

Nara Women's University

温度刺激と機械刺激の感覚統合による湿り感錯覚

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2020-10-12 キーワード (Ja): 温度刺激, 感覚統合, 機械刺激, 湿り感 キーワード (En): 作成者: 横坂(柴原), 舞 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10935/5499

博士論文

温度刺激と機械刺激の
感覚統合による湿り感錯覚

17940010 柴原 舞

指導教員 佐藤 克成

2020年8月

奈良女子大学大学院人間文化総合科学研究科生活工学共同専攻

概要

本論文は、人間が濡れたものに触れたときに湿りを知覚するメカニズムを理解するために、温度刺激と機械刺激の統合処理による湿り感錯覚の生起条件を調査する。湿り感、すなわち手や指で触れた対象がどの程度水分を含んでいるかに関する触覚情報は、衣服の乾きや肌の潤い、物体の滑りやすさなどの判断に重要である。しかし、人間は水分を直接検出する感覚受容器を持っていないことが示唆されており、どのように湿りを知覚しているかは未だに解明されていない。これまでの研究では、湿り知覚は温度刺激と機械刺激の感覚統合によって生じると仮定されている。つまり、湿りを知覚する際に水分そのものによる刺激は必要ではなく、人間は湿りを“錯覚”的に知覚していると解釈できる。そこで本論文では、湿り知覚を水分刺激の検出機能ではなく、温度刺激と機械刺激の感覚統合による錯覚現象であるとする視点に立ち、この湿り感錯覚が生起する条件を検証する。湿り知覚のメカニズムの理解は触れたときに心地よく感じる製品の設計やリアリティのある触覚提示装置の開発において重要な課題である。

本論文では、はじめに乾燥した物体を冷却するとあたかも湿っているかのように錯覚する現象の基本特性と生起条件を調べることにより、湿り知覚における温度刺激の寄与を検討した。この錯覚から得られる湿り感について、実際に水分を含んだ布から得られる湿り感と比較して定量評価した（第2章）。湿った刺激に手掌で静的に触れたときの皮膚温度低下パターンと似た温度低下を、乾いた刺激を冷やすことで再現し、それぞれの湿り感を評価した。その結果、冷たく乾いた刺激から錯覚する湿り感の強さは、湿った刺激に匹敵することを明らかにした。一方で、温かく湿った刺激に触れたときの皮膚温度上昇パターンを、乾いた刺激を温めて再現しても湿り知覚が生じなかった。このように湿り知覚のメカニズムは物体温度によって異なり、静的な接触で皮膚温度の低下が生じるときは機械刺激（布の質感）よりも温度刺激を重視して湿りを知覚することがわかった。

次に、冷刺激による湿り錯覚に物体の機械刺激的特徴が及ぼす影響を評価した。静的接触時における物体表面の滑らかさや柔らかさは、湿り錯覚の効果を強めることが明らかとなった（第3章）。また、皮膚と物体間の接触面積が大きいほど湿り感を錯覚する温度閾値が高い、すなわち錯覚が生じやすいことが明らかとなった（第4章）。さらに、なぞり動作のように皮膚と物体の間の摩擦が時間的に変化する動的接触の場合、静的接触において見出された冷刺激による湿り感錯覚が生じる実験参加者は少なく、個人差が大きかった。この結果より、湿りを知覚する際の温度刺激や機械刺激の統合過程は、触り方や個人特性によって異なることが示唆された（第5章）。

湿り知覚が温度刺激に影響を受けるのであれば、温度知覚で示されている相互参照作用と呼ばれる錯覚現象が湿り知覚においても生じると仮定し、湿り知覚の空間特性を検証した。その結果、人差し指と薬指で湿り刺激、中指で乾燥刺激に触れたときには中指

で湿りを錯覚したが、人差し指と薬指で乾燥刺激、中指で湿り刺激に触れたときに中指で乾燥を錯覚しなかった（第6章）。このことから、湿り知覚は空間平均の処理プロセスが存在し、詳細な空間分布の判断は困難であり大局的な湿り状態を判断していること、一方で乾燥知覚はそのプロセスが存在せず、詳細な空間分布の判断が可能であることが示唆される。

以上の結果から、湿り錯覚における温度刺激と機械刺激の寄与について3つの知見が得られた。第1に、実際に湿り刺激に触れたときに生じる皮膚温度低下を、乾燥した刺激で再現することによって湿り感錯覚が生じる。第2に、滑らかさや柔らかさ（接触面積）といった機械刺激的特徴によって、冷たさから錯覚される湿り感が強まる。そして第3に、温覚の場合やなぞり動作のように温度刺激よりも機械刺激を知覚しやすい条件では、機械刺激の寄与が大きくなる。さらに、触り方や個々人、周囲の湿り刺激の存在が湿り感錯覚の生起状況に影響することを明らかにした。これらの知見から、人間が経験的に学習してきた湿った物体に触れたときに生じる感覚入力の知識に基づいて湿りを判断していると考えられる。

目次

第1章 序論.....	1
1.1 皮膚の湿り.....	1
1.2 先行研究.....	2
1.2.1 材質知覚の中の湿り知覚.....	2
1.2.2 実際に水分を含んだ物体に対する湿り感.....	2
1.2.3 乾燥した物体に対する湿り感.....	3
1.2.4 湿り刺激に触れたときの神経信号伝達.....	4
1.2.5 温度刺激と機械刺激の空間的知覚特性.....	5
1.3 本論文の意義.....	7
第2章 湿り感錯覚を生じる温度条件.....	8
2.1 皮膚温度変化による湿り感錯覚.....	8
2.2 加水による試料布の物理特性変化.....	10
2.3 布に触れたときの皮膚温度変化.....	12
2.4 湿り感の心理物理評価.....	15
2.5 考察：湿り感錯覚を生じる温度条件.....	17
2.6 まとめ.....	18
第3章 湿り感錯覚を生じる物性.....	19
3.1 実験1：湿り錯覚を生じやすい素材の特徴.....	19
3.1.1 実験手法.....	19
3.1.2 実験結果.....	22
3.1.3 考察：湿り感を生起しやすい材質の特徴.....	24
3.2 実験2：湿り感錯覚を生じやすい布の特徴.....	26
3.2.1 実験手法.....	26
3.2.2 実験結果.....	29

3.2.3	考察：錯覚を生起しやすい布の特徴.....	30
3.3	考察：湿り感錯覚を生じる物性.....	32
3.4	まとめ.....	34
第4章	湿り感錯覚を生じる柔らかさ特性.....	35
4.1	実験1：布の柔らかさと温度の効果.....	35
4.1.1	実験手法.....	35
4.1.2	実験結果.....	37
4.1.3	考察：布の柔らかさと温度の効果.....	40
4.2	実験2：縦方向の弾性成分と接触面積の効果.....	42
4.2.1	柔らかさの知覚.....	42
4.2.2	柔らかさに関連する物理量の操作手法.....	43
4.2.3	布の温度の操作手法.....	44
4.2.4	実験手法.....	44
4.2.5	実験結果.....	46
4.2.6	考察：縦方向の弾性成分と接触面積の効果.....	48
4.3	考察：湿り感錯覚を生じる柔らかさ特性.....	51
4.4	まとめ.....	52
第5章	湿り感錯覚を生じる触り方.....	53
5.1	なぞり動作時の湿り感錯覚.....	53
5.2	実験手法.....	55
5.2.1	実験条件.....	55
5.2.2	皮膚温度と摩擦計測.....	56
5.2.3	心理物理実験手法.....	57
5.2.4	解析手法.....	58
5.3	実験結果.....	59
5.4	考察：湿り感錯覚を生じる触り方条件.....	62
5.4.1	温度刺激による湿り感錯覚の触り方比較.....	62

5.4.2	湿り知覚の個人差	62
5.4.3	摩擦特性の個人差	63
5.5	まとめ	65
第6章	湿り感錯覚を生じる刺激の空間配置	66
6.1	湿り刺激の空間配置	66
6.2	実験1：中指の均一性判断実験	67
6.2.1	実験手法	67
6.2.2	解析手法	68
6.2.3	実験結果	69
6.3	実験2：中指の乾燥感の評価	70
6.3.1	実験手法	70
6.3.2	解析手法	70
6.3.3	実験結果	71
6.4	考察：湿り感錯覚を生じる刺激の空間配置	72
6.4	まとめ	74
第7章	総合考察	75
7.1	湿り知覚メカニズム	75
7.2	工学的応用	82
7.2.1	バーチャルリアリティ分野における湿り感提示装置	82
7.2.2	湿り感の知覚特性を考慮した製品開発	90
第8章	結論	92
8.1	本論文のまとめ	92
8.2	今後の展望	94
	謝辞	95
	参考文献	96
	発表リスト	110

第1章 序論

1.1 皮膚の湿り

洗濯した衣服や洗顔した後の肌、乳幼児が使用したおむつ、瑞々しい果実など、人間は手や指で触れることでその物体がどれくらい水分を含んでいるのかを推定できる。このような水分情報に関する触感覚の知覚は、人間が日常生活を安全かつ快適に送るために重要である。

たとえば、皮膚の湿りあるいは乾燥の状態を知覚することは、人間が健康を維持するために重要な役割を果たす。特に胴体など広範囲にわたる皮膚の濡れを放置すると体温が低下し (Schlader et al., 2010)、気温が低い環境であれば皮膚が乾かず低体温症につながる。一方、皮膚の乾燥もまた不健康な状況を招く。角質層は紫外線や細菌などの外部刺激から守る機能と体内の過度な水分蒸発を防ぐ機能 (バリア機能) を有する。この機能が低下し、水分が蒸発して乾燥した皮膚は、ひびわれやかゆみ、それに伴う皮膚炎も起こりやすい (田上, 2005)。したがって、時空間的に変化する皮膚の乾湿を知覚することは人間にとって不健康な状態を避けるために重要である。健康を害するほどでなくとも、発汗や環境 (雨や霧) による皮膚や衣服の湿りは快適性を左右する要因であり、たとえば発汗で皮膚が濡れる状況は不快につながる (Fukazawa and Havenith, 2009)。

さらに、手の指先といった無毛部では、物体を適切な力で把持するために皮膚と物体間の水分量の把握が重要である。まず、指先で細かな物体をつかむとき、物体と皮膚との間に微小な滑りが生じており (Johansson and Westling, 1984; 前野, 1998)、人間はこれを知覚することで把持力を無意識のうちに調整している。このときの把持力において皮膚もしくは物体の水分量が影響し、皮膚あるいは物体の水分量が極端に多い場合 (例: 濡れた皮膚で滑りやすい物体を把持) や極端に少ない場合 (例: 乾燥した皮膚で乾燥した物体を把持) は、皮膚と物体の間の摩擦が減少し、必要な把持力が大きくなることが知られている (Smith et al., 1997; André et al., 2010; André et al., 2011)。

このように、我々は様々な身体部位において、健康状態や快適性、さらには物体の滑りやすさなどの判断のために湿りを知覚している。そこで、人間がどのように湿りを知覚しているのかを調べることは健康状態の把握や把持力の調整のために重要な課題である。次節ではこの湿り知覚に関する研究を整理し、湿り知覚メカニズムを解明するために必要な課題についてまとめる。

1.2 先行研究

1.2.1 材質知覚の中の湿り知覚

人間が物体の表面テクスチャを触って知覚する際、その触感はいくつかの次元の知覚空間から構成される (Okamoto et al., 2013). テクスチャの知覚空間に関する研究では、粗さ/滑らかさ (Rough/Smooth) や硬/軟 (Hard/Soft), 温/冷 (Warm/Cold) に加え、湿り/乾燥 (Wet or Moist/Dry) をその一つの基軸として扱うことが多い (Ackerley et al., 2014; Guest et al., 2011; 白土ら, 2004; 田村ら, 2000; Tanaka et al., 2006). つまり、湿りは温度や柔らかさ、粗さなどとは異なる、ひとつの触知覚次元であるとみなされる。しかしながら、湿りは知覚メカニズムの側面から他の感覚とは異なっている。人間の皮膚には機械的変形や温度変化に反応する感覚受容器が存在する (Vallbo and Johansson, 1989; Spray, 1986).

一方で、水分を検出する感覚受容器は人間の皮膚には発見されておらず、どのように湿りを計算しているのかについてはいまだ明らかになっていない。現状では、湿り知覚は複数の感覚を統合して生じると考える説 (Bentley, 1900; Zigler, 1923; Bermann Tiest et al., 2012a; Filingeri and Ackerley, 2017; 岡島, 武田, 1983; Tanaka and Sukigara, 2008; Okamoto et al., 2019; Kikegawa et al., 2019) が有力であり、温度刺激 (熱伝導特性) や機械刺激 (柔らかさ・滑らかさ・摩擦など) が湿り感の手がかりとなり得ると考えられている。この説が正しければ、湿りを知覚する際に水分そのものによる刺激は必要ではなく、人間は湿りを“錯覚”的に知覚していると解釈できる。したがって、湿りの知覚は水分量などの実際の水分を表現する物理特性と直接対応するとは限らないため、どのような条件が揃えば湿りが知覚されるのかについて考える必要がある。

以下に、湿り感を 2 つの状況、すなわち、実際に水分を含んだ物体の質感としての湿り感と、乾燥した物体の質感としての湿り感に注目して、関連する先行研究から得られている知見をまとめる。

1.2.2 実際に水分を含んだ物体に対する湿り感

実際に水分を含んだ物体について、水分が存在すると人間が気づくかどうかの水分量、すなわち水分検出閾値は約 0.04ml である (Sweeney and Branson, 1990; Ackerley et al., 2012; Filingeri and Ackerley, 2017). しかしながら、湿りの感覚強度は物体が含んでいる水分量や面積とは直接対応しないこともある (小柴, 田村, 1995). また、湿り知覚に温度も影響し、水分量は同じ条件であっても接触時に皮膚と物体間の温度移動が大きいとき (皮膚温度に近い温度の湿り物体よりも温かい湿り物体や冷たい湿り物体に触れたとき) のほうが、評価された湿り感は強まるとされている (小柴, 田村, 1995; Filingeri et al., 2014a).

また、同じ刺激であっても触動作 (触り方や押下圧), 刺激が接触する身体部位によっても湿り感は異なって知覚される。触り方については、動的な触動作のときの湿り感の弁

別閾値は静的な触動作のときよりも小さい、つまり動的に物体に触れたときに湿りをより敏感に知覚できることが知られている (Bergmann Tiest et al., 2012a). 濡れた物体表面をなぞるとき、指 - 物体間の摩擦によってスティック・スリップ現象で水溶液の粘性の違いを知覚している可能性も示唆されている (Nonomura et al., 2012). そのため、動的な触動作で濡れた物体に触れるとき、温度刺激に加え摩擦など機械刺激を手がかりにしていることが示唆される. 押下圧が湿り感知覚に及ぼす影響は、静的あるいは動的な触動作の両方において調査されており、どちらの触り方でも、強い圧 (236 Pa) で湿り刺激に接触するとき、弱い圧 (127 Pa) のときよりも評価される湿り感が有意に強まることが明らかになっている (Raccuglia et al., 2017; Raccuglia et al., 2018). また、衣服圧による湿り感への影響も調査されており、きつい衣服を着用し、皮膚と布の相対運動が制限されている状況のとき、緩い衣服の着用による皮膚と布の相対運動が自由に生じる場合よりも、発汗によって知覚される湿り感を有意に減少させることが示されている (Filingeri et al., 2015).

さらに、濡れた物体に触れる身体部位によって、湿り知覚の感度が異なり、特に背中や手で敏感に水分感を知覚しやすい (Ackerley et al., 2012; Filingeri et al., 2014b). 身体部位における湿り知覚の違いは温度受容器あるいは機械受容器の分布密度や皮膚の厚みなどが関連していると推測できる.

1.2.3 乾燥した物体に対する湿り感

ほとんど水分を含んでいない乾燥した物体の冷刺激から湿りを錯覚する現象が知られている (図 1.2.1). 物体自体は乾燥しているにも関わらず、物体に接触している皮膚部分を一定の速度で冷却するとむしろ“湿り”の感覚を引き起こす (Filingeri et al., 2014a; Daanen, 2009; Bergmann Tiest et al., 2012b). 特に背中 of 冷刺激の感度が高い皮膚領域において湿り感錯覚が強く生じることが明らかにされている (Filingeri et al., 2014b). また、温度制御によって実際の水に触れたときの皮膚温度の変化を再現することで湿り感を錯覚する手法も提案されている (Daanen, 2009).

この冷刺激による湿り感錯覚における触動作の影響を調べた研究として、特定の温度帯で吸熱反応を生じる相転移材料 PCM (Phase change material) の布に対する湿り感を、動的な触動作と静的な接触で比較した研究があり、どちらの触り方でも同程度の湿り

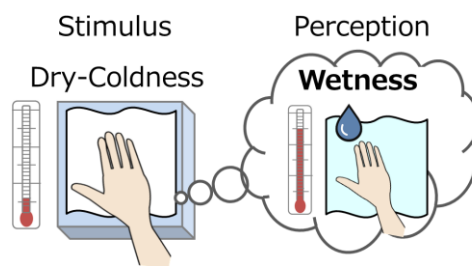


図 1.2.1 冷覚による湿り感錯覚の概念図

感錯覚を引き起こすことを示している (Bergmann Tiest et al., 2012b). また、押下圧については、強い圧 (10000 Pa) よりも弱い圧 (7000 Pa) のときの方が錯覚によって得られる湿り感が強いという結果が得られている (Filingeri et al., 2014c). しかしながら、この冷刺激から錯覚する湿り感と実際に水分を含んだ刺激から得られる湿り感の直接的な比較はなされていない。また、乾燥した素材の機械刺激的な特徴 (滑らかさ・摩擦・接触面積) から湿り感が錯覚される。たとえば、建築素材 (無塗装の木材・タイル・ガラスなど) における研究によると、表面粗さが大きい素材は“乾燥”、表面が滑らかである素材は“湿り”と感じられると結論づけられている (岡島, 武田, 1983). 粉体, 革, 金属, シリコン樹脂, 布などを用いた研究でも、表面が滑らかなほど“しっとり”と感じられることを明らかにしている (Kikegawa et al., 2019). この研究では、しっとりは湿りと滑らかさの複合感覚であり、指が素材表面を動き始めるときの摩擦抵抗をもとに湿りが、指が素材表面を動いてなぞるときに滑らかさが知覚されると結論づけられている (Kikegawa et al., 2019). この知見と同様に、水分を含まない布でも摩擦が大きいとき乾燥知覚を低下させる (Chen et al., 2009a) 一方、弾性コンプライアンスが低く、摩擦が小さく、粗い表面の布は“乾燥”と評価される傾向があることも示されている (Chen et al., 2009b). また、接触面積については凹曲面に加工したアクリル板から濡れたような感覚を生起することも明らかにされている (高山ら, 2008).

1.2.4 湿り刺激に触れたときの神経信号伝達

水に濡れたような温度刺激や機械刺激の特徴を持つ素材に触れると、人間の皮膚には温度変化や変形などの皮膚刺激が生じ、皮膚内に存在する感覚受容器が応答し、神経信号として中枢神経系へ伝達される。

皮膚の温度変化については、自由神経終末などに存在する 6 種類の TRP イオンチャンネルが受容し、各受容体が温刺激や冷刺激など特定の温度帯に応答する (Schepers and Ringkamp, 2009; Sokabe and Tominaga, 2009; Caterina et al., 1997; Patapoutian et al., 2003). こうした受容器に接続した求心繊維は、温覚では 40°C 付近で活動電位が最も活発になり、冷覚では 25°C 付近で活動電位が最も活発になる (Kenshalo, 1976; Jones and Ho, 2008). 神経伝達速度は冷感の方が速く、冷感 は 10~20 m/s (温感 : 1~2 m/s) で伝達される (Darian-Smith, 1984; Jones and Ho, 2008).

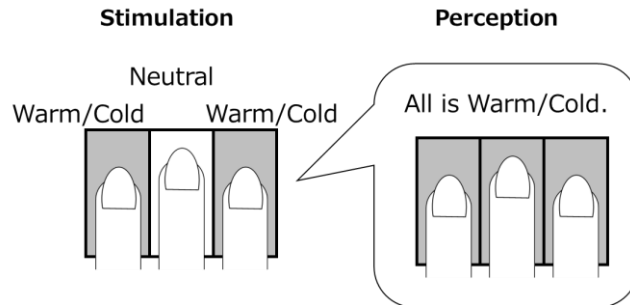
摩擦などによる機械的な皮膚の変形や振動に応答する感覚受容器についてはその時間応答性から遅順応性 (SA; Slowly Adapting) と速順応性 (FA; Fast Adapting) の 2 つのタイプに分類され (Vallbo and Johansson, 1989), 素材に触れたときの皮膚変形は SA ユニット (メルケル小体), 皮膚振動は RA ユニット (マイスナー小体, パチニ小体) の感覚受容器が応答することが明らかにされている (Weber et al., 2013). 機械受容器は有髄の A β 繊維が接続し、神経伝達速度は 35 m/s から 75m/s とされている (Bear et al., 2016).

1.2.5 温度刺激と機械刺激の空間的知覚特性

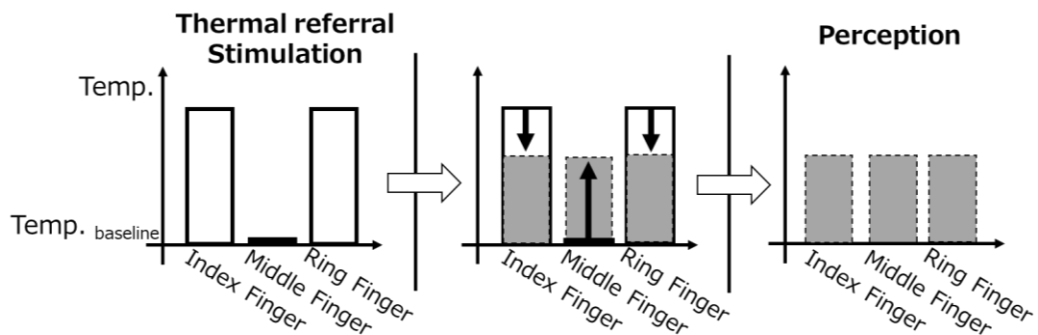
温度刺激や粗さ刺激において、空間的に異なる身体部位に提示された刺激が注目している身体部位に提示された刺激の感覚を変容させる錯覚現象が知られている。

空間加重の効果によって、温度刺激の面積が増大すると温度感覚の強度は増大、あるいは弁別閾値は低下する (Stevens and Marks, 1971; Stevens and Marks, 1979; Greenspan and Kenshalo., 1985; Kenshalo et al., 1967). この空間加重は単独の刺激だけではなく、2つの身体部位(おでこや前腕など)が同時に刺激されるときにも生じる (Marks et al., 1976; Rózsa and Kenshalo, 1977). また、Thermal referral (温度相互参照作用) と呼ばれる、実際に触れた物理刺激とは異なるような知覚が生じる触錯覚現象が知られている。この現象では、中指に中程度の温度刺激を、両側の人差し指と薬指に温かいあるいは冷たい温度刺激を与えると、全ての指が温かくあるいは冷たく知覚される (Green, 1977; Ho et al., 2011, 図 1.2.2 (a)). Thermal referral によって生じる温冷感 は3本指すべて均一に知覚されるが、そのときの温冷感は物理的に均一な刺激(3本指すべて温刺激あるいは冷刺激)から得られる温冷感よりも、中程度の温度に近づくことが明らかとなっている (Ho et al., 2011, 図 1.2.2 (b)). このメカニズムとして、3本指で触れた刺激から得られる温冷感が統合され、平均化されて各指に再分配されるというプロセスが背景にあると考えられている (Ho et al., 2011, 図 1.2.2 (b)).

Thermal referral と似た現象は粗さ感覚でも生じることが調べられている。Thermal



(a) 温度相互参照作用の概念図



(b) 温度相互参照作用の仮説

図 1.2.2 温度相互参照作用 (Thermal referral) (Ho et al. 2011 より再構成)

referral のように 3 本指の外側 2 本指（人差し指・薬指）と中指に異なる粗さの刺激を同時になぞるとき、中指の粗さ知覚は外側 2 本指の刺激（粗い・滑らかな）にともない変化することが明らかにされている（荒井，岡嶋，2009）．中指とその他 2 本指でなぞる粗さが類似していた場合，中指で得られる感覚は均一に感じられる傾向も見られた．粗さ感覚については同化効果（assimilation effect）も研究されている．人差し指で評価刺激，中指で粗い（あるいは滑らかな）刺激をなぞり，その後人差し指で参照刺激，中指で滑らかな（あるいは粗い）刺激をなぞらせ，評価刺激と参照刺激の粗さを比較させたところ，人差し指の粗さ知覚は同時になぞった中指の粗い（あるいは滑らかな）刺激に近い感覚として評価されることを示した（Kahrimanovic et al., 2009）．

このように周辺に提示された刺激によって，注目する刺激の感覚が影響を受ける現象が温冷感や粗さ感で見出されていることから，湿り感についても似た現象が生じる可能性がある．実際に，物体の湿った部分と乾いた部分が同時に皮膚の異なる領域に触れることは日常生活でよく生じることである．たとえば洗濯物の乾きを複数の指を用いて判断する場合や，インナーシャツの湿りを接触している皮膚領域から判断する場合において，水分や汗を含んで濡れた部分と乾いた状態の部分が同時に皮膚に触れる．湿り刺激の空間配置に関連する知覚についてはあまり調べられていないが，これを知ることは日常生活に則した湿り知覚を理解することにつながる．

1.3 本論文の意義

本研究では、水を含んだ物体の触感を「湿り感」と定義する。これまで見てきたように水分感に関連する先行研究において、水分と皮膚が接触したときの感覚は温度刺激と機械刺激の情報を統合することによって推定されると仮定されており、その知覚は実際に特定の温度刺激や機械刺激に影響を受けることも明らかにされている。本論文は、人間の湿り知覚は直接的な水分検出の感覚ではなく、温度刺激と機械刺激の統合による湿り感錯覚であるという視点に立ち、温度刺激と機械刺激の統合処理による湿り感錯覚が生起する条件を調べる。これにより、湿りの知覚メカニズムに関する知見を得ることを目的とする。

人間の触知覚特性を理解することは、触覚提示技術の確立にも貢献できる。近年、バーチャルリアリティの分野などで触覚提示技術の開発が進められている。粗さや硬さ、温度などについては、その触覚情報を他者に、遠隔地でも、数日後でも共有できるような技術が開発されつつある。特に湿り感の提示手法の確立のために人間の本質的な知覚特性を利用することは、生体安全・簡便な提示技術の開発の観点から利点がある。皮膚や衣服を実際に濡らすことは衛生の観点から配慮が必要である。しかし、錯覚を用いることで皮膚を濡らすことなく湿り感を提示できれば、生体安全性を高めることができる上に、機械などの損傷や劣化を防ぐことにつながる。また、水を直接皮膚に接触させる場合、水分を管理するためには蒸発を防ぎながら一定の温度・湿度をコントロールすることが必要であるため実現コストが大きくなってしまうという問題がある。一方で、水を使わずにバイブレータやペルチェ素子などの汎用部品を用いて湿り感を提示できるようになれば入力刺激の制御が容易になる。さらには、錯覚を利用することで広範囲な触覚提示も少数の刺激装置によって実現する可能性がある。現状の触覚提示技術は、手指など局所的な触覚刺激を研究対象として扱うものが多い。局所的な触覚提示をそのまま広範囲な身体部位に適用しようとする、大量の刺激提示装置を全身に装着することになり、装置開発・制御・汎用性などの点で課題がある。そこで、日常的な場面に則した湿り感提示を、より安全で、簡便に実現するためにも、人間の湿り知覚特性を調べることは有用である。

本論文では乾燥した物体に触れたときに、湿り感錯覚を生じる条件を様々なパラメータを変化させながら調べることによって、湿り感の知覚特性を調査する。2章では、温度刺激の寄与、3章では接触対象の物体の物性、4章では柔らかさ特性、5章では触り方、6章では空間的な配置に関して検証する。

第2章 湿り感錯覚を生じる温度条件

本章では、温度条件が湿り知覚にどう寄与するのかを調べるために、布の温度変化によって生じる湿り感錯覚を評価する。そこで、温度を変えた乾燥布から錯覚する湿り感について、実際に湿った布から知覚される湿り評価と比較しながら、湿り錯覚が生じる温度条件を調査する。

2.1 皮膚温度変化による湿り感錯覚

湿り知覚において、温度刺激の寄与が大きいと示唆されている（山川，伊左治，1984；小柴，田村，1995；Filingeri and Ackerley, 2017）。そこで、物体と皮膚の接触時に生じる熱の移動を考える。半無限体同士が接触したモデルを想定し、熱伝導方程式に初期条件と境界条件を当てはめると、物体に皮膚が触れたときの皮膚温度 T_{skin} は以下のように表せる（菅井，前川，2004；高山ら，2008）。

$$T_{skin} = T_{skin}^0 + (T_c - T_{skin}^0) \cdot \left\{ -\exp \left[\frac{\alpha_{skin} t}{(R_{skin} \lambda_{skin})^2} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{\alpha_{skin} t}}{R_{skin} \lambda_{skin}} \right] \right\} \quad (2.1.1)$$

$$R_{skin} = \frac{\sqrt{(\rho c \lambda)_{obj}}}{\sqrt{(\rho c \lambda)_{skin} + \sqrt{(\rho c \lambda)_{obj}}}} R \quad (2.1.2)$$

$$T_c = \frac{\sqrt{(\rho c \lambda)_{skin}} T_{skin}^0 + \sqrt{(\rho c \lambda)_{obj}} T_{obj}^0}{\sqrt{(\rho c \lambda)_{skin} + \sqrt{(\rho c \lambda)_{obj}}}} \quad (2.1.3)$$

ここで、 T^0 は初期温度[°C]， T_c は接触熱抵抗がない場合の接触温度理論値[°C]， α は温度伝導率[m/s²]， t は時間[s]， ρ は密度[kg/m³]， c は比熱[J/kg・K]， λ は熱伝導率[W/m・K]， R は接触熱抵抗×伝熱面積を表す。なお、添え字の *skin* は皮膚，*obj* は物体を示す。接触熱抵抗とは、物体あるいは皮膚表面の粗さや凹凸などが起因する不完全な接触によって接触面に生じると考えられる熱抵抗である。

これらの熱伝導方程式から、皮膚と物体間の熱移動は、物体や皮膚の初期温度や、物体の密度、比熱、熱伝導率や皮膚側の物理特性、皮膚と物体間の接触面積などによって決定されると予測できる。まず、物体表面に水が存在している場合には皮膚と水界面の接触面積が大きくなることから接触熱抵抗が小さくなる。(2.1.1)式より、皮膚と物体の間の接触熱抵抗が減少するにつれて皮膚温度 T_{skin} は接触温度理論値 T_c に近づく一方で、接触熱抵抗が増加すると皮膚温度 T_{skin} は皮膚の初期温度 T_{skin}^0 に近づく。このことから、水が物体表面に存在している場合、皮膚温度は乾いた物体に触れたときの皮膚温度よりも接触温度理論値に近づく、つまり皮膚の温度変化が大きいと考えられる。続いて、(2.1.3)式より、物体の密度 ρ や比熱 c 、熱伝導率 λ が大きいほど、接触温度理論値 T_c は物体の初期温

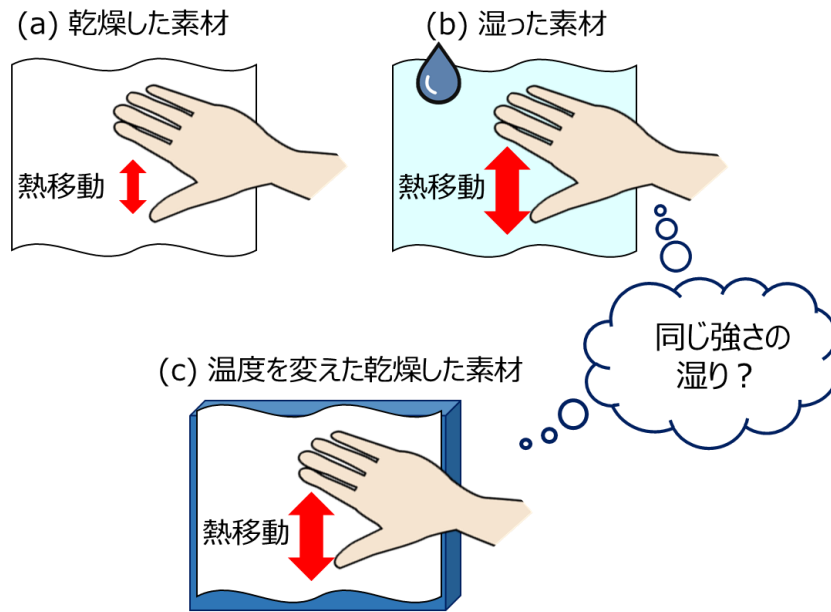


図 2.1.1 乾燥あるいは湿った素材と皮膚間の熱移動の模式図

度 T_{obj}^0 に近づく．水は空気よりも密度や比熱，熱伝導率が大きいため，水を含んでいる物体に触れると皮膚温度は乾いた物体に触れたときの皮膚温度よりも物体の初期温度に近づく．したがって，接触熱抵抗や物体の熱伝導特性から湿った物体に触れる場合，乾いた物体に触れる場合よりも皮膚温度が大きく変化し，乾燥した物体に比べて多くの熱が移動する（図 2.1.1 (a) (b)）．物体が含む水分量が増すとともに，熱伝導率が高くなるため，熱の移動量はさらに大きくなる．一方で，物体の初期温度も理論値に影響し（(2.1.3)式），物体温度と皮膚温度の差が大きいほど，接触後の皮膚温度はより上昇あるいは低下する．つまり，乾燥した物体の初期温度の違いによっても熱の移動量が変化する（図 2.1.1 (a) (c)）．

湿り知覚に皮膚に加わる温度刺激が影響すると考えると，図 2.1.1 (c) のように乾燥した素材の温度を変えることによって，湿った物体に触れたときの皮膚温度変化を同等にすると，実際に湿った素材に匹敵するほどの湿り感を錯覚すると仮定した．本章では，布の表面温度を変えることにより，乾燥布に対して湿り感を錯覚させ得るかを検討した．はじめに加水によって布表面の物理特性（伝熱特性や圧縮特性）がどの程度変化するか確認する（2章2節）．次に，湿った布や温度を変えた乾燥布に手掌で触れたときの皮膚温度変化を確認した．次に，湿った布や温度を操作した乾燥布に触れたときの皮膚温度変化を確認する（2章3節）．そのうえで，湿り感を評価する心理物理実験を行い，実際に湿った布に触れたときに知覚される湿りと比較しながら，温度を変えた乾燥布から湿りを錯覚する温度条件を調査する（2章4節）．本章では，対象の温度知覚に有効な触り方（Lederman and Klatzky, 1998）として，手掌を試料布の上に乗せるように接触させ，そのまま静止させる，静的な触り方を採用した．

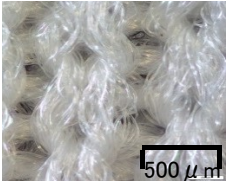
2.2 加水による試料布の物理特性変化

試料布はポリエステルスモースを採用した(表 2.2.1)。ポリエステルは疎水性繊維であるが、表 2.2.1 の拡大写真に見られる繊維間隙に水分を保持でき、含水分率 70%程度まで吸水できることを確認した。

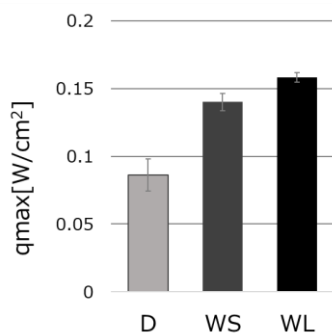
試料布が水分を含むことによって布の物理特性がどの程度変化するか確認するために、KES (Kawabata Evaluation System) を使って伝熱特性と圧縮特性を計測した。KES は布の風合いの客観的評価手法で、布の引っ張りや曲げ、圧縮などの力学特性の計測によって布の風合いを客観的な数値に変換するシステムである。加水による試料布の伝熱特性の変化を確認するため接触冷温感を評価した。接触冷温感には、サーモラボ II (KES-F7, カトーテック株式会社) を用いて熱流量のピーク値 q_{max} (W/cm^2) を計測した。また、静的な触動作に関連すると考えられる試料布の圧縮特性も計測した。圧縮特性は、KES の圧縮試験機 (KES-FB3, カトーテック株式会社) を用いて布の標準測定条件で計測し、特性値として圧縮特性の線形性 LC, 圧縮エネルギー WC ($gf \cdot cm/cm^2$), 圧縮レジリエンス RC (%) および厚さ T (mm) を算出した。計測は、試料布の含水分率を変えた乾燥 (Dry; D) 条件, 湿り小 (Wet Small; WS) 条件, 湿り大 (Wet Large; WL) 条件の 3 条件について行った。試料布の大きさは 20cm 四方とし、乾燥条件は計測環境 (室温: $20^{\circ}C \pm 0.5^{\circ}C$, 湿度: $65 \pm 2\%RH$) に 1 時間放置した布とした。湿り小条件と湿り大条件は試料布に霧吹きで均一に水分を含ませたうえで布表面温度を調整するため計測環境 (室温: $20^{\circ}C \pm 0.5^{\circ}C$) に放置し、調整した。この 2 条件は布の含水分率で区分し、湿り小条件は含水分率 10~20%, 湿り大条件は含水分率 40~60% に設定した。含水分率は 0.01 g 精度のデジタルはかり (HT-120, 株式会社エー・アンド・デイ) を用いて、湿らせる前と湿らせて計測した後の重量を比較して算出した。なお、圧縮特性の計測時に試料布から水が染み出し、装置に水分が残ることは目視では確認できなかった。

図 2.2.1 (a) に接触冷感の指標となる熱流量のピーク値 ($q_{max}[W/cm^2]$) について各 3 カ所の計測値を平均した結果を示す。エラーバーは標準誤差である。同様に図 2.2.1 (b) の 4 つのグラフは圧縮特性に関する 3 種類の特性値と厚さについてそれぞれ計測値を平均した結果を示す。まず熱流束の極大値の結果から、含水分率の増加に伴い最大熱流束も増加することがわかった。この増加量は、繊維の種類や編み組織の異なる編み布における熱流量のピーク値のばらつき (坂口ら, 1986) を上回っている。圧縮特性の圧縮レジリ

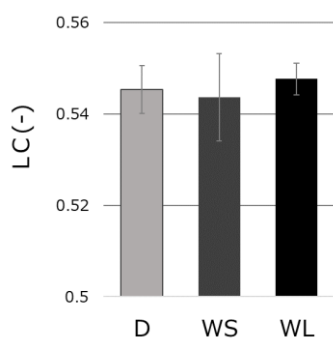
表 2.2.1 試料布の概要

試料布名	組成	糸の太さ (dtex)	編み密度 (2.54cm 間)	厚さ (mm)	重量 (mg/cm^2)	拡大写真
ポリエステルスモース編	ポリエステル 100%	90.9	ウェール 50	0.744	12.7	
			コース 76			

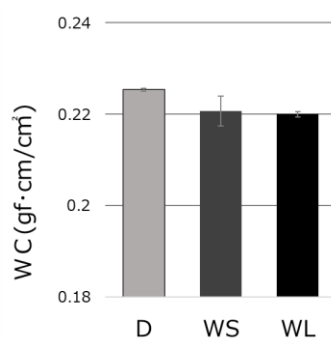
エンス (RC[%]) と厚さ (T[mm]) については、乾燥条件よりも湿り小条件と湿り大条件のほうが小さくなっており、水分を含むことで圧縮変形後の元の形状への回復がしにくくなること、厚みが減少していることがわかった。しかし、繊維の種類や編み組織の異なる編み布における圧縮特性 (LC・WC・RC) や厚みのばらつき (坂口ら, 1986) と比べ、些少である。以上より、布の含水分率によって布表面の物理特性としては主に熱流量のピーク値 (qmax) が変化し、含水分率に伴いより多くの熱が奪われ、冷たく感じられることが推測される。



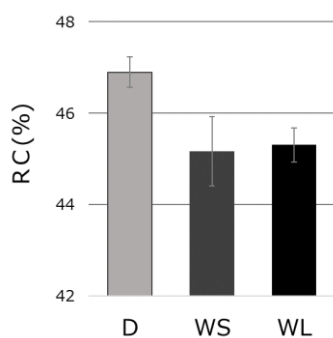
(a) 布の含水分率を変えた 3 条件について熱流量のピーク値の平均値と標準誤差 (各 3 回計測)



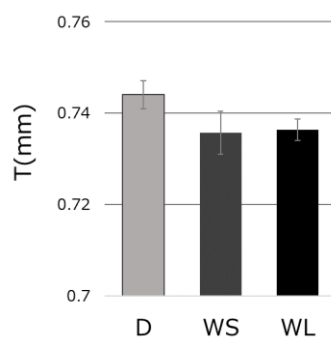
圧縮特性の線形性 (LC[-])



圧縮エネルギー (WC[$\text{gf}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$])



圧縮レジリエンス (RC[%])



厚さ (T[mm])

(b) 布の含水分率を変えた 3 条件について圧縮特性の平均値と標準誤差 (各 3 回計測)

図 2.2.1 布の含水分率を変えた場合の物理特性値

2.3 布に触れたときの皮膚温度変化

実際に温度や含水分率の異なる布に触れた際の皮膚温度変化を確認するために、基準温度の乾燥試料布や湿り試料布に加え、表面温度をいくつか設定した乾燥試料布を準備し、それらの試料布に触れたときの手掌の皮膚温度変化を計測した。皮膚の温度変化には上昇と低下の2通りがある。そのため、計測は試料布の表面温度が皮膚よりも低温の場合と、高温の場合で行った。低温の場合は布の表面温度を 27°C、高温の場合は 39°C を基準温度とし、乾燥 (D) 条件と湿り条件 (湿り小 WS・湿り大 WL) は基準温度に調整した。湿り条件の含水分率の算出は実験参加者が布から手を離れた時点で行った。さらに、乾燥状態の試料布は湿り条件の2条件に対応した皮膚温度変化を生じるよう、基準温度の他に低温は 21・24°C、高温は 42・45°C の各2条件を設定した。

計測は触覚機能が正常な 20 代の女性 1 名 (著者) で行った。皮膚温度の計測は計測者が異なる場合、皮膚の伝熱特性が変化するため最終的な温度変化量が異なる (Jones and Ho, 2008)。しかし、試料布の伝熱特性と初期温度、試料布に触れる前の皮膚温度は固定されていれば、計測者が異なっても温度変化の傾向は変わらない。つまり、ある計測者において温度を変えた乾燥条件と湿り条件に触れたときの皮膚温度変化が同等であった場合、他の計測者でも温度変化量は異なるものの2つの条件は同等の皮膚温度変化を示すことになる。そのため計測は1名のみで十分と考えた。計測時の室温は 26±2°C、環境湿度 53±4%RH であった。

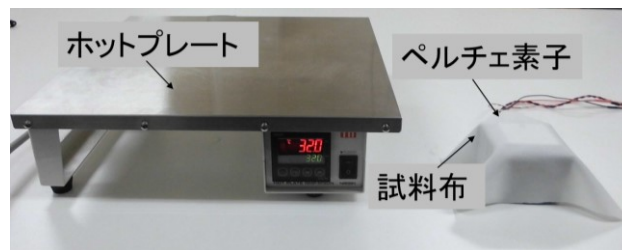
実験装置を図 2.3.1 に示す。皮膚温度の計測にはサーミスタ (P1703, Alpha Technics Inc.) を用いた。計測者の母指球部にサーミスタをセロハンテープで固定した (図 2.3.1 (c))。サーミスタの両端にかかる電圧値は Arduino uno の Analog-Digital 変換端子を用いて 16ms ごとに取得した。Arduino のコンピュータ内で電圧値から算出された温度は、シリアル通信でコンピュータへ伝送した。計測ノイズを除去するために、過去 20 回の計測値の平均を算出し、平滑化を行った。試料布の大きさは 15 cm 四方とし、4cm 四方のペルチェ素子 (TEC1-12706, HB Electronic Components 社) の上に覆うように置き、表面温度を調整した (図 2.3.1 (a))。なお、ペルチェ素子の温度制御はペルチェ素子表面のサーミスタの計測温度を基に PD (Proportional-Derivative) 制御によって行った。ペルチェ素子はモータドライバ (TA7291P, TOSHIBA. Co.Ltd) に、さらにモータドライバは Arduino uno の Digital-Analog 変換端子に接続した。ペルチェ素子に流す電流量は、Pulse Width Modulation で制御した。また計測者の手掌の皮膚温度を一定に調整するために、試料布に触れる前に 32°C に設定したホットプレート (NHP-M30N, 株式会社 日進理化) を用意した (図 2.3.1 (a))。

皮膚温度計測は次の手順で行った。まず、試料布の表面温度を調整するため、試料布をペルチェ素子の上に 70 秒間置いた。この時間で試料布の表面温度が十分に調整できることは事前に確認した。試料布の温度調整と同時に、計測者の手掌の皮膚温度をホットプレートにて調整した。その後、右手の母指球で試料布に触り (図 2.3.1 (b))、静止させた

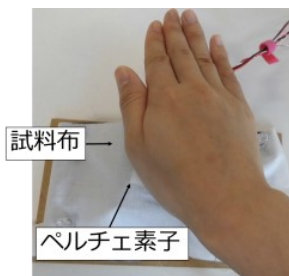
まま 30 秒間の温度変化を計測した。以上の手順を繰り返し、各条件 4 回ずつ計測を行った。

各条件の試料布に触れたときの皮膚温度変化の平均を図 2.3.2 に示す。縦軸は、試料布に接触してからの皮膚温度の変化量を示す。変化量は、ある時間において計測された皮膚温度から、接触時の皮膚温度を引くことで算出した。横軸は、試料布と皮膚の接触後の経過時間を示す。乾燥状態の温度の違いは線の濃さで表し、基準温度と差が大きい条件ほど薄い線で示す。また、湿り状態の含水分率の違いは破線の長さで表し、含水分率が大きいほど長い破線で示す。低温の場合 (図 2.3.2 (a)), 27°C の湿り小 (27°C・WS) 条件と 24°C の乾燥 (24°C・D) 条件、および 27°C の湿り大 (27°C・WL) 条件と 21°C の乾燥 (21°C・D) 条件においてグラフが重なっており、皮膚温度の変化の傾向が似ている。また高温の場合 (図 2.2.2 (b)), 39°C の湿り小 (39°C・WS) 条件と 45°C の乾燥 (45°C・D) 条件同士が似た変化を示している。以上より、湿った布に触れたときの皮膚温度変化に似た温度変化を、乾燥した布の表面温度を変えることで生じさせ得ることを確認した。

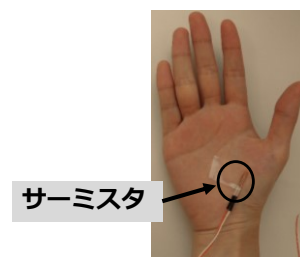
また、従来研究 (Bergmann Tiest and Kappers, 2008) では人の冷覚による物体認識には接触直後の温度変化の時間割合が重要だと示唆している。そこで図 2.3.2 の皮膚温度から接触直後の 5 秒間を取り出し、最小二乗法を用いて 0.5 秒ごとに皮膚温度変化率 [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$] を算出した (図 2.3.3)。図 2.3.3 の縦軸は皮膚温度変化率、横軸は試料布と皮膚の接触後の経過時間を示す。低温 (図 2.3.3 (a)) の場合は乾燥・湿りの両状態ともに接触直後から温度変化率が小さくなっている。一方で高温の場合 (図 2.3.3 (b)) において、乾燥状態と湿り状態を比べると、温度変化率に差が見られる。乾燥状態 (39°C/42°C/45°C・D) の試料布に触れたとき、皮膚温度の変化率は接触してすぐ時間の経過とともに小さくなり、1 秒を経過したあたりで 0.6°C/s の温度変化率を下回る。しかし湿り状態の 2 条件



(a) 実験セットアップ

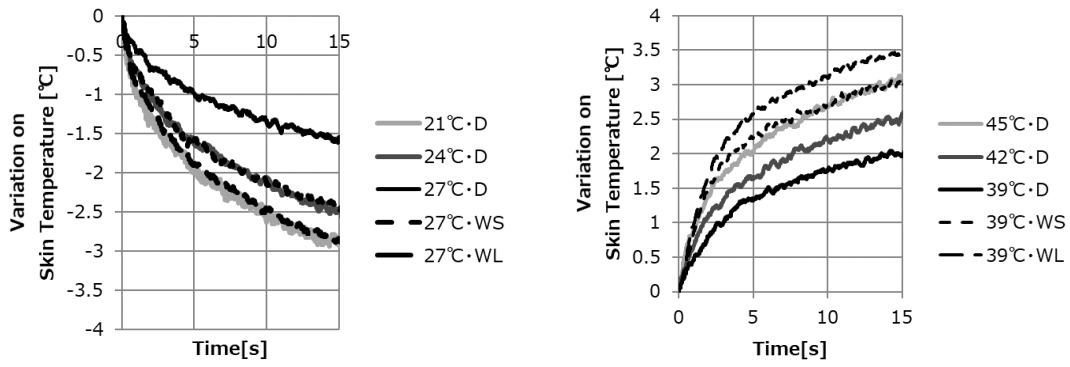


(b) 手掌と刺激の接触方法



(c) 皮膚温度計測

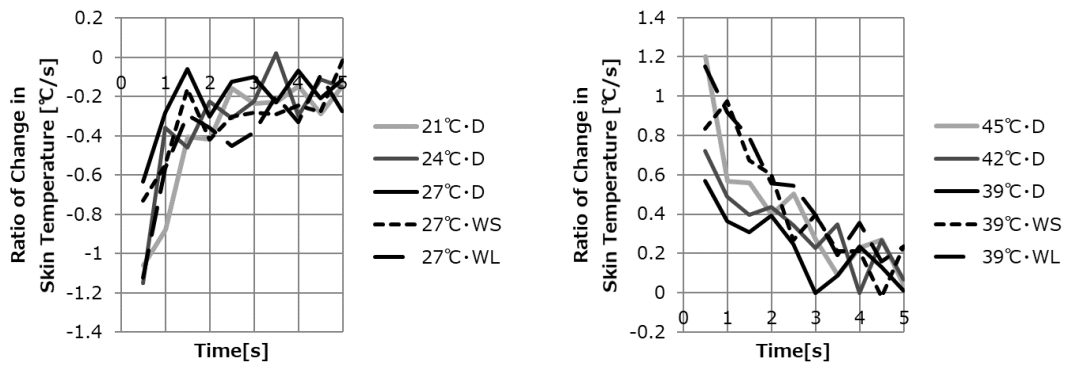
図 2.3.1 実験環境



(a) 低温の場合

(b) 高温の場合

図 2.3.2 刺激に 15 秒間接触しているときの皮膚温度変化



(a) 低温の場合

(b) 高温の場合

図 2.3.3 皮膚温度変化率

(39°C・WS/WL) は、接触後約 1 秒間は 0.8°C/s 以上で、その後 2 秒時点まで 0.6°C/s 以上の温度変化を継続している。このように高温の場合には皮膚温度変化率の挙動において乾燥状態と湿り状態に差が見られたが、次節で述べる心理物理実験は、皮膚温度変化量の計測結果 (図 2.3.2) を基に上述の温度条件で行った。

2.4 湿り感の心理物理評価

乾燥状態の試料布の温度を変化させることで湿り感の錯覚が生じるか確認するために、前節（2.3 節）の皮膚温度計測で用いたものと同様の低温と高温の場合の各 5 条件の試料布に触れた場合の湿りの感覚強度を実験参加者に評価してもらった。実験参加者は、健常な 20 代の女性 8 名で、低温と高温の実験は日を分けて行った。実験は、奈良女子大学の倫理審査委員会の承諾を得たうえでを行い、実験の報酬として謝金を支給した。参加者へは予め実験内容を説明し、同意を得たうえで実験を実施した。

実験装置と接触方法は前節の皮膚温度計測と同様である（図 2.3.1 (a), (b)）。ただし実験時の室温は $27\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度は $51\pm 10\% \text{RH}$ であった。また、湿り感に対する視覚の影響を除くため、実験参加者はアイマスクを着用した。提示する試料布の条件の順番はランダムとした。

心理物理実験は次の手順で行った。まず、試料布の表面温度と実験参加者の皮膚温度の調整、および試料布への触り方は前節と同様である。湿り感の評価は評定尺度法を用い、“0”が乾燥している、“1”がやや湿っている、“2”が湿っている、“3”がかなり湿っている、という 4 段階評価とした。参加者には、実験前に基準温度の乾燥 (D) 条件および湿り大 (WL) 条件の試料布に触れ、前者の湿り感を“0”、後者の湿り感を“3”の基準とするよう教示した。また、温冷覚の弁別閾値に個人差があるため、各参加者にとって両者の刺激が閾値以上の温度変化であることも確認した。この際、布に触れる力が同等となるよう、触り方の説明を行った。実験参加者は布に触れて 10 秒経った時点で湿り感を回答した。また、手を布から離す際や離れた後に生じる感覚から判断されることを避けるため、湿り感を手を離す前に口頭で回答させた。評価が終わるたびに、手掌の水分を拭き取った。以上の手順を繰り返し、1 人の参加者につき各条件 3 回の評価を行った。そして、3 回の評価を平均した値をその条件に対する参加者の評価値とした。参加者の集中力を維持させるために 5 回の評価ごとに 5 分の休憩をとり、休憩後には評価尺度の確認を行った。なお、参加者には「乾燥した布あるいは湿った布に触れ、湿り感の評価する」という実験内容を予め伝えていたが、実験中は、触れる布が湿っているか乾燥しているかは知らせず、湿り感の評価させた。

全実験参加者の湿り感の評価値を条件ごとに平均した結果を図 2.4.1 に示す。横軸が試料布の条件、縦軸が湿り感の評価値である。エラーバーは標準偏差である。低温と高温それぞれの場合において 1 要因分散分析を行った結果、試料布の条件の間に有意差が見られた（低温 $F(4, 28) = 23.5, p < 0.05$ 、高温 $F(4, 28) = 27.5, p < 0.05$ ）。そこで、Holm の方法による多重比較 ($p < 0.05$) を行った。低温の場合（図 2.4.1 (a)）、湿り小 ($27^{\circ}\text{C} \cdot \text{WS}$) 条件は、 24°C の乾燥 ($24^{\circ}\text{C} \cdot \text{D}$) 条件と 21°C の乾燥 ($21^{\circ}\text{C} \cdot \text{D}$) 条件のそれぞれの組み合わせで有意差はなく、湿り大 ($27^{\circ}\text{C} \cdot \text{WL}$) 条件と 21°C の乾燥 ($21^{\circ}\text{C} \cdot \text{D}$) 条件においても有意差はなかった。つまり、図 2.3.2 において皮膚温度の変化が似ていた組み合わせでは、知覚される湿りの強度が異なるという根拠は得られなかった。ま

た、乾燥刺激、湿り刺激ともに、皮膚温度の低下量が大きいほど、強い湿りを知覚する傾向が見られた。一方、高温の場合（図 2.4.1 (b)）、図 2.3.2 において皮膚温度の変化が似ていた 45°Cの乾燥（45°C・D）条件と湿り小（39°C・WS）条件は有意に異なり、温度を変えた乾燥刺激と湿り刺激は異なると評価された。また、乾燥刺激における温度・湿り刺激における含水分率の違いは、湿り知覚の強度に有意な影響を与えなかった。

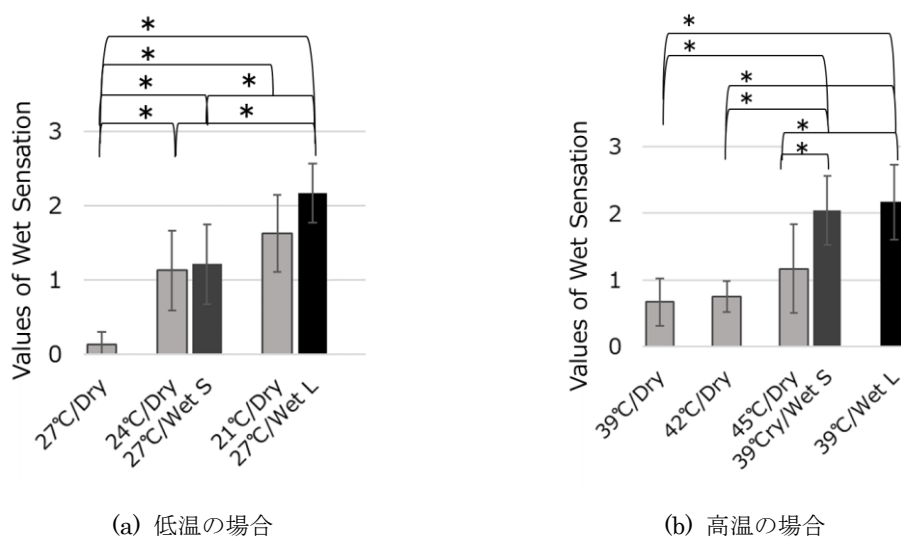


図 2.4.1 全実験参加者の湿り感評価の平均値 * : $p < 0.05$

2.5 考察：湿り感錯覚を生じる温度条件

本章では特に20代女性を対象とし、温度刺激による湿り感錯覚の生起を検証した。皮膚温度の低下を生じる冷覚の場合（図 2.3.2 (a), 図 2.4.1 (a)）、実験参加者は、湿り刺激と似た皮膚温度低下が生じる「冷たい乾燥刺激」に対し、実際に湿り刺激に匹敵する強さの湿り感を錯覚していた。

先行研究では、皮膚温度低下速度が 0.14 から 0.41°C/s の範囲であれば湿り感を錯覚することが実証されている (Filingeri et al., 2014a)。本章の実験では特に接触後約 2 秒の間は、これよりも速い速度で皮膚の温度が低下していた。本章の実験結果より、皮膚温度の低下量が増すほど錯覚する湿り感も強くなっていたことから、先行研究よりも急速に皮膚の温度が低下している本実験では、先行研究よりも錯覚した湿り感の強度が強かったのではないかと推測される。また、本章では湿り感錯覚の傾向を知るために実験参加者の性別や年齢について限定して検証した。先行研究では男性において湿り感錯覚が実証された事例もある (Bergmann et al., 2012b; Filingeri et al., 2014d)。そのため、性差はなく生じる触錯覚である可能性がある。

反対に、皮膚温度の上昇を生じる温覚の場合（図 2.3.2 (b), 図 2.4.1 (b)）、冷覚と異なり、湿り刺激と似た皮膚温度上昇を示す「温かい乾燥刺激」から湿り感を錯覚しなかった。このように、冷覚と温覚では湿り感錯覚の生起状況が異なっていた。先行研究でも冷たい乾燥刺激は“湿っている”ように感じられる (Filingeri et al., 2013) が、温かい乾燥刺激は湿っていると評価されず、温かい湿り刺激からも湿り感が低くむしろ乾いていると評価されていた (Filingeri et al., 2014d)。この知見は、温かい乾燥刺激からは湿り感を錯覚しないという点では本研究の結果と一致しているが、本研究では温かい湿り刺激は正しく湿っていると評価されていた。先行研究 (Filingeri et al., 2014d) と本研究の違いは、刺激を提示する身体部位 (Filingeri et al. は背中) による湿り知覚の精度が異なるためではないかと考える。

温覚と冷覚で湿り感錯覚の生起状況が異なる原因として、温度変化の知覚感度の違いが考えられる。温覚と冷覚の知覚は感覚受容器の種類や各身体部位の受容器の密度、神経伝達経路が異なる (Jones and Ho, 2008)。温度の弁別閾値については、皮膚温度の低下よりも皮膚温度の上昇を知覚しにくいことが実証されている (Jones and Ho, 2008)。そこで、人間は温かい湿りを判断する際、温度の寄与よりも機械刺激の寄与が大きいと推測される。加水による布の圧縮特性の変化 (2.2 節, 図 2.2.1) は、布の種類における差に比べ小さいものであったが、もし人間が加水による布の圧縮特性の差を弁別可能であれば、布の硬さや柔らかさの変化を湿り感の判断材料として用いている可能性がある。

2.6 まとめ

以上の結果から、手掌で乾いた布を静的に触れたとき、その布の表面温度が皮膚温度よりも低く、かつ、湿った布に触れたときと同等の皮膚温度低下を生じるならば、評価される湿り感が強まることを明らかにした。一方で、乾いた布の表面温度が皮膚温度より高い場合は、湿った布に触れたときと同等の皮膚温度低下を生じたとしても評価される湿り感は強くならなかった。この非対称性の原因として、冷覚は温覚よりも温度変化に敏感であることが挙げられる。

第3章 湿り感錯覚を生じる物性

第2章において、布の表面温度を低下させると湿り感の錯覚を引き起こすことを明らかにした。本章では触れる対象の物体のどのような物性が冷たさによる湿り感錯覚の生起に関わっているのかを明らかにするため、複数種類の材質や布を対象として湿り感錯覚を調べ、その錯覚の生起と物性値との関係を解析する。

3.1 実験1：湿り錯覚を生じやすい素材の特徴

本節では、金属や布など複数種類の素材を用いて、湿り感の錯覚強度を評価する。さらに、重回帰分析を行い、湿り感錯覚を引き起こす物性を検証した。

3.1.1 実験手法

刺激は、表3.1.1に示す6種類の異なる素材（アルミ、布、MDF（Medium density fiberboard）、PVC（Polyvinyl chloride）、アクリル、紙）を用意した。この刺激は100×100 mmの大きさに統一した。心理実験の際に刺激を複数回使いまわすと、実験参加者の皮膚から水分を吸収し、実際に素材が濡れることも考えられるため、刺激は試行回数分用意した。布や紙、PVCのような薄い試料は変形しやすいため、ハードボードに貼り付けて固定した。表3.1.1の6種類の試料は表面温度を12℃に調整し、冷・乾燥刺激として提示した。湿り感錯覚の手がかりとして冷たさの他に粘着（Stickiness）が湿り感に関連すると考えられる（Bergmann Tiest et al., 2012a; Bergmann Tiest et al., 2012b）ため、粘着が大きい素材としてアクリルを室温（20℃）で提示した。

刺激表面の機械刺激的特徴を知るため、表面粗さ測定機（サーフテスト SJ-210, 株式

表 3.1.1 試料の概要






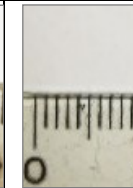

試料	アルミ	布	MDF	PVC	アクリル	紙	アクリル
概観							
表面温度 [°C]	12						20

表 3.1.2 試料の物理特性の平均値 (各 5 回計測)

試料	平均粗さ [μm]	静摩擦 係数 [-]	ヤング率 [GPa]	試料に触れて 3 秒後の皮膚温度低下量 [$^{\circ}\text{C}$]
アルミ	2.2	0.24	6.5×10	-9.3
布	2.2×10	0.50	4.0×10^{-3}	-3.2
MDF	3.3	0.37	1.3	-3.8
PVC	7.6×10^{-1}	0.60	5.8×10^{-2}	-4.9
アクリル	3.2×10^{-2}	0.29	4.2	-5.1
紙	2.9	0.39	4.4×10^{-2}	-5.2
アクリル :20 $^{\circ}\text{C}$	3.2×10^{-2}	0.29	4.2	-2.3

会社ミットヨ)で平均粗さを, 摩擦計(ポータブル摩擦計 TYPE:94i-II, 新東科学株式会社)で静摩擦を, 微小硬さ試験機(HM2000 XYp, 株式会社フィッシャー・インストルメンツ)でヤング率を, それぞれ 5 回計測した. 5 回の計測値を平均したものを表 3.1.2 に示す. 布は, ポリエステル編み布(表 3.1.1)で異方性があるため, 表面粗さは経・緯方向をそれぞれ 5 回計測した平均値を扱った. 摩擦計の接触面は金属であったため, 皮膚と物体との接触状況に近づけるためラバーシートを取り付けて摩擦を計測した. 刺激の温熱的特性を知るため, 皮膚温度の低下量を計測した. 皮膚温度の計測手法は 2.3 節と同様である(図 2.3.1 (c)). 表 3.1.2 の皮膚温度低下量は 5 回計測し, 平均したものを示している.

冷・乾燥刺激の表面温度を制御するため, 刺激は温度調整箱(図 3.1.1, 図 3.1.2; Coolbox)

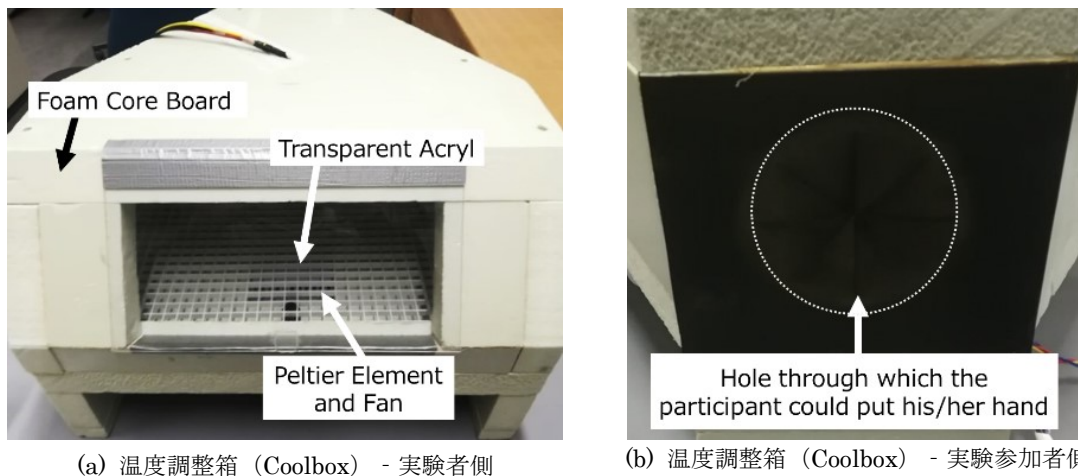


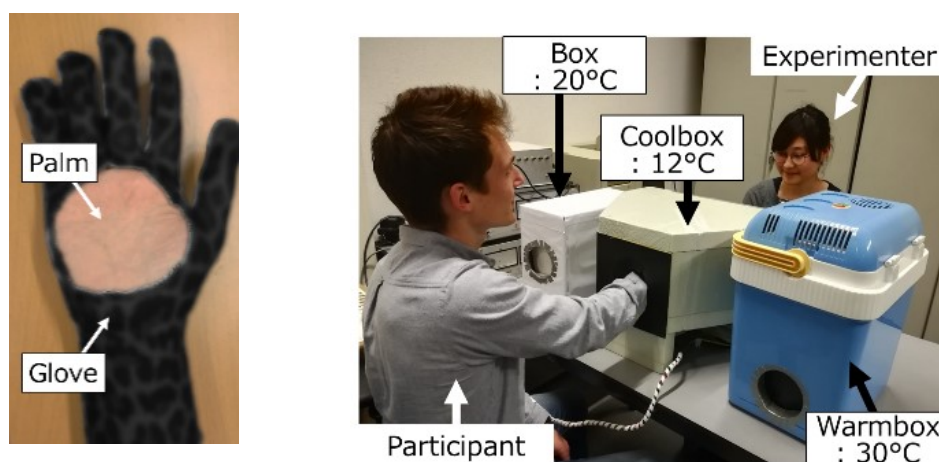
図 3.1.1 実験装置

に保管した。この箱は Bergmann Tiest と Kappers が作成したもの (Bergmann Tiest and Kappers, 2008) で、コンピュータ制御の電源 (Delta E 015-20) に接続したペルチェ素子 (Campingaz, Powerbox 24 L) が箱の下部にあり、12V の電源供給で駆動する。箱内部にはファンがあり、ペルチェ素子によって 12°C に冷やされた空気を循環させている。空気の循環を妨げずに、刺激を置くためにプラスチック製の格子 (図 3.1.1 (a)) を配置している。予備実験において、温度調整箱の内部にサーミスタを差し込んで実験手順を行ったところ、実験の間、箱内部の温度を 12°C (12 ± 2.0 °C) に保っていることを確認した。刺激はこの箱の中に少なくとも 2 時間放置し、物体表面の温度を 12°C に冷却した。実験前に、刺激表面が 12°C 付近に調整できていることを確認した。この箱の片側 (図 3.1.1 (a)) には透明な窓があり、実験者が刺激の入れ替えや実験参加者の手の動きを観察が可能である。反対側 (図 3.1.1 (b)) は刺激が見えないように切り込みのついたゴムで覆い、実験参加者は手を差し込んで刺激に触れることができる。このゴムが箱内部の冷気によって冷やされ、実験参加者の腕に触れた際に冷えたゴムの触感が湿り感の評価に影響するのを防ぐために、実験参加者は手掌部分に穴の開いた手袋を着用し、評価を行った (図 3.1.2 (a))。

乾燥刺激は室温 (21.0 ± 1.3 °C) の箱の中で提示した。評価刺激は全て乾いた刺激であるため、あらかじめ 0.01g 精度のデジタルはかり (HT-120, 株式会社エー・アンド・デイ) で 12°C に冷却する前後の刺激重量を計測し、今回の冷却手法によって刺激が水分を含んでいないことを確認した。

刺激に触れる前に実験参加者の皮膚温度を調整するため、もうひとつ温度調整箱 (Campingaz, Powerbox 24 L, 図 3.2.2; Warmbox) を用いた。この箱は 30°C 付近に設定した。箱には実験参加者が手を入れる穴があり、箱の内部にはアルミ板が設置されている。アルミは熱伝導率が大きいため、箱内部の温度によってアルミ板表面の温度を制御できる。実験参加者は各評価の前に、30°C に設定された箱内部のアルミに触れることで皮膚温度を調整した。3 つの箱を並べた全体のセットアップは図 3.1.2 (b) に示す。

実験は室温 21.0 ± 1.3 °C、湿度 $31.5 \pm 8\%$ RH 環境下で行った。実験参加者は実験目的



(a) 刺激に触れる際に用いた手袋

(b) 実験セットアップ

図 3.1.2 実験環境

を知らない健常な 20 人の男女（20～38 歳，女性 9 人）であった。実験参加者のうち 3 人は左利きであった。実験は奈良女子大学とオランダの Vrije Universiteit Amsterdam の倫理審査において承諾を得たうえで行った。参加者には予め実験内容を説明し，同意を得たうえで行った。実験参加者はボランティアとして参加した。

評価には一対比較法を採用した。実験参加者は異なる 2 つの刺激を一対として提示され，「どちらの方が湿っていると感じるか (Which of the two felt wetter?)」を回答した。刺激の組み合わせは冷・乾燥刺激と乾燥刺激を含む全 7 刺激から，異なる 2 つの刺激を 1 組として提示し，提示する順番を考慮した合計 42 組に対して評価を行わせた。全体の実験を 2 セットに分け，各セットでは全て異なる刺激対となる 21 組の評価を行った。刺激対はランダムな順番で，実験参加者ごとに異なる順番で提示した。

実験手順は次のとおりである。参加者は利き手に手袋（図 3.1.2 (a)）を着用し，皮膚温度の調整を行った。皮膚温度の調整時間は，各セットの最初の試行前のみ 2 分間，連続した試行間では 30 秒間とした。この調整時間で充分であることは事前に確認した。短音が鳴ると，実験参加者は 30℃の箱から手を出し，1 つ目の刺激に 3 秒間静的な触動作で触れた。3 秒たつとまた短音が鳴り，参加者は 2 つ目の刺激に触る。3 秒たつと長音が鳴る。この音を合図に，参加者は口頭で「どちらの方が湿っていると感じるか」を回答した。回答した後，手の水分をタオルでふき取る，という手順を繰り返した。実験前に数回練習を行った。集中を維持するため，2 つのセット間は 3 分の休憩を設け，全体で 1 時間程度実験を行った。

3.1.2 実験結果

強制二択による一対比較によって評価した結果より，全刺激対について「2 つの刺激の内 1 つ目の刺激がより湿っている」と評価された確率を表 3.1.3 に示す。「行」に示す試

表 3.1.3 「1 つ目の刺激がより湿っている」と回答された確率

最初に左側の刺激を提示し，次に上側の刺激を提示したとき，最初に提示された刺激を「より湿っている」と回答された確率を表す

	アルミ	布	MDF	PVC	アクリル	紙	アクリル :20℃
アルミ		0.95	0.95	0.80	0.75	0.80	0.60
布	0.05		0.20	0.15	0.20	0.20	0.45
MDF	0.15	0.85		0.25	0.20	0.40	0.50
PVC	0.15	0.95	0.50		0.20	0.85	0.65
アクリル	0.25	1.0	0.60	0.50		0.70	0.70
紙	0.20	0.85	0.35	0.20	0.15		0.70
アクリル:20℃	0.25	0.70	0.50	0.35	0.30	0.55	

料を1つ目の刺激として提示し、「列」に示す刺激を2つ目として提示した。この確率から、湿り感の強度を相対的に比較するため、それぞれの刺激について標準正規分布の累積分布関数の逆関数の値である Z 値を計算した。この計算には Microsoft Excel の NORMSINV 関数を用い、全ての比較から得られた Z 値を刺激ごとに平均した。平均した Z 値を図 3.1.3 の数直線上に示す。アルミ、アクリル、PVC、室温のアクリル、紙、MDF、布という順番でより強く湿っていると評価された。

続いて、計測した試料の物理特性（表 3.1.2）と心理物理評価の値（図 3.1.3）を用いて重回帰分析を行った。説明変数の候補として、表 3.1.2 の「平均粗さ」、「静摩擦係数」、「ヤング率」、「皮膚温度低下量」や図 3.1.3 に示す「Z 値」は正規化を施した上で、各物理特性間の相関係数を計算した（表 3.1.4）。ステップワイズ法による重回帰分析（backward stepwise multiple regression）を行い、湿り感錯覚の強度を表す「Z 値」をよく説明できるモデルを探索した。このとき、多重共線性を回避するため説明変数間に強い相関がないことを確認した。その結果、決定係数（R² 値）が最も当てはまりの良いモデルは以下の式となった。

$$\text{湿り感 : Z 値} = -0.63 (\text{皮膚温度低下量}) - 0.50 (\text{平均粗さ})$$

このときの自由度調整済みの決定係数 R² = 0.73（p<0.05）となった。この結果を図 3.1.4 に図示する。

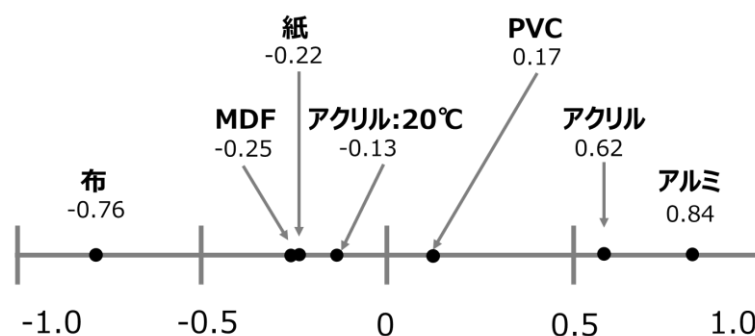


図 3.1.3 湿り感錯覚強度の数直線図

表 3.1.4 心理評価の結果と物理特性間の相関係数（正規化済み）

	Z 値	平均粗さ	静摩擦係数	皮膚温度低下量	ヤング率
Z 値	1.0				
表面粗さ	-0.80	1.0			
静摩擦係数	-0.43	0.38	1.0		
皮膚温度低下量	-0.73	0.27	0.34	1.0	
ヤング率	0.61	-0.16	-0.55	-0.86	1.0

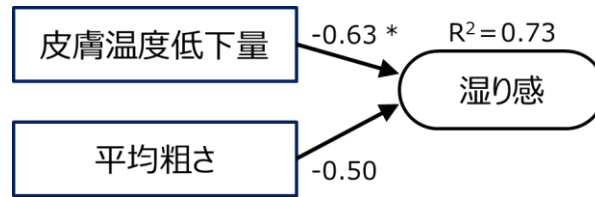


図 3.1.4 重回帰分析結果

矢印の先にある数字は回帰係数，右側上部の数字は自由度調整済みの決定係数 R^2

3.1.3 考察：湿り感を生起しやすい材質の特徴

本節（第 3 章 1 節）では，冷覚による湿り感の錯覚強度について，冷却したいいくつかの材質の湿り感を相対的に評価する実験を行った．さらに，材質の物性値と心理評価値の重回帰分析の結果，皮膚温度低下量が大きいことと表面粗さが小さいことが湿り感錯覚を強めることが明らかとなった．特に，皮膚温度低下量は粗さよりも回帰係数が大きいため，皮膚温度低下量の方が湿り感錯覚にもたらす影響が強いことが示唆される．

皮膚温度の低下量が増えるほど湿り感を錯覚しやすくなるという知見は，前章（第 2 章）や Filingeri らの研究（Filingeri et al., 2014c）と同様であり，皮膚が冷やされる程度が知覚される湿り感強度の指標となることが示されている．さらに，本節では粗さの減少つまり滑らかさの増加が湿り知覚につながるという結果を得た．この結果は，物体と皮膚との密着に起因すると予想される．粗い物体はその表面に多数の凹凸を有するため，皮膚と物体表面が接触していない面積が多く存在する．一方で滑らかな物体は皮膚との接触面積が大きく，密着しやすくなるため，滑らかな物体ほど粘着が強まる（Sharman et al., 2009）．粘着感（Stickiness）は，湿り知覚の手がかりとなることが示唆されている（Bergmann Tiest et al., 2012a; Okamoto et al., 2018）．つまり，滑らかさの大きい物体は皮膚と密着度合いを増加させることで粘着感を生じ，その感覚が湿り感を引き起こしているのではないかと考えられる．室温で提示したアクリルが比較的強い湿り感錯覚を引き起こした背景には，アクリルが皮膚と密着しやすい刺激だったことがうかがえる．

また，今回用いた材質の中ではアルミが一番湿り感錯覚を誘発しやすい一方で，布が一番湿り感錯覚を誘発しにくいことが明らかになった．ただし，本節（3.1 節）の実験では，実際に湿った状態と比較しておらず，冷たい乾燥状態のみの湿り感の相対評価であるため，布刺激は湿り感錯覚を生じにくい材質なのかどうかについては結論付けることはできない．前章（第 2 章）の実験や先行研究での接触冷感布を用いた実験（Bergmann Tiest et al., 2012b）において布刺激に対する湿り感錯覚が実証されており，特に前章（第 2 章）ではペルチェ素子の上に布を置き，表面温度を一定に保つように制御し，皮膚の接触によって布表面の温度が上昇するのを防いでいた．一方で，本節（3.1 節）の実験では，表面の初期温度のみを調整したため，皮膚との接触による熱移動によって物体の温度が上昇する条件であった．これらのことから布刺激における湿り感の錯覚の生起には接触時の冷却速度が特に重要であることが推測される．そこで次節では前章（第 2 章）と同様の

冷却手法によって布の湿り感錯覚と布の物性との関連を明らかにするべく、複数の種類の布を用いて湿り感錯覚を定量評価する。

3.2 実験2：湿り感錯覚を生じやすい布の特徴

前節（第3章1節）において，冷たく，滑らかな材質において冷覚による湿り感錯覚が強く生じることが明らかとなった．本節では布に特化し，湿り感錯覚を生じやすい物性について調査する．また，冷たい乾燥状態の布に加え，湿った状態の布も評価刺激として採用することで，湿り感錯覚から得られる湿り感を実際の湿り感と比較する．さらに，布の物性値による重回帰分析を行い，湿り知覚につながる布の物理特性を明らかにする．

3.2.1 実験手法

実験試料布として，表面の構造や繊維の種類など特徴の異なる布 5 種類を用いた（表 3.2.1）．試料布の大きさはそれぞれ 150 × 300 mm とした．これらの試料布の物理特性を確認するため，圧縮試験機（カトーテック製 KES-FB3）を用いて圧縮特性を計測した．特性値として，圧縮特性の線形性 LC，圧縮エネルギー WC ($\text{gf}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$)，圧縮レジリエンス RC (%) を算出した（図 3.2.1）．図 3.2.1 は 5 回ずつ計測した平均値とその標準誤差を示す．

布の温度制御を行う装置は第2章3節と同様である（図 2.3.1）．4cm 四方のペルチェ素子（TEC1-12706，HB Electronic Components 社）の上に布を覆うように 60 秒間置き，表面の初期温度を調整した（図 2.3.1 (a)，(b)）．実験環境は室温 $24.5\pm 1.5^\circ\text{C}$ ，環境湿度 $5.2\pm 11\%\text{RH}$ であった．実験参加者は健常な 10 代女性 12 名とした．

5 種類の試料布の熱抵抗や吸水特性が異なるため，試料布ごとに温度・含水分率を設定した（表 3.2.2）．乾燥 (D) 条件は冷覚が生じず「乾燥」と明確に判別される温度条件を，湿り (W) 条件は明確に「湿っている」と判別されるような含水分率を設定した．水分を含みにくい布でも均一に湿らせるため，水分の保持性能に優れたスポンジの上に試料布

表 3.2.1 試料布の概要

番号	試料布名	組成	厚さ (mm)	特徴	拡大写真
①	綿ローン	綿 100%	0.27	糸の間隙が大きい	
②	ポリエステル ポップリン	ポリエステル 100%	0.16	うねがある	
③	ポリエステル サテン	ポリエステル 100%	0.16	平滑	
④	綿ダブルガーゼ	綿 100%	0.93	糸の間隙が大きい	
				二重構造	
⑤	綿フランネル	綿 100%	0.99	起毛	

500 μm

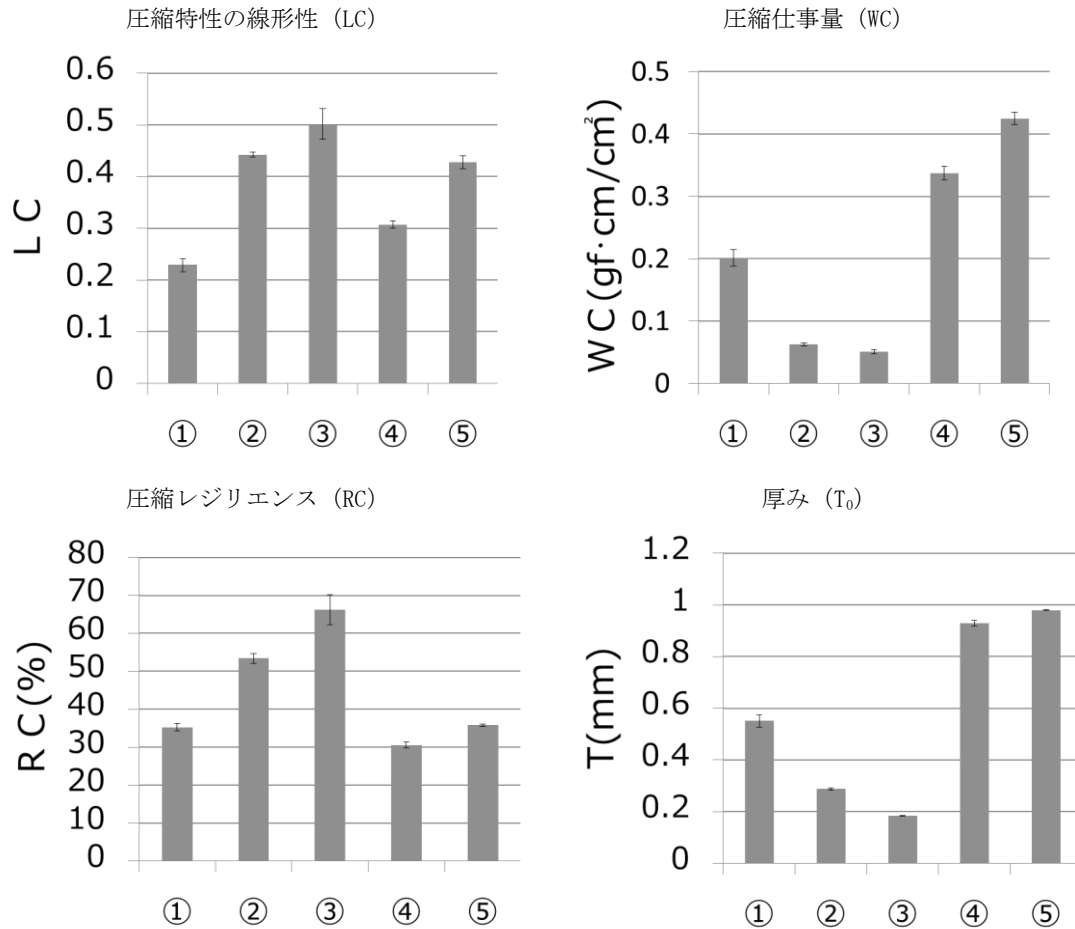


図 3.2.1 試料布 (5 種類) の圧縮特性 (各 5 回計測)

を置き、荷重を加えるという方法で湿らせた。含水分率はデジタルはかり (HT-120, 株式会社エー・アンド・デイ) を用いて、乾燥状態と計測後の布の重量を測定し、算出した。この湿り条件の温度は乾燥条件と同温に調整した。乾燥布の表面を冷却した冷-乾燥 (DC) 条件の温度は、湿り条件の試料布に触れたときの皮膚温度低下量が同程度になるようにそれぞれの試料布で設定した。皮膚温度を T (32°C)、試料布に触れて 8 秒経過した時点の皮膚温度 T_{8s} の差分を皮膚温度低下量 (ΔT) と定義する ((3.2.1) 式)。

$$\Delta T = T_0 - T_{8s} \quad (3.2.1)$$

湿り (W) 条件に触れたときの温度低下量を ΔT_{wet} とすると、冷-乾燥 (DC) 条件に触れたときの ΔT が ΔT_{wet} と同程度になるように、あらかじめ布に触れた際の皮膚温度変化を計測し、冷-乾燥条件の温度条件を設定した。皮膚温度計測手法は 2.3 節と同様である (図 2.3.1 (c))。各条件の布に触れた際の皮膚温度変化を図 3.2.2 に示す。縦軸は試料布に接触してからの皮膚温度の変化量 [$^{\circ}\text{C}$]、横軸は試料布と皮膚が接触した時間 [s] を示す。これを見ると、湿り (W) 条件と冷-乾燥 (DC) 条件において皮膚温度低下量が同程度になっていることが確認できる。この結果から、本実験で採用した評価刺激の含水分率や温度条件を表 3.2.2 に示す。

湿り感の評価には強制二択法を用いた。試料布に触れてから 8 秒経過した時に、触れた布が湿っているか、乾いているか、どちらかを回答させた。手を布から離す際や離れた

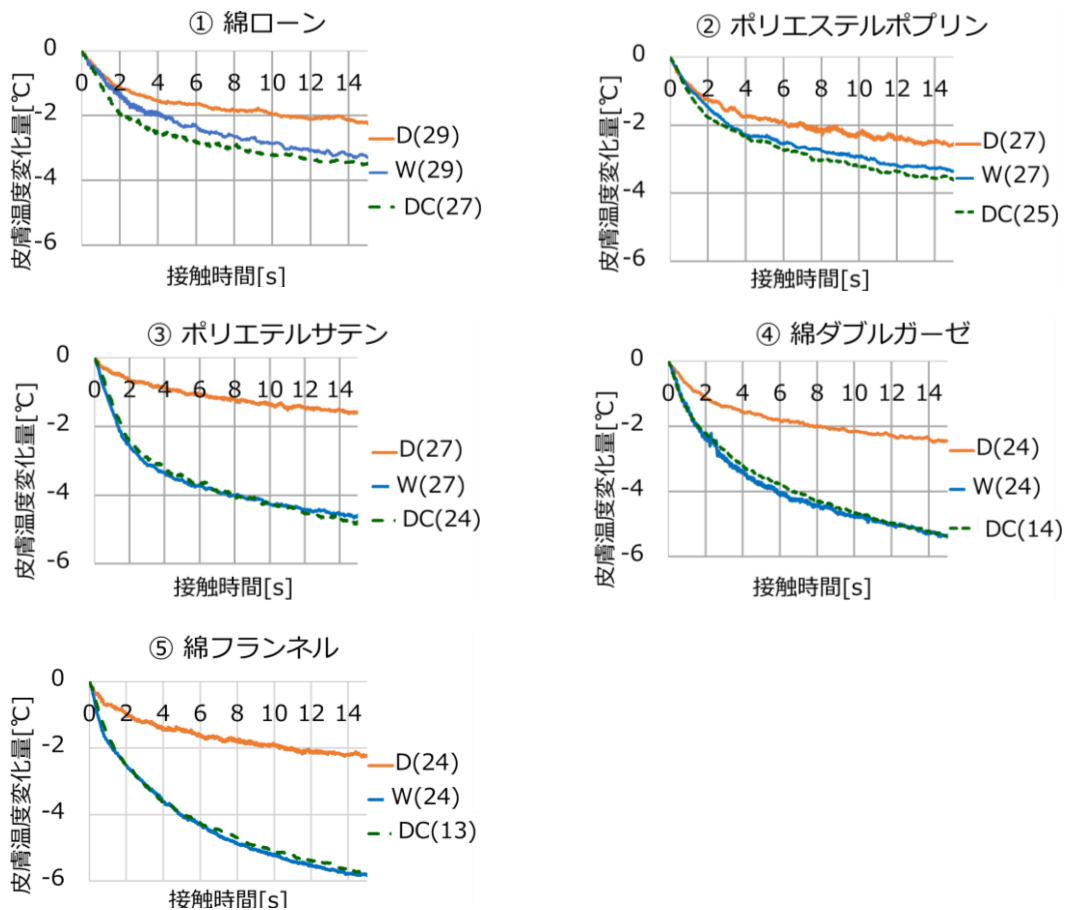


図 3.2.2 試料布に触れたときの皮膚温度低下量

5 種類の試料布につき 3 種の状態に触れたときの皮膚温度低下量を示す。グラフの縦軸は皮膚温度低下量 [°C]，横軸は接触時間[s]を表す。

後に生じる感覚で湿り感を判断することを避けるため、手を離す前に回答させた。試料布に右手で触れながら、参加者自身が左手でキーボードを押して回答した。1 人の実験参加者は各条件 3 回の評価を行った。3 回のうち「湿っている」と回答する回数をその条件に対する実験参加者の評価値として扱った。

実験手順は次のとおりである。はじめに実験参加者の皮膚温度を調整するため、32°C に設定したホットプレートの上に手掌を 60 秒間置いた。同時に、ペルチェ素子で布の表

表 3.2.2 試料布の温度と含水分率の設定

試料布 番号	D 条件		W 条件		DC 条件	
	ペルチェ 温度[°C]	含水分率 [%]	ペルチェ 温度[°C]	含水分率 [%]	ペルチェ 温度[°C]	含水分率 [%]
①	29	0	29	40~60	27	0
②	27	0	27	35~50	24	0
③	27	0	27	20~35	24	0
④	24	0	24	60~90	14	0
⑤	24	0	24	110~140	13	0

面温度を調整した。60秒間で試料布の表面温度を十分に調整できることは事前に確認した。布に触れ8秒が経過するとブザー音が鳴る。このブザー音の後に、実験参加者は布の湿り感を回答した。回答が終わると手掌を布から離し、皮膚についた水分を拭き取った。各試料布の評価を1セットとし、各セットでは異なる状態をランダムに提示した。評価する試料布の順番も参加者ごとにランダムとした。参加者の集中を維持するために、各セットが終わると5分の休憩を設け、各セットの始めには乾燥条件と湿り条件の試料布にそれぞれ触れ、湿り感の評価の参考にした。ただし実験中は触れる布が湿っているか乾燥しているかは知らせず、湿り感の評価させた。

3.2.2 実験結果

図3.2.3は、各実験参加者の評価値を、試料布の種類・条件ごとに平均した結果である。横軸の①から⑤の数字は試料布の種類を、その上のアルファベットは試料布の3種の状態(乾燥・湿り・冷・乾燥)を表し、縦軸は全実験参加者の評価値を平均した値、エラーバーは標準偏差を示す。ここで、試料布の種類と条件における2要因分散分析を行ったところ、試料布の種類の主効果、条件の主効果、試料布の種類と条件の交互作用の全てに有意水準1%で有意差が見られた(試料布の種類 $F(4, 44) = 7.02$, 条件 $F(2, 22) = 172$, 試料布の種類:条件 $F(8, 88) = 8.04$)。単純主効果を検討した結果、冷・乾燥条件における各試料布、全試料布における各条件において、有意水準1%で有意差が見られた。Holmの方法による多重比較を行った結果は図3.2.1上部に示す。冷・乾燥条件における①と⑤、②と⑤の試料布の組合せにおいて、有意水準1%で有意差が見られた。また①、②の試料布における乾燥・湿り条件かつ湿り・冷・乾燥条件の組合せ、③、④の試料布における乾燥・湿り・冷・乾燥条件の全ての組合せ、⑤の試料布は乾燥・湿り条件と乾燥・冷・乾燥条件において、有意水準1%で有意差が見られた。

湿り感の錯覚が生じる要因を検討するため、湿り感の評価結果と試料布の物理特性を

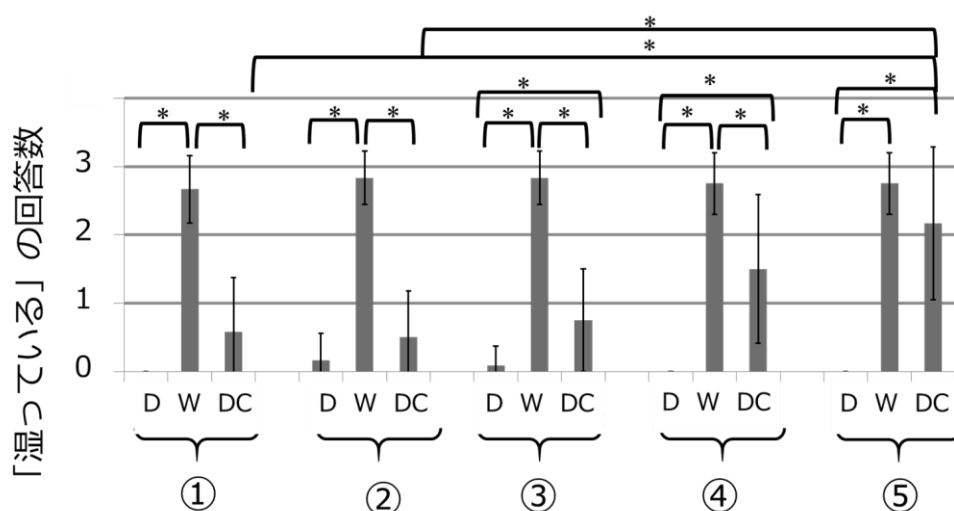


図 3.2.3 「湿っている」と回答された平均回数 *: $p < 0.01$

表 3.2.3 物理特性と湿り感評価値の相関（正規化済み）

	湿り回数	LC	WC	RC	T ₀	重量密度	織密度たて	織密度よこ	温度	含水分率
湿り回数	1.0									
LC	0.049	1.0								
WC	0.44	-0.40	1.0							
RC	-0.23	0.80	-0.84	1.0						
T ₀	0.41	-0.46	0.99	-0.88	1.0					
重量密度	0.46	0.28	0.73	-0.34	0.99	1.0				
織密度たて	-0.33	-0.54	-0.33	-0.16	-0.88	-0.56	1.0			
織密度よこ	-0.38	0.16	-0.83	0.70	0.68	-0.83	0.33	1.0		
温度	0.47	0.014	0.87	-0.55	-0.30	0.87	-0.68	-0.89	1.0	
含水分率	0.47	-0.13	0.93	-0.67	-0.87	0.90	-0.35	-0.87	0.87	1.0

用いて重回帰分析を行った。応答変数としては心理評価実験から得られた湿り感の評価値（図 3.2.3），説明変数には試料布の物理特性から布の重量密度・織密度（表 3.2.1），圧縮特性から圧縮特性の線形性（LC），圧縮仕事量（WC），圧縮レジリエンス（RC），厚み（T₀）（図 3.2.1），実験条件から W 条件における含水分率，D 条件と DC 条件の布の温度差（表 3.2.2）をそれぞれ正規化して，各物理特性間の相関係数を計算した（表 3.2.3）。ステップワイズ法による重回帰分析（backward stepwise multiple regression）を行い，決定係数（R² 値）が最も当てはまりの良いモデルを探索した。このとき，多重共線性を回避するため説明変数間に強い相関がないことを確認した。その結果，説明変数に「圧縮仕事量（WC）」と「圧縮特性の線形性（LC）」を用いた次に示す 3.2.1 式が最適と考えた（図 3.2.4）。

$$\text{湿り感} = 0.543 (\text{WC}) + 0.264 (\text{LC}) \quad (3.2.1)$$

自由度調整済みの決定係数 R² は 0.222 であった。

3.2.3 考察：錯覚を生じやすい布の特徴

本節（第 3 章 2 節）の実験より，湿り感錯覚の生起状況は布の種類によって異なっていることが明らかになった。本節では，明らかな湿り感の錯覚が生じる布を「冷・乾燥条件の評価が乾燥条件と有意差があり，湿り条件とは有意差がない」布と定義すると，湿り感を錯覚した布は⑤のみであった。一方で，湿り感錯覚が生じなかった，つまり「湿り条件と有意差があり，乾燥条件と有意差がない」布は①と②であった。この結果より，湿った布に触れたときに生じる皮膚温度の低下量と似た温度低下を生じるように乾燥布を冷却するという温度操作において，湿り感の錯覚が生じない布が存在することを確認した。

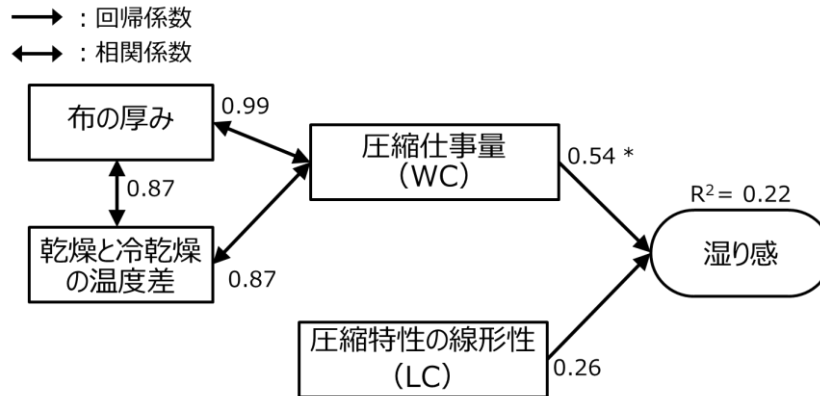


図 3.2.4 重回帰分析結果

片矢印の先にある数字は回帰係数，両矢印の先にある数字は相関係数，右側上部の数字は自由度調整済みの決定係数 R^2

湿り感錯覚が生じる布の特徴として，圧縮により変形しやすく，圧縮変形が線形なことが挙げられた．特に圧縮仕事量 (WC) のほうが圧縮特性の線形性 (LC) よりも回帰係数が大きいため布の圧縮のしやすさ，つまり柔らかさが湿り感の錯覚への影響が大きいと推測できる．さらに圧縮仕事量 (WC) は，「布の厚み (図 3.2.1)」や「D 条件と DC 条件の温度差 (表 3.2.2)」と高い相関関係にあることから，これら 2 つの要因も湿り感錯覚の生起に影響すると考えられる．

したがって，冷たさによる湿り感の錯覚現象は，柔らかくや厚みがあり，皮膚温度の低下量が多い布で生じることが明らかとなった．

3.3 考察：湿り感錯覚を生じる物性

本章（第3章）では冷たさによる湿り感錯覚が生起する物性を明らかにするため、様々な材質や布に触れたときの湿り感錯覚の生起状況を調査した。第3章1節と第3章2節の実験から、湿り感錯覚に影響する物体の特徴として、冷たさ・滑らかさ・柔らかさが挙げられた。

まず、物体の熱伝導特性が関連する冷たさが湿り感錯覚に影響することは、前章（第2章）や Filingeri らの研究結果（Filingeri, 2014c）でも示されている。手掌の静的な触動作は対象の温度知覚に有効な触り方（Lederman and Klatzky, 1998）として知られるため、静的接触で湿り感を評価した第3章1節と第3章2節の実験において、冷たさが湿り感錯覚に影響したと考えられる。また、滑らかさや柔らかさが湿り感錯覚に影響する要因となった背景として、第3章1節で考察したように、皮膚との密着があると考えられる。滑らかさと同様、柔らかさも物体表面との接触面積を増加させる原因となるため粘着と強い関連性がある（Okamoto et al., 2018）。特に静的接触では皮膚と物体表面が密着している状態を作り出しやすく、物体の滑らかさや柔らかさによる皮膚との密着がもともなる粘着感を手がかりとして、湿り感を知覚すると考えられる。このように、乾燥した素材の滑らかさが湿り感の知覚に影響することは先行研究においても報告されている。たとえば、建築素材（無塗装の木材・タイル・ガラスなど）における研究によると、表面粗さが大きい素材は“乾燥”，表面が滑らかである素材は“湿り”と感じられると結論づけられている（岡島，武田，1983）。

本章では手掌の静的接触で湿りの知覚と評価刺激の物性との関連性について検証したが、動的な触動作（active touch）によって調査した先行研究では、物体の摩擦特性が重要な役割を果たすことが知られている（Filingeri and Ackerley, 2017; Chen et al., 2009a; Chen et al., 2009b; Kikegawa et al., 2019; Bergmann Tiest, 2012a）。Chen らは、布を実験参加者に自由に触らせたとき、摩擦が強い布は乾燥知覚を低下させることを明らかにした（Chen et al., 2009a）。さらに、弾性コンプライアンスが低く、摩擦が小さく、粗い表面は乾燥していると評価される傾向を示した（Chen et al., 2009b）。粉体、革、金属、シリコン樹脂、布などを用いた研究でも、表面が滑らかなほどより“しっとり”と感じられることを明らかにしており、指が素材表面を動き始めるときの摩擦抵抗を基に湿り感を知覚されると結論づけられている（Kikegawa et al., 2019）。また、動的な触動作の方が静的な触動作のときよりも水分の弁別閾値が小さいことから、動的接触によって機械刺激（摩擦や粗さ、粘着など）の手がかりが増えることが湿り知覚につながると考えられている（Bergmann Tiest, 2012a）。そのため、湿り感錯覚が生起する条件を理解するためには、触動作の効果も考慮する必要がある。

本章より、冷たさは第3章1節と第3章2節において共通して湿り感錯覚に影響すると結論づけられた。ただし、第3章1節では滑らかさ、第3章2節では柔らかさが湿り感錯覚の要因として挙げられた。まず、第3章1節の実験で柔らかさが湿り感錯覚の要

因として湿り感錯覚説明モデルに採用されなかった理由として、第3章1節の実験試料では硬い試料が多く、柔らかさのバリエーションが乏しかったことが考えられる。たとえば、物体の弾性と吸水性能は関連があるように思われる。弾性抵抗が大きく硬い材質（例：アルミやアクリル）は表面構造が密であるため組織内部に水を吸収せず、表面に水が残存することが多い。濡れた硬い材質に触れたとき、材質と皮膚間に水が介在するという経験から、硬い材質が冷たく滑らかであると濡れているように錯覚するのではないかと推測される。一方、弾性抵抗が小さく柔らかい素材（例：布）は表面特性や布構造が粗で、刺激の内部に空隙が多いことが多く、組織内に水分を含むことができる。こういった柔らかかな素材は内部に保持できる水分量が多いため、経験的に素材の柔らかさを湿り感の指標として解釈している可能性が考えられる。次に、第3章2節の実験では表面粗さを計測していなかったが、布の滑らかさも影響する可能性がある。そのため、実験試料が十分な柔らかさや滑らかさのバリエーションを有していないときには、これらの情報を用いて湿り感を区別することは難しいことが示唆される。

3.4 まとめ

第3章1節と第3章2節の実験では、様々な材質の物体を対象として冷覚による湿り感錯覚の生起を評価した結果、この湿り感錯覚は第2章で実証した布（ポリエステルスモース編）に特化した現象ではないこと、冷たさ・滑らかさ・柔らかさが大きい表面を有する素材ほど強い湿り感錯覚を生起させることが明らかになった。ただし、実験試料の物性値のバリエーションによっては、これらの情報以外を用いて湿り感を判断する可能性がある。

第4章 湿り感錯覚を生じる柔らかさ特性

前章（第3章，特に第3章2節）において，布の湿り感の錯覚現象の生起に関わる要因として「柔らかさ」が挙げられた．本章では，柔らかさが増すと湿り感錯覚が生じやすくなる効果があるのか（4章1節），柔らかさが錯覚を生じやすくする効果があるとするれば複数ある柔らかさを表す物理量のうちどの物理量が関連するのか（4章2節）を検証する．

4.1 実験1：布の柔らかさと温度の効果

湿り感錯覚における「柔らかさ」の影響を調べるために，布の柔らかさを段階的に変えながら湿り感を評価した．また，布の温度も段階的に変え，「柔らかさ」と「皮膚温度の低下量」の影響を比較した．

4.1.1 実験手法

試料布は3.2節の実験において錯覚が生じなかった布から綿ローンを扱った（表3.2.1，試料布番号①）．第2章3節において，湿り感の錯覚に関連する要因の一つとして「圧縮仕事量（WC）」と「圧縮特性の線形性（LC）」を挙げられた．これらが湿り感の錯覚に及ぼすのか否かを調べるために，湿り錯覚が生じないような薄く弾性が小さい布を用いて，圧縮特性を段階的に変える．ここでは，試料布を1枚ずつ重ね，厚みを増すという操作を行った．布を最大4枚まで重ね，柔らかさ条件として4条件を設定した．布枚数が増えるほど圧縮特性が変化するかを確認するために，圧縮試験機（カトーテック製 KES-FB3）を用い，計測を行った（図4.1.1）．計測結果を見ると，布枚数が増えるほど，圧縮特性の線形性（LC）はあまり変化せず，圧縮仕事量（WC）と厚みは段階的に増加し，圧縮レジリエンス（RC）は減少していることがわかる．WCが増加しRCが減少したということは，同じ押し込み量で布に触れるとき手に加わる反力が弱くなり，圧縮回復しにくくなっていることを意味する．このことから，試料布を重ねる操作によって，布の柔らかさが増すと考える．

前章（3章）において，湿り感の錯覚に関連するもう一つの要因として「皮膚温度の低下量」を挙げた．この影響も調べるために，皮膚温度低下量が段階的に変化するよう，布の温度を制御することとした．布の温度制御には，第2章3節，第3章2節の実験と同様ペルチェ素子（図2.3.1）を用いた．ペルチェ素子の温度設定は，はっきりと「乾燥し

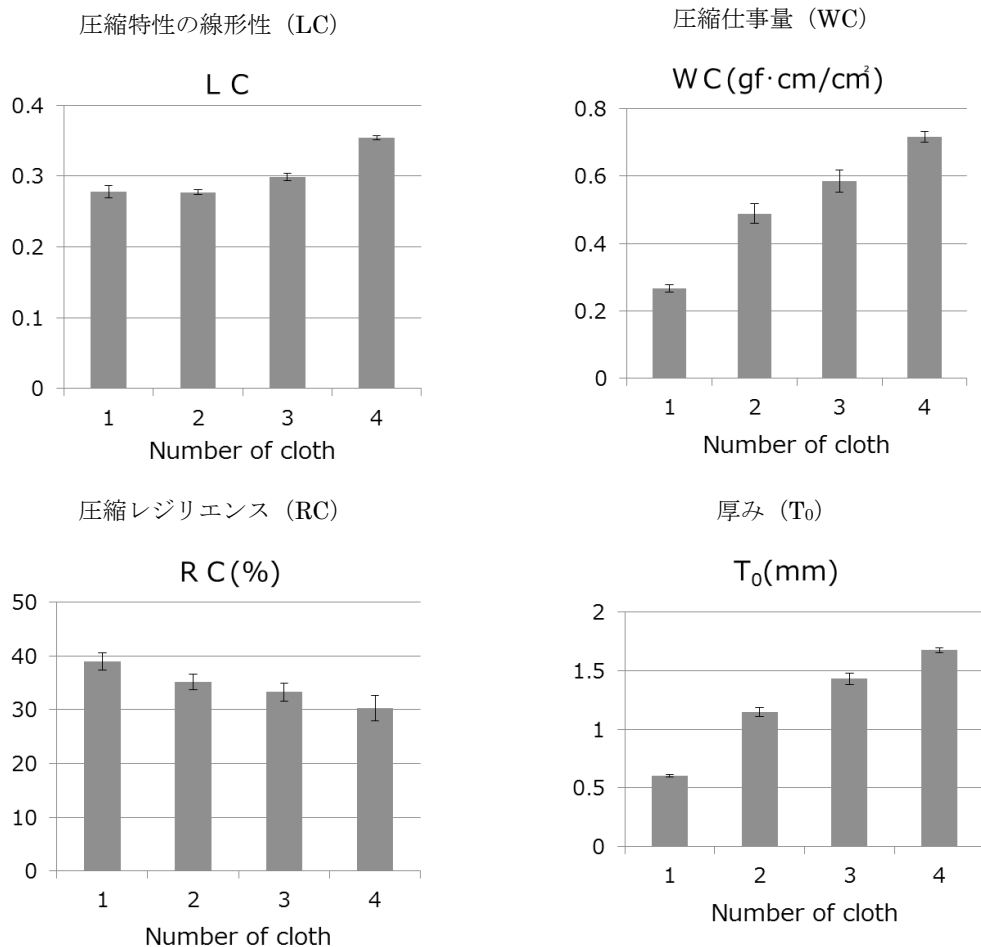


図 4.1.1 柔らかさ条件を変えたときの圧縮特性 (各 5 回計測)

ている」と判別できる常温 (29°C) の乾燥 (D, 含水分率 0%) 条件と、湿り (W, 含水分率 45~60%) 条件を設定した。この湿り (W) 条件に触れた場合の皮膚温度低下量を基準に、冷-乾燥 (DC) 条件を 4 条件設定した。具体的には、各条件の試料布に触れて 8 秒経過した時点の皮膚温度低下量を ΔT , W 条件に触れたときの温度低下量を ΔT_{wet} とすると、

$$\Delta T = \Delta T_{\text{wet}} + \Delta T_{\text{cold}} \quad (\Delta T_{\text{cold}} = 0, 1, 2, 3) \quad (4.1.1)$$

となる 4 条件を設定した。この制御を行うペルチェ素子の設定温度を表 4.1.1 に示す。つまり、実験条件は冷-乾燥 (DC) 条件として、布の柔らかさ (4 条件) と温度 (4 条件) をそれぞれ変えた 16 条件を設定した (表 4.1.1)。冷-乾燥 (DC) 条件との比較のために、常温の乾燥 (D) 条件と湿り (W) 条件も追加し、合計 18 条件 (表 4.1.1) を設定した。

皮膚温度と布温度の調整方法、布の触り方は第 2 章、第 3 章 2 節と同様である。右手は評価対象の刺激に触れ、左手は標準刺激 (乾燥 (D) 条件) の試料布に同時に触れた。各参加者が同じような押し付け圧で触れるように事前に教示・練習を行った。刺激を提示する順番はランダムとした。試料布に触れた後、手掌を離し、皮膚に残った水分が次の評価に影響しないよう、毎回ふき取った。その後、実験参加者は左手の標準刺激を参考にしながら、右手で触れた試料布の触り心地を回答用紙に記入した。触り心地の評価には 7 段

表 4.1.1 試料布の温度と含水分率の設定

		ペルチェ 温度[°C]	含水分率 [%]
D 条件		29	0
W 条件		29	45~60

DC 条件							
		ペルチェ 温度[°C]	ΔT_{cold}				含水分率 [%]
			0	1	2	3	
布の 枚数	1	27	25	23	19	0	
	2	23	20	17	12	0	
	3	19	16	13	7	0	
	4	16	12	6	2	0	

階の SD 法を用いた (図 4.1.2). 形容詞対は湿り感を含む触覚の 5 つの基本因子 (湿り感・冷感・柔らかさ感・厚さ感・粗さ感) (永野ら, 2011) に関する 5 種類とした. 参加者の集中を維持するために, 5 回の評価ごとに 5 分の休憩を設け, 18 条件全てについて評価を行った.

実験時の室温は 23.0 ± 3.8 , 環境湿度は $41.8 \pm 11\%RH$ であった. 実験参加者は健常な女性 21 名 (18~24 歳) で, 視覚の影響を除くためアイマスクを着用した.

4.1.2 実験結果

全実験参加者の評価を条件ごと平均した結果を表 4.1.3 に示す. エラーバーは全参加者の標準偏差を表す. 冷-乾燥 (DC) 条件の湿り感 (図 4.1.3 (a)) は, 温度・柔らかさのどちらの条件が増加しても, 強まっていた. つまり, 皮膚温度低下量が増加しても, あるいは布の枚数が増え柔らかさが増加しても, 湿り感を錯覚しやすくなることがわかった. 冷感の評価 (図 4.1.3 (b)) については, 温度条件にのみ依存し, 皮膚温度が低下するほど冷感が増すことがわかった. 他の 3 つの形容詞対 (柔らかさ感・粗さ感・厚さ感) については条件による差は大きくなかった.

この評価値を乾燥 (D) あるいは湿り (W) 条件と比べるため, 各形容詞対において 1 要因分散分析を行った. その結果, 湿り感, 冷感, 厚さ感, 粗さ感に有意差が見られた (湿り感: $F(17, 340) = 8.57, p < 0.05$, 冷感: $F(17, 340) = 21.4, p < 0.05$, 柔らかさ感: $F(17, 340) = 1.21, p = 0.254$, 厚さ感: $F(17, 340) = 2.02, p < 0.05$, 粗さ感: $F(17, 340) = 2.73, p < 0.05$). さらに, 有意差が見られた項目は Holm の方法による多重比較を行った. そ

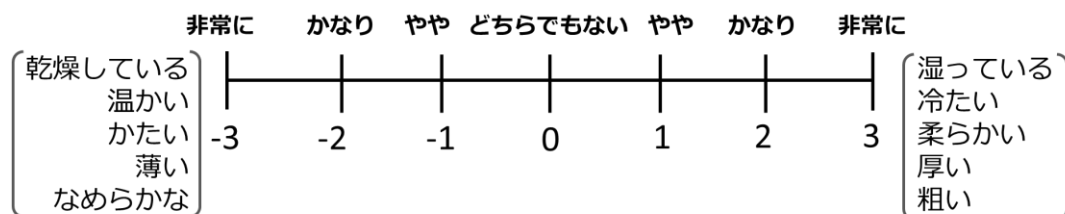


図 4.1.2 評価項目と尺度

の結果を形容詞ごとに示す（図 4.1.3）. 線の左上に示すアスタリスク（*）は D 条件との有意差, 右下のアスタリスクは W 条件との有意差を示す（共に有意水準 5%）.

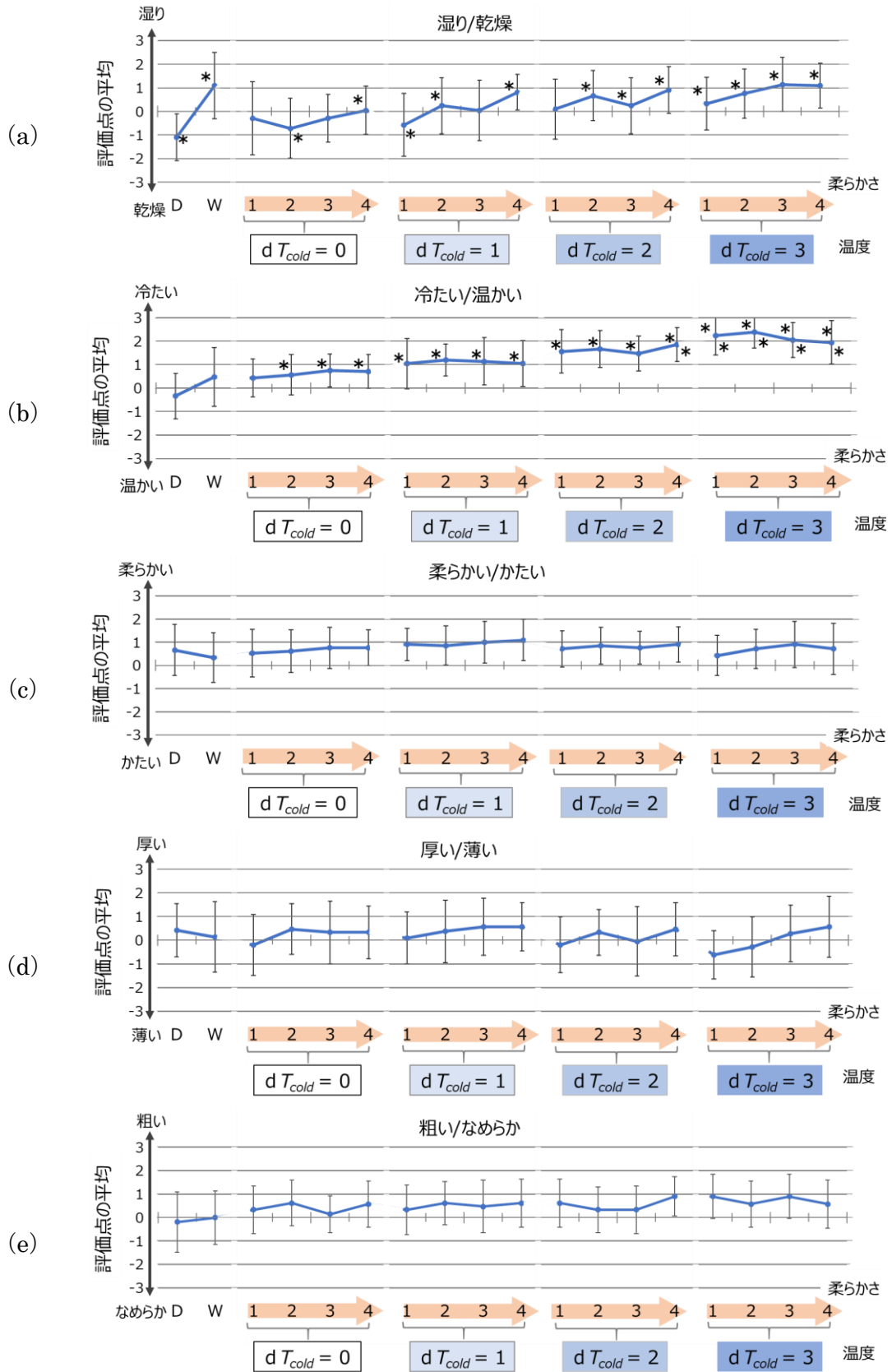


図 4.1.3 評価結果*: $p < 0.05$

グラフ線上：乾燥 (D) 条件との有意差，グラフ線下：湿り (W) 条件との有意差
 横軸は各条件を表し，横軸の 1 から 4 の数字は柔らかさ条件， dT_{cold} は冷たさ条件を示す。

4.1.3 考察：布の柔らかさと温度の効果

第3章2節と同様、乾燥条件と有意差があり、湿り条件とは有意差がない条件（左上にのみアスタリスク）に対して、湿り感が明確に生じたと考える。以下、評価項目ごとに結果を考察する。

【湿り感】

湿り感の結果（図 4.1.3 (a)）より、布が柔らかくなる、あるいは布に触れた際の皮膚温度低下量が大きくなる時、より多くの条件で湿り感が生じた。柔らかさについては、布 1 枚の場合、 $\Delta T_{\text{cold}} = 3$ のときのみ湿り感が生じた。しかし、布を 4 枚に増やすと $\Delta T_{\text{cold}} = 3$ に限らず、すべての温度条件において湿り感が生じた。ゆえに、布を重ねることで柔らかさを増す操作は湿り感の錯覚を生じさせるために有効であったといえる。また、皮膚温度の低下量についても、布 1 枚の場合 ΔT が ΔT_{wet} と同等になる条件である $\Delta T_{\text{cold}} = 0$ の条件において湿り感は知覚されていないが、 $\Delta T_{\text{cold}} = 3$ のときでは布の枚数によらず湿り感が生じた。

ここで、湿り感錯覚における布の柔らかさと冷たさの効果の評価するために重回帰分析を行った。応答変数は湿り感の平均値（図 4.1.3 (a)）、説明変数は ΔT と圧縮仕事量 (WC)（図 4.1.2）とした。その結果、次の (4.1.1) 式を得た。

$$\text{Wetness} = 0.758(\Delta T) + 0.506 (\text{WC}) \quad (4.1.1)$$

このとき自由度調整済みの決定係数 R^2 は 0.804 となった。したがって、乾燥した布を実際に湿った布に触れたときの皮膚温度低下量 ΔT_{wet} と同等にするという温度操作では湿り感を錯覚しないような素材でも柔らかさを増す、あるいは冷たさを強めることによって、湿り感を知覚しやすくなるということがいえる。

【冷感】

冷感の結果（図 4.1.3 (b)）については温度条件に比例していた。 $\Delta T_{\text{cold}} = 0, 1$ の場合、多くの条件において乾燥条件よりも有意に強い冷感と評価された。さらに冷却した条件である $\Delta T_{\text{cold}} = 2, 3$ になると、8 条件中 5 つの条件において湿り条件よりも冷たいと評価された。布枚数が冷感に影響しているようにも思えるため、冷感についても同様に、 ΔT と WC による重回帰分析を行うと、次の (4.1.2) 式を得た。

$$\text{Coldness} = 0.928(\Delta T) + 0.0353 (\text{WC}) \quad (4.1.2)$$

このとき自由度調整済みの決定係数 R^2 は 0.945 となった。つまり、布の柔らかさは冷感へはほとんど影響しないことを意味している。

【柔らかさ感・厚さ感・粗さ】

柔らかさ感と厚さ感、粗さ感の結果（図 4.1.3 (c) (d) (e)）については、多重比較を行ったが乾燥条件および湿り条件における有意差がある冷たい乾燥条件は見られなかった。しかしながら、物理量としては図 4.1.1 のように変化している。ゆえに、試料布の枚

数を増やすという操作は柔らかさや厚さの物理的な変化をもたらすが、弁別閾値よりも小さい変化であることがうかがえる。

以上のように、布の「柔らかさ」と「冷たさ」が増すと湿り感を錯覚しやすいことが明らかとなった。特に布の柔らかさが増すと、布の冷却が少ない条件でも湿り感の錯覚を生起することが示唆された。ただし、今回の柔らかさの操作は錯覚を生じやすくする効果があったが、柔らかさの中でも具体的に何の物理量が湿り感錯覚に影響したのかを明らかにする必要がある。

4.2 実験 2：縦方向の弾性成分と接触面積の効果

前節（第 4 章 1 節）において、布の柔らかさも皮膚温度の低下量も湿り感の錯覚の生起に影響することが明らかとなった。しかし、柔らかさに関わる何の物理量が湿り感の錯覚に関与したのかが明らかではない。そこで本節は、柔らかさの知覚に関連する物理量のうち接触面積と縦方向の弾性成分（押し込み量と反力の関係）のどちらが湿り感に影響するのかを検証する。

4.2.1 柔らかさの知覚

物体の硬さ／柔らかさの知覚には、触覚として主に二つの情報が関与すると考えられている（佐々木，藤田，2000; Bicchi et al., 2000; Scilingo, 2010）。一つは皮膚と物体との接触面積の変化，もう一つは手掌の位置の変化つまり物体に対する皮膚の押し込み量と反力の関係である。

皮膚よりも柔らかい物体に触れるとき、皮膚が埋没することにより接触面積が増大する。この接触面積の増大を皮膚の圧受容器で検出することで、柔らかさを知覚する。物体と皮膚の接触面積は、球体と球体が接触したときの接触面積を物体の曲率から求める理論である Hertz の接触理論（Hertz, 1895）を適用し、(4.2.1) 式のように物体と皮膚のヤング率 (E)，ポアソン比 (ν)，曲率半径 (R)，押下力 (P) を代入し、接触円の半径 (a) を算出することにより求まる（高山ら，2008）。

$$\alpha = \left[\frac{3}{4} p \left(\frac{1-\nu_A^2}{E_A} + \frac{1-\nu_B^2}{E_B} \right) / \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.2.1)$$

α ：接触面積の半径 (mm)

p ：押下圧 (N)

R_A ：物体 A の曲率半径 (mm)

R_B ：物体 B の曲率半径 (mm)

E_A ：物体 A のヤング率 (N/mm²)

E_B ：物体 B のヤング率 (N/mm²)

ν_A ：物体 A のポアソン比

ν_B ：物体 B のポアソン比

また、物体に触れるときは、筋の収縮と皮膚の圧受容器から反力を感じる。同じ押し込み量で触れた場合、柔らかい物体のときの反力は硬い物体よりも小さい。また、同じ押し込み力で触れたとき、柔らかい物体のほうが押し込み量は増大する。これら押し込み量と反力の関係から柔らかさを知覚する。以下では、こうした押し込み量と反力の関係を「縦方

向の弾性成分」と呼ぶ。縦方向の弾性成分については、フックの法則により求められ、押し込み量 Δx に比例した反力 F が皮膚に生じる（(4.2.2)式）。

$$F = k\Delta x \quad (4.2.2)$$

ばね定数 k は物体形状とヤング率に応じて決定される。

以上のように、柔らかさに関連する物理量としては物体の弾性抵抗による「接触面積」と「縦方向の弾性成分」が挙げられる。これら二つによる湿り感の錯覚への影響を検証する。そのためには、一つを固定し、もう一つを変動させることで検証する方法が理想だが、布を用いて接触面積のみを変化させることは困難である。そこで本論文では、「接触面積」と「縦方向の弾性成分」を同時に変える湿り感の評価実験（実験1）を行い、続いて「縦方向のみの弾性成分」のみを変え湿り感の評価実験（実験2）を行う。これらの実験を比較することで、どちらの物理量が湿り感を錯覚する温度帯に大きい影響を及ぼすのかを検討する。

4.2.2 柔らかさに関連する物理量の操作手法

布に触れた際の弾性抵抗を変化させるために、シリコンゴム（SKIN-GEL CLEAR, 株式会社テック技販）を用いた。弾性抵抗は3条件を用意し、最も硬いシリコンゴムⅠ（PC樹脂, 硬度35）、シリコンゴムⅡ（PC樹脂, 硬度25）、最も柔らかいシリコンゴムⅢ（PC樹脂, 硬度0）とした。なお、手掌の母指球付近の皮膚の硬度は20~30である（富樫ら, 2003）。つまり、シリコンゴムⅠは皮膚よりも硬く、Ⅱは同程度、Ⅲは皮膚よりも柔らかいといえる。

実験1では布に触れた際の接触面積と縦方向の弾性成分を同時に変えるために、シリコンゴムを布の直下に配置した（図4.2.1(a)）。

実験2では接触面積は固定し、布に触れた際の縦方向の弾性成分のみを変化させるために、手掌の押し込み力に応じてペルチェ素子を上下に移動させることとした。ペルチェ素子の直下には、放熱のためのファンが必要となるため、このファンの下に実験1と同じシリコンゴムを配置し（図4.2.2(a)）、接触面積を変えずに触れた際の押し込み量に応じた反力を変化させた。

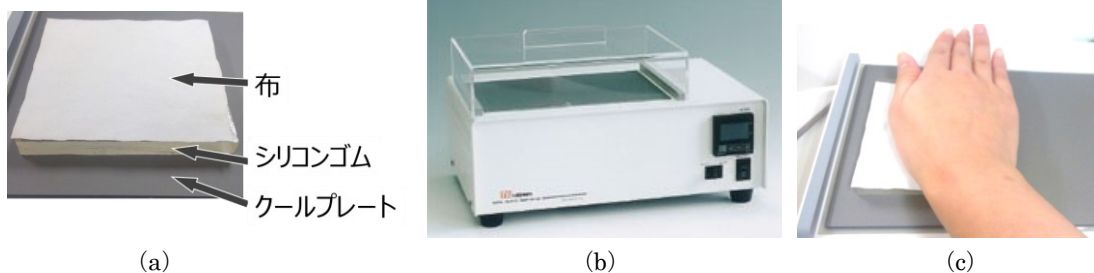


図 4.2.1 実験1：実験セットアップ

(a) 接触面積と縦方向の弾性成分の操作 (b) 実験環境 (c) 触ったときの様子

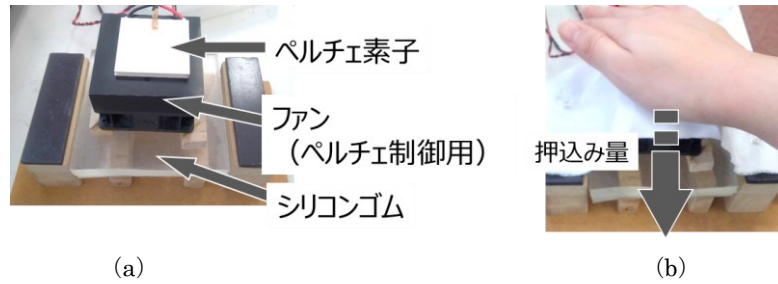


図 4.2.2 実験 2：実験セットアップ

(a) 実験環境, (b) 触ったときの様子

4.2.3 布の温度の操作手法

実験 1 では接触面積を変えるために、ペルチェ素子を用いたこれまでと同様の温度の操作手法（第 2 章 2 節，第 3 章 2 節，第 4 章 1 節）を適用することが難しい。そのため、これまでとは異なる手法で布の温度を操作することとした。シリコンゴムと布表面を冷却するためにクールプレート（クールプレート，株式会社日進理化 NCP-2215，図 4.2.1 (b)）を用いた。各表面が触れるよう 60 秒間クールプレート上に置き，その後，冷却した面を上向きにしてシリコンゴムの上に布をのせた。実験 2 では，ペルチェ素子（図 4.2.1 (a)）を布の温度制御に用いた。

このように実験 1 と実験 2 は布の温度調整手法が異なるが，温度条件を可能な限り揃えるために，これまで（第 2 章 2 節，第 3 章 2 節，第 4 章 1 節）と同様の方法が適用できる実験 2 の温度条件をまず設定した。そして，実験 2 において生じる皮膚温度変化量と同程度になるよう，実験 1 の温度条件を設定した。

4.2.4 実験手法

試料布は第 2 章の実験で用いたポリエステルスムーズを扱った（表 2.2.1）。大きさはシリコンゴムを覆うために十分な 15cm 四方とした。実験 1 は，室温 $21.9 \pm 1.9^\circ\text{C}$ ，環境湿度 $37.5 \pm 6.5\% \text{RH}$ ，実験 2 は，室温 $25.9^\circ\text{C} \pm 2.1^\circ\text{C}$ ，湿度 $46 \pm 10\% \text{RH}$ の条件で行った。実験参加者は実験 1 と 2 で同じ健常な女性 3 名（18～20 歳）であり，視覚の影響を除くためアイマスクを着用した。

今回の実験の目的は，湿り感の錯覚が生じる温度の弁別閾値を実験 1 と実験 2 で比較することであるため，湿り感の評価手法には恒常法を用いた。恒常法とは，刺激セットをランダムな順で提示し，強制二択法で刺激の有無や強弱を回答させる評価を複数回反復させる。この回答割合により，心理測定関数と呼ばれる S 字形のフィッティングカーブを求め，弁別閾値の推定を行う心理物理実験の手法である。この結果より，湿り感を生じる弁別閾となる温度を求める。明確に「乾燥」と知覚されるような皮膚温度変化量を上限とし，高確率で「湿り」と錯覚する皮膚温度変化量を下限として，冷・乾燥（DC）刺激の温度 5 条件を設定した（表 4.2.1）。

実験条件は，弾性抵抗による柔らかさ（3 条件）を実験 1，2 の手法で操作しながら，冷・乾燥（DC）条件の温度 5 条件と実際に水分を含んだ湿り（W）条件（含水分率 65～

表 4.2.1 実験 1 と 2 における実験条件

W 条件				DC 条件				
含水分率[%]	皮膚温度低下量： ΔT [°C]	実験 1 プレート温度[°C]	実験 2 ペルチェ温度[°C]	番号	含水分率[%]	皮膚温度低下量： ΔT [°C]	実験 1 プレート温度[°C]	実験 2 ペルチェ温度[°C]
65~85	2.5~2.8	20	30	(1)	0	1.7	20	30
				(2)		2~2.1	18	27.5
				(3)		2.5~2.8	14	25
				(4)		3	10	22.5
				(5)		3.1~3.2	8	20

85%) をそれぞれ 20 回の反復評価を行い、各実験につき合計 360 回の評価を行った（シリコンゴム 3 種類×刺激 6 種類×反復 20 回=360 評価）。提示する順番はランダムとした。実験参加者は、「触れた布が湿っているか」という問いに Yes か No で回答した。最小二乗法を用いて正規累積分布関数を計測データに当てはめることで、50%の確率で Yes と回答した温度つまり 50%の弁別閾値を算出する。

温度条件については、実験 2 における温度条件をまず設定した。上限の温度と下限の温度を設定した後、ペルチェ素子の温度が等間隔となる 5 条件とした（表 4.2.1）。このときの皮膚温度を手掌に添付したサーミスタ（第 2 章 2 節と同様）を用いて計測した。図 4.2.3 は各条件 4 回の計測値を平均した皮膚温度の変化を示す。実験 1 と実験 2 では布の温度操作手法が異なるため、温度変化は完全には一致しないが、8 秒時点の皮膚温度変化量が同程度になるよう、実験 1 におけるクールプレートの温度を設定した（表 4.2.1）。

実験手順は次のとおりである。まず、皮膚と布の温度調整を行った。皮膚温度の調整方法は第 2 章 3 節と同様である。布の温度調整について、実験 1 ではクールプレートの上

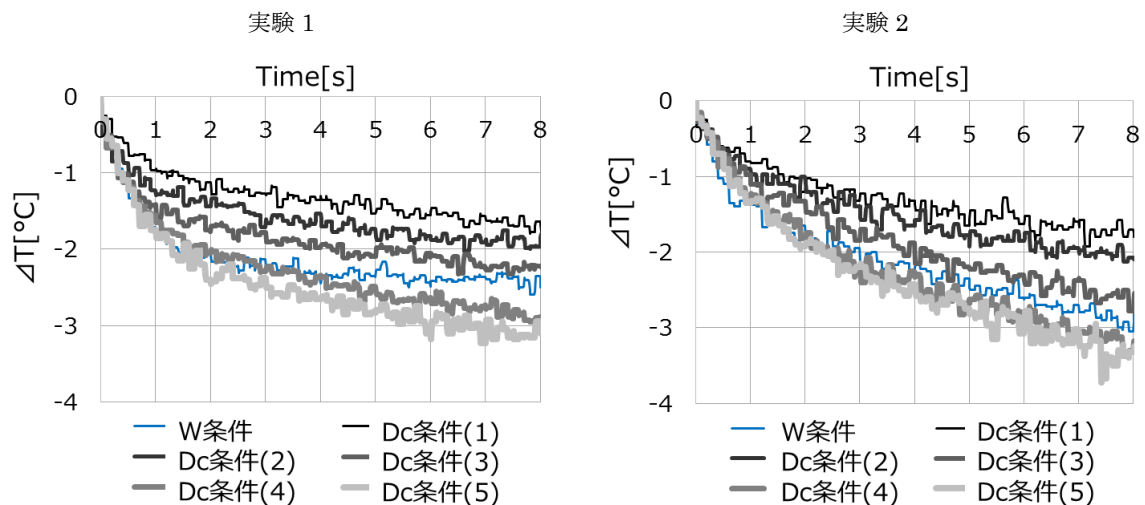


図 4.2.3 実験 1 と 2 の皮膚温度の変化

にシリコンゴムと布を 60 秒間置くことで各表面温度を調整した後、シリコンゴムの冷却面の上に布を重ね（図 4.2.1 (a) ）、手掌で触れさせた（図 4.2.1 (c) ）。実験 2 ではペルチェ素子を用い、2.2 節と同じ手法で布の温度調整を行った。今回の実験では、実験参加者が実験室に入室した直後や休憩後は 2 分間、各評価間は 30 秒間、布をペルチェ素子の上に置くことで表面温度を調整した。これと同時に実験参加者はホットプレート（NHP- M30N, 株式会社 日進理化, 図 2.3.1 (a) ）に触れ、皮膚温度を調整した。事前に、布の表面温度と実験参加者の皮膚温度がこの時間で設定温度に調整可能であることを確認した。触り方は手掌で軽く押さえる静的な触動作で 8 秒間触れさせた（図 4.2.2 (b) ）。各参加者が同じような押し付け圧で触れるように事前に教示・練習を行った。右手は評価対象の刺激に触れ、左手は標準刺激（ ΔT : 約 1.5°C ）の試料布に触れながら、8 秒時点で「湿っていると感じるか」を尋ねた。実験参加者が口頭で回答した後、手掌を離し、皮膚に残った水分が次の評価に影響しないよう、毎回ふき取った。実験参加者の集中を維持するために、18 回の評価ごとに 3 分の休憩を設けた。休憩後は 2 分ほど皮膚温度の調整を行った。各条件 20 回の評価を得た。

4.2.5 実験結果

実験 1 と実験 2 における各実験参加者の回答割合に最小二乗法を用いて正規累積分布関数を当てはめることで、湿りを錯覚する 50%の温度閾値を算出した結果を表 4.2.2 に示す。横軸は皮膚温度低下量（ $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$ ）で、縦軸は湿っていると回答した割合を示す。各参加者による評価結果と、最小二乗法によるフィッティングカーブを示す。黒色はシリコンゴム I、水色はシリコンゴム II、灰色はシリコンゴム III の評価結果を示す。50%弁別閾値は各シリコンゴムの評価と同じ色の縦線で示しており、値は各グラフの下の行内に示す。

「縦方向の弾性成分」と「接触面積」を変えながら、湿り感の温度閾値を評価した実験 1 の結果（表 4.2.2・左側）を述べる。実験参加者 A は今回の温度条件ではシリコンゴム III しか湿り感錯覚を生じる温度閾値が検出されず、皮膚温度の低下量が増しても湿り感を錯覚しにくい結果となった。実験参加者 B と C のフィッティングカーブは S 字形になっており、3 種のシリコンゴムにおける温度閾値が検出され、皮膚温度の低下量に伴い湿り感を錯覚していた。実験参加者 B の温度閾値はシリコンゴム I > II > III の順となった。実験参加者 C の温度閾値はシリコンゴム I > III > II の順となった。すなわち、実験参加者 B はシリコンゴムの弾性抵抗が小さくなるほど湿り感を知覚する温度閾値が小さな値となった。実験参加者 C はシリコンゴムの弾性抵抗の大小関係に準じてはいないが、皮膚よりも硬い場合（シリコンゴム I）と比べ、皮膚以上に柔らかい場合（シリコンゴム II・III）は湿り感を錯覚する温度閾値が小さな値となった。なお、湿り条件に対する「湿っている」の回答割合は実験参加者 A においてシリコンゴム I : 0.90, シリコンゴム II : 0.85, シリコンゴム III : 1, 実験参加者 B・C は全てのシリコンゴムについて 1 であるため、実際に湿った布は明確に識別できていた。

「縦方向の弾性成分」のみを変えながら湿り感の温度閾値を評価した実験 2 の結果（表

表 4.2.2 実験 1 と実験 2 におけるフィッティングカーブと 50% 弁別閾値

実験参加者	シリコンゴム I 評価値 ● フィッティングカーブ ■ シリコンゴム II 評価値 ● フィッティングカーブ ■ シリコンゴム III 評価値 ● フィッティングカーブ ■	
	50% 閾値	
	実験 1	実験 2
実験参加者 A	<p>I : - II : - III : 3.38</p>	<p>I : 2.74 II : 2.77 III : 2.62</p>
実験参加者 B	<p>I : 2.90 II : 2.74 III : 2.60</p>	<p>I : 2.70 II : 2.62 III : 2.70</p>
実験参加者 C	<p>I : 2.50 II : 2.24 III : 2.34</p>	<p>I : 2.24 II : 2.48 III : 2.29</p>

4.2.2・右側)は、実験参加者3人とも湿り感錯覚を生じる温度閾値が3種のシリコンゴムについて検出された。実験参加者AはシリコンゴムⅡ>Ⅰ>Ⅲ、実験参加者BはシリコンゴムⅠ≒Ⅲ>Ⅱ、実験参加者CはシリコンゴムⅡ>Ⅲ>Ⅰの順となった。ただし、湿り感を知覚する温度閾値は、実験参加者3人とも弾性抵抗に準じる変化は見られない。なお、湿り条件に対する「湿っている」の回答割合は実験参加者AにおいてシリコンゴムⅠ:0.8、シリコンゴムⅡ:0.9、シリコンゴムⅢ:0.9、実験参加者B・Cは全てのシリコンゴムについて1であるため、実際に湿った布は明確に識別できていた。

4.2.6 考察：縦方向の弾性成分と接触面積の効果

3人の実験参加者の結果は2つの傾向に大別できる。実験参加者BとCは3種類すべてのシリコンゴムで閾値を求めることができたが、実験参加者Aは実験1において2つのシリコンゴムについて閾値を求めることができなかった。

まず、実験1と2両方において閾値を求めることのできた実験参加者B・Cを考察する。

【実験参加者BとCの結果の考察】

実験1・2ともに皮膚温度の低下量が大きくなるほど湿り感を知覚しやすくなる結果は、これまでの実験結果(第2章・第3章・第4章1節)での実験や先行研究(Fillingeri et al. 2013)と同じ知見が当てはまる。

次に、3種のシリコンゴムの弾性抵抗における温度閾値を実験1と2で比べる。縦方向の弾性成分のみならず接触面積も変えた実験1では、弾性抵抗と閾値に関連性がみられる。実験参加者Bは弾性抵抗が小さくなるほど、湿り感を知覚する温度閾値が小さくなっている。実験参加者Cも弾性抵抗の大きさが皮膚以下の場合には、閾値が小さくなっている。つまり、弾性抵抗が小さく柔らかな条件ほど、皮膚温度の低下量が小さくても湿り感を錯覚したといえる。一方、縦方向の弾性成分のみを変えた実験2では、閾値が弾性抵抗に伴う変化があるとはいえない。実験1と2のシリコンゴムの弾性抵抗は同量であるため、弾性抵抗の差による湿り感の影響は実験1の柔らかさの操作手法のほうが大きい。

さらに、実験1と実験2のS字曲線の傾きを比べる。すると、実験1のほうが傾きは小さくなり、なだらかな曲線となっている。これは実験1において、皮膚温度低下量が小さい場合に「湿り」と、あるいは皮膚温度低下量が大きいときに「乾燥」と回答した回数が多いためである。この理由として、実験1では回答に対する実験参加者の確信度が低下している、すなわち「乾燥」と「湿り」の判断が鈍っていることを考える。このように、実験1の柔らかさの操作手法は、湿りと乾燥の判断を鈍らせる効果を持つ可能性がある。

以上より、実験参加者BとCについては、縦方向の弾性成分のみを変える実験2よりも、接触面積も変える実験1の手法の方が、弾性抵抗が小さくなるほど湿り感を知覚しやすくさせる効果が大きいといえる。ゆえに、冷たさによる湿り感錯覚には縦方向の弾性成分よりも、接触面積が湿り感にとって影響が強いと推測される。

【実験参加者 A の結果の考察】

実験参加者 A は、実験 1 では皮膚温度が低下しても乾燥だと答える割合が高く、今回の実験で最大の皮膚温度低下が生じる条件でも「湿っている」と回答した割合は 3~4 割であった。そのため、実験 1 ではシリコンゴムⅢの閾値しか得られず、湿り感を錯覚しにくい結果となった。しかし、実験 2 では皮膚温度の低下量に応じて湿り感を錯覚しており、最大の温度条件であれば 7~9 割程度、「湿っている」と評価している。

実験参加者 A が実験 1 で湿り感を錯覚しにくかった原因として、布の冷却方法の違いが湿り感の評価に影響を及ぼしたと考えている。実験 1 と 2 では布の温度操作は異なる手法で行った。実験 1 ではクールプレートを用いて冷やした布とシリコンゴムに触れたため、冷えた物体が皮膚の熱を奪って物体の表面温度は上昇し、布と皮膚の温度が同温になると熱の変化が生じなくなる。実験 2 では布の直下のペルチェ素子によって一定の温度に制御し続けている。ペルチェ素子はその表面温度を設定温度に保つよう電氣的に制御しているため、布の温度が皮膚の熱により上昇すれば、電気を流して表面を設定温度まで下げることになり、触り続けている間は皮膚温度が物体の設定温度に近づくまで低下し続けるという状況となる。図 4.2.3 より、実験 1 の条件での皮膚温度は接触直後の急激な低下が生じているが、その後横ばいとなっている。一方、実験 2 は接触している 8 秒間温度が低下し続けている。そこで、皮膚温度低下量の時間変化を確認するべく、1 秒間の温度低下速度を求めた（表 4.2.4）。これより、0~1 秒間では実験 1 の手法の方が皮膚温度の低下速度は速い、あるいは同程度である。その後、実験 2 の手法ではさらに速い速度で低下が続く。つまり実験 1 の温度操作手法では、特に温度低下量が小さな条件（冷-乾燥（DC）条件(1)・(2)）では、実験 2 の手法よりも早い段階で皮膚温度の低下が生じなくなることがわかる。

また、冷覚の知覚特性を考慮しても、皮膚温度の低下速度が湿り感の知覚に影響が大きいことを支持できる。たとえば、感覚受容器の神経伝達は冷感の場合は速く、温度の識別閾値も小さいことが知られている。具体的には、冷感では 10~20 m/s（温感：1~2 m/s）で伝達され、母指球の皮膚温度が 33°C に維持されているとき弁別閾値は 0.11°C（温感：0.20°C）である（Stevens and Choo, 1998; Jones and Ho, 2008）。さらに、物体識別では、終的な温度変化量ではなく、瞬間的な温度変化の速度に基づいて認識されることが知られている（Bergmann Tiest and Kappers, 2008）。ゆえに、湿り感についても皮膚温度低下量（ ΔT ）ではなく、皮膚温度の低下速度を基に判別している可能性がある。

したがって、実験参加者 A は皮膚温度の低下が生じ続けている状況を基に「湿り感」を判断したと考えられる。今回の実験後、実験参加者 A は「（冷-乾燥（DC）条件は）触れたときの冷感が、実際に水を含んだときとは異なる（ため乾燥だと判断した）」とコメントしていることから、湿り知覚において皮膚温度の低下速度を重視している可能性が考えられる。ただし、実験参加者 A についても、実験 1 において弾性抵抗が最も小さいシリコンゴムⅢのみの閾値が検出できたことは、湿りを錯覚しにくい中でも、弾性抵抗

による接触面積の増加の効果があったのではないかと推測できる。

以上より、実験 1 と 2 の結果をまとめると、縦方向の弾性成分と同時に接触面積を変化させる手法のほうが湿り感を錯覚する温度閾値に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。それゆえ、湿り感の錯覚を生じやすくする物理量として接触面積の影響が大きいと示唆される。

4.3 考察：湿り感錯覚を生じる柔らかさ特性

本章では、冷刺激によって乾燥刺激から湿り感を錯覚する現象が生起する条件について、皮膚と布が静的に接触する（手掌を布の上のせるように触れる）状況における、布の柔らかさ特性について調査してきた。第4章1節の実験結果より、布の柔らかさが増すことで、皮膚温度低下量が実際に湿った布に触れたときほどでなくても湿り感を錯覚し得るという知見を得た。第4章2節の実験結果では、柔らかさの物理量の中でも接触面積が湿り感の錯覚を生じやすくする効果があることが示唆された。

このように、柔らかさ、特に接触面積が湿り感錯覚に影響した理由として2つ考える。まず、実際に水に触れるときの状況を想起させるためだと考える。実際に水を含んだ物体と皮膚が触れるとき、物体表面に残存している水あるいは皮膚の接触によって内部から染み出した水の表面張力によって皮膚の周りの水は盛り上がった界面形状となる。このとき物体および水と皮膚の接触面積は、乾燥している物体に触れたときに比べると大きくなる。本論文における、乾いた冷たい物体による湿り感錯覚では、この水による接触面積の増加が生じないため、冷たい物体と皮膚との間の接触面積が大きい状況は水分との接触を想起させ、より強く湿っていると錯覚する可能性がある。また、他の理由として、接触面積の増加により、皮膚と物体間の熱移動量が増えるためではないかと考える。接触面積が大きくなることで第2章1節の(2.1.1)式の接触熱抵抗が小さくなり、皮膚温度は接触温度理論値に近づく。つまり、接触面積が大きくなることで皮膚の温度は物体の温度に近づき、接触面積が小さい場合よりも冷たく感じると推測される。このような理由から、接触面積の増大が湿り感を強めている可能性がある。

先行研究でも、冷たさと接触面積が湿り知覚に関与すると提案されている。たとえば、ゴムに指を入れ水に浸すと皮膚は濡れていないのに湿り感を錯覚すること（Bentley 1900）や、凹曲面に加工したアクリル板を冷却することで濡れた平板に触れた温度変化（2.1節(2.1.1)式）と接触面積（4.2.1項(4.2.1)式）を再現すると濡れたような感覚を生起することが明らかにされている（高山ら，2008）。

第4章2節の実験では接触面積が湿り感錯覚に影響する可能性が明らかとなったが、物体の柔らかさの知覚は接触面積（皮膚感覚）だけでなく、皮膚の押し込み量（固有受容感覚という筋・腱・関節に存在する機械受容器による感覚）の両方を利用するときの方が、硬さ／柔らかさの感覚の感度が高いことから、両方の感覚を統合して柔らかさを知覚していると考えられている（Bicchi et al., 2000; Friedman et al., 2008; Scilingo, 2010）。ただし、対象物体が皮膚よりも柔らかいとき、接触面積による柔らかさの知覚の方が、感度が優れていることが知られている（Friedman et al., 2008）ため、今回の実験で検証した湿り感錯覚においても、物体の弾性抵抗に応じて接触面積と縦方向の弾性成分のうちどちらが影響するのが変わる可能性も考えられる。

4.4 まとめ

第4章1節の実験から、冷たさだけでなく、柔らかさも増すほど湿り感錯覚が生起しやすくなる効果が見いだされた。さらに、第4章2節の実験から柔らかさの中でも接触面積が湿り感錯覚に影響することが示唆された。この結果、物体と皮膚との接触面積が冷たさによる湿り感錯覚を強める役割を果たす可能性がある。

第5章 湿り感錯覚を生じる触り方

本章では湿り感錯覚を生起する触り方を検証する。第2章、第3章、第4章で湿り感錯覚の生起を確認した触り方である手掌の静的接触に加え、動的な触動作（手掌を物体の左端にのせ、右端まで刺激表面をなぞるように動かす触動作）において、布の温度や含水分率を変えながら知覚される湿り感を評価する。

5.1 なぞり動作時の湿り感錯覚

第1章でも述べたように、接触冷感の布を用いて手掌による静的接触に加えつかむような触り方でも湿り感を錯覚することが示されている（Bergmann Tiest et al., 2012b）。この結果とは反し、本論文ではなぞるような触り方では冷覚による湿り感錯覚は生じないと仮定する。その根拠として3つ考えられる。

1つ目は動的な触動作のときの水分検出の弁別閾値である。動的な触動作のとき水分の検出閾値が小さくなる（Bergmann Tiest et al., 2012a）。動的に触れるときは摩擦などの機械刺激の特徴を知覚しやすく、敏感に水分の有無を判断できることから、冷たい乾燥刺激をなぞると機械刺激を手がかりに“乾燥”だと判断できるのではないかと考える。

2つ目の根拠は人間の温度知覚特性である。冷たい物体を動的に触れるとき皮膚の熱は急速に奪われるが、動的に触れるとき温冷感の知覚は抑制されることが知られている（Green, 2009; Van Doorn et al., 2012）。それゆえ、動的な触動作の場合、冷たい乾燥刺激の冷感を知覚しにくく、湿り感錯覚が生じにくいと考える。

3つ目の根拠として、押し付け力が果たす効果が考えられる。同じ押し付け力であれば、乾燥した皮膚よりも湿った皮膚で物体をなぞるときの摩擦係数が大きく、押し付け力が強いほど湿った皮膚で物体をなぞる際の摩擦係数は弱まる（Derler and Gerhardt, 2012）。つまり、皮膚の乾燥あるいは湿りによって物体をなぞる際の押し付け力に伴う摩擦の変化の挙動が異なることが示されているため、押し付け力によって湿り感錯覚の生起状況が異なることが推測される。

本章では、触動作が湿り感錯覚に影響するのかを検証するために、手の動きや押し付け力に注目した。手の動きは、手掌を刺激の上ののせて動かさない静的な触り方と、左から右方向になぞるように動かす動的な触り方を採用した。また、押し付け力の大小で2条件設定し、4種類の触動作（押し付け力：大・小、触り方：静・動）における湿りの感覚強度を評価した。本章ではさらに、刺激の温度と含水分率の寄与も検討した。第2章から第4章において示した、実際の湿った刺激と同程度の皮膚温度低下を生じる冷たい乾燥刺激を“湿り”と錯覚するように、湿り刺激を乾燥刺激に触れたときと同程度の皮膚温

度低下を生じる温かい湿り刺激を“乾燥”と錯覚するのではないかと仮定する。そこで、本章では、常温の乾燥刺激と湿り刺激に匹敵する皮膚温度変化を生じる湿り刺激あるいは乾燥刺激といった4種類の評価刺激を4種類の触動作で触れたとき、知覚する湿り強度を評価した。

5.2 実験手法

5.2.1 実験条件

評価刺激は、皮膚温度変化や布の含水分率に基づいて4種類を設定した(表5.2.1)。常温の湿り刺激(Wet; W)と、Wet刺激と同程度の皮膚温度低下量を示す冷たい乾燥刺激(Dry-Cold; DC)、さらに常温の乾燥刺激(Dry; D)と、Dry刺激と同程度の皮膚温度低下量を示す温かい湿り刺激(Wet-Warm; WW)である。

触り方は、静的な接触のとき手掌の親指のつけ根あたり(母指球)を刺激の上に乗せて3秒間動かさない触り方で、なぞり動作では同じ手掌の部位を使って3秒間で12.5cmの幅を左から右になぞる(約4.2 cm/s)ように実験参加者に教示した。押し付け力が小さい条件は1 N以下(約140 Pa以下)、押し付け力が大きい条件は3 N以上(約430 Pa以上)とした。

実験装置を図5.2.1に示す。試料布としてポリエステルスモース編み布(13×13cm, 2.83から3.28g)を用いた。布の表面温度を制御するために、クールプレート(SCP-85, アズワン株式会社)を用いた(図5.2.1(a))。このクールプレートの温度提示部分(ペルチェ素子)は10cm四方となぞるには小さかったため、12.5×10cmのアルミ板を固定した。このアルミ板の上に布を乗せ、12個の磁石で固定することで、布の表面温度を調整した。クールプレートの下にフォースプレート(TF-4060, 株式会社テック技販)を置き、実験参加者が評価刺激に触れる際の力を計測した(図5.2.1(a))。

乾燥状態の刺激(Dry・Dry-Cold)の布は実験室に1時間以上放置した状態とした。湿り状態の刺激(Wet・Wet-Warm)は、乾燥状態の布を水分の保持性能に優れたスポンジで挟むことで、水を含ませた。湿った状態の布には1.76gから2.64gの水を含ませ、水分を含ませる前の乾燥状態と評価後の重量から算出した含水分率は60~80%とした。乾燥状態の刺激は実験参加者が触って評価した後でも0.7%以下の含水分率であったことから

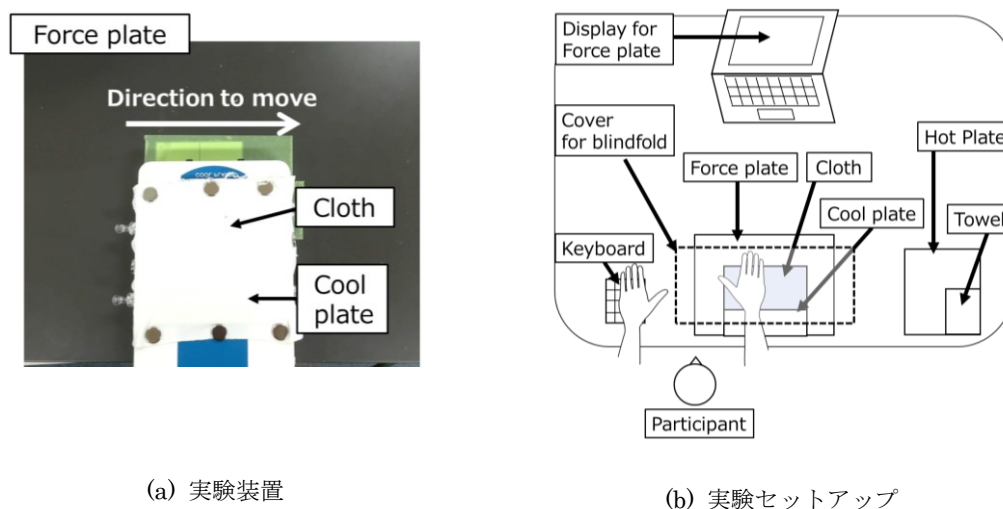


図5.2.1 実験セットアップ

ら手汗など吸収はなかったといえる。

5.2.2 皮膚温度と摩擦計測

Dry-Cold 刺激と Wet-Warm 刺激の表面温度を設定するために、皮膚温度を計測した。皮膚温度計測は第 2 章 3 節と同様である (図 2.3.1 (c))。刺激を触る前に右手を 32°C に設定したホットプレート (NHP-M30N, 株式会社日伸理化) を 1 分間触ることで、皮膚温度を調整した。この刺激の温度設定は静的接触による押し付け力が小さいときを基準にした。皮膚温度計測は室温 $27 \pm 0.8^\circ\text{C}$ 、湿度 $49 \pm 6\% \text{RH}$ 環境の実験室にて行った。皮膚温度計測の結果を表 5.2.1 に示す。その結果、表 5.2.2 のように温度を設定した。

また、各刺激に触れた摩擦の挙動を確認するため、著者が布を手掌で静的に触れるあるいはなぞったときの接線力と法線力をフォースプレートで計測した。計測値は 1ms ごとに取得し、触れている 3 秒間を計測した。ノイズを除去するために過去 10 回の計測値を平均化した。各条件 5 回の計測を行い、摩擦係数を算出し、平均したものを表 5.2.3 に示す。この摩擦係数は、試料布に接触したとき接線力と法線力から算出した摩擦係数と 3 秒間後に得られた摩擦係数の差分を示している。この結果より、動的な触動作では湿った刺激が乾燥刺激より摩擦係数が大きい傾向が見られた。

表 5.2.1 皮膚温度低下の様子

著者の右手で 3 秒間触れた際の皮膚温度変化を示す。著者が各条件の刺激にそれぞれの接触方法で 5 回ずつ触れた際の計測値を平均した。縦軸は皮膚温度低下量 [°C]、横軸は接触時間 [s] を表す。

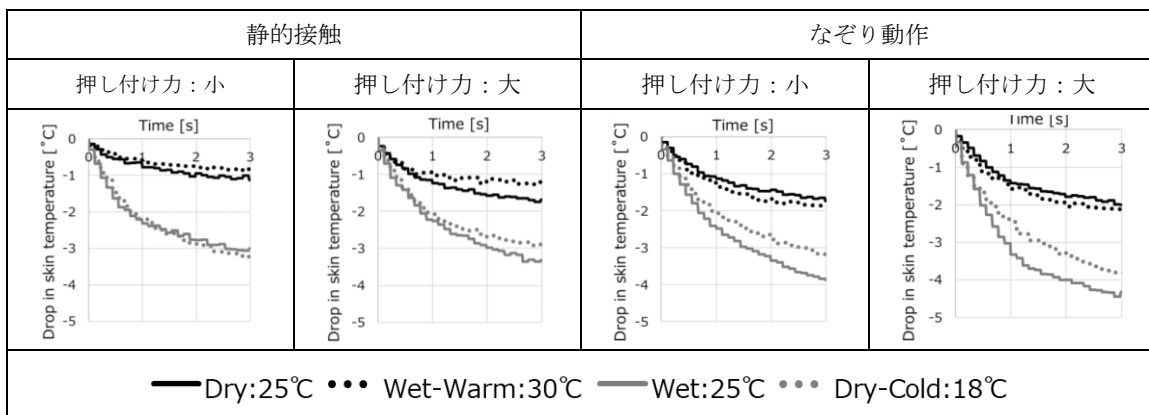


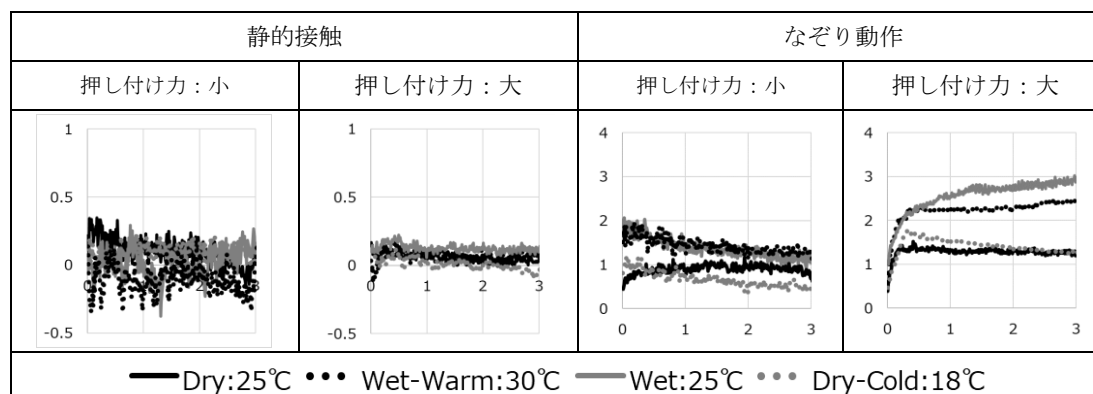
表 5.2.2 刺激の温度設定

各セルの上段は刺激条件の名前、下段に設定温度を示す。

	皮膚温度低下量	
	小	大
乾燥	Dry	Dry-Cold
	25°C	18°C
湿り	Wet-Warm	Wet
	30°C	25°C

表 5.2.3 摩擦係数の時間変化

著者が各条件の刺激にそれぞれの接触方法で触れた際の法線・接線方向の力を 5 回ずつ計測し、算出した摩擦係数を平均したものを示す。縦軸は摩擦係数、横軸は接触時間[s]を表す。



5.2.3 心理物理実験手法

実験参加者は、健常な 18 から 21 歳の女性 21 名とした。実験は、奈良女子大学の倫理審査委員会の承諾を得たうえで、実験の報酬として謝金を支給した。参加者へは予め実験内容を説明し、同意を得たうえで実験を実施した。

実験参加者は心理実験を行う前に、フォースプレートの測定値をリアルタイムで表示しているディスプレイ画面を見ながら、触り方や押しつけ力を練習した。湿り感の評価尺度は、0 を“乾燥”，6 を“かなり湿っている”とした 7 段階とした。実験参加者は Wet 刺激と Dry 刺激の布に触り、両者の湿り感の違いを弁別できることを確認したうえで、Dry 刺激に触れたときの感覚を“0”，Wet 刺激に触れたときの感覚を“6”の基準となるように教示した。

実験セットアップを図 5.2.1 (b) に示す。実験参加者は右手で評価刺激に触れた。実験参加者には評価刺激が見えないように、刺激を覆うように衝立を立て、参加者は衝立の下から手を差し込んで、評価刺激に触った。はじめに、試料布の表面温度をクールプレートで調整する間に、実験参加者は右手で 32°C に設定したホットプレートに 1 分間触れ、実験参加者の皮膚温度を調整した。刺激と皮膚温度の調整が終わると、音が鳴り、その音を合図に参加者はそれぞれの触り方で実験刺激に触れた。刺激に触れて 3 秒経つと再び音が鳴り、それを合図に参加者は左手にあるキーボードで、知覚された湿り感の強さを 0 から 6 の間で回答した。回答が終わると、参加者は右手を刺激から離し、乾いたタオルで水分をふき取った。以上の手順を繰り返した。1 人の実験参加者は各条件 3 回の評価を行い、3 回の評価の中央値をその条件に対する実験参加者の評価値として扱った。実験では 48 回の評価（刺激：4 種×反復：3 回×触動作：2 種×押し付け力：2 種）を行い、各触り方（4 種類）をひとつのセットとし、セット間には 5 分間の休憩を設けた。セット開始する度に、参加者はそれぞれの触り方で Wet 刺激の布に触り、“6”の評価基準の湿り感を確認した。セット内の刺激提示の順番やセットの順番は、参加者ごとに変えた。実験参加者が評価刺激に触れる際の 3 軸の力データは csv ファイルとして出力し、各評価の際の

カデータを保存した。

実験環境は室温 $26\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\pm 8\%$ RH であった。

5.2.4 解析手法

続いて解析手法を説明する。得られた結果の交互作用を統計的に比較するため、統計解析ソフト R を使い、Aligned Rank Transform (ART) (Higgins and Tashtoush, 1994; Wobbrock, 2011) パッケージを使って分散分析を行った。分散分析はパラメトリックデータであることが前提となるため、ノンパラメトリックデータに従来の手法の分散分析を行うことは適切ではない。そこで、ノンパラメトリックデータに整列ランク変換 (ART) を施すことで、パラメトリックデータと同じく分散分析を行えるようにした。刺激 (4 種: Dry; D · Wet-Warm; WW · Dry-Cold; DC · Wet; W), 触動作 (2 種: 静的接触 · なぞり動作), 押し付け力 (2 種: 大 · 小) を要因として使用し、ART 処理したデータの 3 要因分散分析を行った。

主効果の下位検定として Tukey 検定による多重比較、交互作用の下位検定として Holm-Bonferroni 法による Wilcoxon 順位和検定を行った。ここで、実験参加者数が十分であることを確認するために検定力分析 GPower (Faul, 2007) を行った。3 要因分散分析のサンプルサイズは 12 で、効果量は 0.3, 有意水準は 0.05, 検出力は 0.8 であった。したがって、今回の実験参加者 21 名で十分であることが分析結果からいえる。

さらに、なぞり動作時に得られた結果における個人差に着目した (次章参照)。Dry-Cold 刺激と Wet-Warm 刺激について、強い押し付け力でなぞったときの湿り感の評価結果の類似性によって、参加者をグループ分けした。グループ分けは Python の KMeans ライブラリの k-means クラスタリング機能を用いて行った。クラスター数はエルボー法によって選択した。K-means 関数の他のパラメータは初期設定値とした。グルーピングの後、静的接触となぞり動作の違いに注目するため、3 要因分散分析を各グループの結果について実行した。各グループの参加者数が適切なサンプル数 (12) に満たない可能性があったが、グループごとの湿り感知覚の違いを調べるために、分散分析を行った。

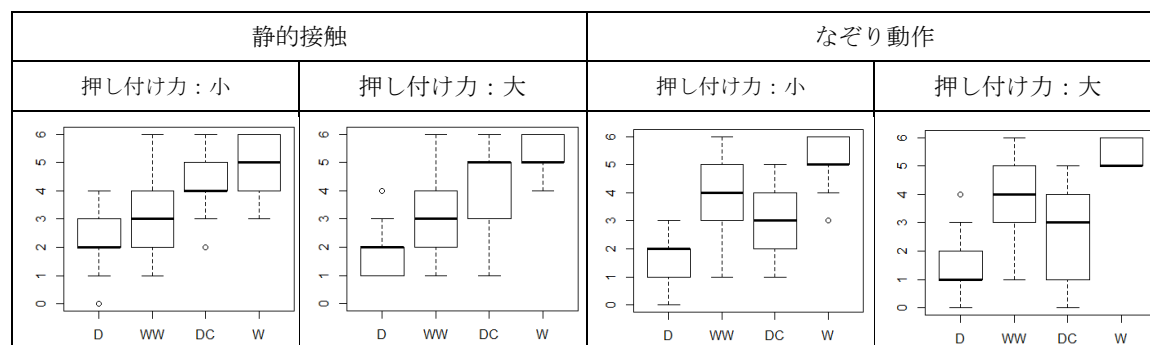
5.3 実験結果

表 5.3.1 は全実験参加者によって知覚された湿り感の評価値を箱ひげ図で示したものである。静的接触では、押し付け力に関係なく Wet 刺激, Dry-Cold 刺激, Wet-Warm 刺激, Dry 刺激の順で強い湿り感として評価された。なぞり動作では Dry-Cold 刺激と Wet-Warm 刺激の順番が静的接触とは逆になっていた。分散分析の結果、刺激と触動作の間に交互作用が示された ($F(3,300)=17.2, p<0.01$)。刺激と押し付け力の間には有意な差は認められなかった ($F(3,300)=0.46, p=0.7$)。Dry 刺激および Wet 刺激の布については全ての触り方で有意差があり、実験参加者はそれぞれ乾燥と湿りを識別できていた。Dry-Cold 刺激と Wet-Warm 刺激については、静的接触では Dry-Cold 刺激の方が Wet-Warm 刺激よりも有意に強い湿り感として評価されていた ($V(41)=595, p<0.01$)。一方、なぞり動作では Wet-Warm 刺激の方が Dry-Cold 刺激よりも有意に強い湿り感として評価していた ($V(41)=186, p=0.012$)。

また、なぞり動作の Dry-Cold 刺激や Wet-Warm 刺激の第一四分位数と第三四分位数の間の幅 (箱の上端から下端までの長さ)、すなわち結果の個人差は Dry 刺激および Wet 刺激よりも大きい。この 2 つの刺激の個人差は静的接触の結果と比較しても大きい。この個人差をさらに調べるためになぞり動作時の Dry-Cold 刺激と Wet-Warm 刺激の結果を用いてクラスター分析を行った。押し付け力について有意差がなかったため、結果のばらつきが顕著な強い押し付け力条件の結果を用いた。図 5.3.1 はクラスター分析による 3 つのクラスターの結果を示す。グループ I (濃い灰色) は 4 人、グループ II (薄い灰色) は 8 人、グループ III (黒色) は 9 人の参加者を分類した。グループ I の参加者は Dry-Cold 刺激を“湿り”、Wet-Warm 刺激を“乾燥”と評価する傾向、グループ II の参加者は Dry-Cold 刺激を“乾燥”、Wet-Warm 刺激を“湿り”と評価する傾向、グループ III の参加者は Dry-Cold 刺激も Wet-Warm 刺激も“湿り”と評価する傾向が見られた。

表 5.3.1 全実験参加者の湿り感評価結果

縦軸は知覚された湿り感の強度、横軸は 4 種類の刺激 (D: Dry, Warm-Wet; WW, Dry-Cold; DC, Wet; W)



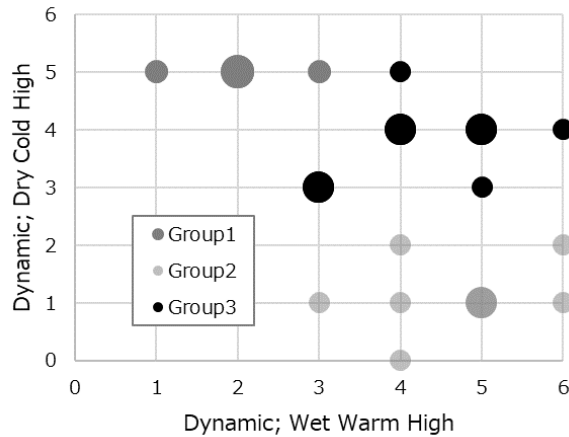


図 5.3.1 実験参加者のグルーピング結果

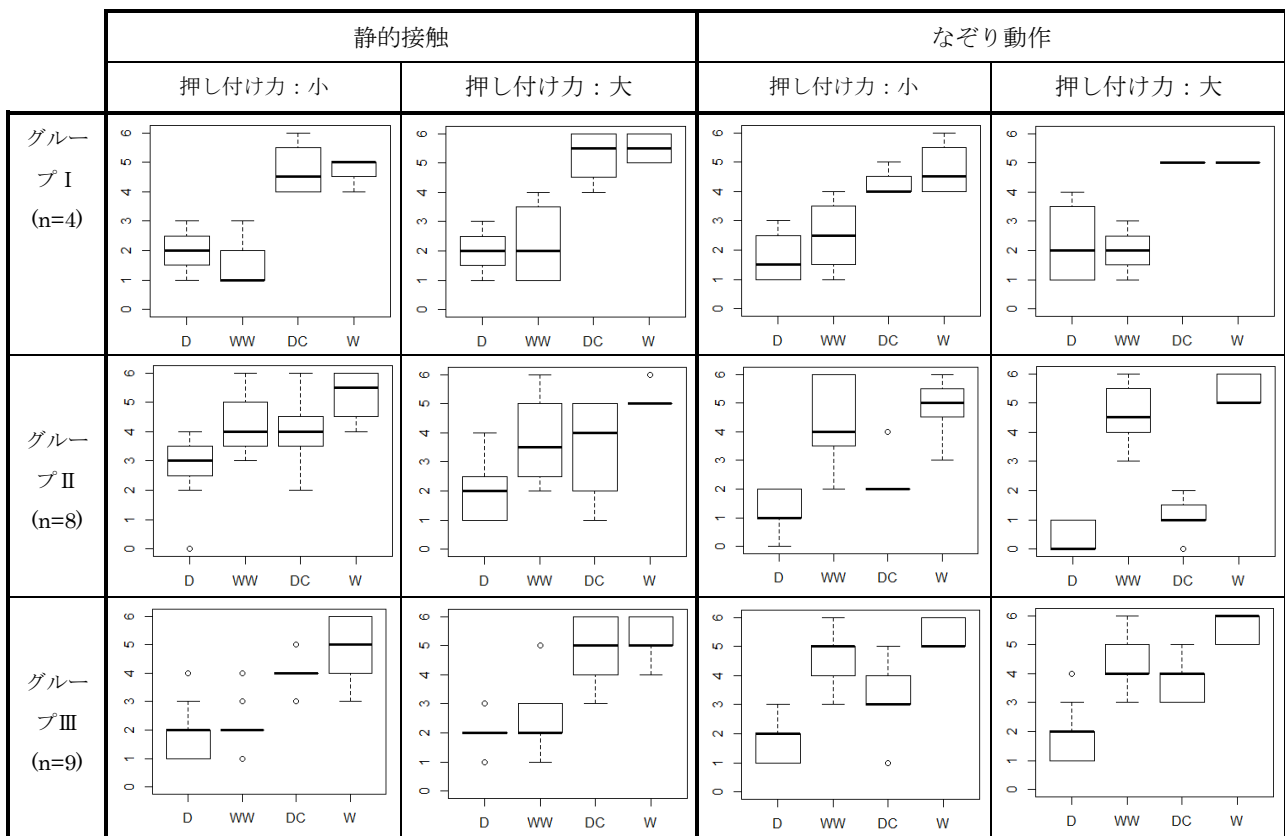
大きな丸は複数の参加者が同じ評価をしたことを意味する。

表 5.3.2 は各グループの湿り感評価結果を箱ひげ図で示す。さらに、各グループで分散分析を行った結果、グループ I では刺激の主効果 ($F(3,45)=50.6, p<0.01$), グループ II とグループ III では刺激と触り方との交互作用が示された (グループ II : $F(3,105)=12.5, p<0.01$, グループ III : $F(3,120)=22.8, p<0.01$)。

表 5.3.2 各グループの湿り感評価結果

行は 3 つのグループ、列は 4 つの触り方における湿り感評価の結果を示す。

グラフの縦軸と横軸は図 5.3.1 と同様。



下位検定の結果、グループ I の参加者は触動作に依らず Dry-Cold 刺激は Dry 刺激と有意差が見られた ($t(15)=8.48, p<0.01$), Wet-Warm 刺激は Wet 刺激と有意差が見られた ($t(15)=8.92, p<0.01$).

グループ II とグループ III では、静的接触となぞり動作で湿り感評価傾向に違いが見られた. グループ II の参加者は静的接触では Wet-Warm 刺激と Dry-Cold 刺激はともに Dry 刺激と有意差が見られた (Wet-Warm 刺激と Dry 刺激間: $V(15)=4, p<0.01$, Dry-Cold 刺激と Dry 刺激間: $V(15)=107, p<0.01$). また静的接触において Wet-Warm 刺激と Dry-Cold 刺激間には有意差がなかったが ($V(15)=52.5, p>0.99$), なぞり動作では Wet-Warm 刺激の方が Dry-Cold 刺激よりも有意に強い湿り感として評価された ($V(15)=4.5, p<0.01$). さらに、静的接触における Dry 刺激はなぞり動作における Dry 刺激よりも有意に強い湿り感として評価されていた ($V(15)=102, p<0.01$).

グループ III の結果は、静的接触の結果はグループ I と同様、Wet-Warm 刺激は Wet 刺激と有意差が見られ ($V(17)=171, p<0.01$), Dry-Cold 刺激は Dry 刺激と有意差が見られた ($V(17)=169, p<0.01$). また、触動作によって Dry-Cold 刺激と Wet-Warm 刺激の評価が逆転し、静的接触では Dry-Cold 刺激が Wet-Warm 刺激より有意に高い評価となったが ($V(17)=120, p<0.01$), なぞり動作ではその逆であった ($V(17)=16, p=0.02$).

5.4 考察：湿り感錯覚を生じる触り方条件

第5章1節で、Dry-Cold 刺激によって錯覚される湿り感の強さは触り方や押しつけ方に影響を受けるのではないかと仮定した。実験で検証した結果、Dry-Cold 刺激と Wet-Warm 刺激は触動作によって得られる湿り感の強さは異なり（図 5.3.1）、実験参加者において個人差があること（図 5.3.2、図 5.3.3）が明らかとなった。

5.4.1 温度刺激による湿り感錯覚の触り方比較

静的接触では過半数の実験参加者が布の温度を手がかりとして湿りを知覚しており、Dry-Cold 刺激に対して Wet-Warm 刺激よりも強い湿り感として評価した。一方で布をなぞる触動作では温度ではなく布の含水分率に対応して湿り感を知覚しており、Wet-Warm 刺激の方が Dry-Cold 刺激よりも強い湿り感として評価した。この結果については、先行研究において実際に水分を含んだ状態の刺激をつかむような動的な触動作で触れるとき、静的に触れるよりも水分検出の精度が向上するという知見（Bergmann Tiest et al., 2012a）と一致しており、なぞることで得られる摩擦などの機械刺激的特徴を手がかりに湿り感を知覚していると考えられる。

押し付け力に関しては、今回の実験では湿りの知覚に影響を与えないことが示された。湿った素材あるいは乾燥した素材を対象とした研究では、接触する際の圧力が湿り感に影響を与えるということが報告されている（Raccuglia et al., 2017; Raccuglia et al., 2018; Filingeri et al., 2014c; Filingeri et al., 2015）。先行研究と一致しない結果となった理由は、圧力条件や身体部位などの実験設定の違いだと考える。たとえば、本研究は強い押し付け力条件が約 430Pa 以上、弱い条件が約 140Pa 以下であったが、先行研究（Filingeri et al., 2014c）では 10000Pa と 7000Pa という設定であった。また、接触部位によっても圧力の寄与が異なると考えられる。本研究では実験参加者は手掌で刺激に触れたが、先行研究では背中（Raccuglia et al., 2017）、前腕（Raccuglia et al., 2018）、さらには着衣状態の胴部・腕・大腿部（Filingeri et al., 2015）であった。特に着衣状態での研究（Filingeri et al., 2015）では衣服圧が異なるときの発汗による湿り感を評価しているが、衣服と発汗した皮膚との間の相互作用（衣服と皮膚の間の滑りなど）が生じるため圧力以外の機械刺激的特徴が湿り感に影響を与えている可能性がある。

5.4.2 湿り知覚の個人差

実験結果について個人差が見られたことから、湿り知覚の戦略は個々人によって異なると思う。グルーピングによって、湿り知覚の戦略は 3 つあることが示唆された。図 5.3.3 より、グループ I の参加者は触動作に依らず Wet-Warm 刺激を“乾燥”、Dry-Cold 刺激を“湿り”と判断していた。つまり、グループ I の実験参加者は湿りを知覚する際に「冷たさ（皮膚の温度の低下）」を重要視すると示唆される。グループ II では、静的接触

のときのみ Dry-Cold 刺激を“湿り”と錯覚し、なぞると含水分率の違いを正しく判別し Dry-Cold 刺激を乾燥、Wet-Warm 刺激を湿りと識別していた。この結果から、グループ II の参加者は「機械刺激的特徴（摩擦や粗さなど）」を手がかりとして湿り感を知覚していると考えられる。さらに、グループ II の静的接触の評価結果は、Dry 刺激の湿り感がグループ I や III と比較すると高い評価となっていた。この結果はグループ II の参加者は機械刺激的特徴を重要視して湿り感を知覚するため、静的接触よりもなぞるような動的接触の方が感度よく湿り感を判断できる可能性がある。グループ III の実験参加者は、静的接触ではグループ I と同様に温度によって湿り感を錯覚していたが、なぞると Wet-Warm 刺激を“湿り”と判断していた。さらに、Dry-Cold 刺激は静的接触よりもなぞったときの方が湿り感は弱く評価されており、触り方によって Dry-Cold 刺激と Wet-Warm 刺激の評価が逆転していた。つまり、グループ III の参加者は、静的接触では「冷たさ」、なぞり動作時は「機械刺激的特徴（摩擦や粗さなど）」というように触動作によって手がかりを変えている可能性がある。

個人差が生じる原因として 3 つ考えられる。まず、同じ物理刺激であっても感覚の統合処理過程に個人差があると考えられる。そうならば、湿り感の認知を決定する手がかりは各グループで異なることになる。たとえば、グループ I の参加者はなぞっていても Dry-Cold 刺激を他のグループよりも強く“湿っている”ように評価した結果より、グループ I の参加者は湿り感を認知する際に冷たさを重視する可能性が高い。このように、湿り感の認知に個人差があるとすれば、湿り知覚は後天的に習得されていくことが示唆される。また個人差を生む原因として、手の動きの影響が考えられる。参加者の中には、なぞり動作で手を動かすことに集中していたため、布の冷たさを感じにくい人もいたかもしれない。しかし、この仮説だとグループ II の参加者のみ手を動かさずに Wet-Warm 刺激を湿っていると正しく判別していたことを説明することはできない。第 3 の原因として、皮膚への物理刺激の入力の違いである。もし個人差が皮膚に加わる物理刺激の差によるものであれば、皮膚に加わる摩擦はグループ間で異なっている可能性がある。

5.4.3 摩擦特性の個人差

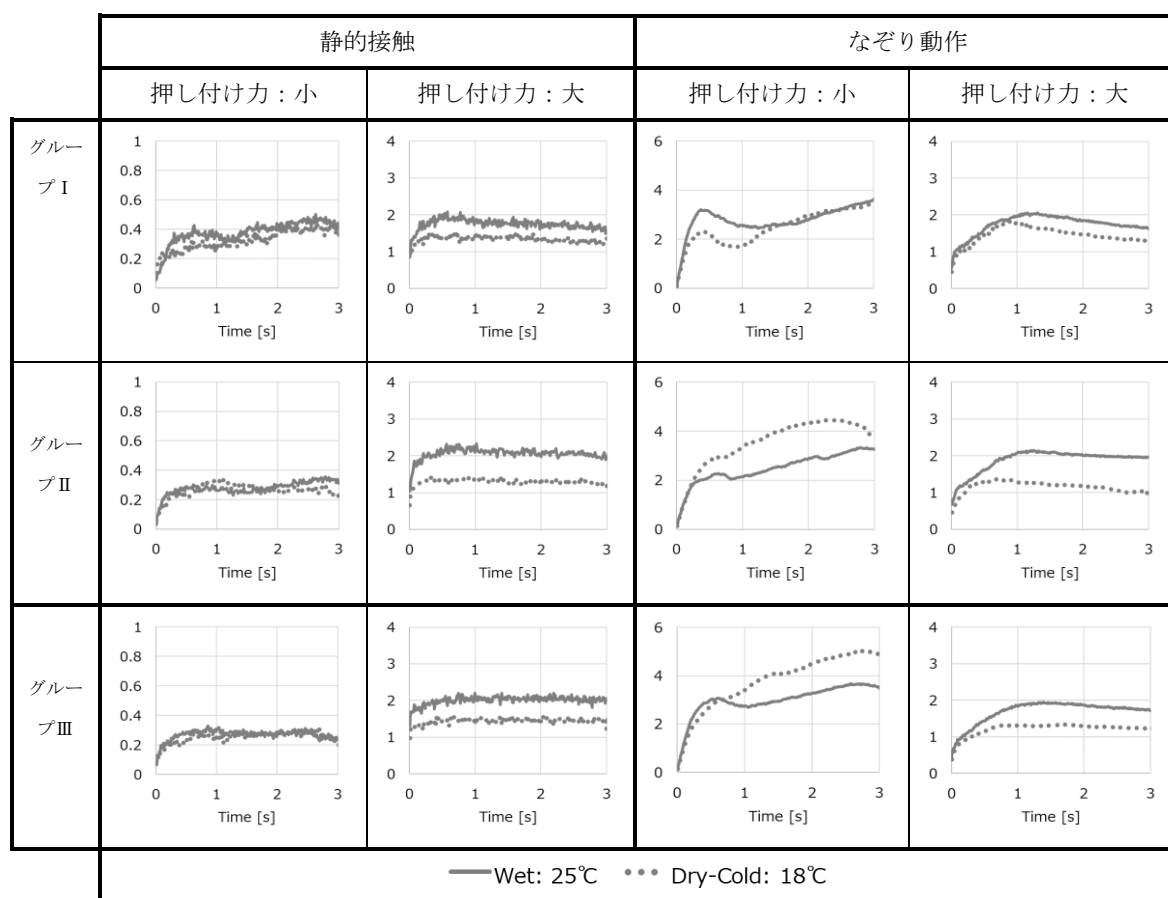
3 つ目の仮説「湿り知覚の個人差は皮膚刺激の違いから生じる」を検証するために、湿り感評価実験で全実験参加者が各試行で刺激に触れた際の摩擦を解析した（表 5.4.1）。4 種類の刺激の内、Wet 刺激（実線）と Dry-Cold 刺激に触れた際の、押し付け力や摩擦係数を算出した。

この結果、グループ I ではどちらの押し付け力でも Dry-Cold 刺激と Wet 刺激の摩擦係数の差は、他のグループに比べて小さい傾向にあった。特に、なぞり動作時の Dry-Cold 刺激の摩擦係数は他のグループよりも全体的に大きい値となっていた。温度や含水分率や表面特性といった布の物理的な状態は、実験参加者によらず同じであるため、摩擦の挙動の違いは、実験参加者の皮膚の微細構造（たとえば皮膚の厚みや弾性、凹凸）の違いによるものとする。つまり、グループ II および III の参加者は皮膚表面の微細構造によって

皮膚と物体の固着が生じにくく, Dry-Cold 刺激をなぞると摩擦係数が小さい値となった. そこで, Dry-Cold 刺激から感じられる湿り感がグループ I よりも低い値となっていたと考える. 皮膚の微細構造によって湿り感知覚の戦略が異なるという仮説を検証するためには, さらなる研究が必要である.

表 5.4.1 Wet 条件と Dry-Cold 条件におけるなぞり動作時の押し付け力と摩擦係数の差

列には 3 つのグループごとの参加者による実験時の計測値, 行は押し付け力条件ごとの実際の押し付け力と摩擦係数を示す. 各グラフの縦軸は摩擦係数, 横軸は接触時間を表す.



5.5 まとめ

第5章では、含水分率や温度の異なる布刺激を、静的接触あるいは動的接触（なぞり）で触れたときの湿り感錯覚の生起を検証した。実験結果を解析したところ、押し付け力の有意な影響は見られなかったが、触り方によって湿り感錯覚の生起状況に違いが見られた。静的接触では過半数の人が Dry-Cold 条件を“湿っている”と錯覚して回答する傾向にあったが、動的な触動作では個人差が観察された。そこで、実験参加者の結果を解析したところ、湿り感の知覚の戦略によって3つのグループに分類でき、人間の湿り知覚メカニズムの多様性が明らかとなった。このような個人差を生む原因として、湿り認知の違い、肌質の違いによる皮膚に加わる摩擦の違いが挙げられる。

第 6 章 湿り感錯覚を生じる刺激の空間配置

本章では、湿り感錯覚を生じる刺激の空間配置について調べる。実験 1 として、人差し指・中指・薬指の 3 本指で触れた湿りあるいは乾燥刺激の感覚が均一に感じられるのかを検証し（第 6 章 2 節）、実験 2 として両隣の指で触れた刺激によって中指の乾燥感に影響するかを検証した（第 6 章 3 節）。

6.1 湿り刺激の空間配置

第 1 章 2 節 2 節において説明したように、日常生活では物体の湿った部分と乾いた部分が同時に皮膚の異なる領域に触れることがある。こうした状況では温度相互参照作用（Thermal referral）のように、人間の知覚特性から空間的に異なる身体部位に提示された湿りあるいは乾燥刺激の感覚が変容する可能性がある。温度相互参照作用では、中指に中程度の温度刺激、その両側の人差し指と薬指に温かいあるいは冷たい温度刺激を与えると、全ての指が温かくあるいは冷たく知覚される（Green, 1977; Ho et al., 2011, 図 1.2.2 (a)）。温度相互参照作用より錯覚する温冷感 は 3 本指均一であり、3 本指すべて物理的に同じ温度で刺激したときよりも弱く知覚されることが実証されている（Ho et al., 2011, 図 1.2.2 (b)）。この知見から、温度相互参照作用が生じるメカニズムとして、3 本指で知覚される温冷感を平均化する処理が行われていると仮定されている（Ho et al., 2011,）。また、粗さ感でも相互参照作用を生じ、中指とは異なる粗さの刺激を人差し指と薬指でなぞるとき、中指の粗さ知覚は両隣の指の粗さ刺激（粗い・滑らか）にともない変化することが明らかにされている（荒井, 岡嶋, 2009）。したがって、温度感覚や粗さ感覚が影響する、湿り感についても周囲の刺激を参照して、物理刺激とは異なる感覚として錯覚する可能性がある。

本章では温度相互参照作用を湿り感に応用し、3 本指で触れたとき湿り感錯覚を生じる刺激の空間配置について調べる。温度相互参照作用と同様に湿りも相互参照作用が生じるのであれば、中指の刺激が両隣の 2 指とは異なる場合、中指も両隣の 2 指と同様の刺激に触れているように錯覚すると予想される。実験 1（第 6 章 1 節）では、中指と他の 2 指が異なる刺激に触れる条件のとき、中指のみ異なる刺激に触れていることを識別できるかを評価した。実験 2（第 6 章 2 節）では、人差し指と薬指における乾燥と湿り刺激の組み合わせが中指の湿り感に影響するかを評価した。

6.2 実験1：中指の均一性判断実験

温度相互参照作用のように、中指に触れている乾燥あるいは湿り刺激が両隣の指に触れる刺激とは異なるとき、3本指に感じられる湿り感が均一に感じられるのかについて調べるために、信号検出理論を用いて3本指から知覚される湿り感の均一性を評価した。

6.2.1 実験手法

実験の様子を図 6.2.1 に示す。実験参加者は右手の3本指（人差し指・中指・薬指）で3つの評価刺激に同時に触れた（図 6.2.1 (a), (c)）。試料布は大きさ 2×7cm、乾燥状態の重量が 0.29g の綿 20 シーチングを用いた。スチール製の机の冷たさが布ごしに伝わるのを防ぐため、布刺激はウレタンボードの上に3枚並べて提示した（図 6.2.1 (c)）。刺激は含水分率の異なる乾燥と湿りの2つを設定した。乾燥（Dry; D）刺激は試料布を実験室（室温 25℃、湿度 30%RH）に1時間以上放置した。湿り（Wet; W）刺激は、乾燥状態の試料布を水分の保持性能に優れたスポンジで挟むという方法で水を含ませた。含水分率はデジタルはかり（HT-120, 株式会社エー・アンド・デイ）を用いて、乾燥刺激の布の重量と水を含ませ実験参加者が評価した後の重量を測定して算出した。Wet 刺激の含水分率は 65%から 95%（布に含んだ水分重量：0.19 から 0.27g）とした。なお、Dry 刺激の含水分率の変化（実験前と評価後の布の重量比）は 6%以下であった。実験では Dry 刺激と Wet 刺激を3つ並べ、参加者は3本指で同時に触った。本論文では、刺激の配置を簡略化するため、人差し指・中指・薬指の順で触れる刺激の頭文字で表記する。たとえば、人差し指と薬指で Wet 刺激・中指で Dry 刺激に触れる場合、WDW と表す。

実験参加者から刺激が見えないように、刺激上部に衝立を立て、参加者は衝立の下から手を差し込んで刺激に触れた（図 6.2.1 (b), (c)）。図 6.2.1 (c) に示すように、衝立の下にはレールがあり、参加者はレールに沿って指を差し込んだ後、指を下におろして刺激に触れた。刺激は触れたら動かさず（静的接触）、自然な力加減で触れるように教示した。

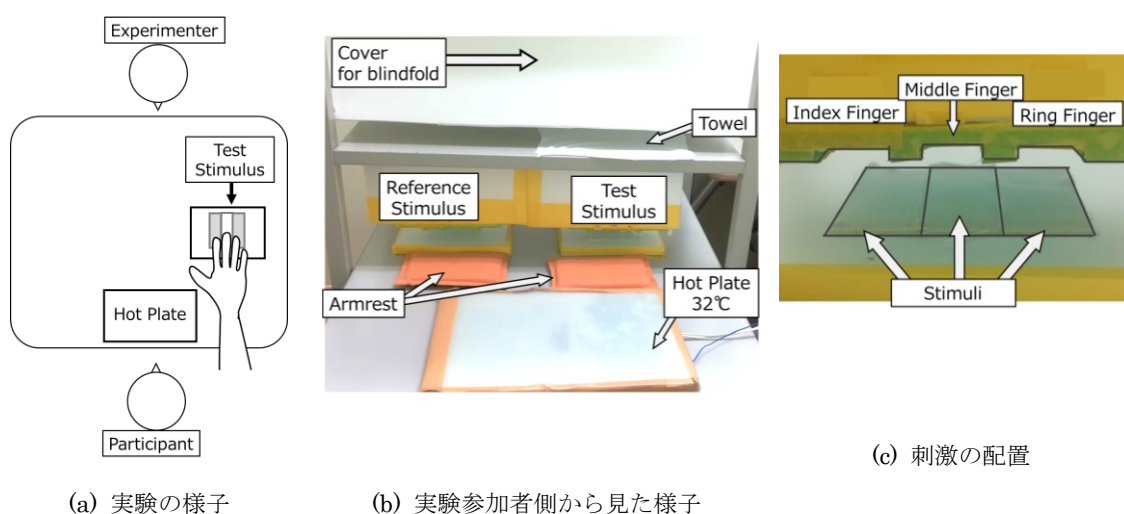


図 6.2.1 実験環境

実験 1 では、中指が両隣の指で触れる刺激と異なるときの湿り感の均一性を評価するため、信号検出理論を用いた。信号検出理論とはノイズに埋もれた信号の検出力を調べるための手法で、今回の実験では、WDW 条件や DWD 条件のように中指に触れる刺激が両隣の指と異なるとき、物理的に均一な条件（DDD 条件や WWW 条件）と弁別できないほど均一か否かを検証した。実験を、DWD と DDD、WDW と WWW の 2 つのセットに分け、各セットでは 2 つの条件（DWD と DDD あるいは WDW と WWW）をランダムに提示した。参加者は右手で触れた評価刺激について、3 本指の湿り感の強さが均一に感じるか否か（A・Not-A 法）を回答した。セットの順番は参加者ごとにランダムに変えた。各条件につき 10 回反復して提示し、合計 40 試行（条件：2×セット：2×反復：10）を行った。参加者の集中を維持するために、セット間に 30 分の休憩を設けた。

実験の手順は次のとおりである。実験前に、参加者が湿りを識別できるのかを確認するため、DDD 条件や WWW 条件に触れながら評価の練習を数回行った。各試行の前に参加者は 32°C に設定したホットプレートに触れることで指の皮膚温度を調整した。セットで最初の試行の前には 5 分、各試行間は 30 秒間ホットプレートに触れた。ホットプレートに触り、皮膚温度の調整時間が終了すると音が鳴る。この音を合図に、参加者はホットプレートから手を離し、3 本指を衝立の下から差し込み、ルールに沿って下におろし、布に 5 秒間静止したまま触れた。触れて 5 秒が経過すると参加者は口頭で「均一に感じる or 感じない」かについて口頭で回答した。評価が終わると、参加者はタオルで手の水分をふきとった。この手順を繰り返した。

実験参加者は 12 人（女性 11 人・男性 1 人、21～50 歳）で、実験は NTT コミュニケーション科学基礎研究所の倫理審査委員会の承諾を得たうえでを行い、実験の報酬として謝金を支給した。参加者へは予め実験内容を説明し、同意を得たうえで実験を実施した。

6.2.2 解析手法

信号検出理論に基づき、得られた回答確率を感覚弁別力 (Sensory discriminability; d') の観点から分析した。物理的に均一ではない条件 (WDW または DWD) に触れたときに「3 本指が均一ではない」とした回答を正答 (Hit) とし、物理的に均一な条件 (WWW または DDD) に触れたとき「3 本指が均一ではない」とした回答を誤警報 (False Alarm) と定義した。これらの回答確率 (P_{Hit} と P_{FA}) を正規分布曲線から感覚弁別力 d' を計算した。 d' はこの 2 つの回答確率分布の平均値間の距離から求められ、 d' の値は感覚弁別力の指標として扱われる (Ennis, 1993; Bi, 2006)、 d' の値が大きいほど 2 つの刺激を弁別しやすく、小さいほど 2 つの刺激の弁別が難しいことを意味する。実験より得られた正答確率 (P_{Hit}) と誤警報確率 (P_{FA}) から累積分布関数の逆関数 (Z 値) を算出し、 d' は $Z(P_{Hit}) - Z(P_{FA})$ で求められる。

本節では、DDD 条件と DWD 条件、あるいは WWW 条件と WDW 条件の弁別能力を比較することで、物理的に均一ではない条件 (WDW または DWD) の均一性と、物理的に均一な条件 (WWW または DDD) の均一性が弁別できるのか否かを検証した。そのため、各条件を 10 回評価した際の P_{Hit} と P_{FA} を求め、Microsoft Excel の NORM.S.INV 関

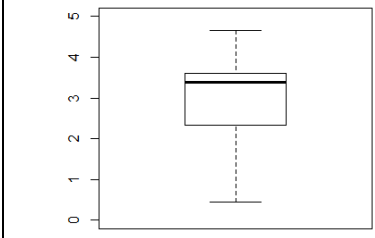
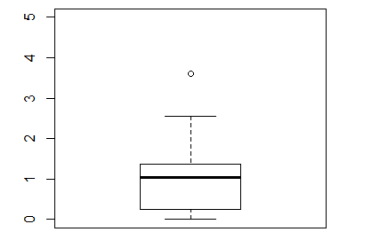
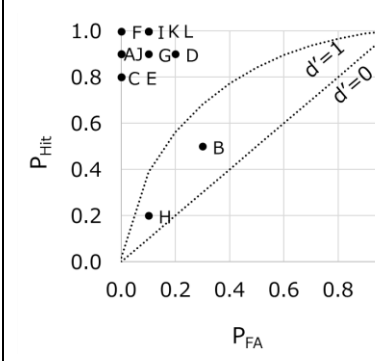
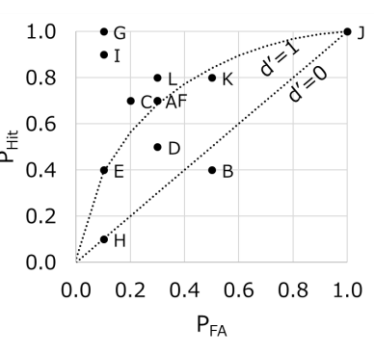
数によって Z 値を算出し、Bi による d' 分布表 (Bi, 2006) を参照して各参加者の回答確率に対応する d' の値を求めた。

6.2.3 実験結果

全実験参加者の d' の中央値や各実験参加者の回答確率を表 6.2.1 に示す。表 6.2.1 (a), (b) より, DDD 条件と DWD 条件のセットでは全実験参加者の d' の中央値は 3.39 である一方, WWW 条件と WDW 条件のセットでは d' の中央値は 1.04 となり, WDW 条件の不均一を弁別する指標となる d' は DWD 条件の不均一の弁別に比べ小さくなった。表 6.2.1 (c) は各参加者の回答確率の分布を示す。グラフの縦軸は P_{Hit} , つまり物理的に均一ではない刺激に触れたときに「均一ではない」と回答した確率, 横軸は P_{FA} , つまり物理的に均一な刺激に触れたときに「均一ではない」と回答した確率を表す。特に左上にプロットされるほど, 物理刺激のとおり均一と不均一を判断できていることを表す。グラフ中の 2 本の点線は $d'=0$ と $d'=1$ に対応する位置を示す。特に, $d'=1$ 以下となった実験参加者は 2 つの刺激を弁別できなかったと示唆される。結果として, DDD と DWD の均一性の弁別では 2 名 (参加者 B・H) を除いた, 10 名の参加者は d' の値が 2 以上となり, 多数の実験参加者が $d'=1$ 以上となった。一方, WWW と WDW の均一性の弁別では, 2 名 (参加者 G・I) を除いた 10 名の参加者は d' の値が 1.5 以下となっており, 多数の実験参加者の d' が 1 に近いあるいは 1 以下となった。

以上の結果から, 過半数の実験参加者にとって DWD 条件は均一ではないと明確に判断できるが, WDW 条件は WWW 条件と同じように均一に感じられることが示唆された。

表 6.2.1 実験 1 の結果 : 全参加者の d' の中央値と各実験参加者の結果

	DDD/DWD	WWW/WDW
(a) d' の中央値と偏差		
(b) d' の中央値	3.39	1.04
(c) 全実験参加者の回答割合		

6.3 実験2：中指の乾燥感の評価

3本指で乾燥あるいは湿り刺激に触れたとき、中指の乾燥感に両隣の指で触れた刺激が影響するか否かを調べるために、湿りあるいは乾燥刺激の配置を変えたとき中指で知覚される乾燥感の強度を評価した。

6.3.1 実験手法

実験の様子を図6.3.1に示す。試料布や含水水分率は前節（第6章2節）と同様である。実験参加者は右手の3本指（人差し指・中指・薬指）で3つの評価刺激に同時に触れた（図6.2.1(c)）。同時に、左手では参照刺激としてDDD条件に触れた。

実験2では、中指の乾燥知覚が両隣の湿りあるいは乾燥刺激によって影響を受けるのかを検証するため、実験参加者は右手の中指が参照刺激と同程度に乾燥と感じるか否か（A-Not-A法）について回答した。評価刺激として、湿りと乾燥刺激の空間配置を変えた8条件を提示した。具体的には、中指が乾燥刺激に触れる、乾燥グループとして4条件（DDD, DDW, WDD, WDW）、湿りグループとして4条件（DWD, DWW, WWD, WWW）を設定した。各条件10試行反復を行い、合計80試行を行った。全80試行を5セットに分け、1セットは16試行で、各条件2回の評価をランダムに行った。参加者の集中を維持するために各セット間30分の休憩を設けた。

実験2の実験参加者は実験1と同じで、同日に実施した。皮膚温度の調整方法や刺激の触り方は前節（第6章2節）と応用である。

6.3.2 解析手法

10回の評価の内、「右手の中指で触れた評価刺激が参照刺激（DDD条件）と同程度に乾燥していると感じる」と回答した確率を算出した。中指で触れた乾燥あるいは湿り刺激において、両隣の刺激が及ぼす相互参照作用の影響を比較するために、乾燥グループ

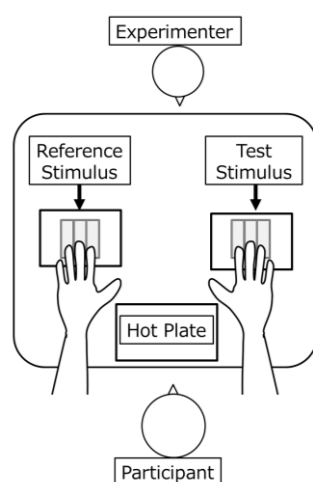


図 6.3.1 実験の様子

(DDD, DDW, WDD, WDW) と湿りグループ(DWD, DWW, WWD, WWW)において、得られた回答確率を統計的に比較した。得られた回答確率を Microsoft Excel の関数を用いて arcsine 変換を施し、統計ソフト R を用いて乾燥グループと湿りグループにおいて一要因分散分析を行った。

6.3.3 実験結果

図 6.3.2 は全参加者がレファレンス (DDD) と同じように「乾燥している」と回答した確率の平均値を示す。DDD 条件は 96.7%の確率で “乾いている”, WWW 条件は 1.7%の確率で “乾いている” と回答された。つまり, 3 本指が物理的に均一な刺激に触れる条件については高確率で “乾燥” あるいは “湿り” を弁別できたといえる。中指に両隣の 2 指とは異なる刺激に触れる WDW 条件は 37.5%, DWD 条件は 10.0%で “乾いている” と回答された。WDW 条件は中指が乾燥刺激に触れているが, DDD 条件と比べ乾燥感の評価確率は低く, 50%チャンスレベルと比べても有意に低かった ($p < 0.05$)。

中指の乾燥知覚における, 周囲の乾燥あるいは湿り刺激の空間配置の影響を比較するために, 乾燥グループと湿りグループで一要因分散分析を行った結果, 乾燥グループと湿りグループ共に条件の主効果に有意差が見られた (乾燥グループ: $F(3, 44) = 19.1, p < 0.05$, 湿りグループ: $F(3, 44) = 4.03, p < 0.05$)。さらに, 下位検定として Holm の方法による多重比較を行ったところ, 乾燥グループでは DDW 条件と WDD 条件以外の組み合わせで有意差が見られた ($p < 0.05$)。湿りグループでは, DWW 条件と WWD 条件と, DWW 条件と WWW 条件のみで有意差が見られた ($p < 0.05$)。

以上の実験 2 の結果として, 物理的に均一な刺激 (DDD 条件・WWW 条件) に触れた場合は, 高確率で湿りと乾燥を弁別できる。しかし, 中指が乾燥刺激に触れていても, 両隣の指のいずれかで湿り刺激に触るとき, 乾燥と知覚される確率が低下し, 特に両隣の指がどちらも湿り刺激の場合 (WDW 条件) はチャンスレベルを有意に下回った。一方, 中指が湿り刺激に触れている場合は, DWD 条件について乾燥と知覚される確率は WWW 条件と有意差がなかった。

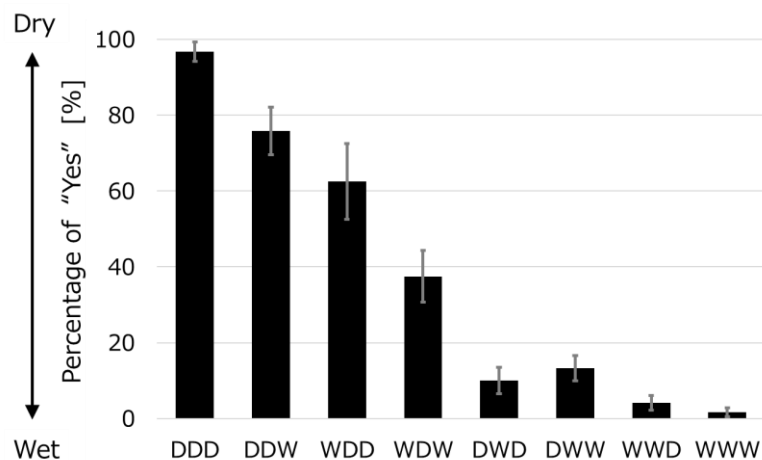


図 6.3.2 実験 2 の結果: 「乾燥している」と回答した確率と標準誤差

参加者は評価刺激の中指が参照刺激 (DDD) と同程度に乾燥していると感じるか否かを回答した。

6.4 考察：湿り感錯覚を生じる刺激の空間配置

本章（第6章）では、手の3本指（人差し指・中指・薬指）で乾燥刺激あるいは湿り刺激に触れたときの、相互参照作用を調べるため2つの実験を行った。第6章2節における実験1では、外側の2本指で湿り刺激、中指で乾燥刺激に触れるWDW条件、あるいは外側2本指で乾燥刺激、中指で湿り刺激に触れるDWD条件、から知覚される3本指の湿り感あるいは乾燥感の均一性を評価した。第6章3節における実験2では、湿りあるいは乾燥刺激の空間配置を変えたとき中指の乾燥感を評価した。結果として、WDW条件は3本指で均一な湿りを知覚しやすいことが明らかとなった。一方、DWD条件は3本指で均一な乾燥を知覚しにくく、中指には湿り感を知覚していた。この結果より、人差し指と薬指で湿り刺激、中指で乾燥刺激に触れる条件では、3本指の湿り知覚が平均化される湿り相互参照作用（Wet referral）といえる錯覚が見いだされた。

湿り相互参照が生じるメカニズムとして、温度相互参照（Thermal referral）を仲介したと考える。人間は水を直接検出できないことから、湿り刺激に触れた人差し指と中指の冷感から、中指には温度相互参照による冷感を錯覚し、さらに冷たい乾燥を“湿っている”ように錯覚した可能性がある。3本指で得られた触感覚の統合は、感覚受容器の神経伝達あるいは大脳体性感覚野に投射された領域上（感覚投射野）で生じると推測する。前者に関しては、指先の神経系では人差し指と中指が同じ神経が通っていることで説明できる。人差し指と中指はともに正中神経、薬指は正中神経と尺骨神経の両方が通っていることから、3本指の触覚刺激が神経系で統合される可能性がある。後者に関しては、異なる指における触覚刺激の情報が脳内で統合されることが示されている（Biermann et al., 1998, Forss et al., 1995, Gandevia et al., 1983, Iwamura et al., 1983, Kahrimanovic et al., 2009）。そのため、3本指の内、人差し指と薬指で受容した湿りの感覚情報が脳における感覚投射野で重なり、乾燥刺激に触れた中指も湿った刺激に触れていると錯覚する可能性もある。

周囲に湿り刺激がある中に乾燥刺激がある条件（WDW条件）は中指の乾燥刺激を検出できないが、周囲に乾燥刺激がある中に湿り刺激がある条件（DWD条件）は中指の湿り刺激を正しく検出できた。この結果は、人間にとって乾燥刺激よりも湿り刺激は顕著性が高いと認識しているからでないかと考えられる。触覚探索課題（haptic search）の研究では、冷刺激や粗さ刺激が温刺激や滑らかさ刺激に比べ顕著性が高いことが示されている。複数の滑らかな物体からひとつの粗い物体を見つけ出す時間は、複数の粗い物体の中からひとつの滑らかな物体を見つけ出す時間よりも短いこと（Plaisier et al., 2008; van Polanen et al., 2013）、複数の温かい物体とひとつの冷たい物体の中から、冷たい物体の存在の有無を評価するときにかかる時間は、温かい物体のみの中から冷たい物体の存在の有無を評価する時間は短いこと（Plaisier and Kappers, 2010）が知られている。すなわち、複数の湿り刺激の中の乾燥刺激（WDW条件の中指の乾燥）は見つけにくい（顕著性が低い）と解釈できる。一方、複数の乾燥刺激の中にある湿り刺激（DWD条件

における中指の湿り)を乾燥という知覚に平均化するということは、顕著性の高い刺激の顕著性を下げるといふ操作(湿り刺激を乾燥と知覚させる)となり、そもそも顕著性は外界の状態を効率的に推定するための重要な手がかりとなる機能であるためこの操作が実現することは難しいのではないかと推測する。

6.4 まとめ

手の3本指（人差し指・中指・薬指）で乾燥あるいは湿った刺激に触れる2つの実験を行った。実験1では、外側の2本指で湿り刺激、中指で乾燥刺激、あるいは外側2本指で乾燥刺激、中指で湿り刺激、に同時に触れたとき3本指から知覚される湿り感の均一性（uniform or not）を評価した。実験2では、湿りあるいは乾燥刺激の配置を変えたとき、中指で知覚される乾燥（dry or not）を評価した。結果として、湿り刺激を外側2本指、乾燥刺激を中指で触れるとき均一な感覚を生起し、中指の乾燥知覚を弱めた。一方、乾燥刺激を外側2本指、湿り刺激を中指で触れるとき、明確に不均一を判断でき、中指の乾燥知覚は上昇しなかった。この結果より、湿り相互参照（Wet referral）といえる錯覚が見出された。

この湿り相互参照作用は、中枢神経系あるいは脳のどちらかで3本指で受容した湿り感を平均化する処理が行われているのではないかと考える。また、周囲の乾燥刺激は湿り刺激の検出精度に影響しなかったのは、人間にとって外界の状態を効率的に推定するために湿り刺激は顕著性の高い刺激と認知していると考えられる。

第7章 総合考察

第2章から第6章では、湿り知覚メカニズムに関する理解を深めるために、乾燥した物体に触れているにも関わらず湿り感を錯覚する現象がどのような条件下で生じるのかを調査した。本章では、これらの実験から得られた知見に基づいて湿り知覚メカニズムについて考察し（第7章1節）、またこれらの知見がどのように工学的な感覚情報提示手法や肌に触れる製品開発に応用できるかについて議論する（第7章2節）。

7.1 湿り知覚メカニズム

これまでの研究において明らかにされてきた湿り感や他の触知覚の情報処理過程を踏まえると、湿り知覚に関与する要素は図7.1.1のように整理できる。まず素材の物理特性については、乾燥した素材に水を含ませて湿らせると、その素材の熱抵抗や表面形状などの物理特性が変化する。次に、湿った素材と皮膚が接触すると、皮膚の接触面に接触者の肌質や触り方（運動）に応じた、皮膚変形や皮膚振動、皮膚と素材の間の熱移動などの皮

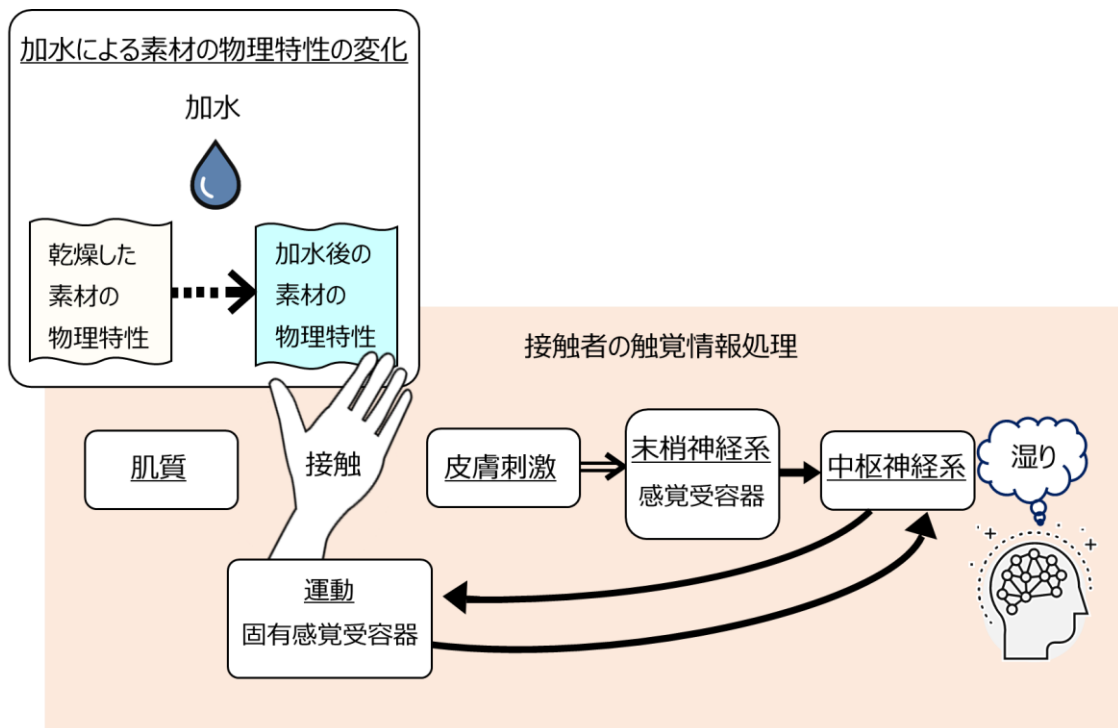


図 7.1.1 湿りの知覚プロセス

破線の矢印は加水による素材の変化，二重線の矢印は皮膚に加わる刺激の入力，実線の矢印は神経信号の流れを表す。四角で囲んだものが湿り知覚に関与すると考えられる要素を示す。

膚刺激が生じる。こうした皮膚刺激を皮膚下に存在する感覚受容器が検出し、神経信号として伝達し、脊髄を経由して大脳体性感覚野（somatic sensory cortex）に投射される。また、接触者が手や腕を動かして素材に触れると、筋肉や腱、関節にある固有感覚受容器の応答によって筋肉の伸縮や関節の角度など手や腕がどのように動いたかに関する情報（固有感覚）が中枢へ送られる。特に能動的に手や腕を動かす場合には適切な運動が達成できたかを監視するために、生成された手や腕への運動信号が遠心性コピーとして複製され、固有感覚などとの比較のために用いられる。中枢神経系に送られた神経信号パターンを、接触者の触覚経験のデータベースも加味して解釈し、湿りを判断すると考えられる。このプロセス図（図 7.1.1）をもとに、本論文や様々な触覚情報処理に関する先行研究で得られた知見を整理すると、図 7.1.2 のように示すことができる。

【加水による素材の物理特性の変化】

水分を含むことによって、素材の熱伝導性が顕著に変化する。第 2 章 1 節で加水前後の布の熱伝導特性を計測したところ、布の含水分率が高いほど熱伝導特性を表す熱流束が大きくなった。これは水の熱伝導率が空気よりもはるかに大きいため、水分を多く含んだ布ほど熱が移動しやすくなるためと考える。

加水による圧縮特性の変化については、布の風合い評価システム KES を用いて布の圧縮特性値を計測したところ、加水前後において大きな差は見られなかった（第 2 章 2 節）。この結果は、KES では加水による素材の圧縮特性の変化を計測できなかったか、もしくは素材が水を含んでも圧縮特性はそれほど変化しなかったという 2 つの説を示唆する。

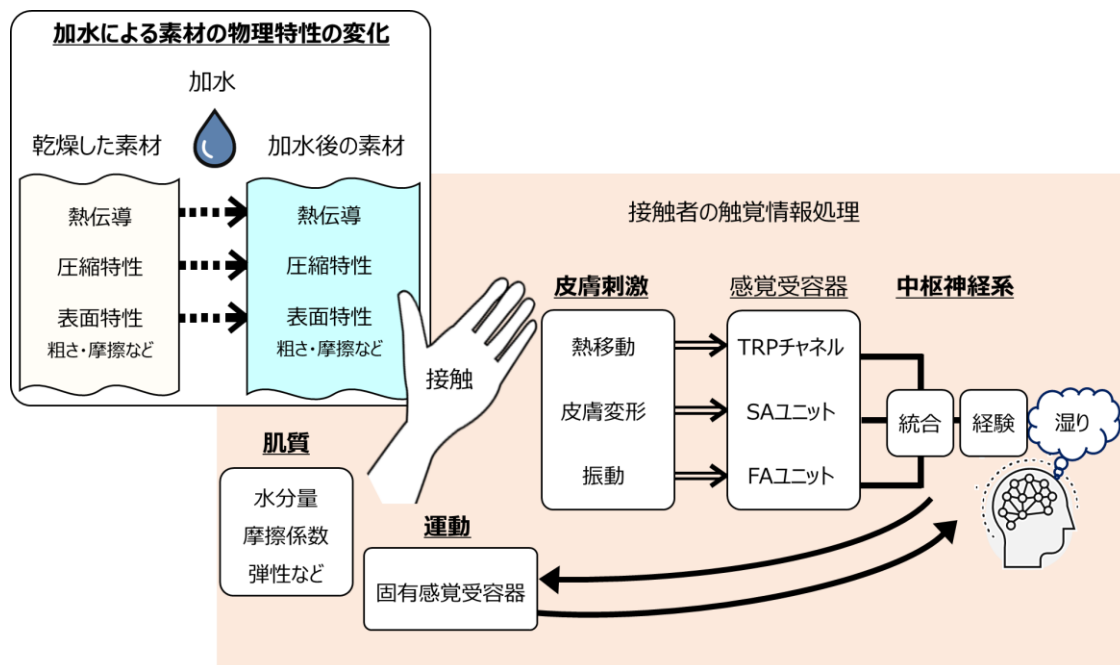


図 7.1.2 湿りの知覚メカニズム仮説

破線の矢印は加水による素材の変化，二重線の矢印は皮膚に加わる刺激の入力，実線の矢印は神経信号の流れを表す。四角の中に示すものが湿り知覚に関与すると考えられる要素を示す。本研究で提案された部分を太字で示す。

加水による表面特性の変化として、粗さと摩擦が挙げられる。KES を使って加水前後の布の表面粗さ計測に加えて粗さ感を評価した研究では、加水前の布の表面粗さと粗さ感の評価は強い相関が示された一方で、加水後の布の表面粗さと粗さ感の評価には相関が弱かった (Raccuglia et al., 2017)。この研究より加水によって布の表面粗さあるいは粗さ感が変化したこともわかっていることから、前述した KES では心理評価に則した湿った布の物理特性を計測することが難しいという説を支持する。本来 KES は乾燥した状態の紳士用スーツ地を主対象とする風合い評価手法のため、湿った布の物理特性を計測することには適していないと考えられる。一方で、加水によって布の圧縮特性や表面粗さがほとんど変化しない説が正しいとすると、圧縮特性や表面粗さとは別の物理特性が湿った布の粗さ感などの触り心地に影響すると考えられる。たとえば、本論文において加水によって布の摩擦係数は変化し、水分を含んだ布は乾燥した布よりも摩擦係数が大きい結果となった (第 5 章)。他の先行研究でも同様の結果が得られており、少量の水分が含まれている場合は摩擦が強まるのが明らかにされている (Egawa et al., 2002; Sivamani et al., 2003; Derler and Gerhardt, 2012)。ただし、ある一定の水分量を超える場合、たとえば皮膚と素材の間に液体が存在する (例：濡れた皮膚でガラスをなぞる、含水分率 120% の布をなぞる) ような状況では流体潤滑が作用し、摩擦は減少する (Adams et al., 2007; Derler et al., 2009; Tomlinson et al., 2011; 木下, 2011)。

このような加水に伴う摩擦の変化が、Raccuglia らの研究結果における布の粗さ感に影響したとも考えられる。素材表面の粗さと摩擦は強く関係しており、乾燥した皮膚とガラスなどの硬い素材との間に生じる摩擦は素材表面が粗くなるほど小さくなる (Skedung et al., 2010; Hendriks and Franklin, 2010; Derler et al., 2009; Derler and Gerhardt, 2012)。こうした知見から、人間は表面粗さと摩擦を独立に判断できないと結論づけている研究もある (Hollins et al., 2000; Smith et al., 2002; Smith and Basile, 2010)。また、Bowden と Tabor による摩擦理論 (Bowden and Tabor, 1954) に基づくと、摩擦は物体の弾性や接触面積にも影響を受ける (Adams et al., 2007; Warman and Ennos, 2009; Derler and Gerhardt, 2012; Adams et al., 2013)。皮膚のような弾性体と物体との接触を想定すると、物体間に分子間力などの相互作用によって凝着が生じる。凝着摩擦 f_{ad} は物体間の接触面積 A の凝着がせん断強度 τ で破壊されるとき抵抗で、

$$f_{ad} = \tau A \quad (7.1.1)$$

と表される。ここで、接触面積 A は (4.2.1) 式の Hertz の接触理論 (Hertz, 1895; 高山ら, 2008) を当てはめると、

$$f_{ad} = \tau \pi \left[\frac{3}{4} p \left(\frac{1-\nu_A^2}{E_A} + \frac{1-\nu_B^2}{E_B} \right) / \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (7.1.2)$$

α : 接触面積の半径 (mm)

p : 押下圧 (N)

R_A : 物体 A の曲率半径 (mm)

R_B : 物体 B の曲率半径 (mm)
 E_A : 物体 A のヤング率 (N/mm²)
 E_B : 物体 B のヤング率 (N/mm²)
 γ_A : 物体 A のポアソン比
 γ_B : 物体 B のポアソン比

となる。すなわち、摩擦力は接触面積 A や接触対象の物体のヤング率積 E にも影響を受け、物体が柔らかいほど摩擦力が大きくなる (Adams et al., 2007; Warman and Ennos, 2009)。このことから、皮膚と加水前後の素材の接触による摩擦の計測から、加水前後の素材の弾性や粗さの変化も捉えることができるとも考えられる。

また、本研究では扱っていないが、加水後の時間経過によっても物理特性は変化する。時間が経つほどに布に含まれている水分量が減少し、知覚される湿りも弱まる (Chau et al., 2018)。こうした刻々と変化する湿り感を評価するためには、時系列官能評価 (Temporal Dominance of Sensations) が利用できる可能性がある。この評価手法は食品を対象によく用いられているが (Okamoto et al., 2020)、触覚にも用いられた例もある (中野ら, 2019)。湿り感の時系列官能評価を行うと、湿った素材に触れた直後は冷感、その後滑らかさや柔らかさといったように手がかりが変わっている可能性もあり、第 5 章の実験において観察された個人差は、実験参加者によって判断するタイミングが異なっていたことが原因となった可能性もある。

【肌質】

たとえ実験参加者が同じ物理刺激に触れ、同じ触り方をしたとしても、皮膚の状態によって湿り知覚が異なることも考えられる。皮膚の水分量と触覚の弁別能力は相関があり、(Gueorguiev et al., 2016)、加齢にともない触覚の弁別能力が低下することから、皮膚の摩擦係数・水分量・弾性と触覚の弁別能力との関連が示唆されている (Skedung et al., 2018)。また、触覚は女性の方が優れていると言われることが多いが、その違いは指の大きさに起因すると結論づけている研究がある (Peters et al., 2009)。

このように、皮膚の水分量や摩擦係数、弾性、指の大きさによって素材との接触面積や摩擦の違いが生じることが、湿り知覚における個人差の原因になっていることが示唆される。実際に第 5 章の実験において、湿り知覚の戦略が異なるグループ間で実験参加者の皮膚に加わる摩擦の時間変化 (表 5.4.1) に違いが見られ、なぞり動作でも冷たい乾燥した布刺激を“湿っている”と錯覚したグループでは、乾燥刺激と実際に水分を含んだ布刺激に触れた際の摩擦の差が小さい傾向にあった。こうした個々人の摩擦の変化や湿り知覚に、個々人の肌質が影響している可能性がある。本研究では主に若年女性を対象として湿り感評価実験を行ってきたが、異なる年齢や性別を比較すると皮膚の状態のバリエーションが広がり、湿り感判断の多様性が観察される可能性がある。ただし、先行研究では男性において湿り感錯覚が実証された事例もある (Bergmann et al., 2012b; Filingeri et al., 2014d) ため、冷刺激による湿り感錯覚は性別によらず生じると考えられる。

【運動】

人間が能動的に手や腕を動かすために、まず運動中枢から手や腕を動かすための筋肉への運動指令を出される。運動が行われ物体に触れると、運動制御に関する腱や関節にある固有感覚受容器の情報や運動指令の複製である遠心性コピーの情報、また皮膚と物体との相互作用によって得られる皮膚刺激の感覚受容器情報を統合し、物体の材質判断を行うと考えられている(小川, 2007)。本論文において、手掌で静的に触れるとき押し込み方向に対する手掌の移動量つまり固有感覚と、皮膚と物体の接触面積つまり皮膚感覚のどちらが冷たさによる湿り感錯覚に寄与が大きいのかを検証した(第4章2節)。その結果、接触面積の寄与が大きいことを示唆した。なぞり運動では過半数の実験参加者は冷たい乾燥刺激からは湿り感を錯覚せず、湿り刺激との摩擦の違いから判別したと示唆される(第5章)。したがって、手や腕の動かし方や、そのとき得られる皮膚刺激などの情報を統合して湿り感を判断していると考えられる。

物体に触れる際の手や腕の動かし方と皮膚刺激の関連性から、触動作によって触り心地の知覚は変化する。たとえば、物体表面をなぞるときの押し付け力の強さを変えるとその物体に対する粗さ評価値が変わることが知られている(Lederman and Taylor, 1972; Lederman, 1974)。本論文でも、触り方が湿り知覚に影響し、なぞり動作より静的接触の方が冷覚による湿り感錯覚を生じやすいという結果を得た(第5章)。この結果は、ある触感覚を判断する目的を持って触れるとき、典型的な手の動きパターン(触覚探索運動)が生じる(Lederman and Klatzky, 1987) ことと関係しているかもしれない。温度を判断したいときは手を動かさずに触り、テクスチャを判断したいときは表面をなでるように動かす。このように触り方によって知覚しやすい物体の特徴が異なっていることから、冷たい乾燥刺激に静的接触で触れると温度を手がかりに“湿っている”と判断し、手を動かしてなぞると過半数の人は摩擦などのテクスチャを手がかりに“乾燥している”と判断していると推測される。一方、なぞる触動作でも冷覚から湿り感を錯覚する人も存在していた。このグループは、ある温度の物体をなぞると、同じ温度の物体に静的接触で触れたときよりも、皮膚温度の低下量が増加するという事実に基づいて判断を行っているという推測される。実際、第5章の皮膚温度計測結果(表5.2.2)では静的接触よりもなぞるときのほうが皮膚温度低下量は多くなっており、同様の知見は熱伝導のシミュレーションからも得られている(城ら, 2007)。このことから、湿った素材をなぞるとき、静的接触よりも強く冷たさを知覚することは理にかなっているとも言える。

【皮膚刺激】

物体に触れたとき、皮膚と物体との間に物理的相互作用が生じる。まず素材の熱伝導特性に関して、湿った素材に触ると水の存在により素材の熱伝導が大きくなるため(2.2節)、乾燥した素材に比べ皮膚温度の上昇量あるいは低下量が増す(第2章3節)。本研究の第2章や第3章、第4章では皮膚温度の低下量が大きいほど湿り感が強まっていた。特に第4章2節では皮膚温度の低下量というより、皮膚温度の低下速度が湿り知覚に影響している可能性が示唆された。湿り知覚において最終的な皮膚温度低下量よりも皮膚温度

低下速度がより重要な働きをするという考えは、FilingeriらやDaanenによって皮膚温度低下速度が0.14から0.41°C/sの範囲内の条件であれば湿り感を錯覚することが実証されていること（Filingeri et al., 2014a; Daanen, 2009）、冷たさによる物体識別は最終的な温度変化量ではなく、瞬間的な温度変化の速度に基づいて認識されるということ（Bergmann Tiest and Kappers, 2008）からも支持される。

皮膚と物体表面が接触すると皮膚には変形が生じ、そのまま物体表面上をなぞらせると皮膚と物体間の摩擦の時間的变化によって皮膚上に振動を生じる。特に、湿った素材をなぞると皮膚と物体間の摩擦は固着と滑り（スティック・スリップ運動）を繰り返すことから（Adams et al., 2007）、固着による皮膚変形と滑りによる皮膚振動が湿り感判断の手がかりとなっている可能性がある。

【感覚受容器の応答】

湿った素材に触れることによって皮膚に温度変化や振動変形といった刺激が加わると、皮膚内部に存在する各刺激に対応した感覚受容器が応答する。皮膚の温度変化は自由神経終末などに存在するTRPイオンチャンネルが受容する（Schepers and Ringkamp, 2009; Sokabe and Tominaga, 2009; Caterina et al., 1997; Patapoutian et al., 2003）。中でも、冷刺激（28°C以下）とメントールに感受性を持つTRPM8が水分感の判断に関与していることが示唆されている（Typolt and Filingeri, 2020）。素材に触れたときの皮膚変形はメルケル小体、摩擦に伴う皮膚振動はマイスナー小体、パチニ小体が応答する（Weber et al., 2013）。

第2章では温かい乾燥刺激からは湿り感を錯覚しなかった。このときの皮膚温度の変化は弁別閾値よりも十分大きな温度変化であるため、感覚受容器が温度変化を受容し、知覚できたはずである。それにも関わらず、この皮膚温度の上昇の情報から湿りを知覚しないのは、皮膚温度の上昇（温かさ）の情報は活用しにくいと考えられる。実際、人間の神経処理において、温かさは冷たさよりも神経伝達速度が遅く（Darian-Smith, 1984; Jones and Ho, 2008）、温度弁別閾値も大きい（Stevens and Choo, 1998; Jones and Ho, 2008）ことが知られており、温かさ情報は冷たさ情報よりもその処理コストが大きいと考えられる。また、冷感に敏感な身体部位で特に湿り感を強く錯覚することが明らかにされており（Filingeri et al., 2014b）、温度感覚の感度によって、温度刺激が湿り判断においてどのくらい重要な情報として扱われるかという寄与率が変化する可能性がある。

温度刺激や触覚刺激に対する弁別性能は加齢に伴い低下することが知られている（Stevens and Choo, 1998; Weinstein, 1968）。そのため、幅広い年齢の実験参加者を対象とすると、本研究のような若年女性とは湿りの知覚精度や判断戦略が異なる可能性が示唆される。

【中枢神経系】

素材に触れたときの感覚受容器の応答は神経信号として伝達され、脊髄を經由し大脳体性感覚野に投射される。第6章では空間的に隣接した湿り刺激の存在が湿り知覚に影響

響を及ぼすことが明らかとなった。触覚刺激に対する脳活動を計測した研究では、異なる指における触覚入力と同じ脳部位で表現されていることが示されている (Biermann et al., 1998; Forss et al., 1995; Gandevia et al., 1983; Iwamura et al., 1983; Kahrmanovic et al., 2009)。そのため、手の人差し指と薬指で触れた湿り刺激の感覚情報が脳内に投射された領域上で重なり、乾燥刺激に触れた中指にまで湿り感を錯覚したと示唆される。

第 5 章で湿り感の判断戦略に個人差が観察されたことから、人間は各々の湿り刺激に遭遇したこれまでの経験に基づいて湿り感の判断基準を構築していることが示唆される。本論文の第 2 章において冷たく乾いた素材からは湿り感を錯覚したが、温かく乾いた素材からは湿りを錯覚しなかった。たとえば、自然界にあるものの多くは皮膚温度よりも低い温度であるため、湿った素材に触れたときは冷たく感じる経験が多い。この経験を基に、物体に触れたときに冷たく感じた際に、その原因の一つとして物体が湿っている可能性が高いと推定することができる。反対に、温かい湿りは自然に生じにくく、温かい湿り刺激に遭遇する確率は冷たい湿り刺激に遭遇する確率よりも低い。そのため、物体に触れたときに温かく感じてその原因として物体が湿っている可能性を考慮しないと考える。この仮説が正しければ、日頃から温かいお湯に触れる頻度が高い人は、温かい刺激に対して湿りをその原因として推定する可能性が示唆される。

また、第 6 章で両隣の指で湿り刺激に触れているとき、乾燥刺激に触れている中指で湿り感を錯覚したのは、物体上で湿りの空間分布は一様であることが多いという経験に基づいていると推測される。この仮説が正しければ、日頃から局所的な湿り判断を頻繁に行う人では、中指における湿り錯覚が起こりにくいと予想される。一方で、人差し指と薬指で乾燥刺激、中指で湿り刺激に触れたときに中指には乾燥感を錯覚しなかった (第 6 章)。この結果を踏まえると別の説明として、人間にとって湿り刺激は不健康状態を警告する信号的な役割を持ち、人間は健康を維持するために湿り刺激を検出する機能を有しているとも考えられる。

このような日常における湿り経験頻度のような個人的要因と湿り判断戦略の関係を調べることは湿り感研究における今後の課題の一つである。

本節 (第 7 章 1 節) では、人間がどのようにして湿り感を判断しているかについて、加水による素材の物理特性の変化、接触者の肌質、運動、皮膚刺激、末梢神経系、中枢神経系といった要因ごとに解説した。まず、素材が水分を含むことによって熱伝導特性が顕著に変化する。次に、素材に触れるときの接触者の肌質や触り方に応じた皮膚刺激として皮膚の温度変化や摩擦などが生じる。この皮膚刺激に感覚受容器が応答し、神経信号が中枢に伝達される。この神経信号パターンを触覚経験も加味して解釈し、湿りを判断していると考えられる。したがって、人間は実際に湿った素材に触れるとき、あるいは湿った素材に触れた経験的知識に合致する皮膚刺激が生じるとき、湿りを知覚していると示唆される。

7.2 工学的応用

本論文を通して調べてきた湿り知覚メカニズムに関する知見は、バーチャルリアリティにおける湿り感の提示装置の開発や肌に触れる工業製品の開発への応用においても有用である。本節では本論文の知見が工学的応用へどのように貢献可能かについて考察する。

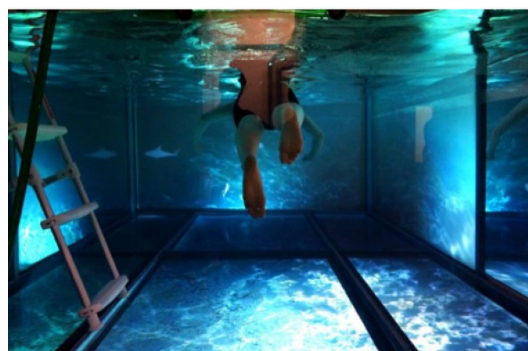
7.2.1 バーチャルリアリティ分野における湿り感提示装置

バーチャルリアリティにおける視覚提示技術を使って、海やプールなどの水中体験を拡張する技術が研究されている(図 7.2.1)。たとえば、体験者が水泳をしながら光学透過型のヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着して、目の前に広がる実際の水中風景にCGを重畳するシステム(Blum et al., 2009, 図 7.2.1 (a))や、プールの側面や底面をリアプロジェクションスクリーンで構成されたプールを泳ぐ体験者に立体的なバーチャル映像を提示するシステム(Yamashita et al., 2016, 図 7.2.1 (b))が提案されている。こうした技術では、大量の水が必要で、体験者が濡れることを前提としている。

ここで、本論文の知見を踏まえると、視覚情報に加えて触覚情報として温度刺激や機械刺激を提示することによって体験者を水で濡らすことなくバーチャルに湿り感を提示できると期待される。本論文の知見として、物体の滑らかさや柔らかさ(接触面積)によって冷たさから錯覚される湿り感が強まること(第3章・第4章)、なぞり動作のとき湿り知覚における冷たさの寄与が小さくなること(第5章)、さらには周囲の湿り刺激の存在が湿り知覚に影響すること(第6章)を明らかにした。これらの知見をもとに、湿り感提示装置の用途や使用状況を例示しながら、刺激の実装形態や提示手法を考察する。触覚提示装置の形態として、デバイスを手や体に装着する装着型、デバイスを指や手などで把持する把持型、体験者が自らデバイスに触れる遭遇型に分類される。それぞれの形態における湿り感提示装置を考察する。



(a) Augmented Reality under water
(Blum et al., 2009)



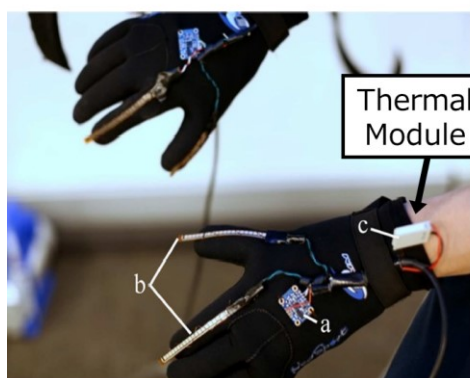
(b) AquaCAVE (Yamashita et al., 2016)

図 7.2.1 水中体験を向上させるバーチャル技術

【装着型湿り感提示装置】

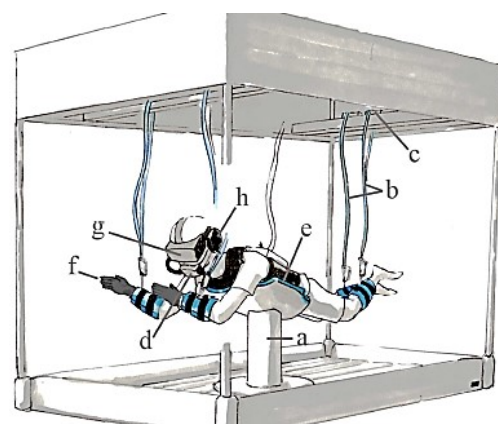
装着型の触覚提示装置はある身体部位に装置を装着した状態でバーチャル体験を行うため、基本的に装置と皮膚は滑りが生じない静的接触を維持する。そのため、装着型の湿り感提示装置は、冷刺激のみで十分である可能性がある。手指に対する装着型湿り感提示装置はバーチャル環境の物体の把持や物体認識に有効である。皮膚あるいは物体の乾湿が把持力調整に影響する (Smith et al., 1997; André et al., 2010; André et al., 2011) ことから、物体把持の際に指先に強い湿り感を提示すると、体験者は指先が発汗している、あるいは物体が濡れていることを想起し、強く物体を把持するというように、バーチャル物体を把持する力を調整させることが可能になると考えられる。また、バーチャル環境の物体に触れたときに手指に湿り感を提示すると、たとえば川に流れる水や結露したグラスなどを手指で触れる体験を実現できる。額や腕、胴体部などへ湿り感を提示すると、顔や体に雨水が体を伝って流れていく感覚や、海やプールに入って水深が深くなっていく体験も実現できると考える。冷刺激に加えてバーチャル環境に適した振動刺激を提示することで湿り感の知覚を強め、バーチャル物体を把持したときの滑りや雨粒が当たったような感覚まで再現する、臨場感あるバーチャル体験を実現できると期待される。

実際に装着型の湿り感提示装置が開発されている例がある。まず、バーチャル環境でのスキューバダイビング体験を実現する試みで、温度刺激提示装置が使われている (Jain et al., 2016, 図 7.2.2)。この研究は手首に冷刺激を提示することで水深に伴って変化する水温を再現しながら (図 7.2.2 (a)), 視聴覚や運動感覚、浮力など複数の刺激を組み合わせ提示することで水に浸からずにスキューバダイビングを実現することを目指している (図 7.2.2 (b))。また、額を対象とした装着型湿り感提示装置が開発されている。この装置はヘッドマウントディスプレイ (HMD) の肌に触れる面にペルチェ素子や振動子を搭載している (Peiris et al., 2018, 図 7.2.3)。HMD で水に触れる体験に関する映像を提示し、同時に触覚刺激 (冷刺激, 冷刺激+振動刺激) を提示したときの、知覚される湿り感の強度や映像との整合性 (Realism) などが評価されている。結果として、冷刺激と



(a) グローブ型湿り感提示装置

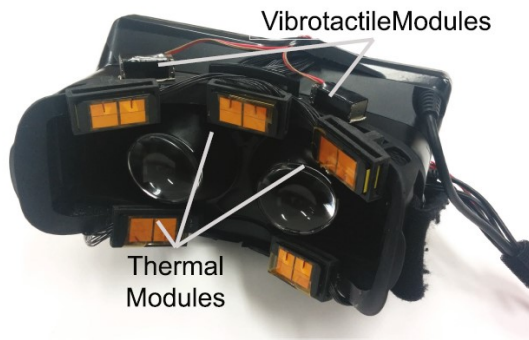
手首に装着したペルチェ素子によって水深にともなった冷刺激を提示する。



(b) バーチャルスキューバダイビング体験の様子

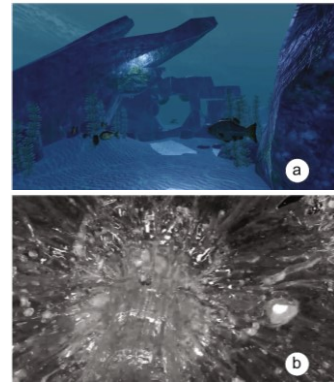
手足の運動感覚や体の浮力、温度刺激、視聴覚を提示する。

図 7.2.2 バーチャルスキューバダイビング (Jain et al., 2016 より再構成)



(a) 装置概観

5つの温度提示装置と2か所の振動子を配置している。



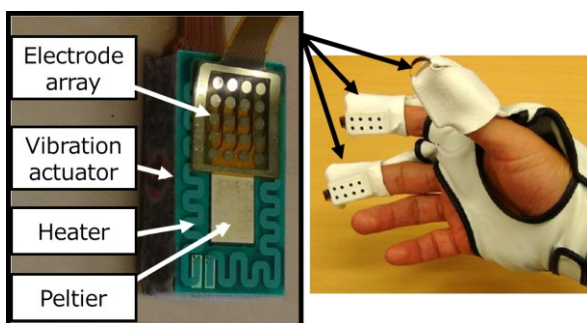
(b) 視覚情報

評価実験で海底探索のシーン（上）と水滴のシーン（下）を提示した。

図 7.2.3 HMD 型湿り感提示装置 (Peiris et al., 2018)

低周波振動（64Hz）を同時に提示した条件よりも、冷刺激単独の条件で最も強く湿りを知覚し、映像に合っているという評価が得られた。ただし、湿り感の評価は冷刺激単独の条件と冷刺激と振動刺激を同時に提示した条件には統計的差は見られず、顔に水しぶきが当たるような感覚がしたという感想を述べた体験者もいたことから、冷刺激に加え映像に適した振動刺激を組み合わせることで知覚される湿り感の質的多様性を広げる効果が期待される。

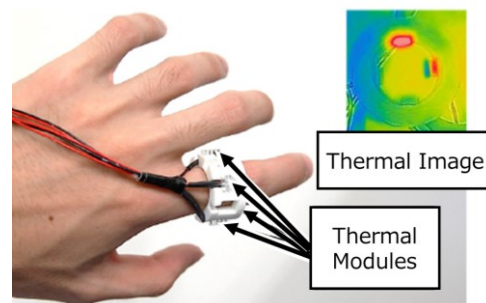
また、湿り感提示を目的としていないが、湿り感提示性能を有する装着型の触覚提示装置としては、手指に装着するグローブやリング、胴部に装着するベスト、腕に装着するアームカバーの形態の装置が開発されている。グローブ型の触覚提示装置として、親指・人差し指・中指の指腹部に温度刺激と振動刺激、電気刺激を同時に提示する装置が開発されている (Yem et al., 2019, 図 7.2.4 (a))。リング型の温度提示装置として、指の両脇・指腹部・上部に4つのペルチェ素子を装着する温度提示装置が開発されている (Zhu et al., 2019, 図 7.2.4 (b))。さらに、触覚を提示したい身体部位に刺激を直接接触させる以外にも、錯覚を使う手法も提案されている。指腹部への温度感覚を提示する装置とし



(a) グローブ型触覚提示装置

(Yem et al., 2019 より再構成)

電気刺激・振動刺激・温度刺激を提示可能



(b) リング型温度提示装置

(Zhu et al., 2019 より再構成)

4つのペルチェ素子を配置

図 7.2.4 手指装着型触覚提示装置

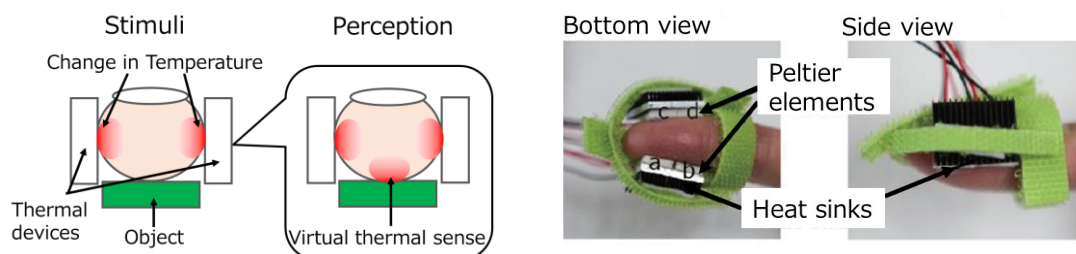
て、指の両脇部に温度刺激を提示しながら指腹部で物体に触れると指腹部にも温冷感を錯覚させる機構が提案されている（佐藤, 2017, 図 7.2.4）. この形態であれば、指の両脇に温度刺激を提示しながら、指腹部に別の刺激を組み合わせることや指腹部で実世界の物体に触れることを可能にする. これにより、多感覚の提示や実物体のテクスチャを変容させる拡張現実を実現できる. さらに、ベストやアームカバーに取り付けたチューブに温水あるいは冷水を流すことで胴体や腕に対する装着型の温度提示装置が開発されている（Günther et al., 2020, 図 7.2.6）. この装置は約 $1.75^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の速度で温度を変化させることができることと確認されているため、湿り感を提示できる性能を有すると考えられる.

このように、装着型の湿り感提示装置は身体部位に装着した形で刺激を提示するため、静的接触と捉えることができ、冷刺激のみで湿り感を十分提示できる可能性がある. ただし、バーチャルシーンに適した機械刺激（圧・振動刺激）を冷刺激と組み合わせて提示することで、湿り感の知覚やリアリティを向上させられると期待される.

【把持型湿り感提示装置】

把持型の触覚提示装置は、手指などを使って装置を把持しながら持ち上げて操作する、あるいは装置を把持して操作する. 手指による把持の際に湿り感を提示すると、ロボットの遠隔操作や義手などの場面におけるバーチャル環境での物体の把持操作や、バーチャル環境の中の氷をつかんだときに徐々に溶けていく触り心地や、素材のしっとり感や粘着感といったテクスチャといったように物体識別に役立つと期待される. 装置に求められる刺激の提示手法について考察する.

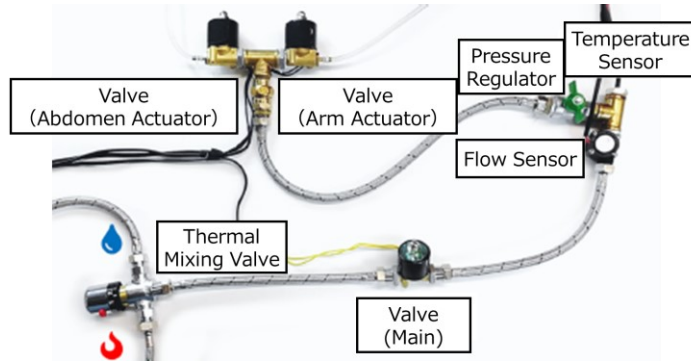
装置を把持する際に、体験者が強く押すことによる圧や、持ち上げることによる滑りが生じるため、把持型湿り感提示を実現するためには冷刺激に加え、場面に則した柔らかさや摩擦の提示が必要と仮定される. 実際に、装置を把持して持ち上げる形態において湿り感提示のための冷刺激や、圧・摩擦の効果を検証した研究がある（Han et al., 2020, 図 7.2.7）. 体験者はペルチェ素子やばねを内蔵した湿り感提示装置（図 7.2.7 (a)）を把持しながら HMD を装着して、たとえば氷をつかむ、水分を含んだスポンジを絞るなどの場面をバーチャルに体験することができる（表 7.2.1）. この研究において、冷刺激と圧ま



(a) 指側部の温度刺激による指腹部への温度感提示
指両脇に温度を刺激しながら指腹部で物体に触れる
と指腹部にも温冷感を知覚する.

(b) 装置着用図
指両脇に温度提示装置を装着する.

図 7.2.5 指側部温度刺激による指腹部への温度感覚提示装置（佐藤, 2017 より再構成）



(a) 装置概要

温水あるいは冷水をチューブの中に流し、温度を制御する。



(b) 装置着用図

赤線は腕に、緑線は胴部に装着したチューブ

図 7.2.6 水流を用いた装着型温度提示装置 (Günther et al. 2020 より再構成)

たは振動を同時に提示したときの湿り知覚を評価する予備実験を行った結果、圧や振動を提示しない条件の方が、強い湿り感として評価される傾向が見られた。さらに、装置の触覚提示に加え HMD による氷やコーラのボトルといったバーチャル映像を連動させて湿りの感覚強度の評価実験を行った結果、装置を強く押す触り方よりも、装置を持ち上げる触りの方が体験者は強い湿り感を評価した。強く押すときは圧のみの提示であるが、持ち上げるときは装置の重量による摩擦が生じるため、圧や摩擦が知覚されるような状況で強く湿りを感じるということが示唆されている。この研究から、圧や振動といった機械刺激の提示は湿り知覚やリアリティを向上させる可能性はあるが、バーチャルシーンに適していない場合かえって感覚を損なうと考えられる。したがって、Han らの形態の把持型湿り感装置は冷刺激の強度によって湿りの感覚強度を制御することに加えて、バーチャルシーンに適した圧や摩擦を提示することで湿り感の質的多様性を広げることができると考えられる。

また、湿り感提示性能を有すると考えられる把持型の触覚提示装置として、マウス型やペン型・指サック型の形態の装置がある。マウスの上に温度提示装置と振動子を搭載した触覚提示装置により、多様な質感提示を目指す試みが行われている (Sato, 2016, 図 7.2.8

(a)). このような温度刺激と振動刺激を組み合わせると湿り感を提示できる装置が開発されれば、オンラインショッピングで革製品のしっとり感やカシミヤのぬめり感といった

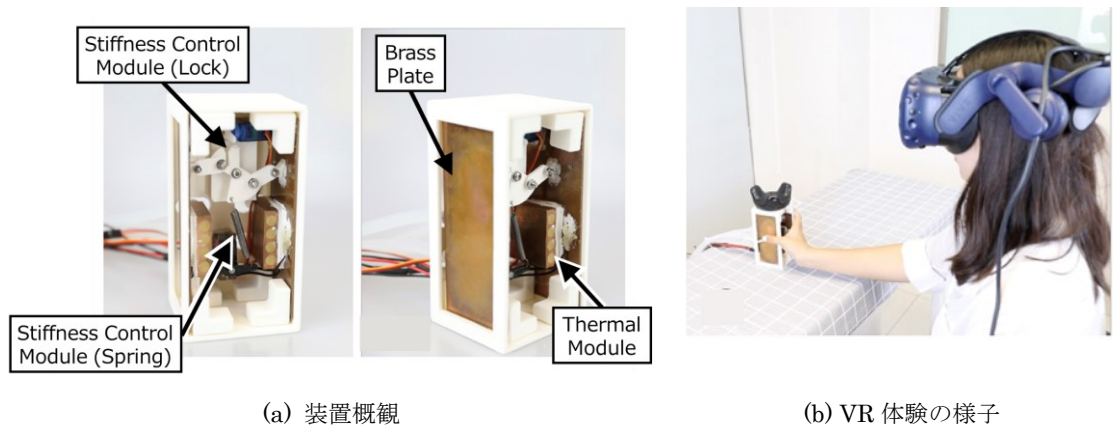
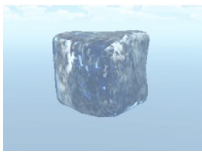




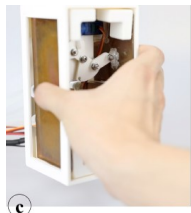


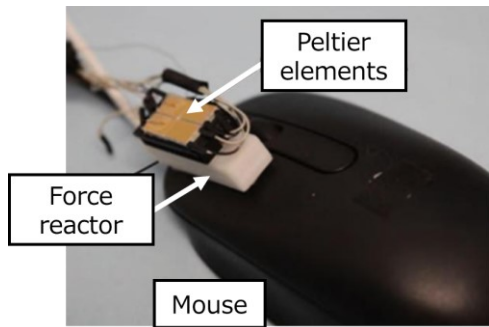


図 7.2.7 把持型湿り感提示装置 (Han et al., 2020 より再構成)

表 7.2.1 把持型湿り感提示装置による視覚刺激と触動作 (Han et al. 2020 より再構成)

	Ice Cube	Coke Bottle	Sponge	Glass Table
視覚情報				
触動作	 Squeeze or Lift	 Squeeze or Lift	 Squeeze	 Scratch

テクスチャをオンライン上で確認できるシステムの確立が期待される。また、ペン型や指サック型の把持部分を有する触覚提示装置 PHANToM (Massie and Salisbury 1994; 3Dsystem 社, 図 7.2.8 (b)) は接触子を介して指先に 6 自由度の反力を提示することができる。この装置を応用することで、ペンなどを介して物体をなぞるなどの触り方による湿り感提示が期待される。本論文から、なぞるときは冷感よりも摩擦感などの機械刺激の寄与が大きくなる (第 5 章) という知見を踏まえ、PHANToM を応用して摩擦感を増強して提示することによって湿り感を提示できると期待される。摩擦感を増強する試みとして、PHANToM の把持部に振動子を固定することによって、振動刺激から疑似的な摩擦感を提示する試みがある (Konyo et al., 2008)。実際に物体をなぞるときはスティック・スリップ運動によって皮膚が静止状態から滑りに移行する際、皮膚にせん断方向の変形が生じる。Konyo らは、この皮膚変形による触覚受容器の活動を振動刺激で再現することができれば、皮膚変形が生じなくても摩擦感を錯覚すると考え、指先の速度と位置座標に対応した皮膚と物体界面のスティック・スリップ運動を模擬するような振動を指腹



(a) マウス型触覚提示装置 (Sato, 2016 より再構成)
温度刺激・振動刺激を提示可能.



(b) PHANToM (3Dsystem 社)
把持部 (ペンまたは指サック形状) を操作すると、6 自由度の反力を提示可能.

図 7.2.8 把持型触覚提示装置

に付与した. その結果, 振動の増減にともない摩擦の知覚が変化することを明らかにしている. 同様に, PHANToM を用いて, バーチャル物体を把持した際の把持力調整を誘発する試みとして高分子ゲルアクチュエータ (Ionic Conducting Polymer gel Film; ICPF) を用いた試みがある (昆陽ら, 2006). 指先に装着した高分子ゲルアクチュエータによって, 物体を把持した際の固着・滑りに対応した空間的な振動刺激を提示することによって, バーチャル物体の把持力調整を変化させられることを示している. このように体験者に反力や摩擦感を提示できれば, 湿った物体の硬軟感やテクスチャをペンで触る, 物体を把持するなどの触覚体験の実現が期待される.

以上より, 把持型の湿り感提示装置として体験者が直接手指などでバーチャル物体に触れることを想定する場合は温度刺激によって湿り感を提示できる. さらに, バーチャルシーンに適した圧や滑りを再現する振動刺激を組み合わせることによって湿り感を増強できると期待される. また, 体験者が装置を介してバーチャル物体に触れることを想定する場合, 圧や摩擦などの機械刺激を把持部に提示することで湿り感提示を実現できると考えられる.

【遭遇型湿り感提示装置】

遭遇型の湿り感提示装置は, 体験者は主体的にこの装置に触れるため, 体験者がどのような触り方で装置を操作するのかをデザインしたうえで, 刺激を組み合わせる必要がある. 静的接触で装置に触れる場合, 皮膚と装置が接触した瞬間に皮膚温度を変化させる, 力を加えて押す場合は温度刺激に加え接触面積を制御する, なぞる場合は温度刺激に加え摩擦を制御することが装置設計に求められる. 遭遇型の装置によって湿り感を提示することで, バーチャル環境で物体のテクスチャ, たとえばケーキに触れたときのしっとり感や, カエルのべたべたした皮膚に触れるような触覚体験を実現できると考える.

静的接触で操作する遭遇型の湿り感提示装置としては冷刺激の提示が必要で, 特に皮膚温度の低下速度が 0.14 から $0.41^{\circ}\text{C}/\text{s}$ (Filingeri et al., 2014a) を実現するような冷却性能が求められる. 湿り感提示性能を有すると考えられる遭遇型の温度提示装置の例として, ペルチェ素子を多数配置した温度ディスプレイが挙げられる (図 7.2.9 (a)). 体験



(a) 温度ディスプレイ (Thermoesthesia) 概観
48 個のペルチェ素子を配列した 15 インチ温度
ディスプレイ.



(b) 温感をイメージした画像の投影
画像はディスプレイに対するリアルタイムなインタ
ラクションに対応.

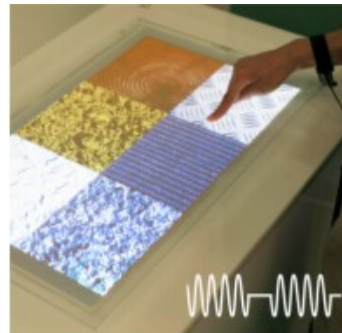
図 7.2.9 遭遇型温度提示装置 (Kushiyama and Sasada, 2006)

者がこの装置に触れるとその手の位置を検出し、雪や植物のリアルタイムシミュレーション画像や音とともに、温度刺激が提示される (Kushiyama and Sasada, 2006, 図 7.2.9). 体験者が静的にこの装置に触れる限りでは、この装置でも湿り感を十分に提示可能と考えられる. また、遭遇型の装置によって湿り感を提示する温度制御手法としては、装着型や把持型のようにバーチャル物体に触れた瞬間に精密な温度制御のみならず、冷却した物体表面に触れる手法 (第 3 章 1 節, 第 4 章 2 節 (実験 1)) や、接触冷感素材 (Bergmann Tiest et al., 2012b)、金属などの熱伝導特性が高い材質、物体の表面構造 (城ら, 2007) などから得られる冷感でも湿り感の知覚を惹起すると考えられる.

動的な接触のとき、冷刺激に加え機械刺激 (接触面積や摩擦) を提示することで、湿り知覚を強めることができる. 力を加えて皮膚を押しつける触り方のとき、皮膚との接触面積の制御が求められる. 遭遇型の触覚提示装置で皮膚との接触面積を制御する手法として、物体形状を凹レンズ状にすること (高山ら, 2008)、空気圧による制御 (池田, 藤田 2004, 図 7.2.10 (a)) が研究されている. また、なぞり動作で操作する場合、摩擦の制御機構が装置に求められる. 既存の遭遇型の触覚提示装置における摩擦提示手法として、タッチパネルディスプレイの静電吸着 (Yamamoto et al., 2006; Bau et al., 2010, 図 7.2.10 (b)) がある.



(a) 遭遇型の接触面積制御装置 (池田, 藤田 2004)
空気圧でゴム膜を制御することで、皮膚との接触面積
を操作する.



(b) 遭遇型摩擦提示装置 (Bau et al. 2010)
タッチパネルと皮膚の間に静電吸着を発生さ
せることで、皮膚に摩擦を提示する.

図 7.2.10 遭遇型触覚提示装置

こうした遭遇型の触覚提示装置において冷刺激と機械刺激を組み合わせるためのひとつの手法として装着型との併用が考える。たとえば、指腹部への温度感覚の提示装置（Sato, 2017）を装着しながら、接触面積を制御する遭遇型の触覚提示装置（高山ら, 2008; 池田, 藤田, 2004）を触ると、指を押しつける触動作における湿り感提示が期待される。

このように、遭遇型の湿り感提示装置の実現には触り方を考慮する必要がある。静的な接触の場合はペルチェ素子などによる温度刺激や素材の熱伝導特性や表面加工による皮膚温度の冷却で実現できると考えられる。皮膚を強く押しつける触り方では冷感の提示に加えて接触面積による柔らかさ、なぞるときは冷感と摩擦の提示が求められる。こうした複数の刺激を組み合わせるための手法として、遭遇型の装置と装着型の装置を組み合わせることも考えられる。

以上、本節ではバーチャルリアリティ応用を目指す湿り感提示装置の開発指針を示すことを目的として、装着型・把持型・遭遇型の観点から既存の湿り感提示装置や温度・触覚提示装置を説明した。水で濡らさずに湿り感を提示できれば安全かつ簡便に、バーチャルリアリティやオンラインショッピングにおいて、物体の把持力調整や材質識別など多様な状況の湿り感提示に貢献できると期待される。

7.2.2 湿り感の知覚特性を考慮した製品開発

湿り感は、しっとりや潤いのように好ましい感情にも、べたつきや蒸れのように不快な感情にも結びつき、幅広い情動反応を惹起し得る感覚である。湿り感の知覚特性を理解することで、不快を避け心地よく感じられる衣服・化粧品、建築材料などの工業製品の設計指針が得られる。

衣服着用時の皮膚の濡れは不快につながるものが心理・生理評価から明らかにされている（Fukazawa and Havenith, 2009; 深沢ら, 2009）。そのため、湿りを感じにくい衣服を設計することは着衣中の快適性に貢献できる。湿りを感じにくい、つまり発汗による水分を素早く気化させる手法として、空調服と呼ばれるファンを取り付けた衣服（株式会社空調服, FAN FIT 空調服®）や、布表面上で水膜をはりにくくさせて通気性をよくする効果を持つ柔軟剤（花王株式会社, ハミング涼感テクノロジー）が開発されている。ここで、人間の湿り知覚特性を考慮すると、肌に触れる製品が意図せず湿り感を知覚させる可能性が示唆される。前述した空調服は、気流によって汗を気化させ、その際の気化熱によって体温を下げることを目的としているため、もし急速な皮膚温度の低下が生じるなら乾燥ではなくむしろ湿りを増強する恐れもある。また、空調服の下に肌着などのインナーを着用する場合、湿ったインナーが風にたなびくことによる湿った布と皮膚間の動的接触の機会が増え、摩擦などの影響で湿り知覚を強めてしまう可能性が考えられる。

本研究で得られた知見を応用し、人間の知覚特性を考慮した湿り感低減手法も考えられる。第5章の Wet-Warm 刺激は 25°C の Dry 刺激に触れたときの皮膚温度低下パターンと似た温度低下を生じており、この刺激に静的に触れた実験参加者の多くが“乾燥”し

ていると評価した。この刺激をなぞって触れたときでも、同じ水分量である 25°C の Wet 刺激よりも弱い湿り感として評価された。つまり、濡れた刺激でも皮膚の温度変化が生じにくいと、知覚される湿り感が抑制される可能性がある。そこで、熱が伝わりにくいような素材や表面構造であれば、湿りを感じにくい衣服を実現できると考えられる。一方で、乾いた刺激でも冷感を生じる場合に湿り感を引き起こすことは本論文や先行研究で示されている (Daanen, 2009; Filingeri et al., 2013; Bergmann et al., 2012b) ため、意図せず使用者に湿りを知覚させないように、製品が皮膚に接触した際の皮膚温度の低下速度には留意が必要と考える。また、本論文第 6 章より、局所的に乾燥刺激に触れている身体部位があっても、その周囲の身体部位が湿っていると、大局的に湿りを知覚していることが明らかとなった。このような、実際に湿った部位よりも広範囲にわたって知覚されてしまう湿り感からも不快な感情を引き起こすことが想定されるため、使用時に濡れることが想定される衣服やオムツといった工業製品の設計は空間特性にも配慮が必要である。

さらには、湿り感の好まれない・触りたくないという側面を活かし、行動誘導や注意喚起として応用できる可能性もある。濡れている物体は汚染されているイメージから嫌悪感を抱かせる場合があること (Oum et al., 2011) や、乳幼児は他の物体よりも植物を触りたがらない傾向があることが示されていること (Wertz and Wynn, 2014) から、湿ったテクスチャも忌避の触覚探索行動を誘発する可能性がある。もし乳幼児が湿り感を触りたがらないという傾向を見出させるなら、子どもが触ると危険なもの、たとえばシュレッダーやベランダの柵などにこうした湿り感を誘発する刺激を配置することにより、危険であることを非言語的に伝達し、子どもが危険を回避する行動を誘導することが実現できる。このように、湿り感をもたらす快／不快を活かした製品開発によって幅広い応用が期待される。

第 8 章 結論

本章では、本論文で行った実験を総括し、課題及び今後の展望について述べる。

8.1 本論文のまとめ

本論文では主に若年女性を対象として、湿り知覚のメカニズムの解明に向けて、温度刺激や機械刺激の感覚統合による湿り感錯覚の生起条件を調べた。

第 2 章では、手掌における静的接触のとき、温度刺激の寄与による湿り感錯覚について、実際に水分を含んだ物体から得られる湿り感と比較して定量評価した。その結果、冷覚は湿り感錯覚を生じるが、温覚では乾燥刺激の温度操作から湿り感を錯覚しないことを明らかにした。湿った刺激に触れたときの皮膚温度低下パターンと似た温度低下を乾いた刺激の上で再現すると、そのとき錯覚する湿り感の強さは湿った刺激に匹敵することを明らかにした。

第 3 章では手掌で静的に物体に触れたとき、冷たさによる湿り感錯覚が生じやすい接触対象の物性について調査した。第 3 章 1 節において、日常生活で遭遇するような様々な素材に対する実験を行い、素材の冷たさや滑らかさが湿り感錯覚を強める効果があることが明らかになった。さらに第 3 章 2 節では、様々な布素材に限定して実験を行い、布の冷たさに加え柔らかさが湿り感錯覚を強める効果があることが明らかになった。

第 4 章では、冷たさによる湿り感錯覚における柔らかさの影響を調べた。第 4 章 1 節において、布の柔らかさと冷刺激を同時に操作して湿りの感覚強度を評価した実験から、柔らかさや冷たさが強まると湿り感錯覚の効果が強まることを明らかにした。第 4 章 2 節において、柔らかさに関連する物理量として接触面積と押し込みに対する移動量を変えながら、湿り感を錯覚する温度閾値を評価した実験を行った。その結果、皮膚と物体間の接触面積が大きいほど湿り感を錯覚する温度閾値が高い、すなわち錯覚が生じやすいことが明らかとなった。

第 5 章では、触り方（接触：静／動、押し付け力：大／小）における湿り感錯覚の生起状況を調査した。その結果、押し付け力による湿り感錯覚の強さへの影響は見られなかった。静的接触のとき過半数の人が湿り感錯覚を生起していたが、なぞり動作のように皮膚と物体の間の摩擦が時間的に変化する動的接触の場合、冷刺激による湿り感錯覚を生じる実験参加者は少なく、個人差が大きい結果となった。この結果より、湿りを知覚する際の温度刺激や機械刺激の統合過程は、触り方や個人特性によって異なる可能性が示唆された。

第 6 章では、湿りの知覚における空間配置の効果を知るべく、相互参照作用に注目し、

3本指で同時に乾燥あるいは湿り刺激に触れたときの、3本指における湿り感の均一性と、中指に知覚される乾燥感を検証するために、2つの実験を実施した。その結果、人差し指と薬指に湿り刺激・中指に乾燥刺激（WDW 条件）に触れるとき、3本すべて湿り刺激（WWW 条件）と同程度に、3本指に均一な湿り感を錯覚することを明らかにした。一方で、人差し指と薬指で乾燥刺激、中指に湿り刺激（DWD 条件）に触れたときに均一な乾燥感を錯覚しなかった。このことから、湿り知覚は空間平均の処理プロセスが存在し、詳細な空間分布の判断は困難であり大局的な湿り状態を判断していること、一方で乾燥知覚はそのプロセスが存在せず、詳細な空間分布の判断が可能であることが示唆される。

以上より、本論文では湿り錯覚における温度刺激と機械刺激の寄与について3つの知見が得られた。第1に、実際に湿り刺激に触れたときに生じる皮膚温度低下を、乾燥した刺激で再現することによって湿り感錯覚が生じる。第2に、素材の滑らかさや柔らかさ（接触面積）は冷たさから錯覚する湿り感を強める。そして第3に、温覚の場合やなぞり動作のように温度刺激よりも機械刺激を知覚しやすい条件では、機械刺激が優位となる。さらに、第5章より湿り知覚は個々人によって判断プロセスが異なるという結果を得たため、湿り刺激に触れる経験的な知識を基に学習して湿りを知覚していると考えられる。同様に、第6章の乾燥刺激に触れていても周囲に湿り刺激が存在していると湿り感を錯覚してしまう現象も、触覚経験が由来していると考えられる。

8.2 今後の展望

本論文によって、手掌において湿り感錯覚が生起する物体の特徴(温度刺激・機械刺激)を示すことができた。しかし、触り方や個々人における湿り知覚の戦略の違いについては未解明な点が多い。今後の展望として、他の触り方(つかむ・こすりあわせるなど)、他の身体部位(有毛部での検証や冷覚感受性との対応)、実験参加者の肌質(皮膚の厚み・弾性など)や属性(性別・年齢・国籍)などについての検証をさらに進めることによってより多くの人に当てはまる湿り知覚のメカニズムを知ることができると思う。さらには、さまざまな物体の湿り感と快適性との関連性を調べることにより、心地よく感じられる工業製品の開発指針を得ることができると思う。

謝辞

指導教官である佐藤克成講師には多大なご指導をいただきました。ここに謹んで深謝の意を表します。奈良女子大学・お茶の水女子大学大学院生活工学共同専攻の才脇直樹教授、太田裕治教授、椎尾一郎教授、久保博子教授には、本論文をまとめるにあたり有益なご指導を承りました。深く感謝を申し上げます。生活工学共同専攻の先生方には、非常に興味深い講義を両大学のキャンパスだけでなく様々な研究機関で行っていただき、貴重な経験をすることができました。感謝の気持ちとお礼を申し上げたく謝辞にかえさせていただきます。

触覚部会の国内留学として電気通信大学の梶本研究室、東京大学の篠田・牧野研究室で研究を遂行させていただいた経験は、何ものにも代え難い経験となりました。梶本裕之教授、篠田裕之教授、牧野泰才准教授をはじめ、研究室の方々には国内留学を受け入れてくださり、多くの議論をしていただきました。深く感謝いたします。

Astrid M. L. Kappers 博士には、オランダでの研究遂行を通して有益なご議論やご指導を賜りました。研究に対する姿勢を間近で学ぶことができ、非常に有意義な留学となりました。心より謝意を申し上げます。

日本電話電信株式会社コミュニケーション科学基礎研究所の渡邊淳司上席特別研究員と Ho Hsin-Ni 主任研究員には、実習生として多くの経験をさせていただき、共同研究を通して有益なご議論およびご指導を賜りました。心より感謝の意を表します。

実験参加者の皆様には、忙しいにもかかわらず快く実験に協力してくださり、感謝しております。研究室の皆様には研究だけでなく公私にわたり様々な場面でお世話になりました。的確なアドバイスをしてくれた研究室の皆様がいなければ、ここまでたどり着けなかったと思っています。深く感謝いたします。

その他にも、友人や家族など多くの方々に支えられました。厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- Ackerley, R., Olausson, H., Wessberg, J. and McGlone, F. (2012). Wetness perception across body sites. *Neuroscience Letters*, vol. 522, no. 1, pp. 73-77.
- Ackerley, R., Saar, K., McGlone, F. and Wasling, H. B. (2014). Quantifying the sensory and emotional perception of touch: differences between glabrous and hairy skin. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, vol.8, no.34.
- Adams, M. J., Briscoe, B. J. and Johnson S. A. (2007). Friction and lubrication of human skin. *Tribology Letters*, vol. 26, no. 3, pp. 239-253.
- Adams M. J., Johnson S. A., Lefèvre P., Lévesque V., Hayward V., André T. and Thonnard J.-L. (2013). Finger pad friction and its role in grip and touch. *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 10, no. 80, pp. 1- 19.
- André, T., Lefèvre, P. and Thonnard, J. L. (2010). Fingertip moisture is optimally modulated during object manipulation. *Journal of Neurophysiology*, vol. 103, pp. 402-408.
- André, T., Lévesque, V., Hayward V., Lefèvre P. and Thonnard J. L. (2011). Effect of skin hydration on the dynamics of fingertip gripping contact. *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 8, pp. 1574-1583.
- Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A., and Harrison, C. (2010). TeslaTouch: Electro-vibration for Touch Surfaces. *Proc. of UIST'10*, pp.283-292.
- Baumgartner, E. and Gegenfurtner, K. R. (2016). Image Statistics and the Representation of Material Properties in the Visual Cortex. *Frontiers in Psychology*, vol. 7, 1185.
- Bear, M. F., Connors, B. W. and Paradiso M. A. (2016). *Neuroscience Exploring the Brain Fourth Edition*. Philadelphia: Wolters Kluwer.
- Bentley, I. (1900). The synthetic experiment. *The American Journal of Psychology*, vol. 11, pp. 405-425.

- Bergmann Tiest, W. M. and Kappers, A. M. L. (2008). Thermosensory Reversal Effect Quantified, *Acta Psychologica*, vol. 127, pp. 46-50.
- Bermann Tiest, W. M., Kusters, N. D., Kappers, A. M. L. and Daanen, H. A. M. (2012a). Haptic perception of wetness. *Acta psychologica*, vol. 141, no. 2, pp. 159-163.
- Bergmann Tiest, W. M., Kusters, N. D., Kappers, A. M. L. and Daanen H. A. M. (2012b). Phase Change Materials and the Perception of Wetness. *Ergonomics*. vol. 55, no. 4, pp. 508-512.
- Bi, J. (2006). *Sensory discrimination tests and measurements*. Iowa: Blackwell Publishing Professional.
- Bicchi, A., Schilingo, E. P. and De Rossi D. (2000). Haptic discrimination of softness in teleoperation: the role of the contact area spread rate. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 496-504.
- Biermann, K., Schmitz, F., Witte, O. W. and Konczak J., Freund H. J., Schnitzler A. (1998). Interaction of finger representation in the human first somatosensory cortex: a neuromagnetic study. *Neuroscience Letters*, vol. 251, no. 1, pp. 13-16.
- Blum, L., Broll, W. and Müller, S. (2009). Augmented reality under water. *Poster Proc. of SIGGRAPH 2009*, pp. 97.
- Bowden F.P, Tabor D. (1954). Friction and lubrication of solids. London, UK: Oxford University Press.
- Cao, D. and Shevell, S. K. (2005). Chromatic assimilation: spread light or neural mechanism?. *Vision Research*, vol. 45, no. 8, pp. 1031-1045.
- Caterina, M. J., Schumacher, M. A., Tominaga, M., Rosen, T. A., Levine, J. D. and Julius D. (1997). The capsaicin receptor: a heat-activated ion channel in the pain pathway. *Nature*, vol. 389, no. 6653, pp. 816-824.
- Chau, K. H., Tang, K. P. M. and Kan, C. W. (2018). Subjective wet perception assessment of fabrics with different drying time. *Royal Society Open Science*, vol. 5, no. 8.
- Chen, X., Barnes, C. J., Childs, T. H. C., Henson, B., Shao, F. (2009a). Materials' tactile testing and characterisation for consumer products' affective packaging design. *Materials & Design*, vol. 30, no. 10, pp. 4299-4310.

- Chen, X., Shao, F., Barnes, C., Childs, T. and Henson B. (2009b). Exploring relationships between touch perception and surface physical properties. *International Journal of Design*, vol. 3, no. 2, pp. 67-76.
- Daanen, H. A. M. (2009). Method and system for alerting the occurrence of wetness. European patent no. 2268247.
- Darian-Smith, I. (1984). Thermal Sensibility. *Handbook of Physiology: The Nervous System*. I. Darian-Smith (Ed.), American Physiological Society, pp. 879-913.
- Derler, S. and Gerhardt, L.C. (2012). Tribology of Skin: Review and Analysis of Experimental Results for the Friction Coefficient of Human Skin. *Tribology Letters*, vol. 45, pp. 1-27.
- Derler, S., Gerhardt, L.C., Lenz, A., Bertaux, E. and Hadad M. (2009). Friction of human skin against smooth and rough glass as a function of the contact pressure. *Tribology International*, vol. 42, no. 11, pp. 1565-1574.
- De Weert, C. M. and Van Kruysbergen, N. A. (1997). Assimilation: central and peripheral effects. *Perception*, vol. 26, no. 10, pp. 1217-1224
- Dzidek, B. M., Adams, M., Zhang, Z., Johnson, S., Bochereau S. and Hayward V. (2014). *Role of occlusion in noncoulombic slip of the finger pad*. Auvray M. and Duriez C. (Eds), *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications*, Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 109-116.
- Egawa, M., Oguri, M., Hirao, T., Takahashi, M. and Miyakawa, M. (2002). The evaluation of skin friction using a frictional feel analyzer. *Skin Research and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 41-51.
- Ennis, D. M. (1993). The power of sensory discrimination methods. *Journal of Sensory Studies*, vol. 8, pp. 353-370.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G. and Buchner A. (2007). G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, vol. 39, no. 2, pp.175-191.
- Filingeri, D., Redortier, B., Hodder, S. and Havenith, G. (2013). The role of decreasing contact temperatures and skin cooling in the perception of skin wetness. *Neuroscience Letters*, vol. 551, no. 13, pp. 65-69.

- Filingeri, D., Fournet, D., Hodder, S. and Havenith, G. (2014a). Why wet feels wet? A neurophysiological model of human cutaneous wetness sensitivity. *Journal of Neurophysiology*, vol. 112, no. 6, pp. 1457-1469.
- Filingeri, D., Fournet, D., Hodder, S. and Havenith, G. (2014b). Body mapping of cutaneous wetness perception across the human torso during thermo-neutral and warm environmental exposures. *Journal of Applied Physiology*, vol. 117, no. 8, pp. 887-897.
- Filingeri, D., Redortier, B., Hodder, S. and Havenith, G. (2014c). Thermal and tactile interactions in the perception of local skin wetness at rest and during exercise in thermo-neutral and warm environments. *Neuroscience*, vol. 258, pp. 121-130.
- Filingeri, D., Redortier, B., Hodder, S. and Havenith, G. (2014d). Warm temperature stimulus suppresses the perception of skin wetness during initial contact with a wet surface. *Skin Research & Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 9-14.
- Filingeri, D., Fournet, D., Hodder, S. and Havenith, G. (2015). Tactile cues significantly modulate the perception of sweat-induced skin wetness independently of the level of physical skin wetness. *Journal of Neurophysiology*, vol. 113, no. 10, pp. 3462-3473.
- Filingeri, D. and Ackerley, R. (2017). The biology of skin wetness perception and its implications in manual function and for reproducing complex somatosensory signals in neuroprosthetics. *Journal of Neurophysiology*, vol. 117, no. 4, pp. 1761-1775.
- Forss, N., Jousmaki, V. and Hari, R. (1995). Interaction between afferent input from fingers in human somatosensory cortex. *Brain Research*, vol. 685, no. 1-2, pp. 68-76.
- Friedman, R. M., Hester, K. D., Green, B. G. and LaMotte, R. H. (2008). Magnitude estimation of softness. *Experimental Brain Research*, vol. 191, pp. 133-142.
- Fukazawa, T. and Havenith, G. (2009). Differences in comfort perception in relation to local and whole body skin wetness. *European Journal of Applied Physiology*, vol. 106, no. 1, pp. 15-24
- Gandevia, S. C., Burke, D. and McKeon, B. B. (1983). Convergence in the somatosensory pathway between cutaneous afferents from the index and middle fingers in man. *Experimental Brain Research*, vol. 50, pp. 415-425.
- Green, B. G. (1977). Localization of thermal sensation: An illusion and synthetic heat. *Perception Psychophysics*, vol. 22, no. 4, pp. 331-337.

- Green, B. G. (2009). Temperature perception on the hand during static versus dynamic contact with a surface. *Attention, Perception, & Psychophysics*, vol. 71, no.5, pp. 1185- 1196.
- Greenspan, J. D. and Kenshalo, D. R. (1985). The primate as a model for the human temperature-sensing system: 2. area of skin receiving thermal stimulation. *Somatosensory Research*, vol. 2, no. 4, pp. 315-324.
- Gueorguiev, D., Bochereau, S., Mouraux, A., Hayward, V. and Thonnard J. L. (2016). Touch uses frictional cues to discriminate at materials. *Scientific Reports*, vol. 6, no. 25553.
- Guest, S., Dessirier, J. M., Mehrabyan, A., McGlone, F., Essick, G., Gescheider, G., Fontana, A., Xiong, R., Ackerley, R. and Blot, K. (2011). The development and validation of sensory and emotional scales of touch perception. *Attention, Perception, & Psychophysics*, vol. 73, no. 2, pp. 531-550.
- Günther, S., Müller, F., Schön D., Elmoghazy, O., Mühlhäuser, M. and Schmitz M. (2020). Therminator: Understanding the Interdependency of Visual and On-Body Thermal Feedback in Virtual Reality. *Proc. of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1-14.
- Han, T., Wang, S., Wang, S., Fan, X., Liu, J., Tian, F., Fan M. (2020). Mouillé: Exploring Wetness Illusion on Fingertips to Enhance Immersive Experience in VR, *Proc. of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1-10.
- Hendriks, C. P. and Franklin, S. E. (2010). Influence of surface roughness, material and climate conditions on the friction of human skin. *Tribology Letters*, vol. 37, no. 2, pp. 361-373.
- Hernández-Pérez, R., Cuaya, L. V., Rojas-Hortelano, E., Reyes-Aguilar, A., Concha, L. and De Lafuente V. (2017). Tactile object categories can be decoded from the parietal and lateral-occipital cortices. *Neuroscience*, vol. 352, pp. 226-235.
- Hertz., H. R. (1895). *Gesammelte Werke*. vol. 1, Facsimile Publisher
- Higgins, J. J. and Tashtoush, S. (1994). An aligned rank transform test for interaction. *Nonlinear World*, vol. 1, no. 2, pp. 201-211.

- Ho, H. N., Watanabe, J., Ando, H. and Kashino, M. (2011). Mechanisms underlying referral of thermal sensations to sites of tactile stimulation. *The Journal of Neuroscience*, vol. 31, no. 1, pp. 208-213.
- Ho, H. N., Chow, H., Tsunokake, S. and Roseboom, W. (2019). Thermal-tactile Integration in Object Temperature Perception. *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 12, no. 4, pp. 594-903.
- Hollins, M., Bensmaïa, S. J., Karlof, K. and Young, F. (2000). Individual differences in perceptual space for tactile textures: Evidence from multidimensional scaling. *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 62, no. 8, pp. 1534-1544.
- Iwamura, Y., Tanaka, M., Sakamoto, M. and Hikosaka, O. (1983). Converging patterns of finger representation and complex response properties of neurons in area 1 of the first somatosensory cortex of the conscious monkey. *Experimental Brain Research*, vol. 51, pp. 327-337.
- Jain, D., Sra, M., Guo, J., Marques, R., Wu, R., Chiu, J. and Schmandt, C. (2016). Immersive scuba diving simulator using virtual reality. *Proc. of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2016)*, pp. 729-739.
- Johansson, R. S. and Westling, G. (1984). Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Experimental Brain Research*, vol. 56, pp. 550-564.
- Jones, L. A. and Ho, H. N. (2008). Warm or Cool, Large or Small? The Challenge of Thermal Displays. *IEEE Transaction on Haptics*, vo. 1, no. 1, pp. 53- 70.
- Kahrimanovic, M., Bergmann Tiest, W. M. and Kappers A. M. L. (2009). Context effects in haptic perception of roughness. *Experimental Brain Research*, vol. 194, pp. 287-297.
- Kenshalo, D. R., Decker, T. and Hamilton, A. (1967). Comparisons of spatial summation on the forehead, forearm, and back produced by radiant and conducted heat. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, vol. 63, pp. 510-515.
- Kenshalo, D.R. (1976). *Correlations of Temperature sensitivity in man and monkey, a first approximation. Sensory Functions of the Skin in Primates with Special Reference to Man*. Zotterman Y. (Ed.), Pergamon Press, pp. 305-330.
- Kikegawa, K., Kuhara, R., Kwon, J., Sakamoto, M., Tsuchiya, R., Nagatani, N. and Nonomura Y. (2019). Physical origin of a complicated tactile sensation: ‘shittori feel’.

Royal Society Open Science, vol. 6, no. 7.

Kim, J., Chung, Y. G., Park, J. Y., Chung, S. C., Wallraven, C., Bühlhoff, H. H. and Kim, S. P. (2015). Decoding Accuracy in Supplementary Motor Cortex Correlates with Perceptual Sensitivity to Tactile Roughness. *PLoS One*, vol. 10, no. 6, e0129777.

Kitada, R., Hashimoto, T., Kochiyama, T., Kito, T., Okada, T., Matsumura, M., Lederman, S. J. and Sadato, N. (2005). Tactile estimation of the roughness of gratings yields a graded response in the human brain: an fMRI study. *Neuroimage*, vol. 25, no. 1, pp. 90-100.

Konyo, M., Yamada, H., Okamoto, S. and Tadokoro, S. (2008). Alternative Display of Friction Represented by Tactile Stimulation without Tangential Force. *Proc. of Eurohaptics2008*, pp. 619-629.

Koudine, A. A., Barquins, M., Anthoine, P. H., Aubert, L. and Lévêque, J. L. (2000). Frictional properties of skin: proposal of a new approach. *International Journal of Cosmetic Science*, vol. 22, no. 1, pp. 11-20.

Kushiyama, K. and Sasada, S. (2006). Thermoesthesia. *Proc. of ACM SIGGRAPH 2006*.

Lederman, S. J. and Taylor, M. M. (1972). Fingertip force, surface geometry, and the perception of roughness by active touch. *Perception Psychophysics*, vol. 12, pp. 401-408.

Lederman, S. J. (1974). Tactile roughness of grooved surface: The touching process and effects of macro- and microsurface structure. *Perception and Psychophysics*, vol. 16, pp. 385-395.

Lederman, S. J. and Klatzky, R. L. (1998). Hand movement : A window into haptics object recognition, *Cognitive Psychology*, vol. 19, no. 3, pp.342-368.

Massie T. H and Salisbury J. K. (1994). The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, *Proc. of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, vol. 1, pp. 295-301.

Marks, L. E., Stevens, J. C. and Tepper, S. J. (1976). Interaction of Spatial and Temporal Summation in the Warmth Sense. *Sensory Processes*, vol. 1, no. 1, pp. 87-98.

Moungou, A., Thonnard, J. L. and Mouraux, A. (2016). EEG frequency tagging to

- explore the cortical activity related to the tactile exploration of natural textures. *Scientific Reports*, vol. 6, 20738.
- Nonomura, Y., Miura, T., Miyashita, T., Asao, Y., Shirado, H., Makino, Y. and Maeno, T. (2012). How to identify water from thickener aqueous solutions by touch. *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 9, no. 71, pp. 1216-1223.
- Okamoto, S., Nagano, H., Yamada, Y. (2013). Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 1, pp. 81-93.
- Okamoto, S., Kojima, H., Yamagishi, A., Kato, K. and Tamada, A. (2018). Layered-modeling of affective and sensory experiences using structural equation modeling: Touch experiences of plastic surfaces as an example. *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 14, no. 8, pp. 1-10.
- Okamoto, S., Kojima, H., Yamagishi, A., Kato, K. and Tamada, A. (2019). Layered-modeling of affective and sensory experiences using structural equation modeling: Touch experiences of plastic surfaces as an example. *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 14, no. 8.
- Okamoto, S., Ehara, Y., Okada, T. and Yamada, Y. (2020). Affective dynamics: Principal motion analysis of temporal dominance of sensations data. *IEEE Transactions on Affective Computing*.
- Oum, R. E., Lieberman, D. and Aylward, A. (2011). A feel for disgust: tactile cues to pathogen presence. *Cognition and Emotion*, vol. 25, no. 4, pp.717-725.
- Pasumarty, S. M., Johnson, S. A., Watson, S. A. and Adams, M. J. (2011). Friction of the human finger pad: Influence of moisture, occlusion and velocity. *Tribology Letters*, vol.44, pp.117-137.
- Patapoutian, A., Peier, A. M., Story, G. M. and Viswanath, V. (2003). ThermoTRP channels and beyond: Mechanisms of temperature sensation. *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 4, no. 7, pp. 529-539.
- Peiris, R. L., Chan, L. and Minamizawa, K. (2018). LiquidReality: Wetness Sensations on the Face for Virtual Reality. *Proc. of EuroHaptics 2018*, part 2, pp. 366-378.
- Peters, R. M., Hackeman, E. and Goldreich, D. (2009). Diminutive digits discern delicate details: Fingertip size and the sex difference in tactile spatial acuity. *Journal of Neuroscience*, vol. 29, no. 50, pp. 15756-15761.

- Plaisier, M. A., Bergmann Tiest, W. M. and Kappers, A. M.L. (2008). Haptic pop-out in a hand sweep. *Acta Psychologica*, vol. 128, no. 2, pp. 368-377.
- Plaisier, M. A. and Kappers, A. M.L. (2010). Cold Objects Pop Out!. *Prc. of EuroHaptics 2010*, Part 2, pp 219-224.
- Raccuglia, M., Hodder, S. and Havenith, G. (2017). Human wetness perception in relation to textile water absorption parameters under static skin contact. *Textile Research Journal*, vol. 87, no. 20, pp. 2449-2463.
- Raccuglia, M., Pistak, K., Heyde, C., Qu, J., Mao, N., Hodder, S. and Havenith G. (2018). Human wetness perception of fabrics under dynamic skin contact. *Textile Research Journal*, vol. 88, no. 19, pp. 2155-2168.
- Rózsa, A. J. and Kenshalo, D. R. (1977). Bilateral Spatial Summation of Cooling of Symmetrical Sites. *Perception & Psychophysics*, vol. 21, pp. 455-462.
- Schepers, R. J. and Ringkamp, M. (2010). Thermoreceptors and thermosensitive afferents. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 33, no. 3, pp. 205- 212.
- Schlader, Z., Stannard, S. and Mündel, T. (2010). Human thermoregulatory behavior during rest and exercise - a prospective review. *Physiology & Behavior*, vol. 99, pp. 269-275.
- Scilingo, E. P., Bianchi, M., Grioli, G. and Bicchi, A. (2010). Rendering softness: Integration of kinesthetic and cutaneous information in a haptic device. *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 2, pp. 109-118.
- Sharman, S. D., Auist, A. and Paul H. (2009). Relationship between stickiness and surface roughness of composite materials: Atomic force microscopy and intermolecular adhesion force measurement. *Journal of Nano Research*, vol. 6, pp. 225-235.
- Shevell, S. K. and Wei, J. (2000). A central mechanism of chromatic contrast. *Vision Research*, vol. 40, no. 23, pp. 3173-3180.
- Sivamani, R. K., Goodman, J., Gitis, N. V. and Maibach, H. I. (2003). Coefficient of friction: tribological studies in man—an overview. *Skin Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 227-234.
- Skedung, L., Danerlöv, K., Olofsson, U., Aikala, M., Niemi, K., Kettle, J. and Rutland, M. W. (2010). Finger friction measurements on coated and uncoated printing papers.

- Tribology Letters. vol. 37, no. 2, pp. 389-399.
- Skedung, L., Rawadi, C. E., Arvidsson, M., Farcet, C., Luengo, G. S., Breton, L. and Rutland, M. W. (2018). Mechanisms of tactile sensory deterioration amongst the elderly. *Scientific Reports*, vol. 8, no. 5303.
- Smith, A. M., Cadoret, G. and St-Amour, D. (1997). Scopolamine increases prehensile force during object manipulation by reducing palmar sweating and decreasing skin friction. *Experimental Brain Research*, vol. 114, no. 3, pp. 578-583.
- Smith, A. M., Chapman, C. E., Deslandes, M., Langlais, J. S. and Thibodeau, M. P. (2002). Role of friction and tangential force variation in the subjective scaling of tactile roughness. *Experimental Brain Research*, vol. 144, no. 2, pp. 211-223.
- Smith, A. M. and Basile, G. (2010). Roughness of simulated surfaces examined with a haptic tool: Effects of spatial period, friction, and resistance amplitude. *Experimental Brain Research*, vol. 202, no. 1, pp. 33-43.
- Sokabe, T. and Tominaga, M. (2009). Molecular mechanisms underlying thermosensation in mammals. *Brain and Nerve*, vol. 61, no. 7, pp. 867-873.
- Spray, D. C. (1986). Cutaneous temperature receptors. *Annual Review of Physiology*, vol. 48, pp. 625-638.
- Stevens, J. C. and Marks, L. E. (1971). Spatial summation and the dynamics of warmth sensation. *Perception & Psychophysics*, vol. 9, pp. 391-398.
- Stevens, J. C. and Marks, L. E. (1979). Spatial summation of cold. *Physiology & Behavior*, vol. 22, no. 3, pp. 541-547.
- Stevens, J. C. and Choo, K. K. (1998). Temperature sensitivity of the body surface over the life span. *Somatosensory & Motor Research*, vol.15, no. 1, pp.13-28.
- Sweeney M. M. and Branson D. H. (1990). Sensorial comfort: Part I: A psychophysical method for assessing moisture sensation in clothing. *Textile Research Journal*, vol. 60, no. 7, pp. 371-377,
- Tanaka, Y., Tanaka, M. and Chonan, S. (2006). Development of a Sensor System for Measuring Tactile Sensation. *Proc. of the 2006 IEEE Sensors*, pp. 554-557.
- Tanaka, Y. and Sukigara, S. (2008). Evaluation of “shittori” characteristic for fabrics. *Journal of Textile Engineering*, vol. 54, no. 3, pp. 75-81.

- Tomlinson, S.E., Lewis, R., Liu, X., Texier, C. and Carré, M.J. (2011). Understanding the friction mechanisms between the human finger and flat contacting surfaces in moist conditions. *Tribology Letters*, vol. 41, no. 1, pp. 283-294.
- Typolt, O. and Filingeri, D. (2020). Evidence for the involvement of peripheral cold-sensitive TRPM8 channels in human cutaneous hygro-sensation. *American Journal of Physiology Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, vol. 318, no. 3, pp. R579-R589.
- Vallbo, A. B. and Johansson, R. S. (1984). Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human Neurobiology*, vol. 3, no. 1, pp. 3-14
- Van Doorn, G. H., Dubaj, V., Wuillemin, D. B., Richardson, B. L. and Symmons, M. A. (2012). Cognitive Load Can Explain Differences in Active and Passive Touch. *Proc. of EuroHaptics 2012*, pp 91-102.
- Van Polanen, V., Bergmann Tiest, W. M. and Kappers A.M. (2013). Integration and Disruption Effects of Shape and Texture in Haptic Search. *PLoS One*, e:70255.
- Warman P. H., Ennos A. R. (2009). Fingerprints are unlikely to increase the friction of primate finger pads. *Journal of Experimental Biology*. vol. 212, pp. 2016-2022.
- Weinstein, S. (1968). Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality. *The skin senses: Proc. of the First International Symposium*, pp.195-222.
- Weber, A. I., Saal, H. P., Lieber, J. D., Cheng, J. W., Manfredi, L. R., 3rd Dammann, J. F. and Bensmaia, S. J (2013). Spatial and temporal codes mediate the tactile perception of natural textures. *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 110, no. 42, pp. 17107-10112.
- Wertz, A. E. and Wynn, K. (2014). Thyme to touch: Infants possess strategies that protect them from dangers posed by plants. *Cognition*, vol. 130, pp. 44-49.
- Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D. and Higgins, J. J. (2011). The Aligned Rank Transform for Nonparametric Factorial Analyses Using Only ANOVA Procedures. *Proc. of CHI 2011*, pp. 143-146.
- Wolfram, L. J. (1983). Friction of skin. *Journal of Society of Cosmetic Chemists*, vol. 34, no. 8, pp. 465-476.

- Yamashita, S., Zhang, X. and Rekimoto, J. (2016). Aquacave: Augmented swimming environment with immersive surround-screen virtual reality. *Proc. of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2016)*, pp. 183-184.
- Yamamoto,A., Nagasawa,S., Yamamoto,H., and Higuchi,T. (2006). Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile Telepresentation Systems. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol.12, no. 2, pp.168-177.
- Yem, V., Kajimoto, H., Sato, K. and Yoshihara, H. (2019). A System of Tactile Transmission on the Fingertips with Electrical-Thermal and Vibration Stimulation. *Proc. of Human Interface and the Management of Information. Information in Intelligent Systems (HCII 2019)*, part 2, pp. 101-113.
- Zigler, M. J. (1923). An experimental study of the perception of clamminess. *The American Journal of Psychology*, vol. 34, no. 4, pp. 550-561.
- Zhu, K., Perrault, S., Chen, T., Cai, S., Peiris, R. L. (2019). A Sense of Ice and Fire: Exploring Thermal Feedback with Multiple Thermoelectric-cooling Elements on a Smart Ring. *International Journal of Human Computer Studies*, vol. 130, pp. 234-247.
- 荒井 観, 岡嶋 克典. (2009). 粗さ触知覚における両側刺激の影響. *映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア*, vol. 63, no. 12, pp. 1800-1806.
- 池田 義明, 藤田 欣也. (2004). 指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.9, no. 2, 187-194.
- 岡島 達雄, 武田 雄二. (1983). 触覚による乾湿感の定量化 : 建築仕上げ材料の感覚的評価に関する研究 (その 5). *日本建築学会論文報告集*, vol. 327, pp. 12-19.
- 小川博教. (2007). アクティブタッチを用いた材質感判別に関する研究. *電気通信大学大学院電気通信学研究科博士論文*.
- 木下 瑞穂. (2011). 湿潤時における布の摩擦特性と布に含まれる水の形態に関する研究. *広島大学大学院教育学研究科紀要 (第二部)*, vol. 60, pp. 243-247.
- 小柴 朋子, 田村 照子. (1995). 皮膚濡れ感覚の支配要因. *繊維製品消費科学*, vol. 36, no. 1, pp. 119-124.

- 昆陽 雅司, 中本 雅崇, 前野 隆司, 田所 諭. (2006). ICPF アクチュエータを用いたヒト指腹部への分布振動刺激に基づく把持力調整反射の誘発. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 1, no. 11, pp. 3-10.
- 坂口 晴子, 丹羽 雅子, 川端 季雄. (1986). 編布肌着の客観的品質評価法の開発 第1報 布特性値の測定. *繊維機械学会誌*, vol. 39, no.3, pp.33-42.
- 佐々木 博, 藤田 欣也. (2000). 力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.5, no.1, pp.795-802.
- 佐藤 克成. (2017). 指側部の温度刺激による指腹部への温度感覚提示. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 22, no.3, 315-323.
- 柴田 佐和子, 吉田 正人, 上甲 恭平. (2019). 炭化水素鎖固定化処理綿布の表面形状と特性. *繊維製品消費科学*, vol. 60, no. 9, pp. 722-731.
- 城 堅誠, 仲谷 正史, 川上 直樹, 舘 暉. (2007). 表面加工による布の手触り感提示に関する研究, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集*, 1A2-B12.
- 白土 寛和, 前野 隆司. (2004). 触感呈示・検出のための材質認識機構のモデル化. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 9, no. 3, pp. 235-240.
- 菅井 清美, 前川 博. (2004). 触感温度に及ぼす接触熱抵抗の影響. *繊維学会誌*, vol. 60, no. 10, pp.287-292.
- 田上 八朗. (2005). アトピー性皮膚炎と皮膚のバリア機能. *アレルギー*, vol. 54, no. 5, pp. 445-450.
- 高山 裕行, 山本 晃生, 樋口 俊郎. (2008). 物体表面における濡れ感の再現提示に関する基礎的検討. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 1P1-I14(1)-1P1-I14(4).
- 田村 和也, 小山 紀, 山田 宏道. (2000). 材質認識時における人間触覚の感性評価に関する研究. *Dynamics and Design Conference: 機械力学・計測制御講演論文集 :D & D*, no. 709.
- 富樫 浩志, 酒井 直隆, 嶋脇 聡. (2003). 手の触覚と皮膚硬度. *日本機械学会第14回バイオフィロントピア講演会講演論文集*, vol. 14, pp. 133-134.
- 中野 詩織, 能勢 柚, 谷田貝 友洋, 梶野 しほり, 引間 理恵. (2019). 化粧品塗布時の感触変化を捉える時系列官能評価手法の検討. *日本認知心理学会発表論文集 2019*,

P2-02.

永野 光, 岡本 正吾, 山本 陽滋. (2011). 触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.16, No.3, pp. 343-353.

深沢 太香子, 栃原 裕, Havenith G. (2009). コルチゾールとアミラーゼ活性を指標とした局所と全身の温熱的快適性評価. *デサントスポーツ科学*, vol. 30, pp. 87-95.

前野 隆司, 小林 一三, 河合 隆志, 平野 雄一. (1998). 曲面状弾性体の内部ひずみ分布検出に基づく把持力制御法. *日本機械学会論文集 C編*, vol. 64, no. 620, pp. 1258-1265.

発表リスト

受賞 (8件)

1. 優秀講演賞

柴原 舞, 佐藤 克成: 布の湿り感覚と温熱的性質の関連性に関する研究, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2014)

2. 2016年度論文賞

柴原 舞, 佐藤 克成: 布の温度制御による湿り感の錯覚, 繊維製品消費科学会, Vol. 56, No. 12, pp. 41-48

3. 優秀講演賞

柴原 舞, ヤエム ヴィボル, 佐藤 克成, 梶本 裕之: 指腹部の皮膚変形の方が及ぼすなぞり感への影響, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2016)

4. 優秀講演賞

喜多 萌子, 柴原 舞, 佐藤 克成: 顔の局所的皮膚感覚刺激が心身に及ぼす影響, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2016)

5. 優秀講演賞

米山 理子, 喜多 萌子, 柴原 舞, 佐藤 克成: 布帛のべたつき感の定量的評価方法の提案, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2016)

6. 若手優秀発表賞

服部 愛, 柴原 舞, 佐藤 克成: 写真を用いた Pseudo Haptics による布の質感提示, 日本繊維製品消費科学会 2017 年年次大会

7. 学術奨励賞

喜多 萌子, 柴原 舞, 佐藤 克成: 後頸部への皮膚感覚刺激が顔面部の血行及び心理状態に及ぼす影響, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2017

8. 優秀講演賞

喜多 萌子, 柴原 舞, 佐藤 克成: 局所的皮膚感覚刺激が顔面部の血行及び心理状態に及ぼす影響, 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2017)

国際論文 (主著 1件)

1. **Mai Shibahara** and Katsunari Sato: Illusion of wetness by dynamic touch, IEEE Transactions on haptics, vol. 12, no. 4, pp. 533-541(2019)

国内論文（主著 3 件）

1. 柴原 舞, 佐藤 克成：布の温度制御による湿り感の錯覚, 繊維製品消費科学会, vol. 56, no. 12, pp. 951-958 (2015)
2. 柴原 舞, 森 奈津乃, 佐藤 克成：布製品に必要とされる機能の欲求階層説に着目した推測, 繊維製品消費科学会, vol. 58, no. 2, pp. 189-197(2017)
3. 柴原 舞, ヤエム ヴィボル, 佐藤 克成, 梶本 裕之：なぞり感提示における指腹部せん断変形の向きの影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 22, no. 3, pp. 301-304(2017)

査読付き国際会議（主著 3 件, 関連 2 件）

1. **Mai Shibahara** and Katsunari Sato: Illusion of Wet Sensation by Controlling Temperature and Softness of Dry cloth, Proc. of EuroHaptics 2016, pp. 371-379 (2016.7)
2. Vibol Yem, **Mai Shibahara**, Katsunari Sato and Hiroyuki Kajimoto: Expression of 2DOF Fingertip Traction with 1DOF Lateral Skin Stretch, Proc. of AsiaHaptics 2016, pp. 21-25 (2016.11)
3. **Mai Shibahara** and Katsunari Sato: Temperature Threshold to Produce the Illusion of Wetness by Changing Contact Area Between a Dry Cloth and Skin, World Haptics 2017 (2017.6)
4. Ai Hattori, **Mai Shibahara**, Katsunari Sato: Presentation of Cloth Texture on Touch Panel Using Pseudo Haptics, World Haptics 2017 (2017.6)
5. **Mai Shibahara**, Katsunari Sato, Astrid M.L. Kappers: Relative sensation of wetness of different materials, Proc. of EuroHaptics2018, pp. 345-353 (2018.6)

国内学会発表（主著 8 件, 関連 10 件）

1. 柴原 舞, 佐藤 克成：布の湿り感覚と温熱的性質の関連性に関する研究, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2014) 講演論文集 (2014.12)
2. 柴原 舞, 佐藤 克成：布の湿り感に影響を及ぼす温冷感と布の性質の影響, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会(2015.9)
3. 柴原 舞, 佐藤 克成：湿り感提示における布の温度と柔らかさの影響, 日本繊維製品消費科学会 2016 年年次大会(2016.6)
4. 柴原 舞, ヤエム ヴィボル, 佐藤 克成, 梶本 裕之：指の皮膚変形による布感の提示手法の検討, 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会(2016.9)

5. 柴原 舞, ヤエム ヴィボル, 佐藤 克成, 梶本 裕之: 指腹部の皮膚変形の方向が及ぼすなぞり感への影響, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2016) 講演論文集 (2016.12)
6. 喜多 萌子, 柴原 舞, 佐藤 克成: 顔の局所的皮膚感覚刺激が心身に及ぼす影響, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2016) 講演論文集 (2016.12)
7. 米山 理子, 喜多 萌子, 柴原 舞, 佐藤 克成: 布帛のべたつき感の定量的評価方法の提案, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2016) 講演論文集 (2016.12)
8. 喜多 萌子, 柴原 舞, 佐藤 克成: 局所的皮膚感覚刺激による美容支援デバイスの設計, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (2017.5)
9. 柴原 舞, 佐藤 克成: 錯覚を利用した布の湿り感提示手法, 日本家政学会第 69 回大会 (2017.5)
10. 柴原 舞, 佐藤 克成: 布の湿り感錯覚における接触面積の効果, 日本繊維製品消費科学会 2017 年年次大会(2017.6)
11. 服部 愛, 柴原 舞, 佐藤 克成: 写真を用いた Pseudo Haptics による布の質感提示, 日本繊維製品消費科学会 2017 年年次大会(2017.6)
12. 喜多 萌子, 柴原 舞, 佐藤 克成: 後頸部への皮膚感覚刺激が顔面部の血行及び心理状態に及ぼす影響, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2017 (2017.9)
13. 柴原 舞, 佐藤 克成: なぞり運動時の湿り感の知覚, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会(2017.9)
14. 服部 愛, 柴原 舞, 佐藤 克成: 指の動作に応じた布の変形写真の表示による布の質感伝達, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会(2017.9)
15. 喜多 萌子, 柴原 舞, 佐藤 克成: 局所的皮膚感覚刺激が顔面部の血行及び心理状態に及ぼす影響, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2017) 講演論文集 (2017.12)
16. 服部 愛, 柴原 舞, 佐藤 克成: 触動作の速度に応じた布の変形写真表示による布の質感伝達, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2017) 講演論文集 (2017.12)
17. 村元 鈴露, 柴原 舞, 佐藤 克成, 浅沼 夏海, 野々村 美宗: 布のぬめり感と温度・摩擦特性の関係, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2018) 講演論文集(2018.12)
18. 尤 禅懿, 柴原 舞, 佐藤 克成: 皮膚の水分量に伴う布の湿り感変化の評価, 第 20 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2019) 講演論文集(2019.12)