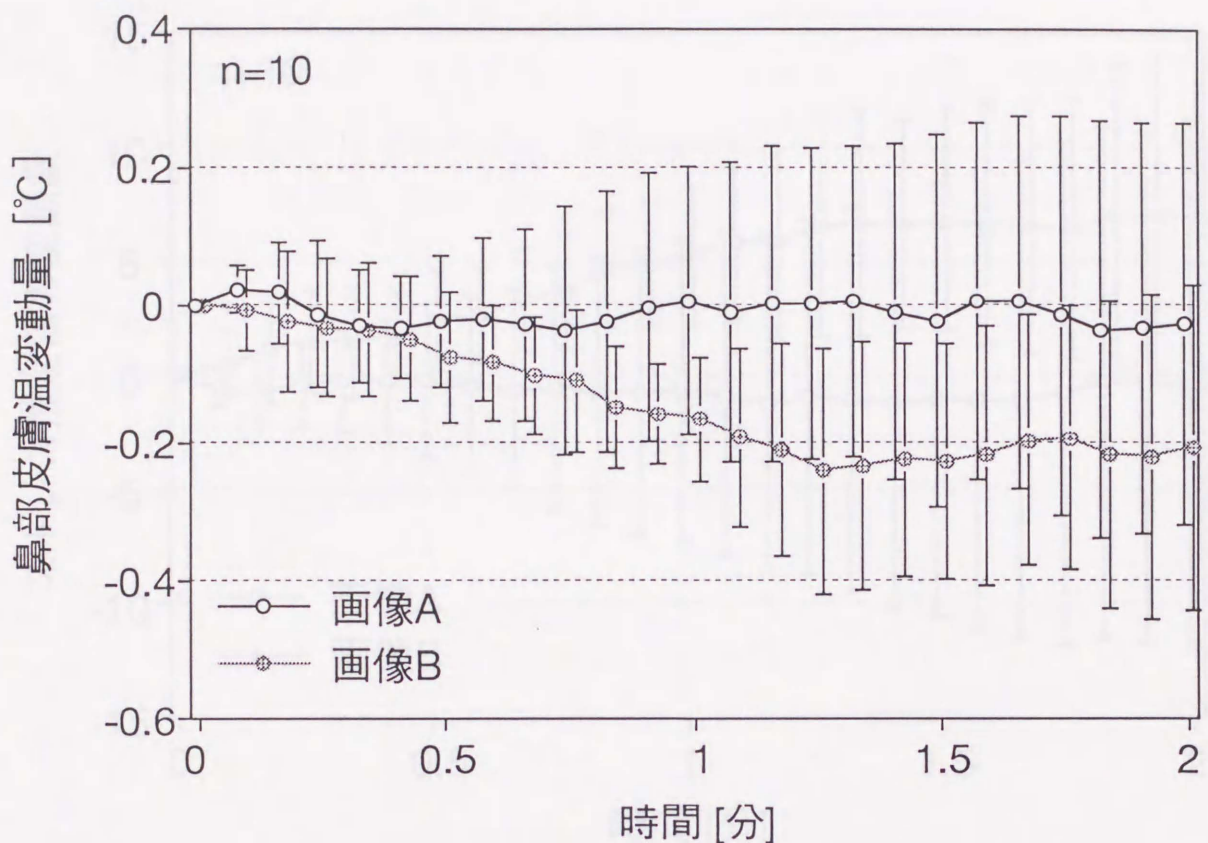


図 7-4 鼻部皮膚温の変動

上記のように、鼻部皮膚温変動量から、ストレスの客観的評価は一応可能である。しかし、鼻部皮膚温によるストレス評価は、安静閉眼時、すなわち、リラックスしている状態の鼻部皮膚温が基準となるため、必ず、安静閉眼時のデータが必要である。本実験では、実験の流れの中に安静閉眼を含めているため問題はないが、一般的な実場面でのストレス評価には不向きな評価手法である。一方、第6章で作成したストレス推定式 (6-1) は、ストレスを評価する瞬間の額部と鼻部の皮膚温差を用いているため、即時性が確保されており、一般的な実場面でのストレス評価に適している。

今、鼻部皮膚温と同様に、画像観察直前（安静閉眼直後）の各被験者のストレス推定値を0とし、0からの変動量をストレス推定値の変動量と定義する。図7-5に、2枚の画像を観察しているときのストレス推定値の変動を示す。図中のストレス推定値の変動量は、被験者間の平均値であり、標準偏差を付加している。この図から、画像Aの観察時よりも、画像Bの観察時の方が、ストレス推定値の

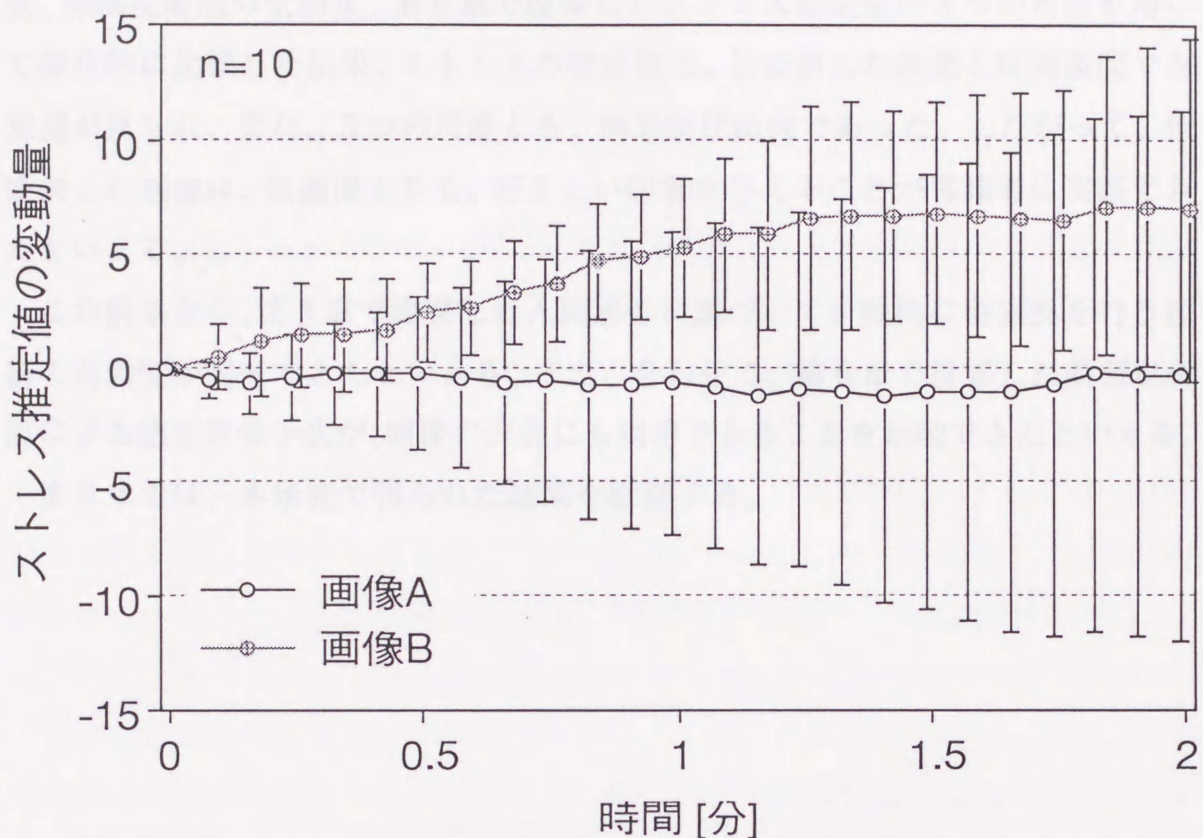


図 7-5 ストレス推定値の変動

増加量が大きくなっていることがわかる ($P < 0.05$)。すなわち、画像Aよりも、画像Bの方が、ストレスを多く付加する画像であるといえる。

上記のように、主観評価値、鼻部皮膚温の変動量、ストレス推定値の3つの尺度で、両画像を評価した結果、同じ傾向が得られた。すなわち、主観評価値、鼻部皮膚温の変動量、ストレス推定値の3つの尺度は、画像色表現の評価を良好に行うことができ、また、色変換した画像は、原画像よりも好ましい印象を与えることが総合的に実証できたといえる。

7. 4 まとめ

本章では、カラーコピー系で原稿よりも好ましいと感じるような色彩に変換した画像の客観的評価を行った。色変換された画像と変色した原画像を、主観評価

値、鼻部皮膚温の変動量、第6章で提案したストレス推定値の3つの尺度を用いて総合的に比較した結果、ストレスの推定値は、色変換した画像と原画像間で有意差が見られ、また、3つの尺度とも、同じ変化傾向であった。したがって、色変換した画像は、原画像よりも、好ましい印象を与えることが客観的に実証できたといえる。

この結果から、第3章で提案した人間感性に基づいて自動的に色変換を行う技術の有効性が実証できたといえる。また、合わせて、第6章で提案した顔面皮膚温による感覚評価手法が、画像の評価にも利用できることを示唆できたといえる。

第8章では、本研究で得られた結果を総括する。

第8章 結言

本論文では、非接触で計測した顔面皮膚温から人間感覚を推定する手法を開発するとともに、開発した感覚推定手法を用いて、カラーコピー系が出力したカラー画像から受ける人間の色彩感覚を客観的に評価した。以下では、本研究の総括と今後の課題について述べる。

さて、本論文では、まず、画像を精度よく圧縮復元するフラクタルブロック符号化方式を高速化する手法を述べ、原画像に忠実な色表現を高速に行うことが可能なカラーコピー系を提案した。高速かつ高精度で画像の圧縮復元を行う手法は、原画像に忠実な色表現を行うカラーコピー系を確立するために不可欠であるが、残された課題も存在する。フラクタルブロック符号化方式は、画像内の自己相似性を利用した全く新しい方式であるが、膨大な圧縮時間が必要であった。本論文で提案した高速化手法をハードウェア化した場合、約100秒以内で処理できる試算が得られているが、未だリアルタイムとはいえない。画像圧縮の高速アルゴリズムを開発する場合に重要なことは、知覚できる画質劣化を生じないことである。これは、本論文で述べた高速化手法の基本的な考え方であった。今後は、人間の視覚認知機能の研究をさらに進め、知覚する情報のみを効率よく高速で圧縮するアルゴリズムの開発を進めてゆく予定である。

次に、本論文では、変色した原稿を複写する場合を考慮して、人間感性を具体化する感性工学の手法を応用し、人間感性に基づいて自動的に色変換して出力するカラーコピー系を提案した。ここで提案した内容は、ファジィ集合による色彩感性の定量化法と、ファジィ推論を用いた色変換処理手法に分けられる。この結果、あいまいな色彩感性を定量的に取り扱うことができ、また、色空間の連続性を崩さずに、感性を考慮した複雑な色変換処理を簡単なルールで実行することが可能になった。また、この色変換処理をサンプル画像に適用した結果、好ましいと感じる人物の肌色を表現することができた。しかし、この色変換手法は、形状認識を行っていないため、人物以外の肌色も変換されてしまうという欠点がある。今後は、人物認識の手法を取り入れ、色変換が必要な領域のみを処理するアルゴ

リズムの開発に取り組んでゆきたい。

本論文では、次に、カラーコピー系が出力する色変換後の画像を客観的に評価するために、比較的動きが少なく非接触計測しやすい顔面皮膚温に着目し、人間に負荷をかけずに顔面皮膚温を自動連続計測する手法と、計測した顔面皮膚温から人間感覚を推定する手法を提案した。

まず、顔面皮膚温の非接触計測の部分では、同時に計測した赤外画像と可視画像を用いて人物領域を抽出し、抽出した人物の顔面内から感覚推定に必要な部位の皮膚温を自動計測する手法を提案した。この結果、約0.3秒周期で、顔面内の任意の5部位の皮膚温を非接触自動連続計測することが可能になった。しかし、開発したシステムは、EWSと画像処理装置を用いて処理を行っているため、大型で、また、操作性も良くない等の欠点がある。したがって、今後は、ハードウェア化によりシステムの小型化をはかり、使い勝手のよいシステムに改良してゆく予定である。

次に、顔面皮膚温から人間感覚を推定する部分では、まず、基礎となる顔面皮膚温の基本変動特性について記述した。この結果、温熱刺激とストレスに起因する顔面皮膚温変化のしくみを把握でき、中立環境温度下では、ストレスに伴う顔面皮膚温変動が存在することが確認できた。また、ストレスがある場合にも、顔面皮膚温だけから、温冷感を推定できることを示唆した。しかし、感覚に起因する顔面皮膚温変化のメカニズムは、完全に解明できたとはいえない。今後は、感覚発生源である脳の機能や、皮膚温変化を直接制御する交感神経活動を定量的に解析し、工学的制御モデルで近似することにより、さらなるメカニズムの解明に取り組んでゆく予定である。

さらに、顔面皮膚温による感覚推定手法については、ストレスの客観的評価手法を提案し、この評価手法の検証を行って、有効性を確認した。この結果、ストレス推定値とストレス主観申告値の関係は、統計的に有意な相関関係にあり、良好にストレスを推定できることがわかった。あわせて、ストレスの蓄積によって疲労が生じると仮定し、顔面皮膚温による疲労の客観的評価手法を提案した。しかし、これらの感覚推定手法には、個人差の補正という課題が残っている。個人差は、同じ刺激が付加されても同じ感覚を生じるとは限らない認知的な問題と、同じ感覚を生じてても同じ反応を示さない生理反応的な問題に大別される。今後は、

これらを個別補正する手法の開発に取り組んでゆく予定である。

本論文の最後では、顔面皮膚温によるストレスの客観的評価手法を用いて、カラーコピー系で原稿よりも好ましいと感じるように色変換した画像を定量的に評価し、人間感性に基づく色変換手法の有効性を実証した。いいかえれば、顔面皮膚温による感覚評価手法が、画像の評価にも利用できることを示唆したといえる。今後は、本論文で提案した顔面皮膚温による人間感覚の推定手法を、種々の場面で利用できるように、応用例の蓄積を進めてゆきたい。

本研究の一部は、東京大学工学部第二学術研究センターの調査研究費によるものであり、工学部第二学術研究センターの調査研究費によるものであります。さらに、調査として、示唆を得た調査費を助成いただきました金子一英教授、山下英生教授に深く感謝いたします。

また、本研究の一部は、東京大学工学部工学技術研究センターの調査研究費によるものであり、生理学的な見識からご指導、助言をいただいた清瀬勉教授に深く感謝いたします。さらに、本研究の一部は、建設省工技院総合工学技術研究所の調査研究費によるものであり、心電学的な見識からご指導、助言をいただいた吉田正徳先生に深く感謝いたします。また、本研究の一部は、建設省工技院総合工学技術研究所制度「人間総合計測の応用技術の研究開発」の委託によるものであり、関係各位に感謝の意を表します。

工学電機（機）メカトロニクス研究所副所長システム研究室ヒューマンサイエンス研究室の方々には、多大な御協力を頂きました。特に、生理心理グループの橋本義久主任研究員、若本誠主任研究員、神尾伸博研究員、石川志子研究員をはじめ、前田浩夫研究員、飯野浩主任研究員、吉田博明研究員に感謝いたします。

また、本研究を行う機会を承えて頂くと同時に、御助言ご指示を頂いた工学電機（機）メカトロニクス研究所の大城正人所長、鈴木龍岡所長、若本和夫所長、村田史都所長、橋本清司所長（現任、東京システム工学研究所所長）、吉田洋主任研究員、及び、研究開発本部の佐本一義部長に深くお礼申し上げます。

さらに、筑波大学の工学部在学中に、調査を御指導を賜りました立花良正教授に深く感謝いたします。また、最終になりましたが、本研究で行った実験の御助言になってくださった方々に感謝の意を表します。

1999年4月

藤野 弘

謝辞

本研究は、広島大学工学部第二類（電気系）長町三生教授（現在、呉高等専門学校校長）の御指導のもとに行いました。長町教授には、著者が本研究を進める際に、終始変わらず適切な御指導、示唆に富んだ御助言を賜りました。ここに心から感謝の意を表します。

また、本論文をまとめるにあたり、主査として、熱心で綿密な御討論と御助言を賜りました同大学工学部第二類（電気系）の坂和正敏教授に深く感謝の意を表します。さらに、副査として、示唆に富んだ貴重な御助言を賜りました金子 真教授、山下英生教授に深く感謝いたします。

また、本研究の一部は、東京大学先端科学技術研究センターの満渕邦彦助教授との共同研究の成果であり、生理学的な見地から御指導、御助言頂いた満渕助教授に深く感謝いたします。さらに、本研究の一部は、通産省工技院生命工学工業技術研究所の吉田倫幸主任研究官との共同研究の成果であり、心理学的な見地から御指導、御助言頂いた吉田主任研究官に深く感謝いたします。また、本研究の一部は、通産省工技院産業科学技術研究開発制度「人間感覚計測応用技術の研究開発」の委託によるものであり、関係各位に感謝の意を表します。

三洋電機（株）メカトロニクス研究所制御システム研究部ヒューマンサイエンス研究室の方々には、多大な御協力を頂きました。特に、生理心理グループの藤原義久主任研究員、菊本誠主任研究員、神原修研究員、石川恵子研究員をはじめ、西条淳夫室長、蚊野浩主任研究員、吉田博明研究員に感謝いたします。

また、本研究を行う機会を与えて頂くと同時に、的確なご指示を賜った三洋電機（株）メカトロニクス研究所の大隅正人所長、鈴木龍司部長、松本和夫部長、河田宏部長、福島清司部長（現在、空調システム商品開発研究所部長）、富田洋主席研究員、及び、研究開発本部の塚本一義理事補に厚くお礼申し上げます。

さらに、著者の福井大学在学中に、貴重な御指導を賜りました立花規良教授に深く感謝いたします。また、最後になりましたが、本研究で行った実験の被験者になってくださった方々に感謝の意を表します。

1996年6月

源野広和

参考文献

- 1) JPEG : "CD10918-1 Digital Compression Coding of Continuous-tone Still Images Part I, Requirements and guideline, JPEG-9-R6", CCITT SG VIII & ISO (1991)
- 2) Jacquin : "A Novel Fractal Block-Coding Technique for Digital Images", Proc.IEEE-ICASSP'90 (1990)
- 3) Mandelbrot : "The Fractal Geometry", Nature (1982)
- 4) Barnsley : "Fractals Everywhere", Academic Press (1988)
- 5) 長町 : "感性工学", 海文堂 (1989)
- 6) 道盛 他 : "脳波 α 波解析による覚醒レベルの定量化", 第5回生体生理工学シンポジウム予稿集 (1990)
- 7) 広瀬 : "ヒューマン・インタフェースの定量評価の方法論", TV学会技術報告, Vol.78, No.6 (1986)
- 8) 井辺 他 : "ストレス・リラックス状態における心拍R-R間隔ゆらぎの解析", 第7回ヒューマン・インタフェースシンポジウム予稿集 (1991)
- 9) 新見 他 : "皮膚電気活動", 星和書店 (1986)
- 10) 田多 他 : "まばたきの心理学", 北大路書房 (1991)
- 11) 安居院 他 : "赤外線静止画像からの人物領域抽出手法", 画像電子学会誌, Vol.21, No.5, pp.511-518 (1992) .
- 12) 福井 他 : "放送番組「人体II—脳と心—」におけるCGと実写の合成技術", 画像電子学会誌, Vol.23, No.4, pp.342-349 (1994)
- 13) 舟久保 : "視覚パターンの処理と認識", 啓学出版 (1990)
- 14) 入来 : "体表温の生理学的基礎—皮膚血流とその調整—", Biomedical Thermography, Vol.6, No.1 (1986)
- 15) 中山 他 : "新生理学体系22", 医学書院 (1987)
- 16) 入来 : "シェーマで見る自律神経", 藤田企画出版 (1989)
- 17) 石井 他 : "集団における生体情報の計測システムの開発", 計測自動制御学会第3回ヒューマンインタフェースシンポジウム講演論文集, pp.341-346 (1987)
- 18) 岩田 他 : "サーモグラフィによる観劇反応の分析", Biomedical

- Thermography, Vol.7, No.1, pp.44-46 (1987)
- 19) 苗村 他 : "騒音刺激が鼻部皮膚温度に及ぼす効果", 心理学研究, Vol.64, No.1, pp.51-54 (1993)
 - 20) 中山 : "温熱生理学", pp.329-330 理工学社 (1981)
 - 21) Vokac et al : "Effect of cooling of peripheral parts of the body on general thermal comfort", Textile Research Journal, pp.827-833 (1971)
 - 22) 源野 他 : "グレイバランス保存および特定色重視カラーマスキング", Japan Hardcopy '91 Fall (1991)
 - 23) Genno et al : "Correction methods of printed density with the sublimation dye transfer process", Proc. of the SID, 32 (1991)
 - 24) 井田 他 : "反復変換符号化による画像圧縮", 電子情報通信学会春季全国大会予稿集 (1991)
 - 25) 大石 他 : "フラクタルブロック符号化を用いた画像圧縮法とその評価", TV学技報, Vol.16, No.10 (1992)
 - 26) 和久井 他 : "テレビジョン・システム評価用デジタル標準画像解説書", TV学会 (1985)
 - 27) 日本色彩学会 : "色彩科学ハンドブック", 東京大学出版会 (1980)
 - 28) 宮原 : "系統的画像符号化", IPC (1990)
 - 29) Marr : "ビジョン", 産業図書 (1987)
 - 30) Gargan : "An Effective Way to Represent Quadrees", CACM, 25, 12 (1982)
 - 31) 山崎 他 : "三角平面パッチを用いた多階調画像データの圧縮", 電子情報通信学会論文誌 Vol.J75-D-II (1992)
 - 32) Trancoso : "Efficient procedures for finding the optimum innovation in stochastic coders", Proc. IEEE-ICASSP (1986)
 - 33) 川上 : "JIS色の常識", 日本規格協会 (1986)
 - 34) 市橋 他 : "PIDとFUZZYのハイブリッド型コントローラ", 第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 (1988)
 - 35) 広野 他 : "赤外・可視画像によるシーンからの人物抽出", 電子情報通信学会秋期全国大会予稿集 (1991)

- 36) Hirono et al : "Segmentation of human images for care of console operator by infrared and color camera", Proceeding of Japan - U.S.A. Symposium on Flexible Automation, No.2 (1992)
- 37) 高木 他 : "画像解析ハンドブック", 東京大学出版会 (1991)
- 38) 広野 他 : "赤外・可視画像による人物領域抽出と顔の部位認識", 機械学会関西支部第69期定時総会講演会予稿集 (1994)
- 39) Corbit : "Voluntary control of hypothalamic temperature", J. Comp. Physiol. Psychol., Vol.83, pp.394-411 (1973)
- 40) Adair : "Skin, preoptic, and core temperatures influence behavioral thermoregulation", J. Appl. Physiol., Vol.42, pp.559-564 (1977)
- 41) 吉田 : "脳波のゆらぎ計測と快適評価", 日本音響学会誌, Vol.46, No.11 (1990)
- 42) Hales et al : "Thermally-induced cutaneous sympathetic activity related to blood flow through capillaries and arteriovenous anastomoses", Pflugers Arch., Vol.37, No.5, pp.17-24 (1978)
- 43) 入来 : "体表面温度生理学", Biomedical Engineering, Vol.3, No.7 (1989)
- 44) Hardy et al : "The technic of measuring radiation and convection", J.Nutr., Vol.15, pp.461-475 (1938)
- 45) 奥野 他 : "多変量解析法<改訂版>", 日科技連 (1971)
- 46) 広重 : "生物リズムと疾患", からだの科学, Vol.33 (1987)
- 47) 長町 : "現代の人間工学", 朝倉書店 (1986)
- 48) 吉田 他 : "作業負荷に伴う顔面皮膚温と感情状態の変化", 日本感情心理学会第1回大会予稿集 (1993)
- 49) 菊本 他 : "鼻部皮膚温を指標としたトラック作業下における心理状態の評価", 生理人類学会第31回大会要旨集 (1993)
- 50) 菊本 他 : "顔面皮膚温による作業負担の評価", 第17回人間-生活環境系シンポジウム報告集 (1993)
- 51) 菊本 他 : "鼻部皮膚温変化とストレス感", 第12回日本生理心理学会学術大会予稿集 (1994)
- 52) 中野 : "図解・ヒトのからだ", 医歯薬出版 (1988)

- 53) 石原 他 : "生活ストレスとは何か", 垣内出版 (1985)
- 54) 長町 : "監視作業における単調感の心理的生理的解析", 日本人間工学会誌, Vol.7, No.3 (1971)

A. 学位論文等の要約

1. Kiyoshi Fukushima, Hiroaki Kuroda, Yoshihisa Fujiwara, Hirokazu Genno : "Human Sensory Perception Oriented Image Processing in a Color Copy System", International Journal of Industrial Ergonomics, vol.15, no.1, pp.53-74, 1995.
2. 瀬野広和, 松本和夫, 渡島清史 : "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, 1993.
3. 瀬野広和, 松本和夫, 鈴木龍司 : "フラクタルブロック符号化における画像圧縮の高速化", 日本フレンジ学会誌, vol.7, no.4, pp.701-709, 1995.
4. Hirokazu Genno, Osamu Kanbara, Kazuo Matsumoto, Ryouji Suzuki, Masato Osumi, Kunihiko Mabuchi : "Relationship between Thermal Sensation and the Temperature of Skin and Deep Tissues in Various Environments", The Journal of the Japanese Society of Thermology, vol.15, no.4, pp.2-7, 1995.
5. Hirokazu Genno, Atsuo Saijo, Hiroyuki Yoshida, Ryouji Suzuki, Masato Osumi : "Non-contact Method for Measuring Facial Skin Temperature", International Journal of Industrial Ergonomics, vol.16, 1996 (accepted).
6. Hirokazu Genno, Keiko Ishikawa, Osamu Kanbara, Makoto Kikumoto, Yoshihisa Fujiwara, Ryouji Suzuki, Masato Osumi, Mitsuo Nagamachi : "Using Facial Skin Temperature to Objectively Evaluate Sensations", International Journal of Industrial Ergonomics, vol.16, 1996 (accepted).

学術研究論文等研究業績一覧

A. 学術雑誌等掲載論文

1. Kiyoshi Fukushima, Hiroshi Kawata, Yoshihisa Fujiwara, Hirokazu Genno : "Human Sensory Perception Oriented Image Processing in a Color Copy System", International Journal of Industrial Ergonomics, vol.15, no.1, pp.63-74, 1995.
2. 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", 計測自動制御学会論文集, vol.31, no.8, pp.973-981, 1995.
3. 源野広和, 松本和夫, 鈴木龍司 : "フラクタルブロック符号化における画像圧縮の高速化", 日本ファジィ学会誌, vol.7, no.4, pp.701-709, 1995.
4. Hirokazu Genno, Osamu Kanbara, Kazuo Matsumoto, Ryuuji Suzuki, Masato Osumi, Kunihiko Mabuchi : "Relationship between Thermal Sensation and the Temperature of Skin and Deep Tissues in Various Environments", The Journal of the Japanese Society of Thermology, vol.15, no.4, pp.2-7, 1995.
5. Hirokazu Genno, Atsuo Saijo, Hiroyuki Yoshida, Ryuuji Suzuki, Masato Osumi : "Non-contact Method for Measuring Facial Skin Temperature", International Journal of Industrial Ergonomics, vol.16, 1996 (accepted) .
6. Hirokazu Genno, Keiko Ishikawa, Osamu Kanbara, Makoto Kikumoto, Yoshihisa Fujiwara, Ryuuji Suzuki, Masato Osumi, Mitsuo Nagamachi : "Using Facial Skin Temperature to Objectively Evaluate Sensations", International Journal of Industrial Ergonomics, vol.16, 1996 (accepted) .

B. 国際学会等講演論文

1. Hirokazu Genno, Yoshihisa Fujiwara, Hiroichi Yoneda, Kiyoshi Fukushima :
"Human Sensory Perception Oriented Image Processing in Color Copy System",
Proceeding of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks,
pp.423-427, 1990.
2. Hirokazu Genno, Kiyoshi Fukushima, Hiroichi Yoneda, Yoshihisa Fujiwara :
"Correction Methods of Printed Density with the Sublimation Dye Transfer
Process", Proceedings of the Society for Information Display, vol.32, no.1, pp.65-
72, 1991.

C. 一般雑誌等掲載論文・著書

1. 源野広和, 藤原義久, 蚊野浩, 米田広一, 福島清司 : "カラーハードコピー系に
おける感性画像処理", 三洋電機技報, pp.76-81, 1991.
2. 源野広和, 藤原義久 : "ファジィ理論を用いた感性画像処理", 映像情報, vol.23,
pp.31-36, 産業開発機構, 1991.
3. 源野広和 : "画像処理におけるファジィ制御", 最近のファジィ実用化応用技術
事例, 第12章, ミマツデータシステム, 1992.
4. 源野広和, 松本和夫, 鈴木龍司, 福島清司 : "Sensory Estimations Using Facial
Skin Temperatures", IEEE Denshi Tokyo, pp.212-214, 1994.

D. 学会技術研究会等研究発表

1. 源野広和, 富田洋, 亀田勇 : "カラーサーマルプリンタ用記録紙の伸縮とレジストレーションに関する実験的研究", 電気関係学会関西支部連合大会, G256, 1986.
2. 源野広和, 福島清司, 米田広一, 高見正人 : "昇華型カラープリンタにおける印写色ずれの最小化", 電子情報通信学会春季全国大会, D349, 1990.
3. 源野広和, 福島清司, 米田広一, 高見正人, 藤原義久 : "昇華型熱転写記録における印写位置ずれの最小化", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会予稿集, pp.81-82, 1990.
4. 源野広和, 藤原義久, 蚊野浩, 米田広一, 福島清司 : "カラーハードコピー系における感性画像処理", 画像電子学会第119回研究会講演予稿, pp.19-23, 1990.
5. 源野広和, 福島清司, 米田広一, 藤原義久 : "昇華型熱転写プリンタにおける印写濃度補正方法", 日本写真学会ワークショップエレクトロニックフォトグラフィー論文集, pp.89-92, 1990.
6. 源野広和, 藤原義久, 蚊野浩, 福島清司 : "カラーコピーにおける感性画像処理", システム制御情報学会第35回研究発表講演会講演論文集, pp.441-442, 1991.
7. 源野広和, 藤原義久, 蚊野浩, 福島清司 : "ビデオプリントシステムにおける感性画像処理", 日本ファジィ学会第7回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.403-406, 1991.
8. 源野広和, 藤原義久, 蚊野浩, 福島清司 : "グレイバランス保存および特定色重視カラーマスキング", 第68回電子写真学会研究討論会予稿集 Japan

Hardcopy 91 Fall, pp.1-4, 1991.

9. 源野広和, 河田宏 : "フラクタルブロック符号化を用いた画像圧縮の高速化", 第23回画像工学コンファレンス, pp.11-14, 1992.
10. 源野広和, 藤原義久, 菊本誠, 河田宏 : "顔面皮膚温による温冷感の推定", 日本機会学会第6回熱工学シンポジウム, pp.49-50, 1993.
11. 源野広和, 藤原義久, 菊本誠, 河田宏 : "顔面皮膚温による温冷感の推定", 第17回人間-生活環境系シンポジウム, 1993.
12. 源野広和, 藤原義久, 菊本誠, 松本和夫, 福島清司 : "顔面皮膚温による温冷感の推定", 第12回日本生理心理学会学術大会, 1994.
13. 源野広和, 藤原義久, 菊本誠, 松本和夫, 福島清司 : "顔面皮膚温による温冷感の推定", 日本生理人類学会第32回大会, p.41, 1994.
14. 源野広和, 松本和夫, 鈴木龍司, 福島清司 : "皮膚温による人間感覚計測", 計測自動制御学会第11回センシングフォーラム講演論文集, pp.101-104, 1994.