

**温度感覚がもたらす運動・感覚作用の
医療福祉への応用**

渡辺 亮

電気通信大学大学院情報理工学研究科

博士学位申請論文

2017年3月

温度感覚がもたらす運動・感覚作用の 医療福祉への応用

博士論文審査委員会

主査	梶本 裕之	准教授
委員	兼子 正勝	教授
	坂本 真樹	教授
	板倉 直明	教授
	広田 光一	教授
	児玉 幸子	准教授

著作権所有者

渡辺亮

2017年

Medical application of motor and perceptual effect caused by thermal perception

Ryo Watanabe

Abstract

Thermal stimulation could be presented with lower cost and energy than vibration stimulation. Therefore, it might be an efficient way to present information to wide area of our body. However, the study of thermal sense is currently mostly limited to scientific research, and most application of thermal sense is for virtual reality environment to achieve more realistic haptic sense. On the other hand, thermal stimulus give participants other information than thermal perception itself, such as other sensations or some motion. For example, pain and itch sensations are different from thermal sensation, but these three kinds of senses were commonly mediated with the same types of nerves (A δ and C), and recent study indicated that thermal sensation affects grip force control. This research focused on these effects and tried to apply them for medical purposes.

Our first application is a thermal stimulation to relieve itch sensation that is common to many skin diseases, such as atopic dermatitis. Common methods of itch treatment often has serious side effects. It is therefore important to reduce the itch sensation without damaging the skin. I developed and evaluated roller-type device that could present painful thermal grill illusion (TGI) that have itch-relief effect. The results showed that device is effective in terms of relieving the itch sensation, and the effect continued for at least 8 minutes. I also investigate the nature of a thermal illusion, thermal referral (TR) that might useful to present TGI to our whole body.

Our second application is a thermal stimulation for motor control. I found out that there are correlation between thermal change and grip force change, which implies possibility of applying thermal sensation as a diagnosis method of absence of thermaesthesia. In addition, I investigated the relationship between temperature and motor control of other body parts. The result suggested that dynamic thermal change in sole might influence standing position, and sometimes a swaying is elicited.

This thesis is summarized as follows. I tried to apply the effects of thermal stimulus other than pure temperature information for medical treatment, and the possibility of itch-relief and diagnosis of absence of thermaesthesia were confirmed.

温度感覚がもたらす運動・感覚作用の医療福祉への応用

渡辺 亮

概要

人間の皮膚感覚は、皮膚の機械的変形を伝える触覚（本論文では機械的変形を伝える感覚を狭義の触覚とする）、温度感覚、痛覚等によって構成されている。このうち触覚については近年、バーチャルリアリティ（VR）等、さまざまな分野への応用もなされている。しかし温度提示の応用は、VRにおける皮膚感覚の一要素としての温度感覚の提示や、保温等による快適性の向上に限定され、いまだ発展途上の研究分野といえる。一方で温度提示は機械的な駆動部を必要とせず、また振動提示等と比べて低コスト、低エネルギーであるため、全身への情報提示に向いている可能性がある。これらのメリットを持ちながら応用が行われなかった理由として、これまでの温度提示が「温度そのものの知覚」に主眼をおいていたことが挙げられる。

しかし、温度提示によってもたらされるものは温度そのものの知覚に限らない。温度感覚は温度の情報を伝達するのみならず、時としてほかの感覚を生起し、さらには人間の運動を誘発する。例えば痛み、痒みの感覚は必ずしも温度提示と不可分の感覚ではないが、伝達する神経は温度を伝達する神経と共通し、実際には温度感覚と不可分の関係にある。また近年の研究では、人間が物体を把持する力の調節に温度感覚が寄与することが示唆されている。このような温度感覚の運動および感覚に与える作用を考えれば、上述した振動等の触刺激提示に対する利点を活用することができるであろう。

本論文は単純な温度情報の伝達にとどまらない、温度感覚がもたらす運動・感覚作用に注目し、特に医療福祉分野における応用を提案する。本論文ではこうした温度感覚が身体に与える作用を「純粋に感覚的なもの」、「身体運動に影響を与えるもの」の2つに分類した。温度感覚の身体作用については限定的にしか知られていないが、上記の分類それぞれについて「温度感覚による痛みの生起」と「温度感覚による運動調整」が挙げられる。

「純粋に感覚的なもの」として挙げた温度感覚提示が痛みの感覚を生起する現象に着目すると、痒みの鎮静（鎮痒）への応用可能性がある。温度感覚はA δ 線維とC線維によって伝達され、同じくA δ 、C線維により伝達される痛み、痒みとも密接な関係をもつ。痒みは乾皮症や腎不全、糖尿病等様々な病気の症状として知られるが、なかでも日本国内に約35万人の患者を抱えるアトピー性皮膚炎は非常に重大な問題となっている。現在一般的な痒みの治療法は少なからず副作用の危険性を持つ。特に、アトピー性皮膚炎の治療薬として最も一般的なステロイド薬には多くの重篤な副作用が報告されている。この他の痒みを抑制する方法に、患部を掻きむしる、患部に痛みを与える等がある。いずれも鎮痒効果があることは検証されているが、皮膚を損傷し症状を悪化させる危険性が大きく、治療に用いることは難しいとされる。これに対して本論文では温度錯覚現象 Thermal grill illusion (TGI) を用いた鎮痒を提案した。TGIは温冷2つの温度感覚提示によって痛みを生じる現象であり、皮膚を損傷せず痛みを提示することが可能であることから、副作用のない鎮痒手法になる可能性がある。ローラー型の温冷刺激部が皮膚上を回転することで

時空間的に交互に温冷刺激を提示し、TGIを生起させるという手法を提案し、複数回の鎮痒デバイスの試作および鎮痒効果の実験を行い、一定の鎮痒効果を有するという結果を得た。またローラーを用いずにTGIを生じさせるために、温度感覚が触覚提示部位に転移する現象であるThermal Referral (TR)を用いる手法を検討し、TRによって転移した温度提示部にTGIが生じることを発見した。さらにTRが全身に適用できることを示した(第4章)。

「身体運動に影響を与えるもの」として挙げた温度感覚と把持力調節機能の関係に着目すると、温度感覚検査への応用可能性がある。近年の温度感覚研究では温度感覚の脱出した患者の把持動作に異常がみられることから、A δ 、C線維が伝達する温度感覚が運動機能に関与する可能性が示唆されていた。この知見は人間の温度知覚を、主観的な回答に依らない把持力の変化という客観的な形で表すことができる可能性が大きいことを示している。これまで温度知覚能力を計測する際には、患者の主観的な回答に頼る場合が多く、明確にその能力を計ることが困難であった。無意識的な運動調節が温度の知覚サインとなるのであれば、検診やリハビリの現場で温度、痛みを評価する際の指標としての運用が期待できる。本論文ではより直接的な温度提示と把持力調節の関係を探るため、物体の表面温度を動的に変化させることが可能なキューブ型のマニピュランダムを開発した。被験者が拇指、示指で装置を把持した際の、表面温度の変化に伴う把持力の推移を記録した。温度変化と把持力の関係性を検討したところ、物体表面の温度が増加すると把持力が減少するという関係性を認めた。健常者におけるこのような変化が温度覚由来の調節であることを確かめる目的で、温度感覚が脱失しているCIPA患者4名に同様の課題を行わせたところ、温度変化と把持力変化の間には関連性を認めなかった。また、実験を行った健常者は温度の変化を知覚した一方で把持力が変化したことを認識していなかったことから、温度の変化に伴う把持力調節は無意識的な調節であることが示唆された。これらの結果により、提案手法、デバイスが温度知覚能力の検査に応用可能であることを示した。次に把持動作についてみられた運動調節が姿勢や状況に依存しないものであるか検証を行った。手掌部における実験では温度と加重の推移に関連はみられなかった。これは把持動作に、「把持した物体を落さない」という明確な目的があるのに対し、手掌部の実験の場合明確な目的がなく加重調節の必要がなかったためと考えた。そこで立位という明確な姿勢調整の必要性を持つ条件を用いたが、温度変化と重心の推移の関係は不明確であった。しかし人間が立位姿勢をとるときの自然な重心動揺が実験条件に近いことから、周期をより大きく変更した実験を行った。その結果、温度変化時にわずかではあるが重心の偏りが生じることが示唆された(第5章)。

以上のように、本論文は温度感覚のもたらす「温度そのものの知覚」以外の身体作用に注目し、特に医療福祉分野における応用を提案した。温度感覚によって痛覚を生起するという現象を鎮痒に利用できること、温度感覚によって運動調整が生じるという現象を温度知覚機能検査に利用できることを示した。

目次

第1章	序論	13
1.1	研究背景	13
1.2	研究目的	13
1.3	本論文の構成	14
第2章	温度感覚および痛覚に関する知見	15
2.1	温度受容体	15
2.2	温度感覚の錯覚	16
2.2.1	サーマルグリル錯覚 (TGI)	16
2.2.2	Thermal referral	17
2.3	温度感覚の脱出を伴う疾病	20
第3章	既存の解決手法と問題点	22
3.1	痒みの抑制 (鎮痒) 手法	22
3.1.1	薬剤による鎮痒	22
3.1.2	搔破行動による鎮痒	24
3.1.3	笑いによる鎮痒	25
3.1.4	冷却による鎮痒	26
3.1.5	痛みによる鎮痒	26
3.1.6	鎮痒手法のまとめ	27
3.2	温度知覚能力の検査方法	28
3.3	姿勢の制御手法	28
3.3.1	視覚刺激が姿勢に及ぼす影響	29
3.3.2	GVS (Galvanic Vestibular Stimulation) を用いた姿勢制御	30
3.3.3	ハンガー反射を用いた姿勢制御	30
3.3.4	重心動揺の増幅・減弱による姿勢制御	30
第4章	温度提示を用いた鎮痒	32
4.1	ローラー型ポータブルデバイスを用いた TGI の提示	32
4.2	第1試作	34
4.2.1	デバイス構成	34
4.2.2	評価：提示温度の安全性	37
4.2.3	評価：鎮痒実験	37
4.3	第2試作	39

4.3.1	デバイス構成	39
4.3.2	評価：提示温度の安全性	41
4.3.3	評価：TGI の提示	42
4.3.4	評価：鎮痒実験 1	43
4.3.5	評価：鎮痒実験 2	46
4.4	TR を用いた鎮痒の可能性検討	48
4.4.1	TR による TGI 提示実験	49
4.4.2	全身における TR の生起実験	54
4.5	まとめ	57
第 5 章	温度提示を用いた運動調節	58
5.1	温度変化と把持力の推移	58
5.1.1	実験システム	58
5.1.2	実験条件	59
5.1.3	実験手続	60
5.1.4	実験結果	60
5.1.5	考察	61
5.2	手掌部への温度提示による加重推移	62
5.2.1	手掌部における力触覚生起実験	62
5.2.2	手掌部における触力覚生起と加重変化	65
5.3	足裏への温度提示による重心遷移	68
5.3.1	左右方向の重心制御	69
5.3.2	前後方向の重心制御	72
5.3.3	前後方向の重心制御（姿勢の統制）	77
5.3.4	長周期の温度変化と重心の推移	79
5.4	まとめ	81
第 6 章	結論	83
6.1	まとめ	83
6.1.1	温度提示を用いた鎮痒手法（第 4 章）	83
6.1.2	温度感覚提示による運動調節（第 5 章）	84
6.2	今後の展望	85

6.2.1	温度提示を用いた鎮痒手法.....	85
6.2.2	温度提示と温度知覚能力の検査.....	85
6.2.3	温度提示と姿勢の制御.....	86
	謝辞.....	87
	参考文献.....	88

図表目次

図 2-1	TGI イメージ図	16
図 2-2	TGI のエンタテイメント利用の例[25][59]	17
図 2-3	手指における TR の例[26].....	18
図 2-4	温度の平均化[15]	18
図 2-5	指の組合せによる TR の差異[11]	19
図 2-6	刺激間の距離による TR の変化[12]	20
図 2-7	CIP 群と健常群の把持力推移.....	21
図 3-1	STT (痒み神経) 細胞活動 (左: 掻く前 右: 掻いた後) [7].....	24
図 3-2	特殊な孫の手の例[44].....	25
図 3-3	コメディ番組視聴によるアレルギー反応値の変化 (左: 視聴前 右: 視聴後) [77]	25
図 3-4	温度提示による痒みの推移 (左上: 49°C 右上: 2°C 左下: 41°C 右下: 15°C) [42]	26
図 3-5	一般的な温度感覚検査の手順[57]	28
図 3-6	左: 与えられた運動視差 右: 視覚刺激と揺れのタイミング[5]	29
図 3-7	レンチキュラレンズを用いた歩行誘導[40].....	29
図 3-8	GVS 装置と電流方向と生起する加速度の方向[30]	30
図 3-9	ハンガー反射 (左: 頭部 右: 腰部) [24].....	30
図 3-10	重心動揺リアルタイムフィードバックシステム BASYS[51].....	31
図 4-1	デバイスイメージ図	32
図 4-2	デバイス使用による摩擦	33
図 4-3	ローラーの大型化	33
図 4-4	ローラーによる温冷刺激の交互提示.....	34
図 4-5	試作デバイス外観	34
図 4-6	システム構成	35
図 4-7	オーディオ端子による回転体の接続.....	35
図 4-8	ローラー断面図.....	36
図 4-9	サーモグラフ (左: ローラー表面温度 右: 使用時の皮膚)	36
図 4-10	ローラー表面温度の遷移	37
図 4-11	痒みの遷移	38
図 4-12	試作デバイス外観	39
図 4-13	システム構成	40
図 4-14	ペルチェ素子とローラー (左: 第 1 試作 右: 第 2 試作)	40
図 4-15	ローラー内部	41
図 4-16	ローラー表面温度の遷移	41
図 4-17	実験結果.....	43
図 4-18	痒みの遷移	45

図 4-19	痒みの遷移.....	47
図 4-20	分散分析の結果.....	47
図 4-21	TR を用いた非接触 TGI.....	49
図 4-22	相互の TR.....	49
図 4-23	実験システム.....	50
図 4-24	実験の様子.....	51
図 4-25	実験結果 (“n-n”, “h-h”, “c-c”).....	51
図 4-26	実験結果 (“h-n”, “c-n”).....	52
図 4-27	実験結果 (“n-h”, “n-c”).....	52
図 4-28	実験結果 (“h-c”, “c-h”).....	53
図 4-29	温度提示装置.....	54
図 4-30	温度提示部位.....	55
図 4-31	30℃のみ提示した際の TR 生起率.....	56
図 4-32	TR 生起率.....	56
図 5-1	上：装置外観 下：システム図.....	59
図 5-2	代表的な健常群被験者 1 試行の計測結果と相関曲線 (A：温度, 把持力の推移 B： 5 周期を重ね合わせたもの C：各周期の相関曲線).....	60
図 5-3	左：全体の相関曲線 右：相関値.....	61
図 5-4	3 条件における相関曲線.....	61
図 5-5	生起する感覚.....	62
図 5-6	温度提示装置.....	63
図 5-7	触力覚の生起率.....	64
図 5-8	温度提示装置.....	65
図 5-9	触力覚の生起率.....	66
図 5-10	被験者 1 名の計測結果 (赤：温度 緑：加重).....	67
図 5-11	被験者 1 名の相関曲線 (点線は 5 周期の平均).....	67
図 5-12	実験結果 (左：(b) 27~37℃ 右：(c) 37~47℃).....	68
図 5-13	生起する感覚のイメージ.....	69
図 5-14	実験装置.....	70
図 5-15	被験者 1 名の記録波形.....	71
図 5-16	各周期の相関曲線.....	71
図 5-17	被験者全体の相関曲線.....	72
図 5-18	想定される感覚と姿勢.....	73
図 5-19	左：実験装置 右：実験中の足の位置.....	73
図 5-20	感覚の生起率 (A：触力覚 B：揺れ感覚 C：両感覚ともに知覚した割合)....	74
図 5-21	被験者 1 名の計測結果 (A：提示温度 B：重心移動) と各周期の相関曲線 (C)	75
図 5-22	全被験者の平均相関曲線.....	75
図 5-23	左：触力覚回答試行の平均相関曲線 右：揺れ感覚回答試行の平均相関曲線....	76

図 5-24	左：触力覚のみ回答試行の平均相関曲線 右：揺れ感覚のみ回答試行の平均相関曲線.....	77
図 5-25	乗り方と温度提示面積.....	78
図 5-26	全被験者の平均相関曲線	79
図 5-27	全被験者の平均相関曲線	80
図 5-28	提示温度による重心の差	81
表 2-1	主な温度受容体の特性（文献[74]より抜粋・改変）	15
表 3-1	先行手法の効果と副作用	27
表 4-1	実験条件	38
表 4-2	実験条件.....	44
表 4-3	各条件間の有意差	45

第1章

序論

1.1 研究背景

人間の皮膚感覚は、皮膚の機械的変形を伝える触覚（本論文では機械的変形を伝える感覚を狭義の触覚とする）、温度感覚、温度感覚の一種ともいべき痛覚等によって構成されている。温度感覚は重要な感覚の一つであり、我々は日常生活においてその恩恵を受けている。しかし温度感覚と同じく皮膚感覚である触覚については、近年その基礎的性質の検討やバーチャルリアリティ（VR）分野への応用の研究が盛んになされているのに対し、温度感覚はそれに比して研究が少なく、いまだ発展途上の研究分野といえる。温度提示は、触った感覚の質を向上するための手段、いわば触覚の一要素としての温度感覚の提示や、保温等による快適性の向上に用いられることが主であった。しかし一方で温度提示は機械的な駆動部を必要とせず、また振動提示等と比べて低コスト、低エネルギーであるという利点を持ち、全身への情報提示に向いている可能性がある。にもかかわらず利用されてこなかった原因に、これまでの温度提示が「温度そのものの知覚」に主眼をおいていたことが挙げられる。VR分野の場合を考えても、触覚の場合には、さまざまに再現すべき感覚が多数考えられるのに対し、温度感覚の場合、再現すべきものは文字通りの温度の知覚そのものでしかなく、物理的接触による温度変化の忠実な再現といった、きわめて限られたものであった[40]。

このように、温度提示による単純な温度の知覚という観点からは、その応用範囲は限られる。一方で、温度提示によってもたらされる「温度そのものの知覚」以外の作用に注目すればその限りではない。温度感覚が生じることによって、人は温度が提示されていることを知覚するが、温度感覚はただ温度の情報を脳へ伝えるのみならず、温度感覚の生起が他の感覚や、人間の運動を生起ないし誘発する場合がある。たとえば痛覚は文字通り痛みの感覚であり、必ずしも温度提示と不可分の感覚ではないが、痛覚を伝達する神経は高温ないし低温の温度を伝達する神経と共通しており、実際には温度感覚と不可分の関係にあり温度感覚の一種ということもできる。痒みの感覚も同様に温度感覚と伝達神経を一にしており、温度感覚の影響を受けることが知られている。また近年の研究では、人間が物体を把持する力、把持力の調節に温度感覚が寄与することが示唆されている。

1.2 研究目的

本論文は上述したような、これまで一般には注目されてこなかった、温度提示がもたらす「温度そのものの知覚」以外の身体作用に注目し、特に医療福祉分野において応用することを提案す

る。本論文ではこうした温度提示の身体への作用を純粋に感覚的な作用、「身体運動に影響を与える作用」の2つに分類した。前者は温度提示によって温度感覚以外の感覚を生じるものを指し、後者は温度提示により身体運動が生じるものを指す。温度感覚の身体作用については限定的にしか知られていないが、二者それぞれについて「温度感覚による痛みの生起」と「温度感覚による運動調整」が挙げられる。

本論文では前者に関し、温度錯覚 TGI によって生じる痛覚を用いた皮膚を傷つけない鎮痒手法に取り組む。ローラー型鎮痒装置を試作開発し、その効果を検証する。加えて、患部に接触せずに TGI を提示するため、温度感覚が触覚提示部位に転移する現象である Thermal Referral (TR) を用いる手法を検討する。痒みはアトピー性皮膚炎をはじめ多くの疾病にみられる症状であり、その鎮静手法にはしばしば副作用を伴うために大きな問題となってきた。このため温度感覚の性質を利用した鎮痒手法の考案と装置の試作には大きな意義がある。

また後者に関しては、まず温度感覚が把持力の調節に関与するという先行研究における示唆に基づき、温度提示と運動調節機能との関係を分析し温度知覚能力検査方法としての応用を提案する。これまで人間の温度知覚能力の検査は被験者が口頭で行う回答に依るところが大きく、その結果は被験者の主観に大きく影響される。これに対し、把持力の変化という形で温度知覚能力を診断可能とすれば、客観的な診断方法という点で優れているといえる。こうした観点から実験を行い、温度知覚能力検査方法としての応用可能性を探る。また把持力調整にとどまらず、身体各所の運動感覚に影響を与えるかどうかを調査し、人間の姿勢の制御、具体的には立位姿勢や歩行のサポート手法としての応用可能性を探る。

1.3 本論文の構成

第2章では温度感覚の基礎的性質について述べる。温度を伝達する神経繊維や受容体の種類について述べた後、温度感覚に関わる錯覚現象、温度感覚を脱出する疾病について説明する。

第3章では本論文で取り組む各テーマについて関連研究をまとめる。既存の鎮痒手法および姿勢を制御する手法について述べる。

第4章では安全に痛覚を生起する錯覚現象 TGI を利用した鎮痒について検討する。皮膚を損傷しない TGI 提示方法としてローラー型鎮痒装置を提案、試作を行う。そのうえで実際に鎮痒実験を行い、その効果を検証する。また錯覚現象 TR を利用し患部に接触せずに TGI を生起する手法を提案する。非接触 TGI を行うにあたり必要となる基礎的な性質を検証していく。具体的には TR によって TGI が生起可能か、TR が身体のどの部位で生起するか検証実験を行う。

第5章では温度感覚の運動調節への影響を検討する。温度感覚の把持力調節への関与を実験により検証し、その後手掌部、足裏への提示温度変化によって触力覚や揺れの感覚を生起する錯覚現象の性質および重心動揺に与える影響についても検証する。

第6章では結論および今後の課題について述べる。

第2章

温度感覚および痛覚に関する知見

本章では以降で取り組む課題に関連すると思われる温度感覚の基礎的な性質についてまとめる。

2.1 温度受容体

温度感覚は A δ 線維と C 線維によって伝達され、同じく A δ 、C 線維により伝達される痛み、そして痒みとも密接な関係をもつ。温度に応答して活性化するイオンチャンネルを温度受容体と呼ぶ。温度受容体には種類があり、それぞれ応答する温度、生起する感覚が異なる[76]。たとえば 43°C 以上の侵害性の温度提示において活性化する温度受容体 TRPV1 がもたらす感覚は痛みや辛さである。温度受容体は温度以外の要因によっても活性化する場合がある。こうした要因の例としてカプサイシン、メントールが挙げられる。唐辛子に含まれる成分カプサイシンは、痛み、辛みを生起する温度受容体 TRPV1 を、ハッカ（ミント）に含まれるメントールは冷覚を生起する温度受容体 TRPM8 を活性化する[75]。表 2-1 に温度受容体の活性化する温度、分布域、温度以外の活性化刺激を示す。

表 2-1 主な温度受容体の特性（文献[76]より抜粋・改変）

受容体	活性化温度閾値	存在する部位	温度以外の活性化刺激
TRPV1	43°C <	感覚神経 脳	カプサイシン 酸 アリシン 脂質
TRPV3	32 ~ 39°C <	感覚神経 脳 脊椎 内臓	カンフル サイモール カルバクロール
TRPM8	< 25 ~ 28°C	感覚神経	メントール
TRPA1	< 17°C	感覚神経 内耳	アリルイソチオシアネート シナモアルデヒド カルバクロール アリシン

2.2 温度感覚の錯覚

温度感覚における錯覚現象のうち、第4章で論じる鎮痒手法に関連するものとしてサーマルグリル錯覚 (TGI) と Thermal referral (TR) について取り上げる。TGI によって生起される痛覚は第3章で紹介するように、本論文の課題の一つである鎮痒に関係する。TR は痛覚を簡便に広範囲へと提示する可能性をもつ。

2.2.1 サーマルグリル錯覚 (TGI)

サーマルグリル錯覚 (Thermal grill illusion, 略称 TGI), 別名 Synthetic heat (略称 SH) は図 2-1 のように温刺激と冷刺激を皮膚上の近傍へ同時に提示した際に痛覚や灼熱感を伴う独特の感覚を生じる錯覚現象である [1][6][28]。

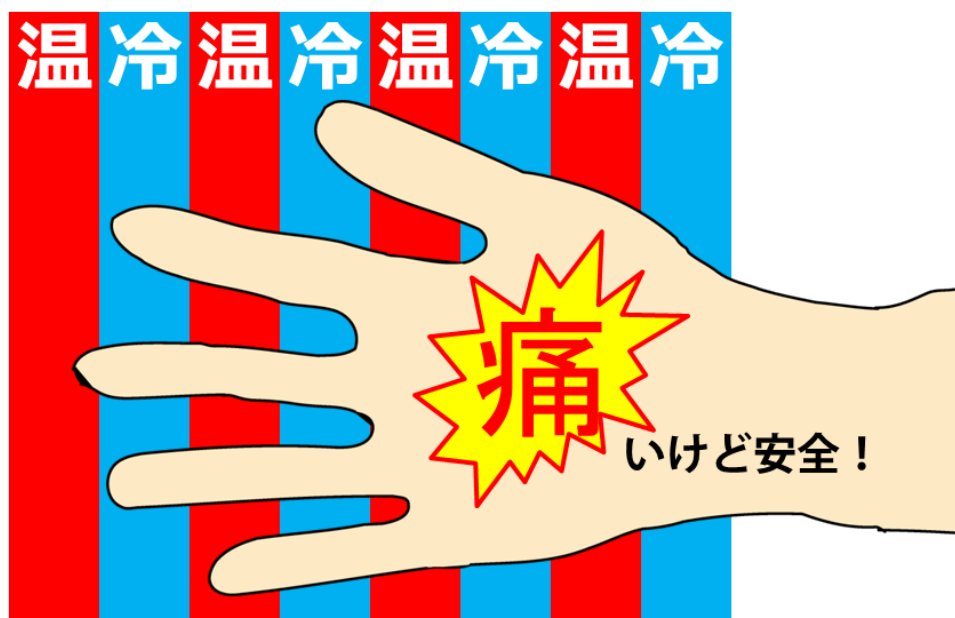


図 2-1 TGI イメージ図

TGI の特徴として、皮膚に損傷を与えない温度提示の組み合わせで痛覚を生起可能という点が挙げられる ([14], [2])。皮膚を傷つけず、安全に生起可能であることから痛みに関する心理実験にも用いられるほか、エンタテインメント分野への応用もされている [21][26] (図 2-2)。

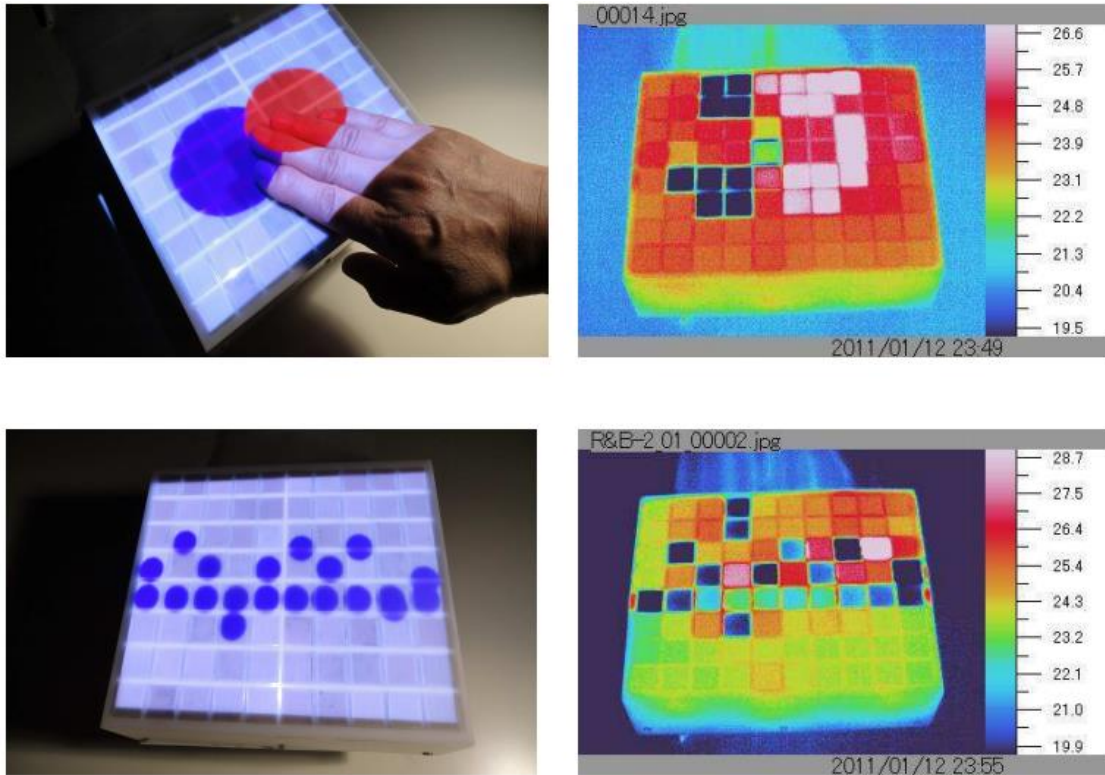


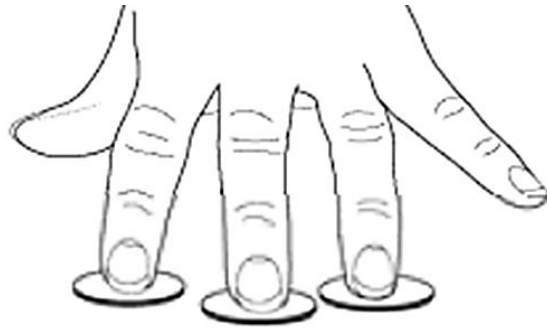
図 2-2 TGI のエンタテイメント利用の例[26][60]

第 3 章では痛覚が痒みを抑制することを紹介するが、皮膚を損壊せず純粋な痛みのみを生起できるという TGI の性質は鎮痒手法として有効と考えられる。同じく錯覚により痛みを生じるカプサイシンと TGI を比較すると、前者は皮膚に吸収されることで痛みを生じるため、時間的な応答性に劣る。カプサイシンは塗布後痛みを生じるまでに多少時間を要し、また同様に、一旦皮膚に塗布してしまうと、痛みを消すにも時間を要する。対して TGI は温源と皮膚との接触により生起が可能であるため、時間的な応答性に優れる。

2.2.2 Thermal referral

皮膚上の二点において温度提示と触刺激を同時に提示すると、触刺激提示部位にも温度感覚が生じる現象を Thermal referral(略称 TR)と呼ぶ。TR は温度を広範囲に提示する一手法としての可能性をもつほか、第 4 章に提案する非接触 TGI を実現するうえで重要な錯覚現象である。

手指における TR の例を図 2-3 に示す。3 指はともに温源に接触した状態にあるが、実際に温度が提示されるのは外側の 2 指のみである。このとき、温度が提示されていない中指においても温度が知覚される[11]。



Physical Stimulation	warm	neutral	warm
	cool	neutral	cool
Perceptual Experience	warm	warm	warm
	cool	cool	cool

図 2-3 手指における TR の例[27]

Hoらは、この3指におけるTR生起時に、外側の2指が知覚する温度が実際に提示している提示温度よりも弱く、かつ3指において知覚する温度が同程度となる現象を報告した。(図 2-4). この現象は温度の平均化と表現される[16].

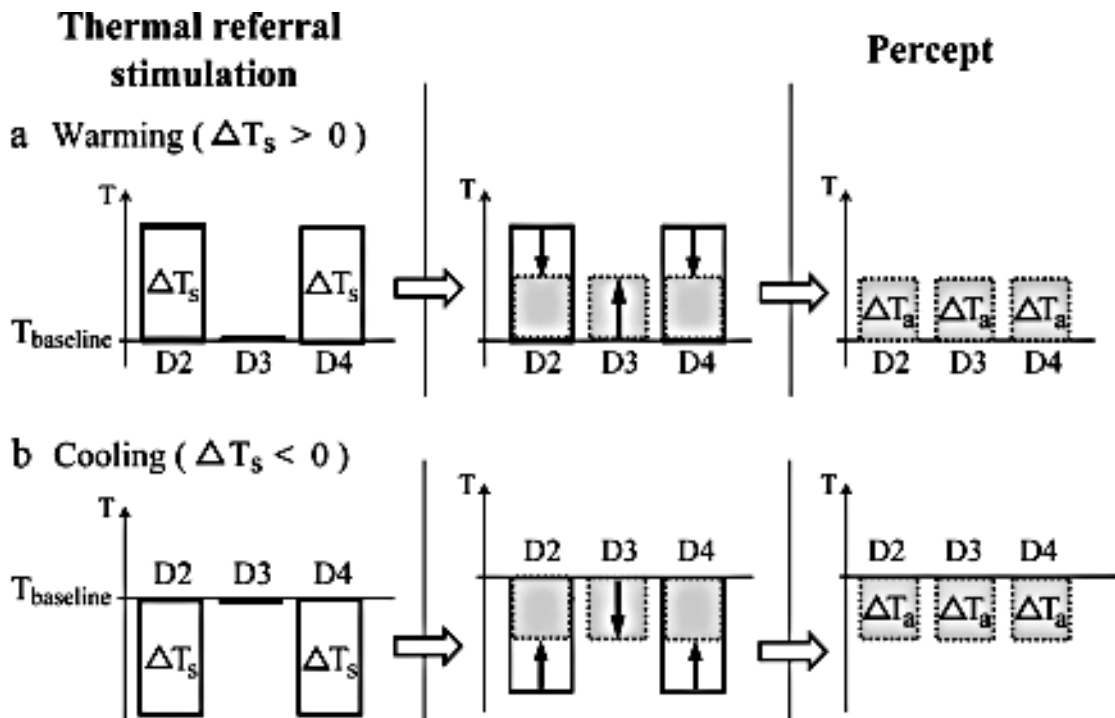


図 2-4 温度の平均化[16]

TRは2指(温度提示を与える指, 触刺激を与える指それぞれ1本ずつ)においても生起し, その指の組み合わせにより知覚される温度に差異があることが報告されている[12]. 図 2-5 は親指

を除いた片手の4指のうち、2指の組み合わせにおいてTRが生起した際に生じた温度感覚の強度を示したグラフである。グラフ横軸の1~4は各指を表し、数字が小さい程人差し指に近い指である。黒の棒グラフは人差し指側の指のみ温度提示した際に小指側の指に生じた温度感覚の強度を表し、白の棒グラフは小指側の指のみ温度提示した際に人差し指側の指に生じた温度感覚の強度を表す。図2-5は同時に、TRは温覚の場合よりも冷覚の場合の方が、実際に提示された温度に対してTRが生起する温度感覚が弱くなることを示す。冷覚においてTRが生じにくい理由は、温覚と比較して冷覚の空間分解能が高いためであるといわれる[27]。

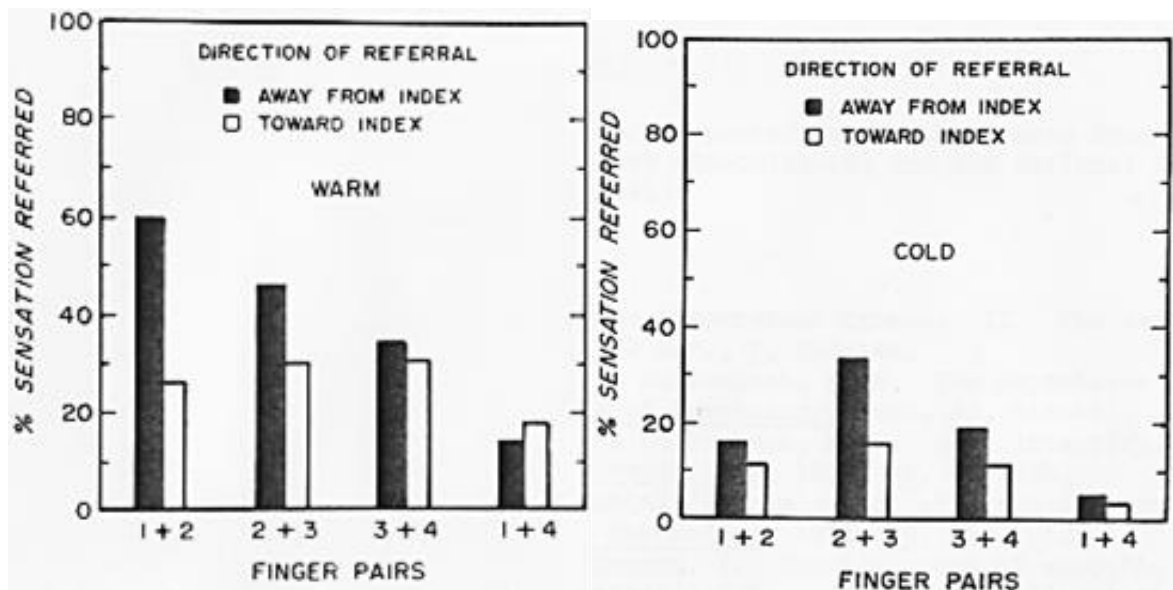


図 2-5 指の組合せによるTRの差異[12]
(左：温覚 右：冷覚)

TRは手指のみではなく前腕部においても生起することが報告されている[13][69]。図2-6は前腕における温度提示と触刺激の距離がTRにおいて知覚される温度感覚へ与える影響を示したグラフである。白丸が温度提示部に知覚した温度感覚の強度、黒丸が触刺激提示部位に知覚した温度感覚の強度を表す。刺激間の距離が大きい程知覚される温度感覚が微弱となることがわかる。

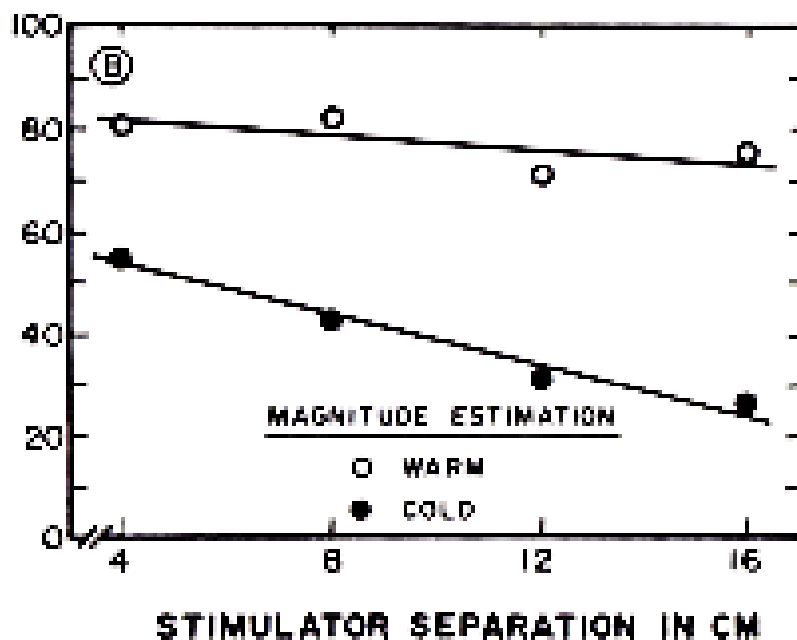


図 2-6 刺激間の距離による TR の変化[13]

また TR を用いて TGI が生起可能であることが示唆されている。Green は被験者の人差し指、薬指に温刺激を、中指に冷刺激を同時に提示した際の感覚を報告した。痛みについての検証はなされていないものの、中指では冷覚に加えて温覚が重畳され、温度の判別が困難となったほか、中指に Synthetic Heat (TGI) が知覚されたことを報告した[11]。

2.3 温度感覚の脱出を伴う疾病

温度感覚が脱出する疾病には様々なものがある。触覚等他の感覚と同様、温度感覚も脳や脊椎の損傷によって失われる。また糖尿病では高血糖状態が続くと、知覚神経、運動神経、自律神経を含む末梢神経の働きが阻害される。このため温度感覚も鈍麻、脱出する場合がある。これらの疾病は温度感覚と伝達神経を同じくする痛覚は無論のこと、触覚や他の感覚、能力も脱出、鈍麻する。本論文で取り組む温度知覚能力の検査手法の検討という観点からは、純粋に温度感覚（痛覚を含む）が脱出する疾病の罹患者を実験の対象者としてすることが有用と考えられる。

温痛覚のみを脱出する疾病として先天性無痛無汗症（Congenital Insensitivity to Pain, CIP）が挙げられる。CIP は交感神経性感覚ニューロパチー（Hereditary Sensory and Automatic Neuropathy, HSAN）に分類される疾病の 1 つである。温度感覚、痛覚を伝達する C 線維、A δ 線維が選択的に欠損することで両感覚が欠落ないし鈍麻する疾病である。痛覚が欠落しているため、通常痛みを伴う打撲や火傷などを直感的に回避できないため、高エネルギー外傷、整形外科的疾患をえるリスクが高い。温痛覚の脱出以外に無汗や精神遅滞など随伴症状も多いが、通常は運動神経や触力覚を伝達する神経には異常がない。

この CIP の温痛覚のみを脱出するという性質を利用して、温度感覚の運動調節への寄与を検討した研究がある[23]。手指での物体の把持動作は日常生活で最も良く用いられる動作であり、物体の重さや表面の摩擦等によって把持力は合目的的に調節される。多くの従来研究では把持力調節

において、 $A\alpha$ 、 $A\beta$ 線維を介して伝達される皮膚感覚、つまり触力覚が貢献することが明らかにされていた[19]一方で、温度感覚を伝達する $A\delta$ 、 C 線維を介した情報は把持力に対する貢献度はそれほど高くないというのが通説であった。しかし $A\delta$ 、 C 線維が脱出し温度感覚をもたない CIP 患者および健常者の把持動作を観察、比較したところ、健常者の場合に比して把持力調節の点で明らかな欠陥が見られた。図 2-7 に示すように、健常者の場合には把持後緩やかに把持力が低下するのに対し、CIP 群では把持力が乱高下しており、その値も大きい。このことから、温度感覚を伝達する $A\delta$ 、 C 線維が把持力調節に何らかの寄与をしている可能性が指摘されている[23]。ただし、この時点では温度感覚がどのように寄与しているのか明確にはなっていない。

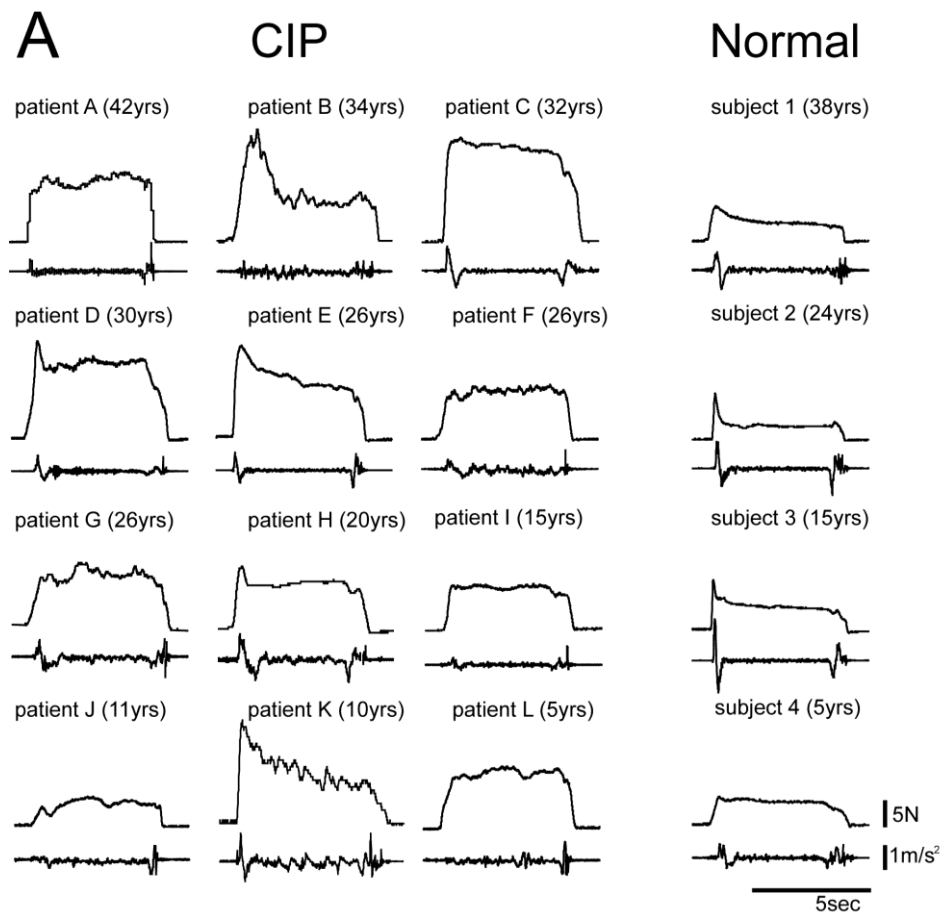


図 2-7 CIP 群と健常群の把持力推移

第3章

既存の解決手法と問題点

第4章以降で取り組む各課題に関して、既存の対策のうち代表的なものについて説明し、その問題点を明らかにする。

3.1 痒みの抑制（鎮痒）手法

痒みは多くの疾病に共通する症状である。痒みを伴う疾患にはアトピー性皮膚炎や老人性乾皮症などの皮膚疾患のほか、糖尿病や腎炎等がある[61][71]。特にアトピー性皮膚炎は現在、3歳児の13%が罹患する国民病となっているが、いずれの手法も何らかの副作用を持つ。このため皮膚を傷つけない方法で痒みを抑える手法の発見は極めて重要な社会的課題である。

3.1.1 薬剤による鎮痒

ステロイド剤

ステロイド剤は合成副腎皮質ホルモン剤とも呼ばれ、免疫機能を抑制し、抗炎症作用や抗アレルギー作用を持つ。軟膏等の外用薬として一般的に皮膚炎や乾癬、虫刺され等各種皮膚疾患の治療に用いられる薬剤である。特にアトピー性皮膚炎の治療においてはステロイド剤が多用される[62]。酢酸ジフロラゾンや吉草酸ベタメタゾン等、成分には複数の種類がある[50][55]。重度のアトピー性皮膚炎や腎炎では、ヒドロコルチゾンやプレドニゾロン等のステロイド内服薬が用いられるほか、トリアムシノロンアセトニド等を皮下注射する場合もある[49][56][48]。

ステロイド剤には様々な副作用があることが確認されている。副作用には適用した部位にのみ生じ、比較的軽度の局所性副作用と、症状が重く、全身に及ぶ全身的副作用に分離される。副作用のリスクは薬効の大きさに比例するとされ、外用薬、内服薬、注射の順に高くなる[62]。ステロイド外用薬は内服薬や注射に比して副作用のリスクが低いとされ、発生する副作用も局所的副作用が主である。生じ得る局所的副作用には、皮膚萎縮（皮膚が薄くなり、物理的な刺激により傷つきやすくなる）、酒さ様皮膚炎（皮膚の紅潮）、紫斑（内出血によるあざ）、瘰癧（にきび）、多毛、免疫の低下による感染症の誘発等があり、外用剤の使用の長期化に伴い悪化する。特に顔面や関節部は薬の吸収率が高い分副作用が起きやすく、ステロイド剤以外の薬剤が推奨されている。ステロイド剤の外用によって全身的副作用が引き起こされるケースは稀であり、通常の診療では用いない多量を適用した場合に限られるとされている[70][77]。また近年では全身的副作用の起こりにくいアンテドラッグと呼ばれるタイプのステロイド外用剤も使用されている[57][47]。対して、ステロイド剤を内服、注射した場合は全身的副作用のリスクが高い。ステロイド剤がもたらす全

身的副作用には満月様顔貌（ムーンフェイス）、骨粗しょう症、糖尿病、副腎不全、高血圧等がある[51]。全身的副作用は重篤なものも多いため、原則としてステロイド内服剤（注射）の使用は短期に限られる。

特にアトピー性皮膚炎の場合、ステロイド剤の使用はリバウンド（離脱症状）と呼ばれる問題を抱える。リバウンドとは、アトピー性皮膚炎自体が完治しないままステロイド剤の使用を中断した場合に、ステロイド剤使用開始前よりも強いアレルギー症状が全身に現れる現象を表す。比較的副作用の小さいステロイド外用剤であっても、長期に渡り使用した場合、上記副作用の悪化により皮膚は変色し、傷つきやすくなる。しかし、ステロイド剤の使用を中断すればリバウンドが起きるため、副作用を耐えながら慢性的に使用せざるを得ないという悪循環に陥る[24]。

タクロリムス

タクロリムスはステロイドと機序は異なるが、タクロリムス（プロトピック）も免疫抑制機能を持ち、炎症を抑制する作用があり、アトピー性皮膚炎等の治療に用いられる[54]。タクロリムス軟膏の長所として、ステロイド外用剤に特有の副作用（皮膚萎縮、紫斑等）の大半を持たない点が挙げられる（ただし、免疫低下による感染症の誘発や使用中断によるリバウンドが生じる点はステロイドと共通する）[64]。このため、ステロイドの外用による副作用の生じやすい顔面や頸部へ適用されるケースが多い。塗布部位に灼熱感、ほてり感などの刺激症状を伴うものの、一過性のものであり、安全性に大きな問題はないとされる[15][35]。ただし、タクロリムスの安全性については未確認の領域も大きい。安全性の確立されていない2歳児未満の小児、妊婦や授乳中の婦人へ使用できない。また、タクロリムス軟膏を使用する医師は患者へ以下の警告を行うことが義務付けられている[62][74][73]。「マウス塗布がん原性試験において、高い血中濃度の持続に基づくリンパ腫の増加が認められている。また、本剤との関連性は明らかではないが、外国においてリンパ腫、皮膚がんの発現が報告されている。本剤の使用にあたっては、これらの情報を患者又は代諾者に対して説明し、理解したことを確認した上で使用すること。」

抗ヒスタミン薬

抗ヒスタミン薬はアレルギー原因物質であるヒスタミンの受容を妨げることで、アレルギー症状を抑える作用を持つ。ステロイド剤と抗ヒスタミン内服薬を併用することでアトピー性皮膚炎の痒みが有意に抑制される[22]。ただし抗ヒスタミンはあくまでステロイド剤等、他の療法の補助のために用いられるのが主であり、単独ではアトピー性皮膚炎の炎症を抑制するものではない。抗ヒスタミン薬の副作用としては眠気、倦怠感を生じることが知られている。

シクロスポリン

シクロスポリンはステロイド、タクロリムスと機序は異なるが、免疫抑制機能を持ち、炎症を抑制する。主に上記のステロイド剤、タクロリムス軟膏等では治療効果の見られないアトピー性皮膚炎患者に内服薬として投与される[53][78]。シクロスポリンがもたらす副作用として腎虚、肝炎、高血圧、消化器の不快感等が確認されており、これを防ぐために定期的な血液検査を行った上で投薬期間を短期（3ヶ月以内）に留めるべきであるとされる[63]。

3.1.2 掻破行動による鎮痒

痒みの患部を爪や孫の手を用いて掻くこと（掻破行動）により痒みが抑制されるということは経験的に知られている。掻破行動の鎮痒効果は経験的に知られるのみならず，科学的にも検証されてきた。Yosipovitch らは痒みの患部をブラシで掻くことで被験者の主観的な痒みが抑制されることを報告している[43]。

さらに Davidson らは患部への掻破が単に主観的な鎮痒をもたらすものではなく，神経レベルでの鎮痒効果を持つことを動物実験により示唆した[7]。痒み原因物質ヒスタミンを導入されたサル7匹の脊髓視床路（Spinothalamic tract(STT))細胞の活動を計測し，図 3-1 に示す結果を得た。グラフ横軸はサルが痒みの患部を掻く前後の条件を，縦軸は STT 細胞の活動量を示す。黒丸は個々のサルの値，白丸は7匹の平均値を示す。全体として患部を掻いた後，STT 細胞活動が抑制されることが見て取れる。STT は痒みを皮膚から脳へ伝える神経路であり，STT 細胞活動の抑制は痒みが神経レベルで抑制されたことを示唆する。

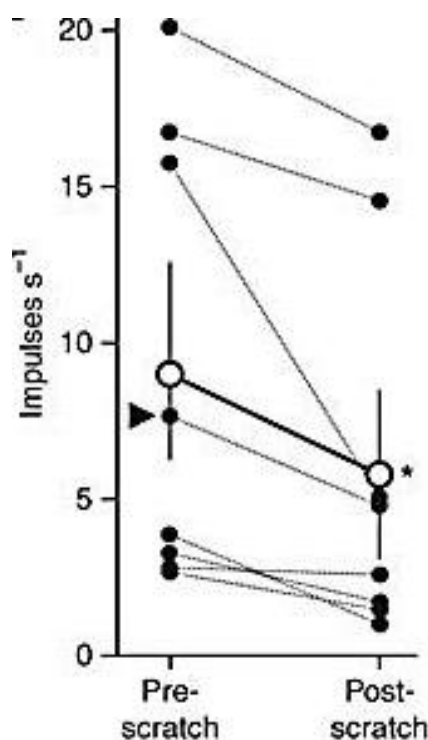


図 3-1 STT (痒み神経) 細胞活動 (左：掻く前 右：掻いた後) [7]

前述のように深刻な副作用の危険性を持つ薬剤に頼るよりも，皮膚を傷つけないように慎重に掻く方法が優れているとする論も存在する[46]。近年では皮膚を傷つけないように形状を工夫した孫の手も販売されている[44][45] (図 3-2)。しかしながら確実に皮膚を傷つけないように掻く方法はいまだ確立されておらず，危険性は残る。一般に掻破行動は皮膚を損傷，炎症を悪化し，結果的にさらに痒みが強くなるという悪循環 (itch-scratch cycle) を引き起こすことから忌避されている[42]。



図 3-2 特殊な孫の手の例[45]

3.1.3笑いによる鎮痒

木俣らは、アトピー性皮膚炎の患者 26 名(男 11 人, 女 15 人)にコメディ動画 (Modern Times) を視聴させ、その前後でアレルギー反応の変化を調べた[79]。被験者にはコメディ動画視聴の前後で皮膚プリックテストを実施した。皮膚プリックテストは、アレルギーの原因物質を特定するテストの一つで、皮膚に出血しない程度の微小な傷をつけてその上にアレルギー物質をのせ、その反応を観察するテストである。実験結果を図 3-3 に示す。グラフ横軸はコメディ動画視聴前後の条件であり、縦軸は皮膚プリックテストのアレルギー物質によって生じた膨疹のサイズを表している。以下に示すように、ほぼすべての被験者で膨疹のサイズが縮小していることが分かる。

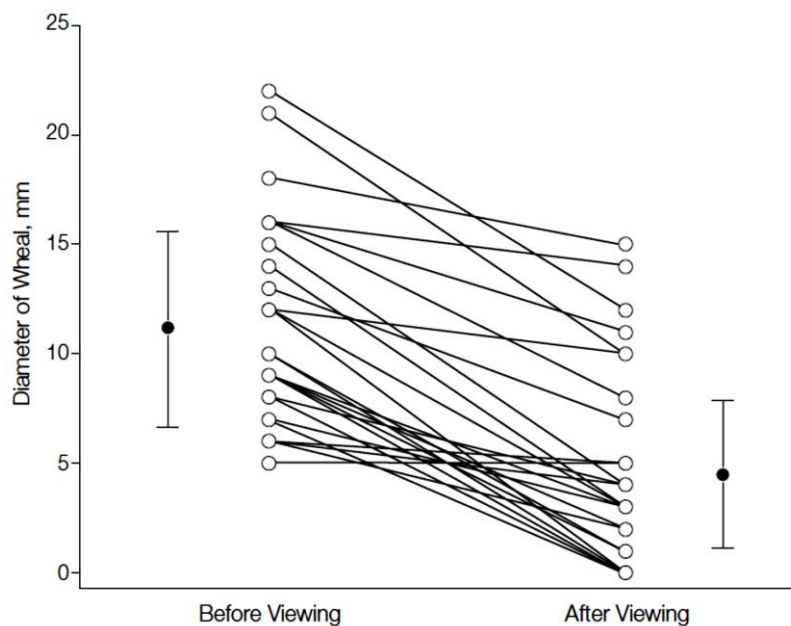


図 3-3 コメディ番組視聴によるアレルギー反応値の変化 (左: 視聴前 右: 視聴後) [79]

3.1.4冷却による鎮痒

患部を冷やすことで痒みが抑制されることが知られている[10][20]. また **Fruhstorfer** らは患部を温めた際に痒みが促進されることを報告した[10]. さらに **Bromma** らは冷感を錯覚させる成分メントールの塗布が実際の冷却と同様、鎮痒効果を持つことを示唆した[4]. ただし、冷却やメントールによる鎮痒効果が確認できないとする研究結果も存在する[43].

3.1.5痛みによる鎮痒

皮膚を掻く行為と同様に、つねる、爪痕をつける等の痛みを伴う行為が一時的に痒みを抑制することも経験的に知られている. 1938年という早い時期に **Bickford** は痛みを伴う機械刺激と電気刺激が痒みを抑制することを報告した[3].

Yosipovitch らは痛みを伴う侵害性の温度提示が痒みを抑制することを報告した[43]. 痒み原因物質ヒスタミンを皮膚に導入した10名の被験者に対し、温度提示を与える場合と与えない場合の主観的な痒みの推移を記録した結果を図3-4に示す. 痛みを伴う侵害性の温度提示として49°Cと2°C、痛みを伴わない非侵害性の温度提示として41°Cと15°Cが用いられた. グラフ縦軸は主観的な痒みの強さを、横軸はヒスタミン導入後の時間経過を示す. 折れ線グラフの橙色は温度提示を提示しなかった場合の痒み、緑色は温度提示を提示した場合の痒み、灰色は提示温度の推移を示す. 痛みを伴う49°C、2°Cを提示した場合にのみ有意な鎮痒効果がみられた. 痛みを伴わない41°C、15°Cを提示した場合には有意な鎮痒効果はみられなかった.

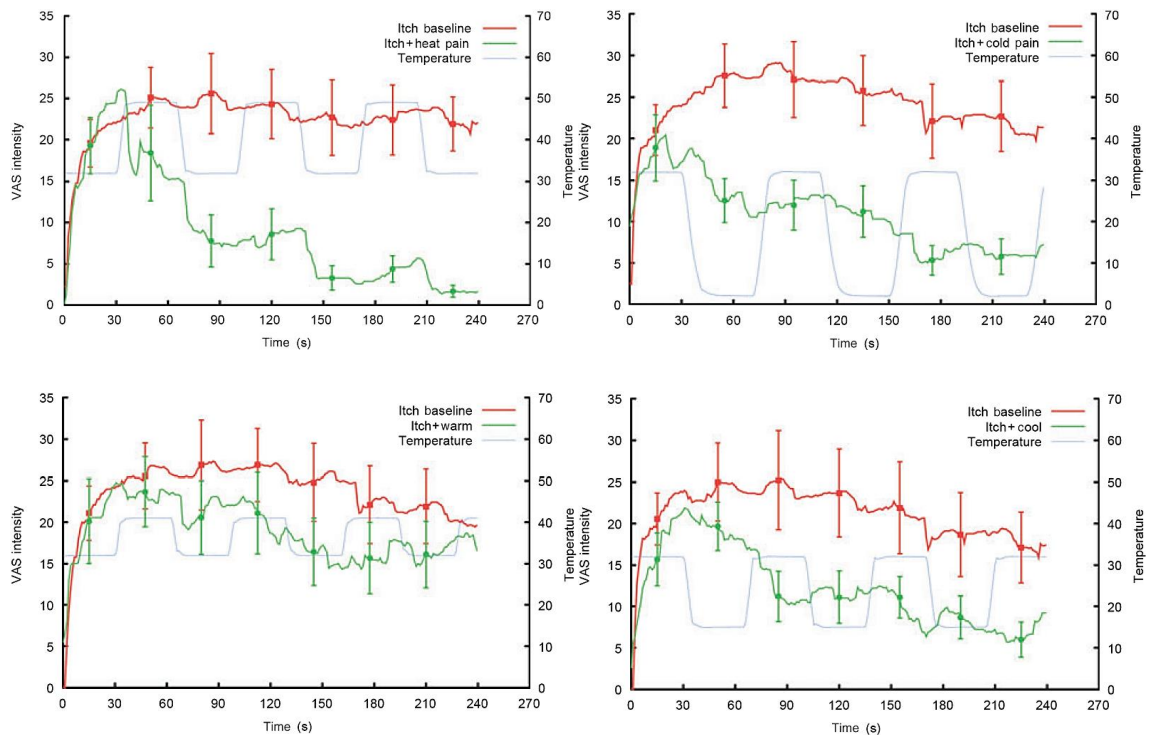


図 3-4 温度提示による痒みの推移 (左上: 49°C 右上: 2°C 左下: 41°C 右下: 15°C) [43]

しかしながら、痛みを伴う刺激は皮膚を損傷する場合が多い。例えば痛みを伴う温度提示はやけどを引き起こす危険性を持つ[33][34]。

皮膚を傷つけずに痛みを生起する方法の 1 つに、唐辛子に含まれる辛み成分カプサイシンの塗布がある。カプサイシンは皮膚の痛みを知覚するセンサ（受容体）に直接働きかけ、痛みを錯覚させる作用を持つ。カプサイシンを含んだ軟膏を患部に塗布することで、乾癬、水性じんましん、透析掻痒症、肛門掻痒症等の痒みを抑制できることが報告されている[9][29][37][30]。副作用としては、一過性のものではあるが塗布後皮膚に赤みがさすこと、塗布後しばらく知覚過敏となることがあげられる。

3.1.6 鎮痒手法のまとめ

以上の先行手法の鎮痒効果、副作用の有無と抑制の対象について表 3-1 にまとめる。これらはすべて対症療法であるが、純粹に感覚としての痒みを抑制するものと、炎症やアレルギー反応を抑制した結果として痒みが抑制されるものに分かれる。薬剤は内服する場合は重篤な副作用のリスクが高く、外用する場合でも使用の慢性化による皮膚の損壊や使用中止によるリバウンド等のリスクを持つ。搔破行動は当然ながら皮膚を損壊する。笑いには副作用はみられないが、痒みを感じた際に常に笑える状態にあるとは限らず、確実性に欠ける。冷却にも副作用は見られないが、冷却後に血流が増加し、痒みがかえって増加することが知られている。痛みは痒みを抑制するが、多くの場合皮膚を損壊してしまう。ただし、錯覚により純粹に感覚としての痛みのみを生起させる方法ならば皮膚の損壊の恐れはなく、安全な鎮痒手法であるといえる。先行手法の内では一過性の副作用はあるものの、カプサイシンを塗布する方法がこれに該当する。第 4 章では、より副作用リスクが低く、安全に痛みを提示する手法を検討した後、その手法を鎮痒に応用していく。

表 3-1 先行手法の効果と副作用

	鎮痒効果	副作用	抑制する対象
薬剤	有	有	炎症
搔破	有	有	痒み
笑い	有	無	炎症
冷却	有	無	痒み
痛み	有	多くの場合有	痒み

3.2 温度知覚能力の検査方法

これまで温度感覚の検査は主観的な回答を用いるものが主であった。一般には、仰向けに横たわる被験者の、温度感覚障害が疑われる部位、あるいは全身へ温水、冷水を満たした試験管底部を数秒間接触させ、感覚を回答させるという手法である[66]。この検査方法は検査結果が被験者の主観的な回答に大きく依るため、正確さの点で不安が残る。温度感覚が正常な被験者の場合であっても誤回答をする恐れがあり、回答がない場合にも時間を延長して提示を続け回答までの時間を記録する、左右対称部との比較を行う等の対策がなされてはいるものの、万全とはいえず、また実験手順も煩雑である。これに対し、温度に対し一定の運動調整がなされる傾向があるとなれば、客観的な計測手法としての応用が大いに期待できる。第5章ではこの観点から、温度変化と把持力調節の間の関係を実験により検討していく。また同章では掌、足裏に対する温度提示を行った際の運動調節を観察していくが、この場合にも温度変化に対し一定の運動調整がなされる可能性に注目していく。

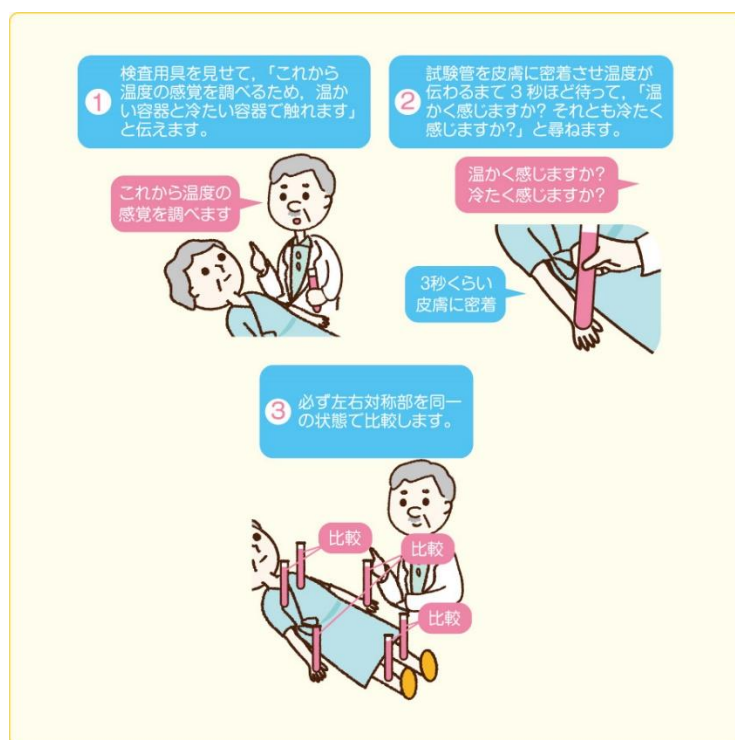


図 3-5 一般的な温度感覚検査の手順[58]

3.3 姿勢の制御手法

第5章では温度提示が運動調節に及ぼす影響を検証するが、その中で足裏への温度提示が人間の姿勢の調節に影響を与えることを予測し、その検証実験を行う。これまで温度以外の刺激を提示することで姿勢に影響を及ぼす例が知られている。

3.3.1 視覚刺激が姿勢に及ぼす影響

視覚的な刺激の提示が姿勢に影響を及ぼす例が知られている。人間自らが運動しているかのように視覚的の手がかりを与えることによって自己運動感覚（ベクシオン）が発生することが知られており，人間の姿勢も影響を受ける場合がある。直立した被験者に異なる運動視差を持つ視覚刺激を与えた際，それぞれ異なる重心移動が生じたことが報告されている（図 3-6） [5]。床面に敷いたレンチキュラレンズによって，歩行にあわせて移動する視覚刺激を提示し歩行方向を誘導することが可能である[41]。

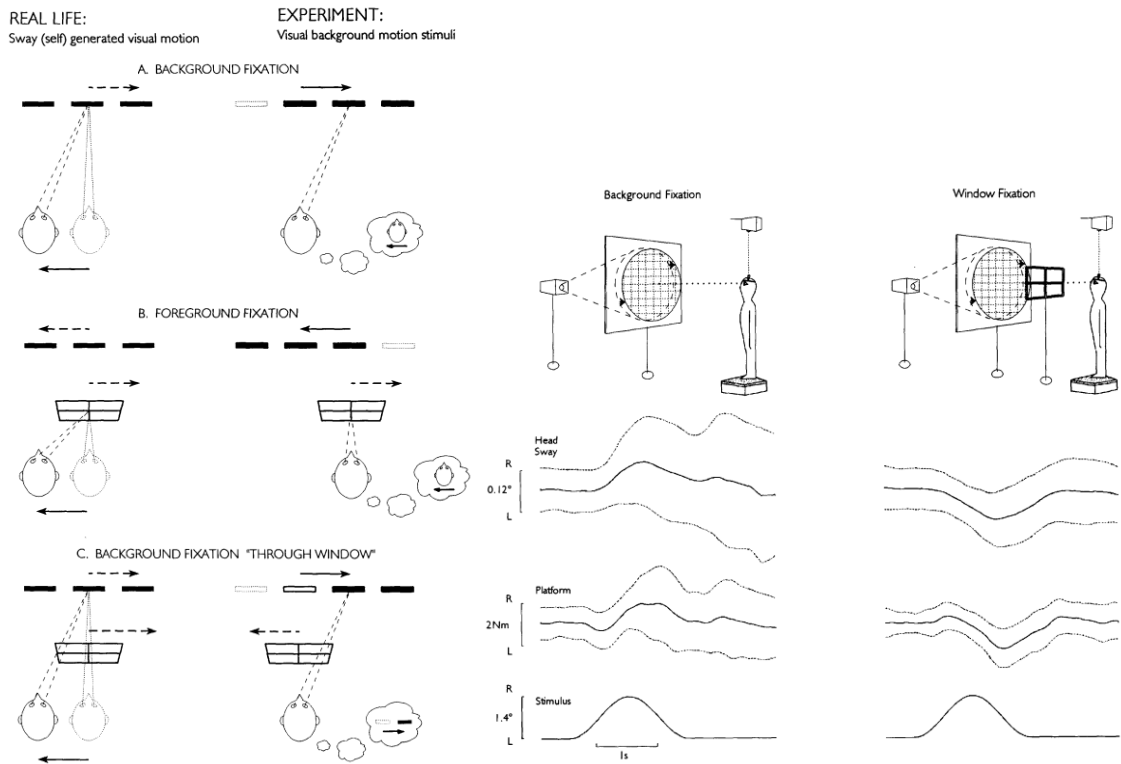


図 3-6 左：与えられた運動視差 右：視覚刺激と揺れのタイミング[5]

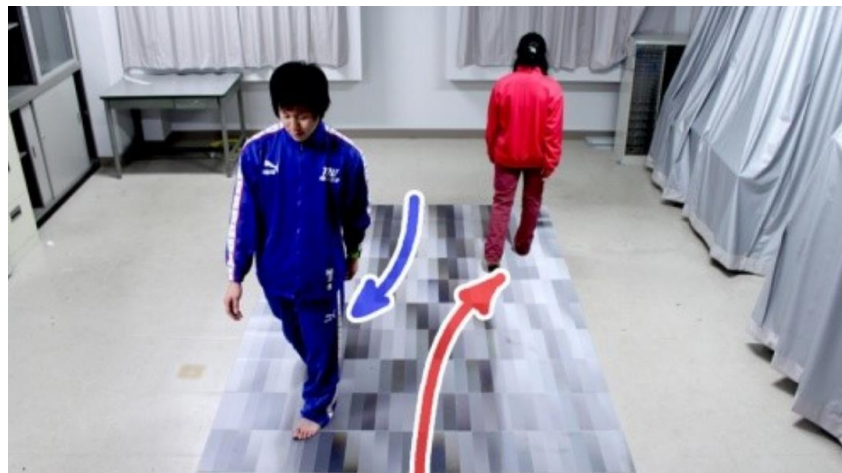


図 3-7 レンチキュラレンズを用いた歩行誘導[41]

3.3.2 GVS（Galvanic Vestibular Stimulation）を用いた姿勢制御

平衡感覚、加速度感覚を司る前庭器官に対する電気刺激（Galvanic Vestibular Stimulation, GVS）によって姿勢感覚に影響があることが知られている。GVSによって人間の加速度感覚を錯覚し、自らの身体が傾いた感覚が生起する。歩行時にGVSを提示することで進む方向を制御可能であることが示されている（図 3-8）[31]。

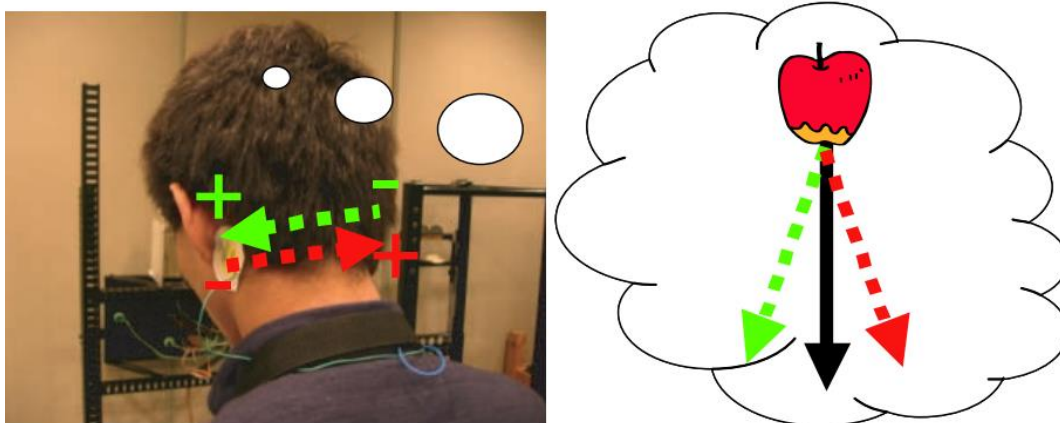


図 3-8 GVS 装置と電流方向と生起する加速度の方向[31]

3.3.3ハンガー反射を用いた姿勢制御

皮膚変形によって身体の回旋が生起するハンガー反射と呼ばれる現象が存在する[36]。はじめこの現象は頭部において確認されていたが、その後の研究で腰や足首等他の部位でも生起することが確認された。頭や腰、足などに適用した例では歩行に影響を与えることが確認された[25]。



図 3-9 ハンガー反射（左：頭部 右：腰部）[25]

3.3.4重心動揺の増幅・減弱による姿勢制御

重心動揺リアルタイムフィードバックシステム BASYS（テック技販）は人間の重心の移動を計測し、その変異を知覚にのぼらないレベルで増幅ないし減弱することで立位の安定を促す装置である[52]。高齢者等、姿勢の傾きを知覚しにくくなっている場合には重心動揺を増幅し、知覚にの

ぼらせることで自然な姿勢調節を促す。脊椎損傷等，姿勢動揺が不必要に大きくなる場合にはその動揺を減弱することで安定した立位姿勢に近づける。

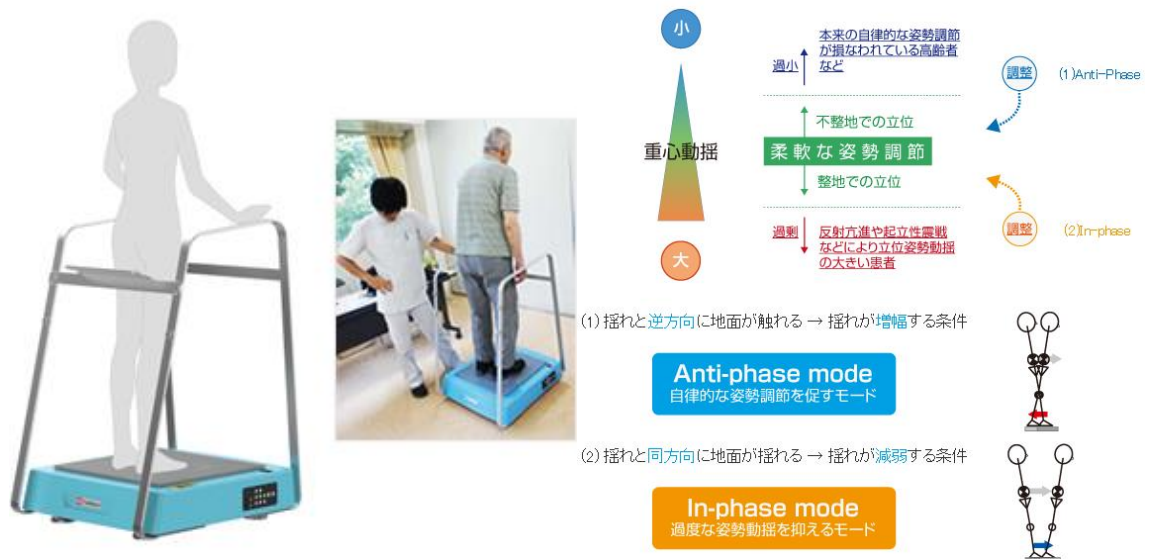


図 3-10 重心動揺リアルタイムフィードバックシステム BASYS[52]

第4章

温度提示を用いた鎮痒

第3章で述べたように、搔破行動や痛みの提示は痒みを抑制するが、皮膚を損傷するという問題がある。一方で温冷2種類の温度提示を同時に行うことで生じるTGIという錯覚現象によって安全に痛みが提示可能である。本章では、TGIが副作用のない鎮痒手法として有効であると考え、その提示方法、鎮痒効果について検討を行う。

4.1 ローラー型ポータブルデバイスを用いたTGIの提示

表3-1に示したように、痛みは炎症を抑えるものではなく、あくまで一時的に感覚としての痒みを抑えるものである。このためTGIを鎮痒に用いる場合、頻繁に患部への提示を行う必要があり、TGIを提示するデバイスはポータブル型であることが望ましいと考えられる。以下ではポータブル型TGI提示デバイスについて検討する。

TGIを生起するポータブルデバイスとして、まず棒状の把手の先端部に平面状のTGI提示部を持つものが考えられる。デバイスのコンセプトイメージを図4-1に示す。図4-1では取手先端部に格子状に温度素子を取り付け、その半数から温刺激を、もう半数から冷刺激を提示する。

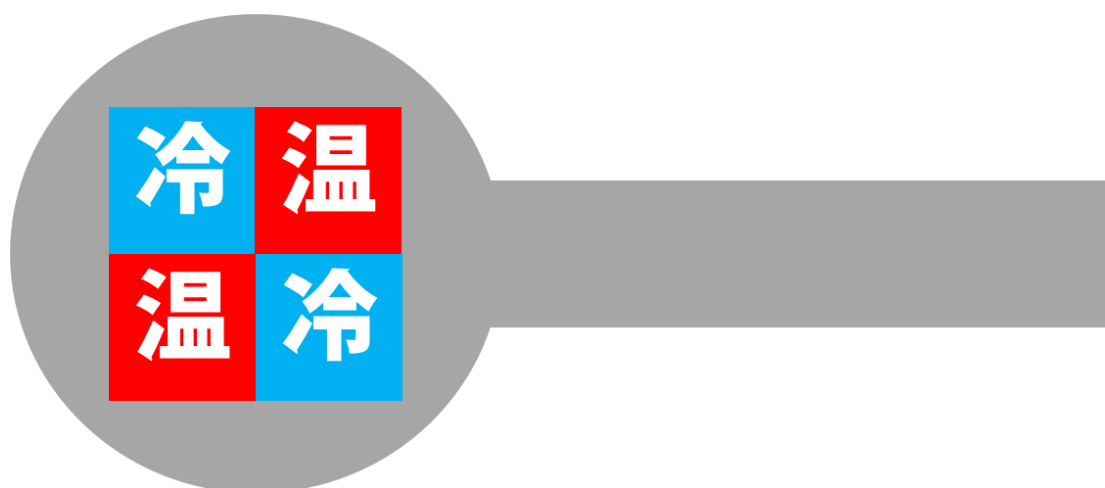


図 4-1 デバイスイメージ図

しかし、図4-1に示したコンセプトイメージには大きな問題がある。図4-1のようなデバイスを使う場合、図4-2のようにTGI提示部が患部上を滑るようにして使用すると考えられる。このため患部とデバイスが擦り合い、摩擦が発生し、皮膚を損壊する危険性がある。

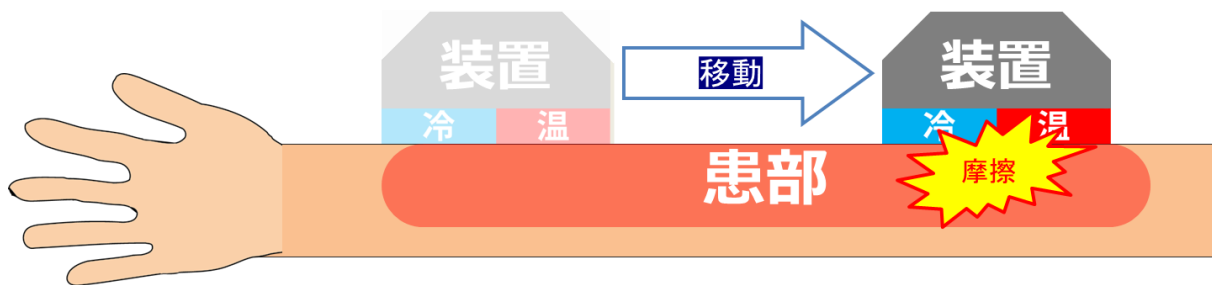


図 4-2 デバイス使用による摩擦

皮膚との間に極力摩擦を生じないために、TGI 提示部の形状をローラー型とすることを考えた。ローラー型であれば、移動につれて回転するため皮膚と擦り合うことがなく、摩擦は少ないと考えられる。ただしローラー型は、その体積に比較して皮膚に接触する面積が小さい。TGI 生起のために温冷を同時に提示することを考えた場合、図 4-3 に示すように平面型の提示部に比して大型化してしまうことが予想され、ポータブルデバイスへの採用は難しい。

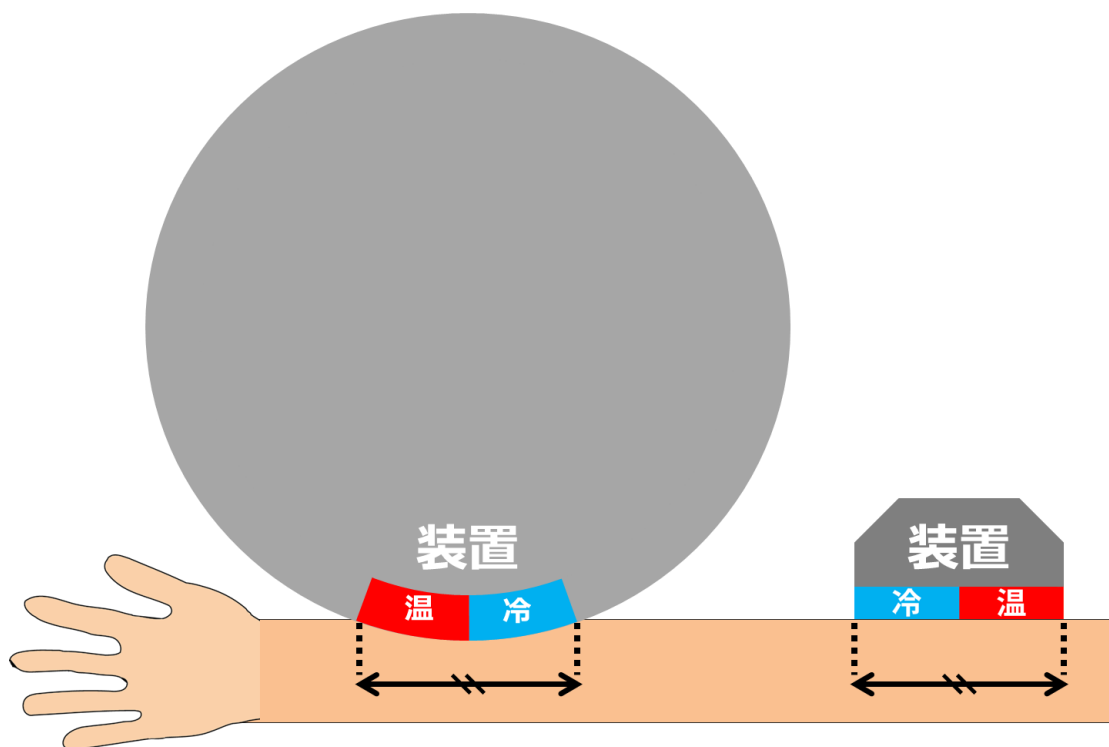


図 4-3 ローラーの大型化

ローラーの大型化は TGI の生起条件が温冷刺激の同時提示である以上は避け得ない。しかしこのとき一つの疑問が生じる。果たして本当に温刺激と冷刺激の提示タイミングが同時であることは TGI 生起の必要条件なのだろうか。仮に温刺激と冷刺激の間に僅かな時間的ずれが存在しても TGI が生起可能であるならば、ローラーは小型でも問題ないと考えられる。この仮説が真であるとするならば、図 4-4 のように、温刺激提示面と冷刺激提示面を持つローラーを皮膚上で素早く移動し、温冷刺激を時空間的に交互提示することで TGI の生起が可能となる。本研究ではこの仮説に基づき、回転により温冷刺激を交互に提示するローラー型ポータブルデバイスを提案する。

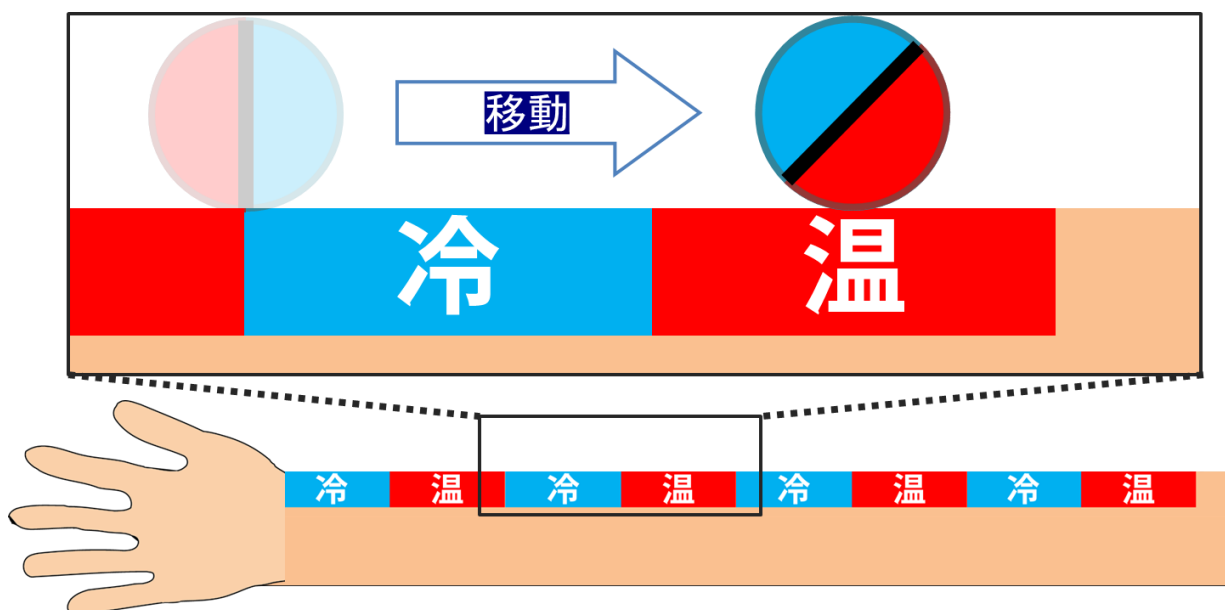


図 4-4 ローラーによる温冷刺激の交互提示

4.2 第 1 試作 :

4.2.1 デバイス構成

図 4-5 に試作デバイス外観, 図 4-6 にシステム構成を示す. 本システムはアルミニウム製パイプ (外径 20mm, 内径 18mm, 全長 40mm), ロータリーセンサ (可変抵抗), 振動子 (Tactile Labs 社, Haptuator Mark II), ペルチェ素子 (STS 社, T150-85-017S), マイクロコンピュータ (NXP 社, mbed NXPLPC1768), オーディオアンプ (ラステーム・システム社, RSDA202), 外殻 (ABS 樹脂製) から構成される.

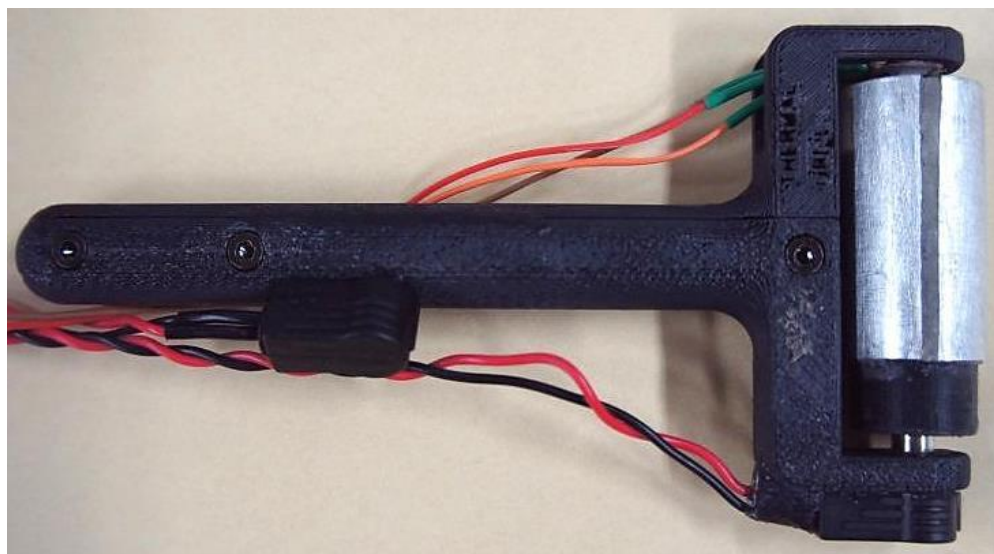


図 4-5 試作デバイス外観

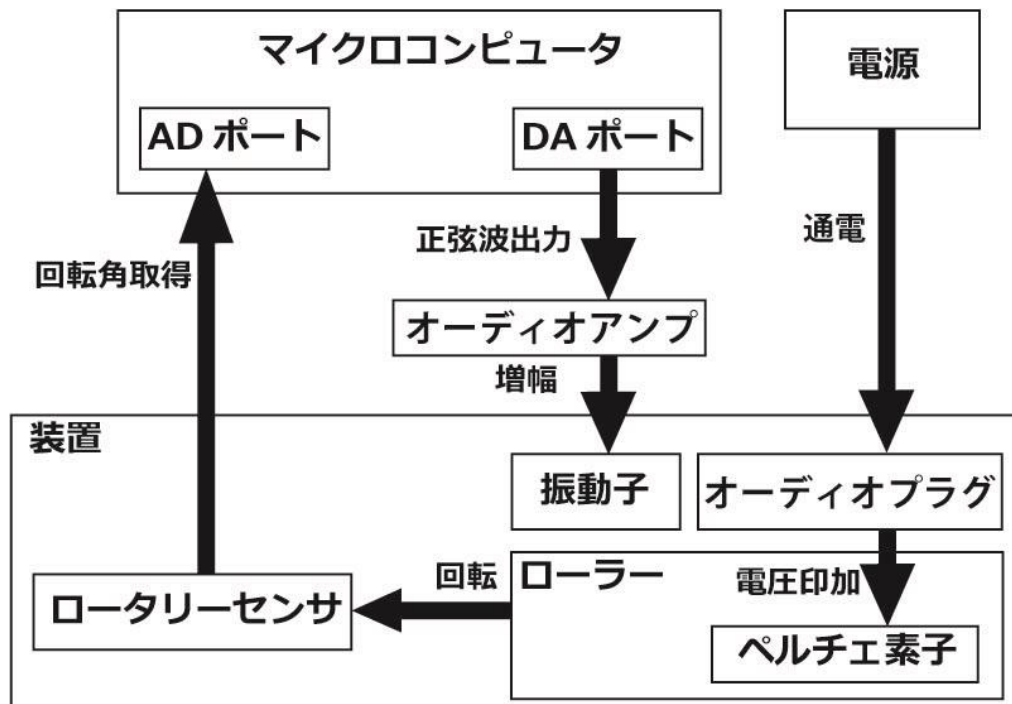


図 4-6 システム構成

ローラー内部のペルチェ素子に給電を行うため、回転体特有の給電機構が必要となる。最も一般的な機構は、スリップリングと呼ばれる機構である[72]。回転体内部のペルチェ素子と外部電源の接続のために市販のスリップリング等を検討したが、大きさ、形状の問題から適するものがなかった。第1試作では図 4-7 のようにオス/メス1組のオーディオ端子を介して行い、回転体への連続した給電を可能とした。



図 4-7 オーディオ端子による回転体の接続

今回温度提示に用いたペルチェ素子は、通電することで1面から放熱、もう1面から吸熱を行う性質を持つ。つまり温冷の両温度刺激を1つの素子で同時に提示可能であり、TGI提示に適していると考えた。

ローラー部は図 4-8 のように 3 枚の重ねられたペルチェ素子の両面を二分したパイプで挟み

込むようにして形成される。ペルチェ素子と円筒の間は金属片と熱伝導グリスによって満たされている。図 4-9 に通電時のローラー部をサーモカメラで写した図を示す。円筒の片側半周が加熱、反対側の半周が冷却されていることがわかる。ローラーを皮膚上で使用した場合 のように約 31.4mm ごとに交互の温冷刺激が提示される。この冷温提示の間隔は、TGI を生起するにあたって必ずしも最適なものではないが、一般に入手できるペルチェ素子のサイズの制約上、このような形となった。

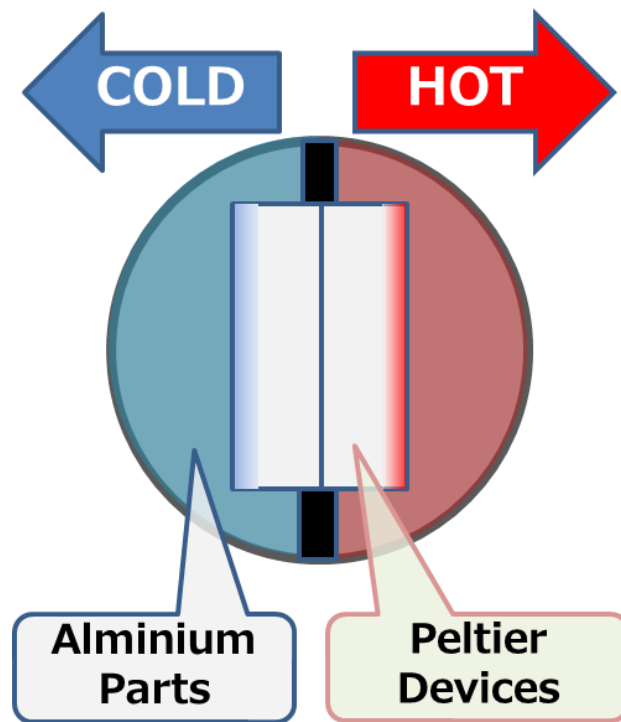


図 4-8 ローラー断面図

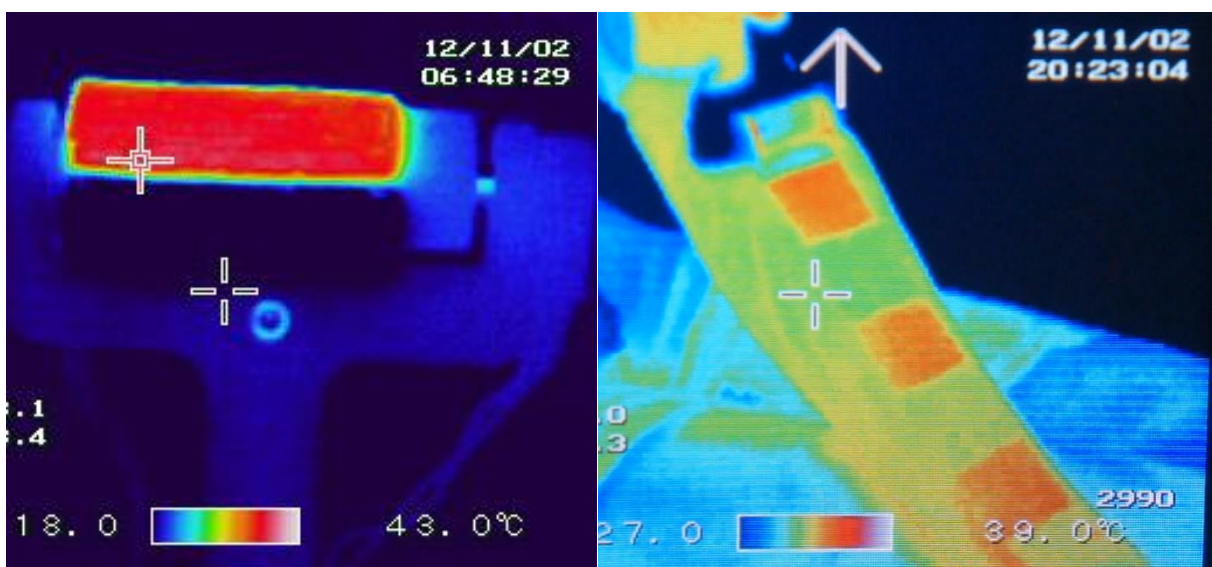


図 4-9 サーマグラフ (左：ローラー表面温度 右：使用時の皮膚)

4.2.2評価：提示温度の安全性

安全性の確保のため、ローラー表面の温度は皮膚に損傷を与えない範囲に留める必要がある。43℃以上あるいは 0℃以下の温度提示は火傷、凍傷の危険性を持つため、ローラーの表面温度が 0℃以上 43℃以下となるよう調整を行った[17][18]。図 4-10 はローラーに定常的に電圧を印加した際のローラー両面の表面温度を 30 分間に渡り計測した結果である。印加電圧は 1.0V、室温は 27℃であった。計測の結果、ローラーの表面温度は常に 43℃を下回り、試作デバイスは上述の条件の下 30 分以内の連続稼働であれば安全であるといえる。

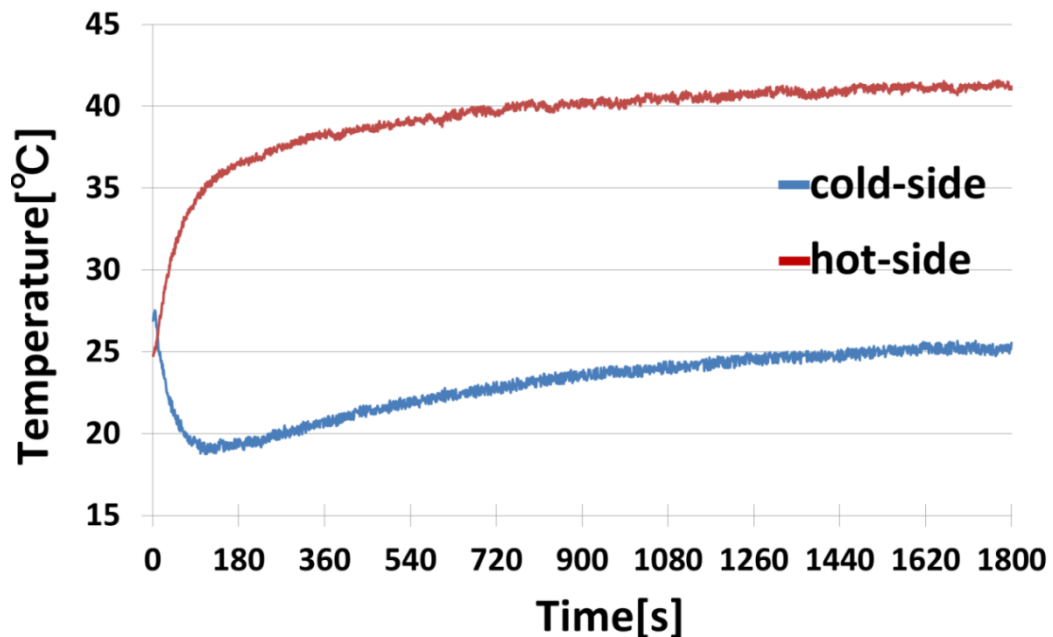


図 4-10 ローラー表面温度の遷移

4.2.3評価：鎮痒実験

4.2.3.1 被験者

実験時に皮膚疾患をもたない 29 名が参加した。被験者はすべて男性であり、年齢は 20 代から 60 代であった。

4.2.3.2 実験環境

室温 22 °C，湿度 45% の室内で実験を行った。

4.2.3.3 実験条件

表 4-1 に示す 2 条件を用いた。コントロール条件である条件 C では、ローラー部からの温度提示、把手部からの振動刺激のいずれも提示しない。このとき、ローラー部の温度は人肌に近い 32℃に調整された。条件 S では温度、振動の両刺激を提示した。

表 4-1 実験条件

	温度刺激	振動刺激
条件 C	無	無
条件 S	有	有

4.2.3.4 実験手順

1 条件につき行った実験手続きを以下に示す。まず被験者の片頬に 2. 5%乳酸水溶液 7mL を浸み込ませた 5. 5×7cm のコットンを貼付した[67]。8 分後コットンを剥離し、1 分間の待機の後被験者は 15 秒間の待機ないし 15 秒間のデバイス使用を行い、さらに 8 分間待機させた。以上の手続きは頬の左右及びデバイスの使用/非使用を逆にして 2 回行われた。上記手続き中に被験者は数回痒みの評価を行った。評価には VAS (visual analogue scale)を用いた[65]。VAS 左端は痒みが生じなかったことを、VAS 右端は搔くのを耐えられない痒みを表す。評価を行ったタイミングはコットン剥離の直前および直後、15 秒間の待機ないし 15 秒間のデバイス使用直後、使用後 1 分ごと 8 回である。

4.2.3.5 実験結果

各条件における痒みの遷移を図 4-11 に示す。縦軸が VAS の値を、横軸が時間の遷移を表す。装置使用直後において 1%有意差が、使用 1 分後に 5%有意差が認められた。

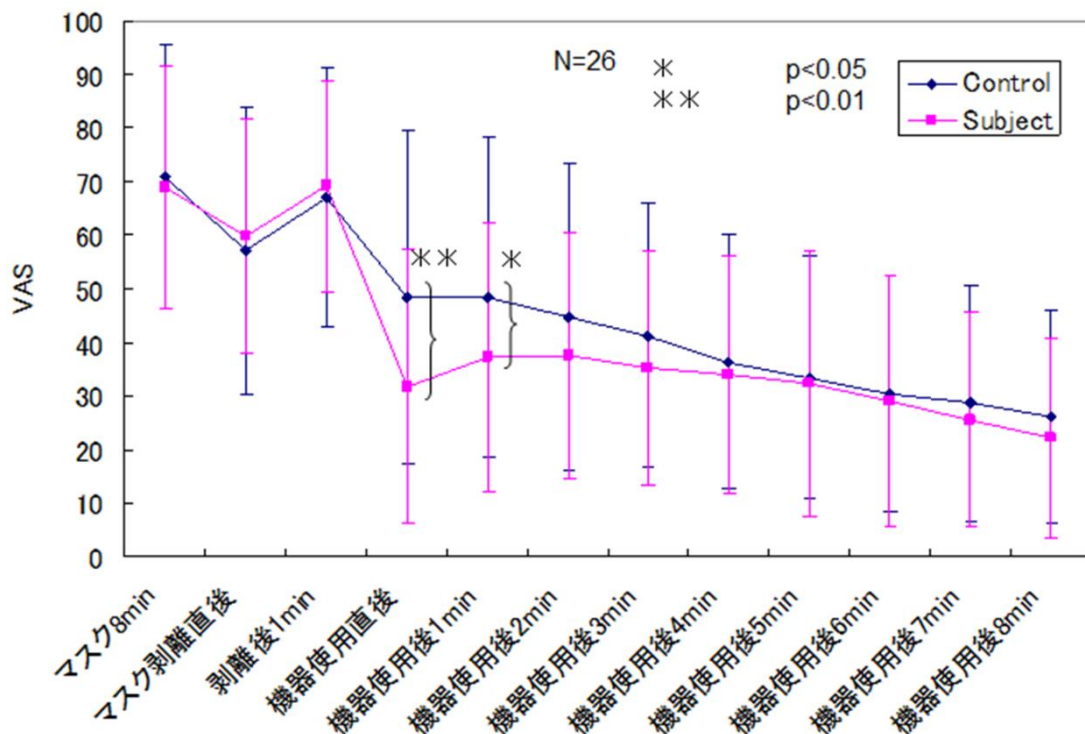


図 4-11 痒みの遷移

4.2.3.6 考察

使用後 1 分間という非常な短期ではあるが、一定の鎮痒効果が見られた。しかし、交互の温度提示と把手への振動提示を同時に行ったため、鎮痒効果がどちらによるものであったのか不明である。また、デバイスにも問題点が多く見られた。ペルチェ素子と曲面を持つアルミパイプの間を多量の熱伝導グリスで満たしていたため、熱伝導効率が劣悪であった点、スリッパリングの代用にオーディオ端子を用いたため、ローラーがうまく回転しなかった点等が挙げられる。

4.3 第 2 試作

第 1 試作の問題点を踏まえ、改良したデバイスを作成した。

4.3.1 デバイス構成

図 4-12 に提案デバイス外観、図 4-13 にシステム構成を示す。本システムはアルミニウム製パーツ（外径 20mm、全長 50mm）、ロータリーセンサ（可変抵抗）、振動子（Tactile Labs 社、Haptuator Mark II）、ペルチェ素子（STS 社、T150-85-017S）、マイクロコントローラ（NXP 社、mbed NXP LPC1768）、オーディオアンプ（ラステーム・システム社、RSDA202）、冷却ファン（SANON 社、Mighty Mini Fan UF3C3-500）、プラスチック製外殻から構成される。

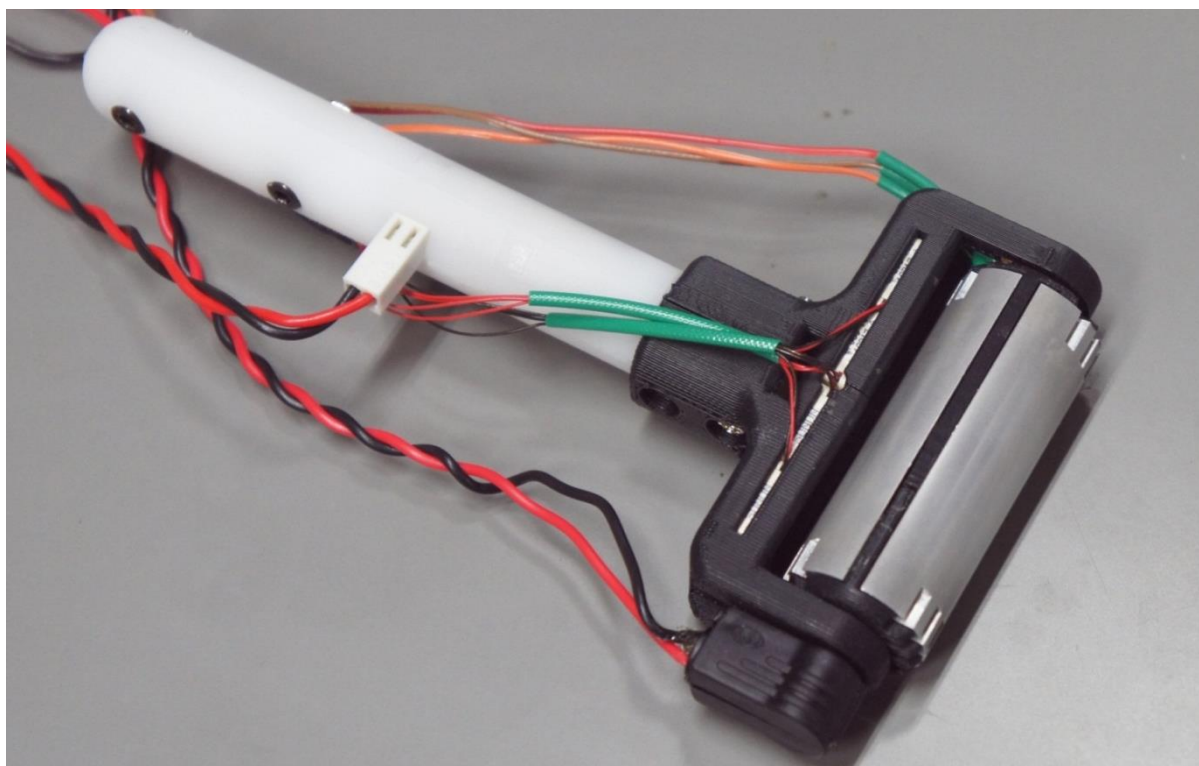


図 4-12 試作デバイス外観

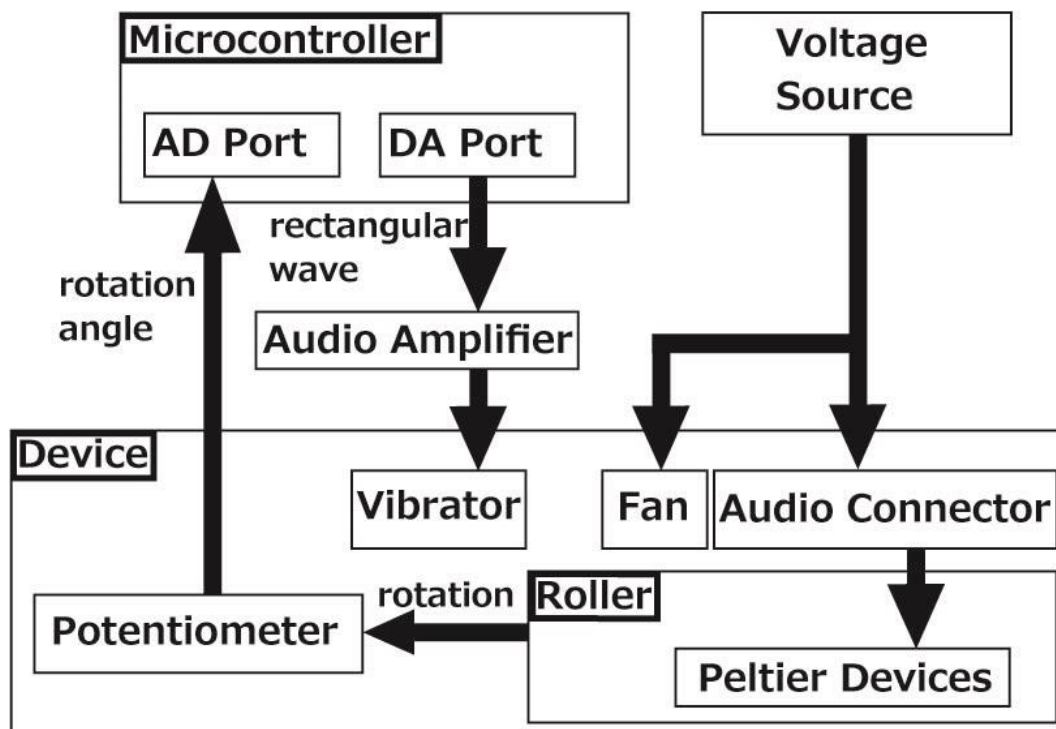


図 4-13 システム構成

第一試作の段階では、板状のペルチェ素子と曲面を持つアルミパイプを接触させる都合上、両者の間を多量の熱伝導グリスで満たしていた（図 4-14 左）。一般に熱伝導グリスの持つ熱伝導率は空気よりも高いが金属に比してはるかに小さく、密着させた接合部の微細な隙間を空気の変わりに埋めるという場合でなければ効果を発揮できない。このため第一試作ではペルチェ素子からローラー表面への熱伝導効率は劣悪であったと考えられる。熱伝導効率の改善のため、図 4-14 右のようにペルチェ素子の形状に合わせたパーツを設計、採用した。また、第 1 試作では放熱を行わなかったことも性能の悪化に拍車をかけたと考えられる。第 2 試作ではファンを組み込み、ローラーを空冷した。

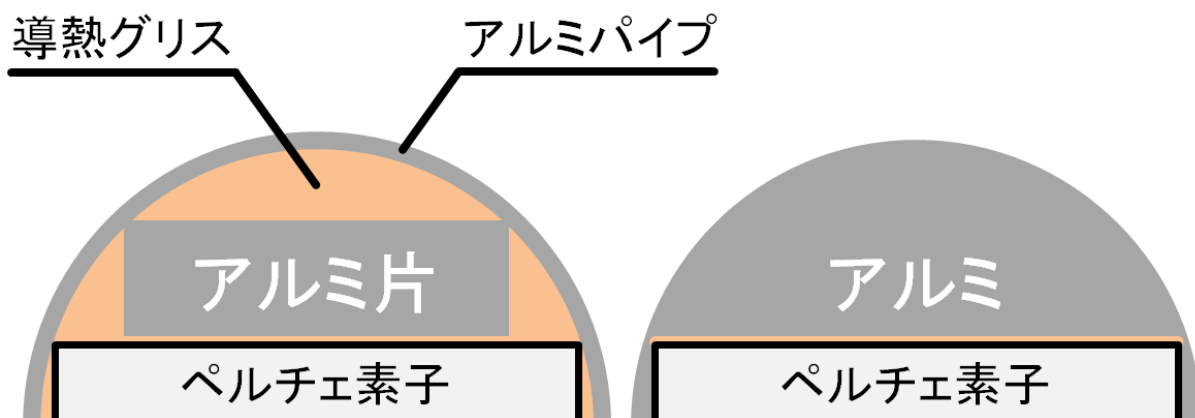


図 4-14 ペルチェ素子とローラー（左：第 1 試作 右：第 2 試作）

第1試作では回転体であるローラー内部へ給電を行うため、1組のオーディオ端子を用いたが、スリップリング等とは異なり回転を目的に作られていないため、ローラーがうまく回転しない、回転時に不快な音を発する等の問題があった。このため第2試作ではスリップリングの自作を行った。オーディオジャックおよび燐青銅板による接触子を介しており、回転体への連続した給電を可能としている（図 4-15）。



図 4-15 ローラー内部

4.3.2評価：提示温度の安全性

第1試作と同様、ローラーの表面温度の上限が44°C以下となるよう調整を行った。図 4-16 はローラーに定常的に電圧を印加した際のローラー両面の表面温度を30分間に渡り計測した結果である。印加電流は0.8A、室温は23°Cであった。計測の結果、ローラーの表面温度は常に43°C以下であり、試作デバイスは上述の条件の下30分以内の連続稼働であれば安全であるといえる。

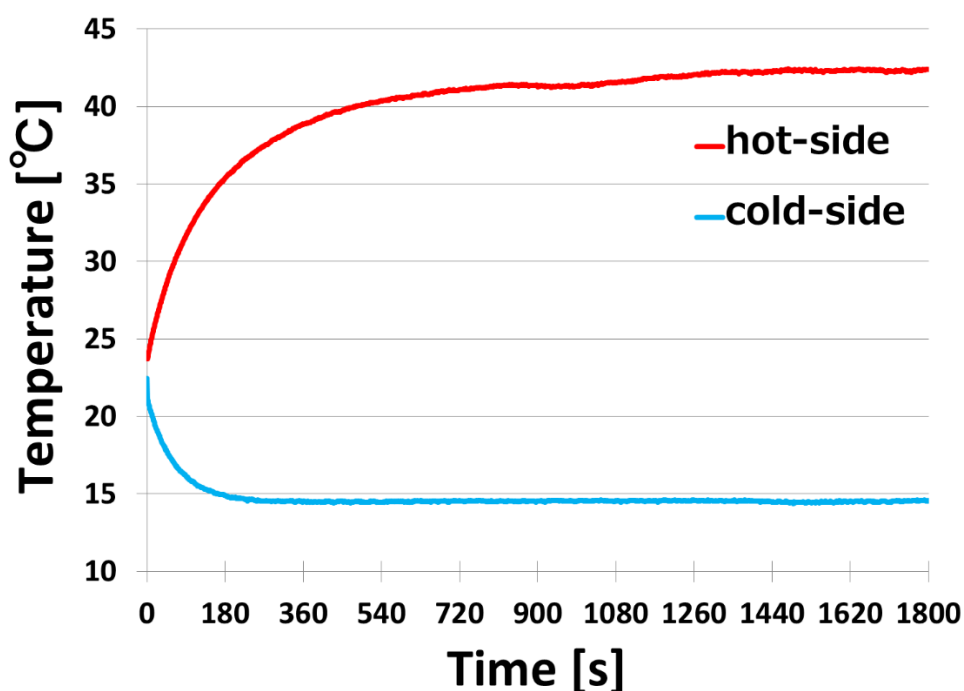


図 4-16 ローラー表面温度の遷移

4.3.3 評価：TGI の提示

試作デバイスが皮膚へ温冷刺激を交互に提示した結果 TGI が生起しているか検証を行った。ローラーから温刺激のみを提示した場合、冷刺激のみを提示した場合、温冷刺激を交互に提示した場合について比較検討を行った。

4.3.3.1 被験者

実験時に皮膚疾患をもたない 8 名が参加した。被験者は男性 5 名、女性 3 名であり、年齢は 20 代から 60 代であった。

4.3.3.2 実験条件

室温 25°C の室内で実験を行った。

4.3.3.3 実験条件

温刺激のみを提示した場合、冷刺激のみを提示した場合、温冷刺激を交互に提示した場合 (“hot only”, “cold only”, “alternate”) の 3 条件を用いた。温刺激のみを提示した場合にはローラーの両面を 45°C に、冷刺激のみを提示した場合には 5°C に調整した。温冷刺激を交互に提示した場合には、ローラーの 1 面を 40°C に、もう 1 面を 15°C に調整した。

4.3.3.4 実験手順

実験は一人あたり 3 条件につき 5 試行ずつ、計 15 試行を行った。被験者は 1 試行につき 10 秒間、試作デバイスを右前腕内側に対して使用した。各試行後に被験者は選択肢のうちから当てはまるものを全て回答した。選択肢は、「ひんやり」、「冷たい」、「温かい」、「熱い」、「刺すような」、「かゆい」、「くすぐったい」、「ぬれた」、「痛い」、「気持ちいい」、「奇妙な」 (“cool”, “cold”, “warm”, “hot”, “stinging”, “itching”, “tickling”, “wet”, “painful”, “good feeling”, “strange feeling”) の 11 個であった。

4.3.3.5 実験結果

実験結果を図 4-17 に示す。温刺激のみを提示した場合 (“hot only”) では、「温かい」 (“warm”), 「熱い」 (“hot”) の回答が多く見られた。冷刺激のみを提示した場合 (“cold only”) では「ひんやり」 (“cool”), 「冷たい」 (“cold”), 「ぬれた」 (“wet”) の回答が多く見られた。温冷刺激を交互に提示した場合 (“alternate”) では温度を表す 4 つの回答項目「温かい」 (“warm”), 「熱い」 (“hot”), 「ひんやり」 (“cool”), 「冷たい」 (“cold”) すべてが見られたほか、TGI に特有の感覚である「痛い」 (“painful”), 「奇妙な」 (“strange feeling”) の回答率が 3 条件中最も高かった。2 つの相反する温度 (温冷) を表す回答 («冷たい」と「熱い」等) が同時に行われるケースが多く、また 8 名中 6 名の被験者が温冷を交互でなく同時に知覚していたことを報告した。

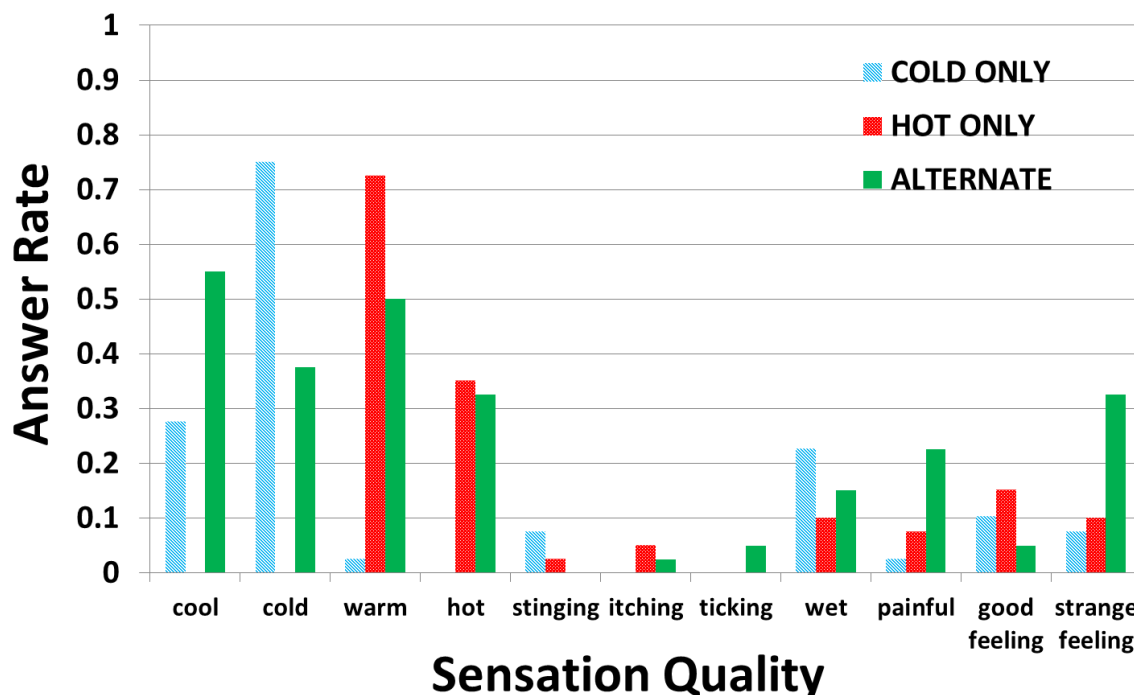


図 4-17 実験結果

4.3.3.6 考察

TGI に特有の感覚を表す「痛い」(“painful”), 「奇妙な」(“strange feeling”) の回答率は前者が 22.5%, 後者が 32.5% と決して高いものではない。ただし、温冷を同時に提示した場合であっても TGI は確実に生起するとは言えず、生起率が 20% 程度であるケースも存在する[2]。このため、試作デバイスによる温冷の交互提示は TGI を生起するという目的に対し一定の効果を持つことが示唆された。

4.3.4 評価：鎮痒実験 1

4.3.4.1 被験者

実験時に皮膚疾患をもたない 5 名が参加した。ただし、乳酸によって皮膚の痛みを訴えた被験者や痒みの生じない被験者については除外し、この人数には含めていない。被験者はすべて男性であり、年齢は 20 代から 60 代であった。

4.3.4.2 実験環境

室温 22℃, 湿度 45% の室内で実験を行った。

4.3.4.3 実験条件

表 4-2 に実験条件を示す。条件 O において試作デバイスは温度を提示しないことを意図しており、ローラー両面の温度を皮膚温に近い約 30℃ に加熱する。条件 T においては温度提示 (交互の温冷提示) のみ、条件 V においては装置把持部に 50Hz の振動を提示した。条件 VT においては同様の振動、温度をとともに提示する。以上 4 実験条件のほかに、コントロール条件 C を用意した。

条件 C では、デバイスを使用しない。

表 4-2 実験条件

	実験条件		コントロール条件 C
	振動	温度	
条件 O	-	-	デバイス 使用せず
条件 V	✓	-	
条件 T	-	✓	
条件 VT	✓	✓	

4.3.4.4 解析手法

4 実験条件にコントロール条件 C を加えた 5 群間の多重解析を Holm 法を用いて行った。

4.3.4.5 実験手順

各被験者は上述の 4 実験条件（条件 O, V, T, VT）を 1 条件ごとに異なる日に行った。4 条件を使用する順番は被験者ごとに異なる。

1 条件につき行った実験手続きを以下に示す。被験者の片頬に 2. 5%乳酸水溶液 7mL を浸み込ませた 5.5×7cm のコットンを貼付した。8 分後コットンを剥離し、1 分間の待機の後被験者は 15 秒間の待機ないし 15 秒間のデバイス使用を行い、さらに 8 分間待機させた。以上の手続きは頬の左右及びデバイスの使用（実験条件）／非使用（コントロール条件 C）を逆にして 2 回行われた。

上記手続き中に被験者は数回 VAS による痒みの評価を行った。評価を行ったタイミングはコットン剥離の直前および直後、15 秒間の待機ないし 15 秒間のデバイス使用直後、使用後 1 分ごと 8 回である。

4.3.4.6 実験結果

各条件における痒みの遷移を図 4-18 に示す。表 4-2 の 4 条件に対して有意差（5%有意差）の認められた群を表 4-3 に示す。但し有意差を持つ他群平均値の値が自らよりも高い場合のみ記載した。デバイスを使用した条件では条件 O はデバイス使用直後のみ条件 C との間に有意差が認められたが、使用 1 分後以降は認められなかった。条件 T は 4 群の中で唯一デバイス使用直後から 8 分後まで条件 C との有意差を保った。条件 O との有意差を持つ範囲も大きく、平均値も最も小さい。条件 V は平均値こそ低いものの分散が大きく、デバイス使用後 2 分後以降はほとんど他群との有意差が認められなかった。条件 VT は条件 T に次いで条件 C, O との有意差を持つ範囲が

大きく平均値も小さい。

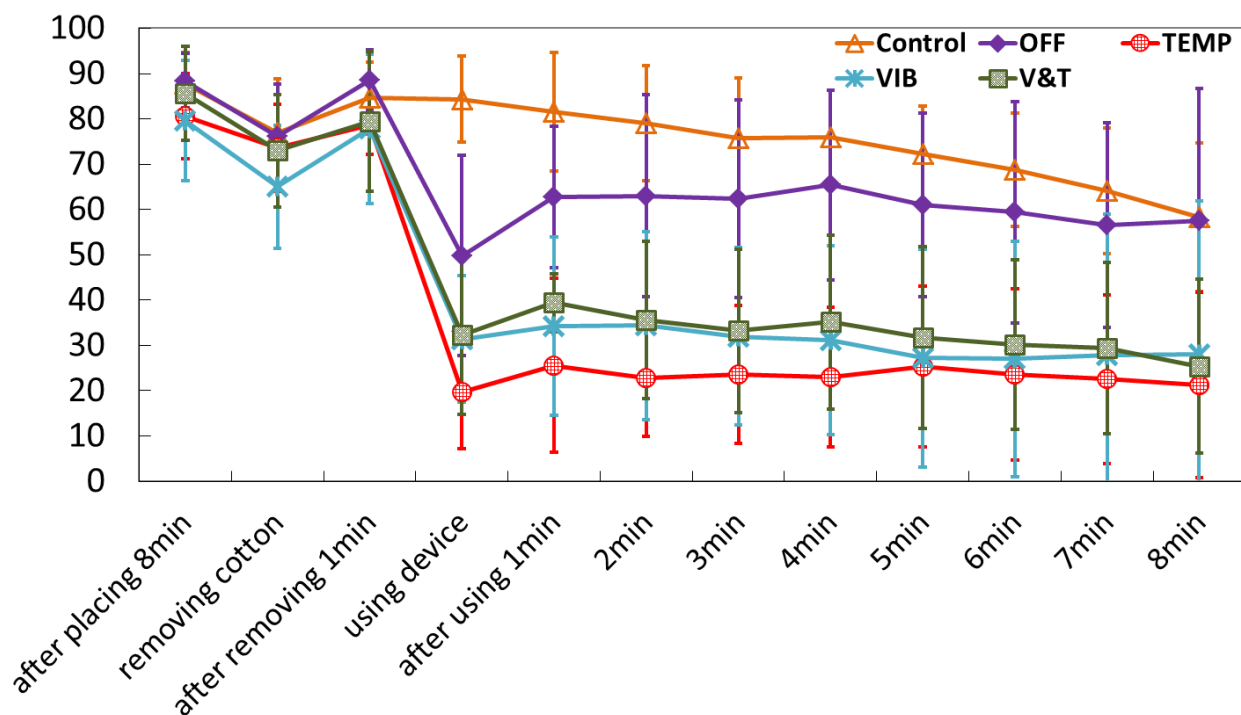


図 4-18 痒みの遷移

表 4-3 各条件間の有意差

	使用直後	1min	2min	3min	4min	5min	6min	7min	8min
O	C	-	-	-	-	-	-	-	-
T	C	C O V	C O VT	C O	C O	C O	C O	C O	C O
V	C	C O	-	-	C O	-	-	-	-
VT	C	C O	C O	C O	C O	O	O	C O	C O

4.3.4.7 考察

交互の温冷刺激を提示した条件 T および条件 VT 下ではデバイスが一定の鎮痒効果を持つことが示唆された。対して、把手部の振動のみを提示した条件 V では鎮痒効果は限定的なものであ

た。以上から、痒みに対し温冷の交互提示は有効と言える。しかしこの鎮痒実験 1 では先行研究から鎮痒効果の示されている冷刺激との比較がなされていないことが問題であった。

4.3.5 評価：鎮痒実験 2

4.3.5.1 被験者

実験時に皮膚疾患をもたない 5 名が参加した。ただし、乳酸によって痒みの生じない被験者については除外し、この人数には含めていない。被験者はすべて男性であり、年齢は 20 代から 30 代であった。

4.3.5.2 実験環境

気温約 20°C の室内で行った。

4.3.5.3 実験条件

実験条件として N, R, C, A の 4 条件を用意した。条件 N は作製デバイスを用いないコントロール条件である。条件 R では両面を皮膚温に近い 30°C に加熱したデバイスを、条件 C は両面 20°C のデバイスを用いる。条件 A では提案手法である交互の温冷提示（約 40°C と約 15°C の面）を行う。条件 C で 15°C ではなく 20°C を提示したのは、装置の制約上ローラー両面を 15°C に保つことが困難であったためであり、やむなく室温に近い 20°C を用いた。条件 C で提示する 20°C では温度受容体 TRPM8 が活性化するのに対し、条件 A の冷側面の温度 15°C では TRPM8 に加えて TRPA1 も活性化すると考えられる（表 2-1）。TRPA1 の活性化が鎮痒に寄与する可能性を否定できないことから、C と A は比較条件としてはやや不適當かもしれない。しかし TRPM8 のみを活性化するメントール塗布が鎮痒効果を持つことからすでに知られている冷覚の鎮痒効果との比較としては十分と考え実験を行った。

4.3.5.4 解析手法

4 実験条件間に Holm 法の分散分析を行った。

4.3.5.5 実験手順

各被験者は上述の 4 実験条件（条件 N, R, C, A）を 2 条件ごとに異なる日に行った。4 条件を使用する順番は被験者ごとに異なる。

1 条件につき行った実験手続きを以下に示す。被験者の片頬に 2.5% 乳酸水溶液 6mL を浸み込ませた 4×4cm のコットンを貼付した。8 分後コットンを剥離し、1 分間の待機の後被験者は 20 秒間の待機ないし 20 秒間程度のデバイス使用（頬の下から上へ装置ローラー部を転がす）を行い、さらに 10 分間待機させた。以上の手続きは一条件につき頬の左右いずれかを用いて行われた。

上記手続き中に被験者は計 14 回 VAS による痒みの評価を行った。評価を行ったタイミングはコットン剥離直前および剥離直後、待機ないしデバイス使用直後、使用後 1 分ごと 10 回である。

4.3.5.6 実験結果

各条件における痒みの遷移を図 4-19 に示す。4 実験条件（条件 N, R, C, A）に対して有意差（5%有意差）の認められた群を図 4-20 に示す。デバイスを使用しなかった条件 N との間に有意差のあるタイミングを列挙すると、皮膚温度に近い条件 R ではデバイス使用 7, 8 分後の 2 カ所、20℃を提示した条件 C では使用 4, 5, 7, 8 分後の 4 カ所、提案手法である交互の温度提示を行った条件 A では最も多く使用 2-10 分後の 8 カ所であった。ローラーを使用した 3 条件間には有意差はみられなかった。

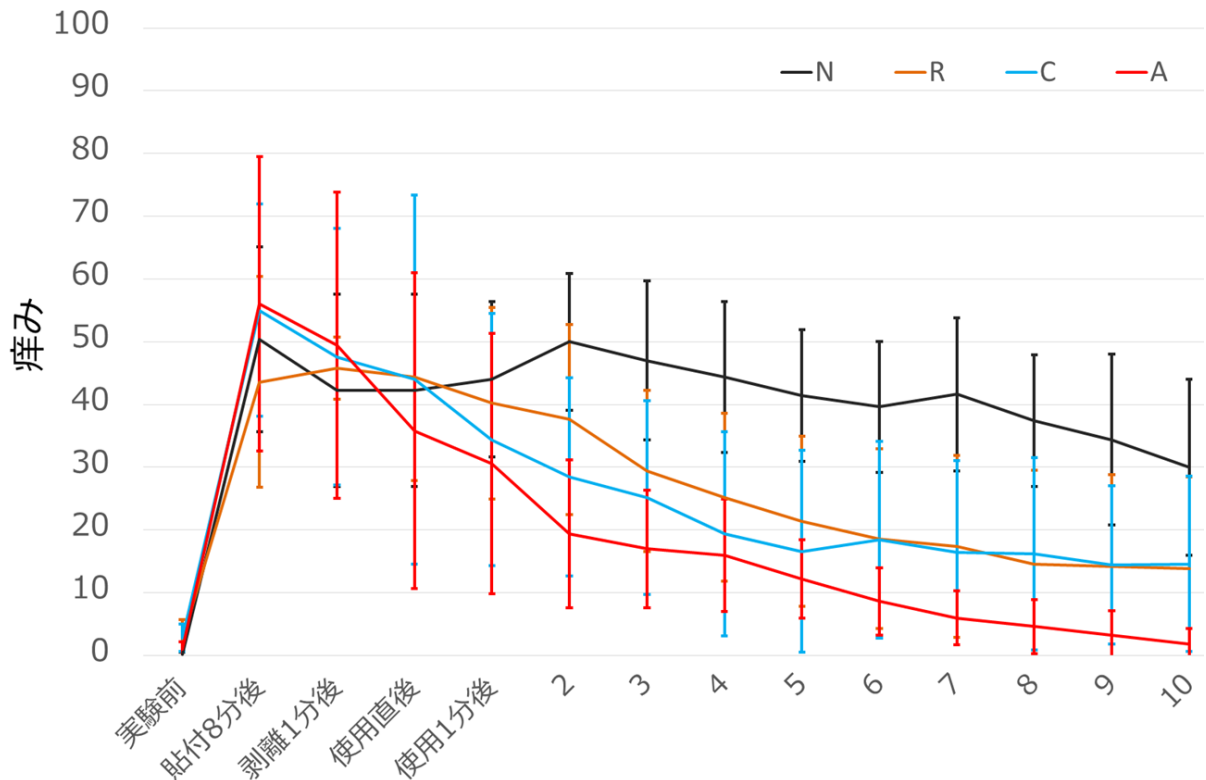


図 4-19 痒みの遷移

	実験前	貼付8分後	剥離1分後	使用直後	使用1分後	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N-R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-
N-C	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-
N-A	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
R-C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

図 4-20 分散分析の結果

条件 O はデバイス使用直後のみ条件 C との間に有意差が認められたが、使用 1 分後以降は認めら

れなかった。条件 T は 4 群の中で唯一デバイス使用直後から 8 分後まで条件 C との有意差を保った。条件 O との有意差を持つ範囲も大きく、平均値も最も小さい。条件 V は平均値こそ低いものの分散が大きく、デバイス使用後 2 分後以降はほとんど他群との有意差が認められなかった。条件 VT は条件 T に次いで条件 C, O との有意差を持つ範囲が大きく平均値も小さい。

4.3.5.7 考察

コントロール条件 N に対して有意な痒みの減少が冷刺激のみを提示した条件 C よりも温冷刺激提示を行った条件 A において多く見られたことから、提案手法が冷刺激よりも有効であることが示唆された。なおすでに述べたように、条件 C は 20°C であり、40°C, 15°C を交互に提示した条件 A との比較には限界はある。しかし少なくとも従来知られてきた冷刺激が、皮膚程度の 30°C に温めた条件 R と違いがなく、特にグラフの傾向として使用直後に痒みが低減するもののその後低減しないという傾向は、従来から知られてきた「冷刺激による鎮痒のぶり返し作用」とも一致する結果であるといえる。

また提案した温冷刺激がペルチェ素子の表裏を使って効率よく作成できるのに対し、冷刺激を同様のローラー型に作成することがハードウェア的に困難なことも、提案手法の優位性の一つであると考えられる。

4.4 TR を用いた鎮痒の可能性検討

これまで提案ローラー型デバイスが鎮痒効果を持つことを示してきた。しかしこの装置は皮膚との摩擦を軽減するローラー型とはいえ、皮膚に接触する必要がある。そのため患部がすでに大きく損傷している場合、ステロイド等の副作用により皮膚が弱くなっている場合には使用することができない。このような場合のために、患部に直接接触することなく痛みを提示する手法について検討する必要がある。

先行研究では指における TR による TGI の提示可能性が示唆されていた[11]。仮に TR によって痛み錯覚 TGI が生起することができるならば、患部に触れずに痛みを提示することが可能と考えた。患部へ触れずに TGI を提示する具体的な提示方法として、図 4-21 に示す温風を用いた手法を考えた。患部には温風（触刺激と温刺激）を提示し、患部から離れた位置に冷刺激を提示する。患部には温風により触刺激が提示されているため、TR により遠方の冷覚が生じるはずである。加えて温風そのものによる温覚も生じ、温冷覚が同位置に知覚され、TGI が生起すると考えられる。患部に触れないということは皮膚を損壊しないことを意味し、有用な鎮痒手法として応用可能と考えられる。

以降では非接触 TGI に先立ち、これまで示唆にとどまっていた TR による TGI 提示が可能であるかどうか検証実験を行った。また、TR を鎮痒手法に応用する際、全身に対して適用可能であることが望ましいが、これまでの TR 研究はその対象部位が手指、前腕に限定されていた。全身への適用可能性を探るべく、上半身の 4 カ所について TR 生起実験を行った。

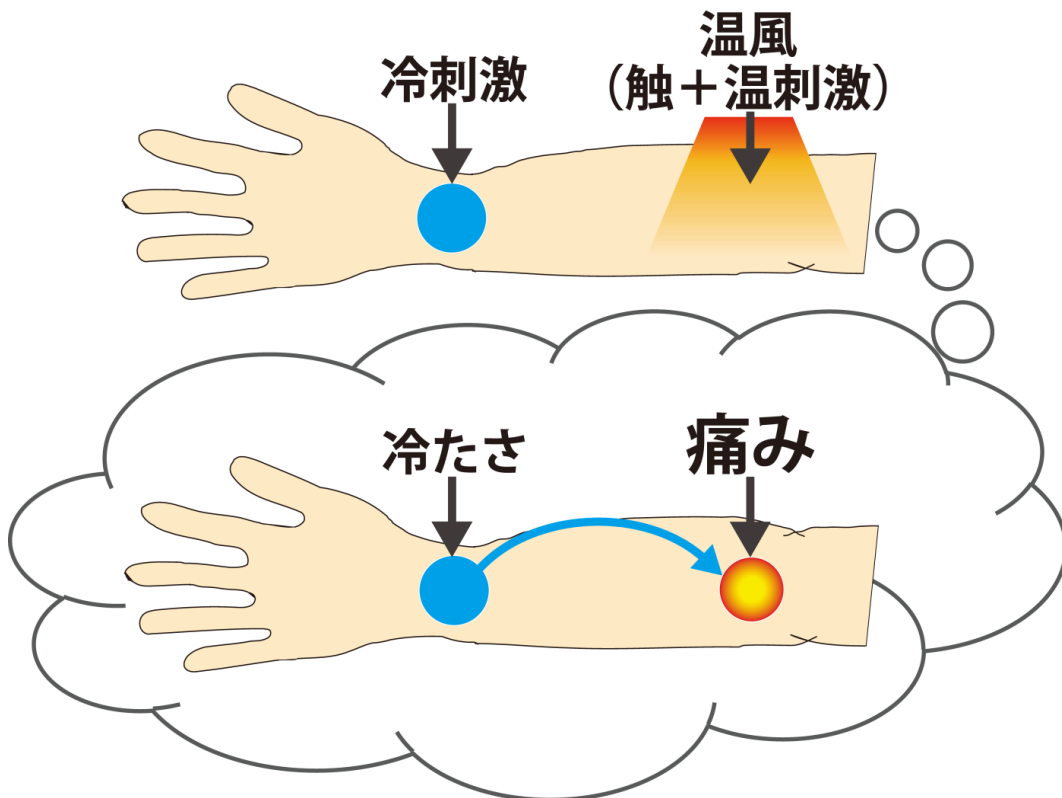


図 4-21 TR を用いた非接触 TGI

4.4.1 TR による TGI 提示実験

非接触 TGI に先立ち、まずは物理的接触を伴う TR による TGI 提示が可能であるかどうか検証実験を行った。前腕上の 2 点に装置接触による温度提示を行い、その際に生起する TR を観察した。2 点に提示される刺激が異なる温度、温刺激と冷刺激である場合図 4-22 のように相互の TR が発生し、TGI が生起することが予想される。

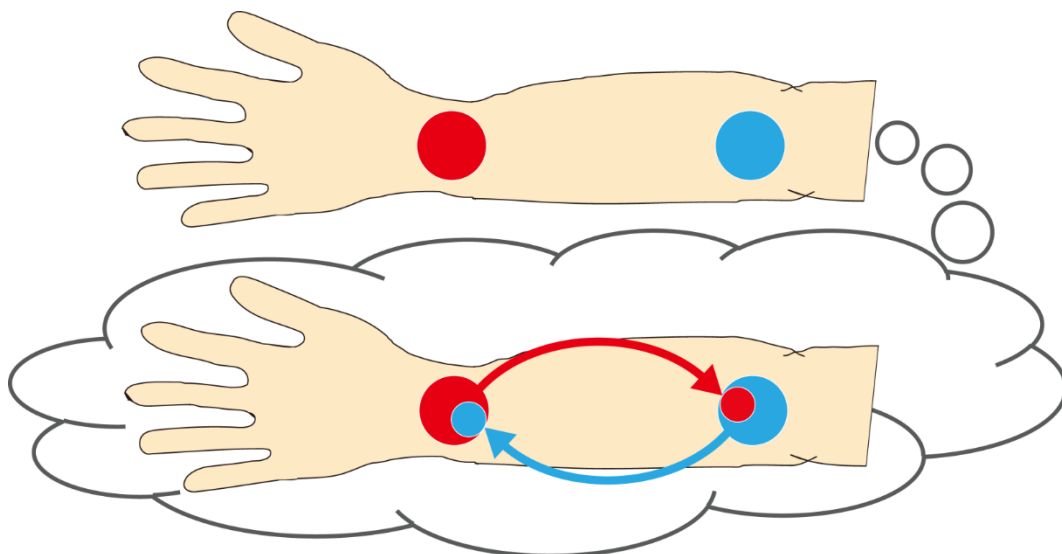


図 4-22 相互の TR

4.4.1.1 実験システム

実験システムを図 4-23 に示す。システムは 2 個の温度提示装置から構成され、各装置は 40mm 角ペルチェ素子、ヒートシンク、冷却ファンから構成される。2 個の温度提示装置は 100mm の距離を隔てて配置された。これは前腕部における触二点弁別閾 40mm を十分超える値である [38]。



図 4-23 実験システム

4.4.1.2 実験条件

被験者は年齢 21～25 歳の男性 6 名であり、うち 5 名は右利き、1 名は両利きであった。実験は室温約 28℃の室内で行われた。各温度提示装置から提示された刺激は温刺激 (40℃)、冷刺激 (20℃)、常温刺激 (33℃) の 3 種類である。今回は 2 個の装置を用いたため、実験条件は 9 通りであった。

4.4.1.3 実験手順

被験者は図 4-24 のように、一方の装置が手首に当たるように右腕を置いた。このとき両装置が腕に接触していることにより触覚提示をしている。20 秒後右腕を装置から離し、2 つの温度提示部それぞれについて、知覚された感覚を回答した。回答の選択肢は、“ひんやりする”、“冷たい”、“暖かい”、“熱い”、“灼熱感”、“痛い”、“何も感じない” (“cool”, “cold”, “warm”, “hot”, “burning”, “pain”, “nothing”) の 7 種を用意した。被験者には、“何も感じない” を選択する場合以外は複数の選択肢の回答を許可した。以上を 1 試行とし、各被験者は全 9 条件それぞれについて 3 試行ずつ、計 27 試行をランダムな順序で行った。なお、温度の順応を防ぐため、試行間には温度が提示された部位をよく擦るよう指示した。



図 4-24 実験の様子

4.4.1.4 実験結果

実験結果を図 4-25, 図 4-26, 図 4-27, 図 4-28 に示す. グラフの“○-○”は手首側, 肘側に提示した温度提示を表す (n: 常温刺激, h: 温刺激, c: 冷刺激). 例えば“n-n”は両装置から常温刺激を提示した条件を表し, “h-c”は手首側に温刺激を, 肘側に冷刺激を提示した条件を表す. 各グラフは図 4-25 が両装置から同一の刺激を提示した場合 (“n-n”, “h-h”, “c-c”), 図 4-26 が肘側の装置のみ常温刺激を提示した場合 (“h-n”, “c-n”), 図 4-27 が手首側の装置のみ常温刺激を提示した場合 (“n-h”, “n-c”), 図 4-28 が温刺激と冷刺激を同時に提示した場合 (“h-c”, “c-h”) の結果を表す.

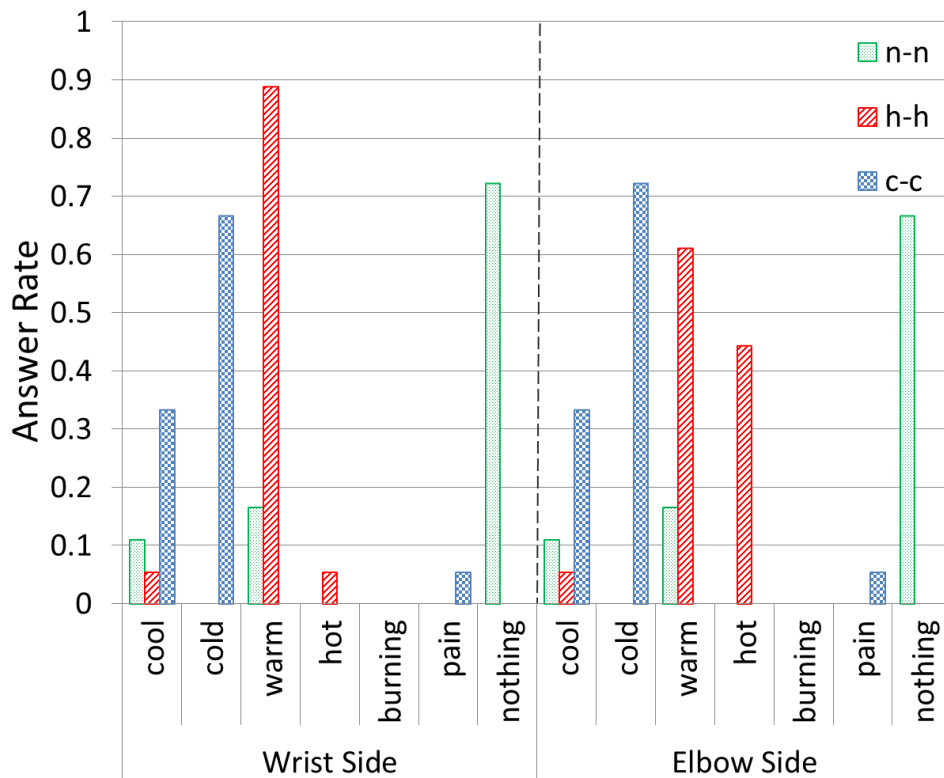


図 4-25 実験結果 (“n-n”, “h-h”, “c-c”)

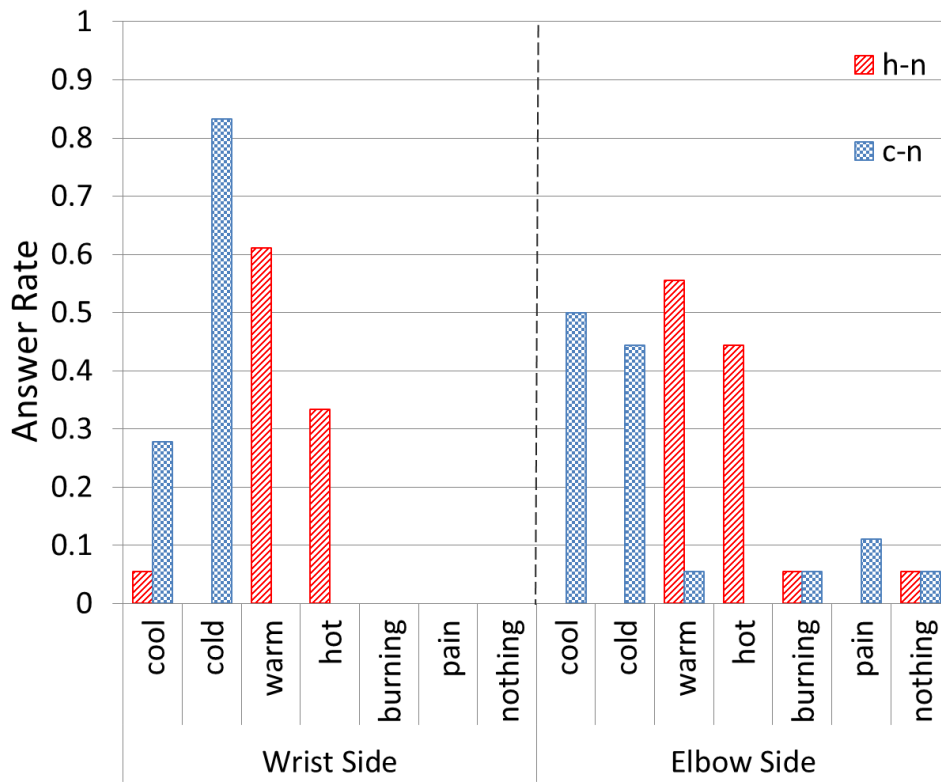


図 4-26 実験結果 (“h-n”, “c-n”)

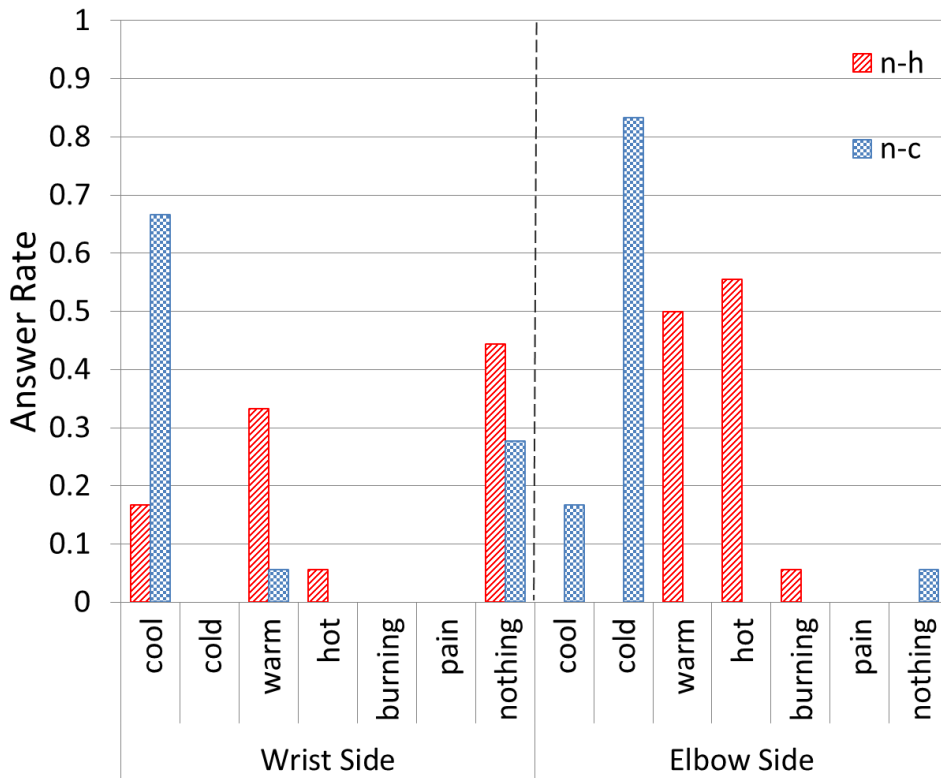


図 4-27 実験結果 (“n-h”, “n-c”)

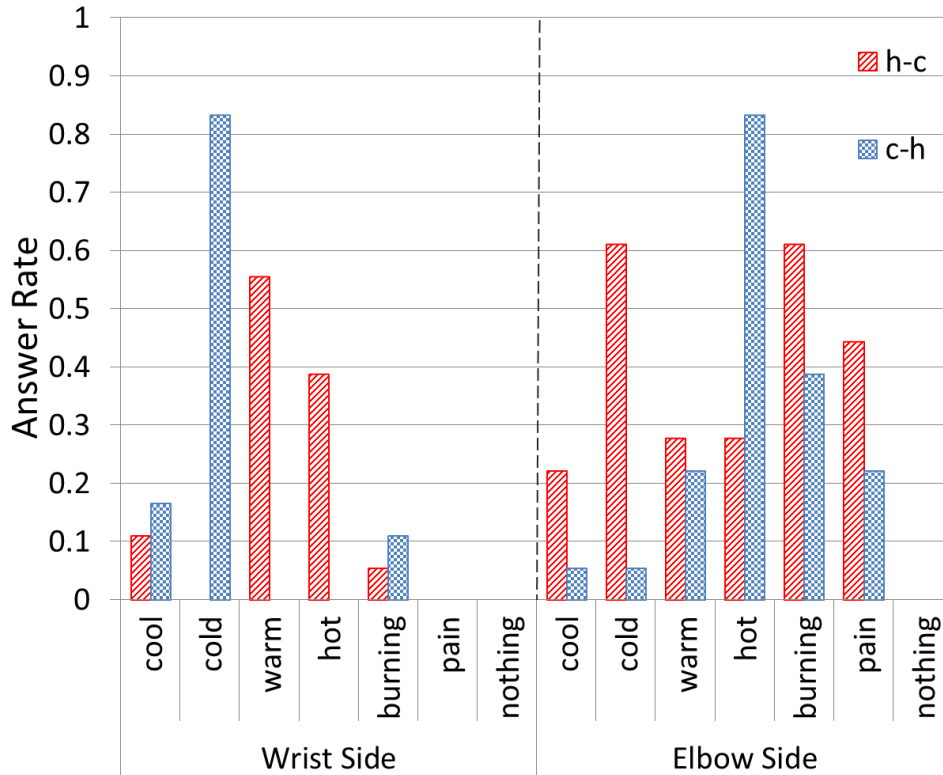


図 4-28 実験結果 (“h-c”, “c-h”)

図 4-25 では両側に同一温度の刺激を提示した場合にはおおむね提示した通りの温度知覚がなされたことがわかる. 図 4-26 では手首側に提示された温度が知覚されたのみならず, 同種の感覚が常温刺激の提示された肘側でも知覚されたことがわかる. 一方図 4-27 では, 肘側に知覚されたものと同種の感覚が常温刺激の提示された手首側で知覚された割合はやや低く, “何も感じない”の回答も多い. 図 4-28 に示した温冷刺激を同時に提示した場合には, 肘側で TGI 特有の感覚である“灼熱感”, “痛い”の回答が多く見られた一方で, 手首側ではほとんど回答されなかった. 特に“h-c”条件においては肘側に“灼熱感”, “痛い”の回答が多く見られ, 冷刺激の提示された肘側でも“暖かい”, “熱い”の回答率が3割近く見られた.

4.4.1.5 考察

実験結果から, 皮膚上の2点のうち1点に常温刺激を, もう1点に温または冷刺激を提示した場合に TR が生起したことが確認された. 2点それぞれに温刺激と冷刺激を同時に提示した場合 (“h-c”, “c-h”) では肘側に TGI に特有の感覚を示す“灼熱感”, “痛い”の回答が多くみられた. これは肘側に物理的に提示された温度提示に加えて, TR により手首側へ提示された温度提示が同時に知覚されたこと, つまり結果的に温冷覚が肘側に同時に知覚され, TGI が引き起こされたことを示唆している.

また肘側に常温刺激を行った場合 (“h-n”, “c-n”) の TR 生起率は手首側に温度提示を行った場合 (“n-h”, “n-c”) に比べ高いといえる. “h-c”, “c-h”において“灼熱感”, “痛い”の回答が多くみられたのも肘側であった. 上述の通り“灼熱感”, “痛い”の回答が TR の生起によりもたらされたと考えれば, 肘側を参照した手首側への TR の生起率が低いということになる.

以上から前腕部において TGI が生起することが示唆された。また同時に TR は刺激点の位置によって生起率に偏りがあること、具体的には肘側の知覚が手首側の知覚へ及ぼす影響よりも、手首側の知覚が肘側の知覚へ及ぼす影響の方が高いことが示唆された。

4.4.2 全身における TR の生起実験

4.4.1 では TR によって TGI が生起可能であることを示した。この TR による TGI を鎮痒手法に応用する際、全身に対して適用可能であることが望ましい。しかし先行研究における TR の実験は手指や前腕を対象としたものがほとんどであり、身体の他の部位については TR が生起可能であるか不明であった。そのため全身において上述した TR を用いた鎮痒手法が可能であるか検証する必要がある。本項ではその手始めに右前腕から胸部にかけての 4 部位における TR 生起実験を行った。

4.4.2.1 実験システム

4.4.1.1 と同様、ペルチェ素子を用いた温度提示装置を用いた (図 4-29)。素子表面にサーミスタを配置し、表面温度は PI 制御によって制御された。2 個の温度提示装置は 100mm の距離を隔てて壁面の床から約 140cm の位置に垂直に配置された。被験者は実験時には自身で立った状態でこの温度提示装置に身体を押し付けた。装置に皮膚を押し付けることによって、温度提示とともに触刺激も提示された。



図 4-29 温度提示装置

4.4.2.2 実験条件

20 代の男性被験者 4 名が参加した。室温 19℃室内で実験を行った。なお実験を通して、被験者は上半身の衣服を脱いだ状態であった。

温度提示部位は以下の 4 条件を用意した (図 4-30)。

- (1) 右手首をまたいだ掌, 前腕の 2 箇所
- (2) 右肘をまたいだ前腕, 上腕の 2 箇所
- (3) 右肩をまたいだ上腕, 胸部の 2 箇所

(4)正中線をまたいだ左右胸部の2箇所

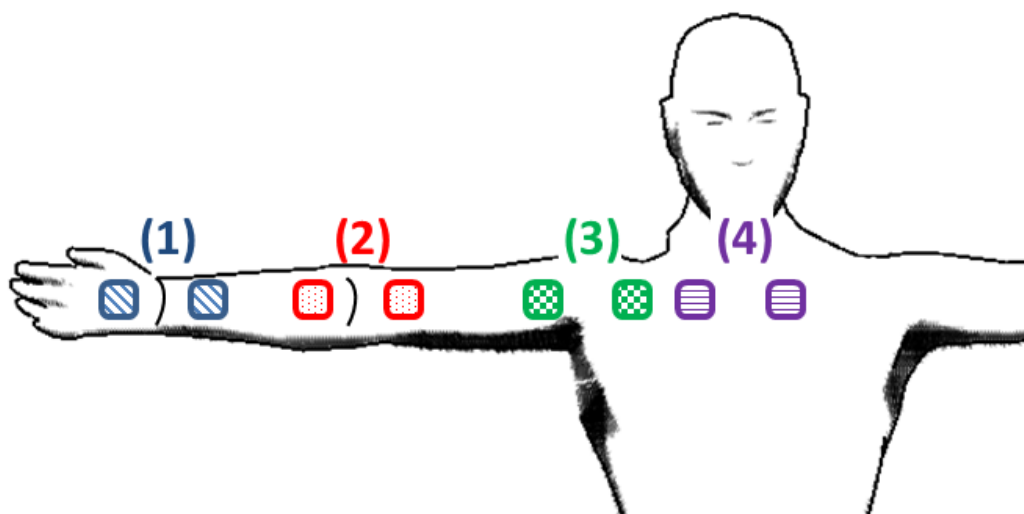


図 4-30 温度提示部位

2 箇の温度提示装置から以下の 3 種の温度を提示した.

- (a)近位側 (体幹に近い側, 左側) 装置 : 40°C, 遠位側 (末端に近い側, 右側) 装置 : 30°C
- (b) 近位側装置 : 30°C, 遠位側装置 : 40°C
- (c) 近位側装置 : 30°C, 遠位側装置 : 30°C

部位 4 条件それぞれに対し提示パターン 3 種が用意されているため, 被験者は計 12 条件の実験を行った.

4.4.2.3 実験手順

被験者は全 12 条件それぞれに対し 4 試行ずつ, 計 48 試行をランダムな順序で行った. 以下に 1 試行あたりの手順を示す. 被験者は(1)~(4)のうち指定された部位を壁面の温度刺激提示装置に 10 秒間押し当てた. 10 秒後, 装置から離れ, 各装置が接触した部位に温覚 (「熱い」「あたたかい」) が生じたかどうか回答を行った.

4.4.2.4 実験結果

実験結果を以下に示す. 図 4-31 縦軸の「温覚生起率」は(c)の条件の際に, 被験者が温覚が生じたと回答した割合を示す. (1)手首をまたいだ 2 箇所(3)肩をまたいだ 2 箇所(4)正中線をまたいだ 2 箇所では温覚生起率は 0%であり, (2)肘をまたいだ 2 箇所でも非常に低い. 30°Cの温度刺激では温覚は生じないと考えられる.

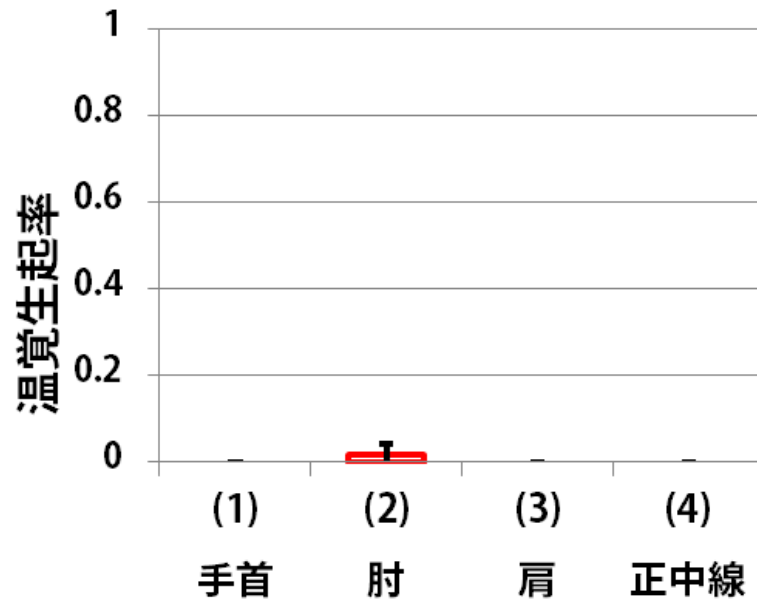


図 4-31 30°Cのみ提示した際の TR 生起率

縦軸の「TR 生起率」は(a)(b)の条件の際に、被験者が 2 箇所ともに温覚が生じたと回答した割合を示す。(2)肘をまたいだ 2 箇所(3)肩をまたいだ 2 箇所では TR 生起率が高いが、対して(1)手首をまたいだ 2 箇所(4)正中線をまたいだ 2 箇所での生起率が非常に低いことがわかる。Holm 法による多重解析の結果、(2)は(1)および(4)との間に 1%有意差が、(3)は(1)および(4)との間に 5%有意差が認められた。

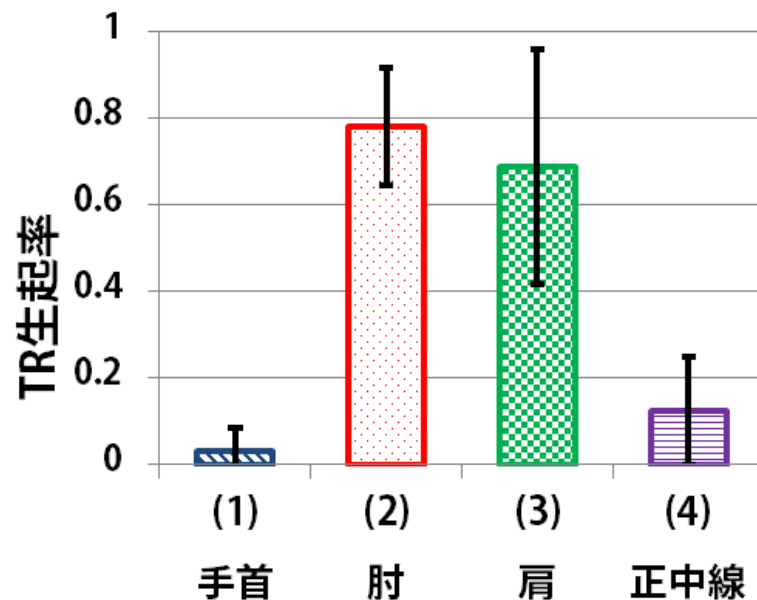


図 4-32 TR 生起率

4.4.2.5 考察

正中線をまたいだ場合、脳内の感覚情報処理は左右半球に分かれることになり、この時の生起率の低さは TR が左右半球の情報が統合される前に生じている現象であることを示唆していると

考えられる。また手首をまたいた場合の TR 生起率の低さは、掌と前腕で触覚、温度感覚の空間解像度に大きな差があることが一つの原因として考えられる。

4.5 まとめ

前章までに紹介した先行研究では、痛覚が痒みを抑制すること、錯覚現象 TGI が皮膚を傷つけずに痛みを生起することが知られていた。本章ではこの2つの知見に基づき、TGI を安全な鎮痒手法として利用するための具体的な方法を検討した。

接触によっても皮膚表面を極力傷つけず、広範囲に TGI を提示するためペルチェ効果を利用し、温冷2種類の温度を交互に提示するローラー型 TGI 装置を試作した。2度の試作、3度の実験の結果、提案手法である温冷交互の提示が一定の持続時間を持つ鎮痒効果を発揮すること、その効果が冷温のみを提示した場合と比較しても高いことを確認した。

また、患部に接触できない場合に備え、非接触に TGI を提示する方法を検討した。先行研究では TR による TGI の提示が可能であることが指先において発見されており、この知見に基づき、TR を利用し患部に触れずに TGI 生起が可能と考えた。その実現に先立ってまず指先のみで知られていた TR を用いた TGI の生起実験を前腕部において行った。その結果 TR によって痛みの感覚が生起可能であることを確認した。さらに全身における鎮痒への適用のため、TR の生起可能な部位を上半身において検証した。その結果、TR が上腕や胸部についても生起すること、触刺激、温度提示位置が手首や正中線を跨いだ際には TR が生起しないことが確認された。この発見は、全身への温度感覚提示による鎮痒という応用にとって重要であるとともに、TR の生起する脳内メカニズムを解明する上で重要な結果であると考えられる。

第5章

温度提示を用いた運動調節

第3章で述べたように、温度感覚が把持力調節に関係することが先行研究によって示唆されている。先行研究では温度感覚の欠如が把持力の増大や不安定化につながることを確認されたが、どのような温度によってどのように把持力が推移するのかについては未知であった。温度提示が人間の運動調節に対し影響を与えるのであれば、これまでのような主観的な温度知覚検査に代わり、運動の観察という客観的な指標を用いた温度知覚検査が可能となる。また温度により人間の運動を制御することも可能と考えられる。本章では、温度感覚と運動調整の関係性を検証し医療・リハビリテーションへの応用可能性を検討する。

5.1 温度変化と把持力の推移

温度感覚が把持力調節に寄与するならば、温度の変化が把持力に影響を及ぼすことが予想された。これを検証するために把持物体の温度の動的変化と把持力推移の関係に注目した。物体の表面温度を動的に変化させることが可能なキューブ型のマニピュランダム装置を開発し、被験者が拇指、示指で装置を把持した際、表面温度の変化に伴う把持力の推移を記録し、その関係性を検討した。また温痛覚の寄与を明確に示すための対象群として、温痛覚の脱出する疾病である CIP 患者の協力を得て同様の実験を行った。健常群では温度変化につれて把持力が変化することが予想されるが、CIP 群では温度感覚を持たないことから把持力と温度変化間に関係性が見られないと予想された。この予想通りの結果であれば、温度と把持力の関係は直接的に示され、客観的な温度知覚能力の検査手法としての応用可能性は高い。

5.1.1 実験システム

把持力と提示温度の関係を検証するため、物体の表面温度を動的に変化させることが可能なキューブ型のマニピュランダム装置を開発した。装置はロードセル (LMA-A, 共和)、ペルチェ素子、ヒートシンク、冷却ファン、温度センサから構成され、制御、記録のためにロードセル用アンプ (DPM-711B, 共和)、マイクロプロセッサ (mbed NXP LPC1768, NXP) モータドライバを用いた (図 5-1)。装置重量は 89g であり、体積はおよそ 45 cm³ (30mm×30mm×50mm) である。ペルチェ素子の表面温度は PI 制御され、装置にかけられた把持力はロードセルからアンプを通して増幅され、マイコンへ送信される。

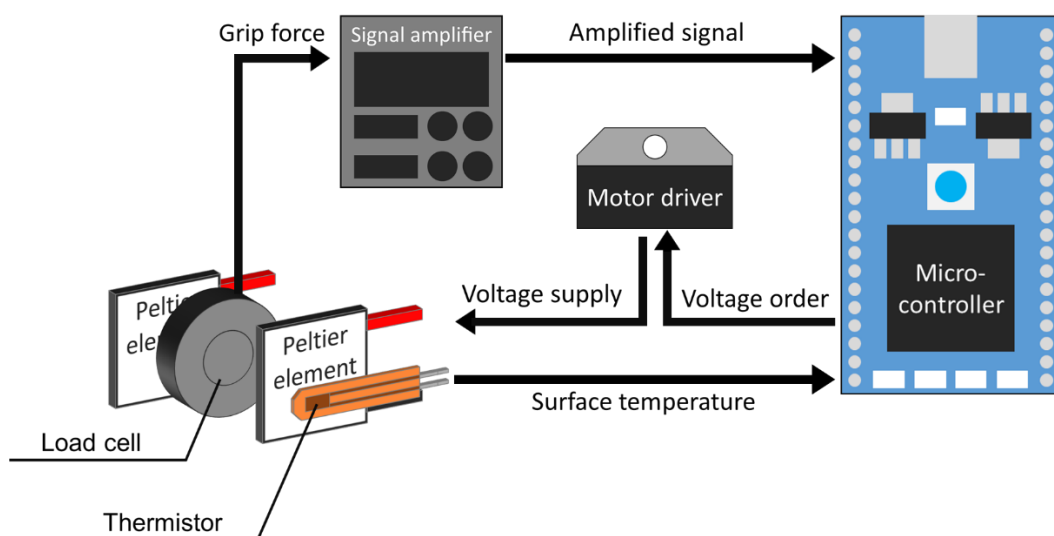
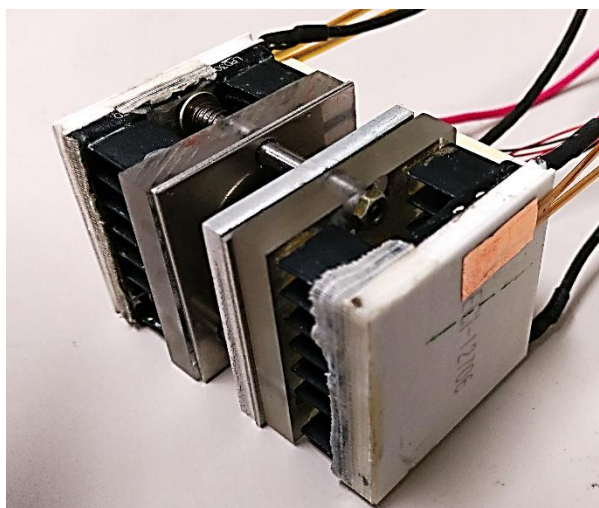


図 5-1 上：装置外観 下：システム図

5.1.2実験条件

25名の神経機能に問題を持たない被験者（健常群）と4名のCIP患者（CIP群）が実験に参加した。実験中装置表面には0.2Hzの正弦波状に推移する温度が提示された。提示した温度範囲は以下の3条件を用意した。

- (1) 27 °C ~ 37 °C
- (2) 27 °C ~ 32 °C
- (3) 32 °C ~ 37 °C

人間の体温に近い32 °Cを中心に5 °C上下するもの、体温より低い範囲で上下するもの、高い範囲で上下するものの3種である。健常群では各条件について2試行ずつ行った。CIP群については条件(1)のみを実施し、3名の被験者については1試行のみ、1名の被験者について3試行を行った。

5.1.3 実験手続

被験者は実験を通して、装置の置かれた机前の椅子に着座した状態であった。はじめ被験者は右手親指と人差し指で装置側部（ペルチェ素子の面）を把持し、約 10 cm 直上へ持ち上げた。その後被験者は 30 秒間その姿勢を保ち、この間温度変化が提示された。30 秒が経過した後被験者は装置を机上に置き、指を装置から離れた。次の試行に移るまでには最低 1 分間の間隔をおいた。

5.1.4 実験結果

図 5-2AB に代表的な健常群の被験者 1 名の 1 試行の計測結果を示す。A は温度、把持力の 30 秒間における推移そのものを、B は温度変化の 1 周期ごとに分割し重ねたものである。A の把持力推移に重ねて表記された破直線は把持力推移の 1 次フィッティング線、であり、B における分割の前段階で破線の示す値が実線の示す把持力から引かれた。これは、人間は把持した後、その力を合目的に調整した結果、把持開始からしばらく把持力が減衰する傾向があることが知られており、その影響を受けないための処理である。図 5-2C は周期ごとの相関曲線を表す。この試行において、5 周期すべてについて大きく負の相関がみられた。これは装置表面の温度が上昇した際に把持力が減弱し、温度が下降した際に把持力が上昇することを示す。

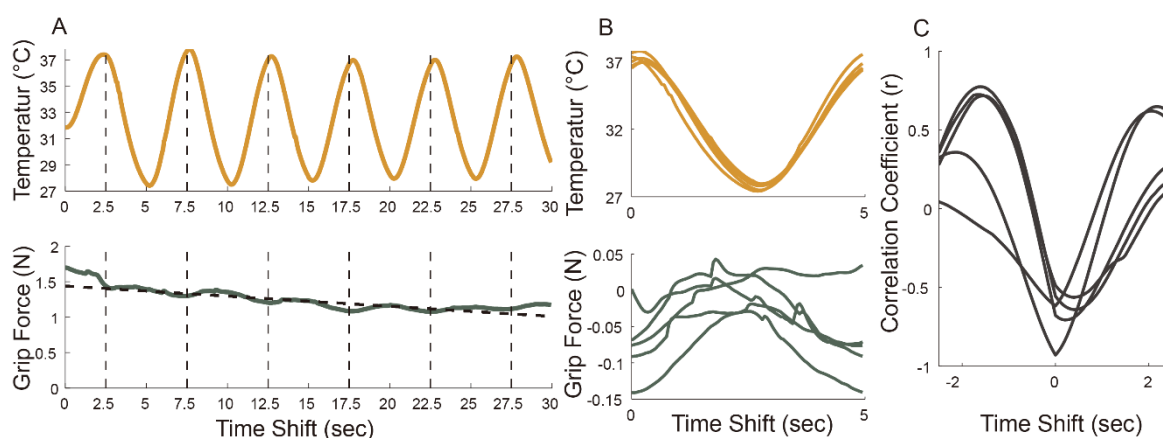


図 5-2 代表的な健常群被験者 1 試行の計測結果と相関曲線 (A : 温度、把持力の推移 B : 5 周期を重ね合わせたもの C : 各周期の相関曲線)

図 5-3 に条件(1)における健常群、CIP 群の全被験者の平均相関曲線を示す。健常群では大きな負の相関がみられるのに対し、CIP 群はなだらかな波形である。2 被験者群間の極値の平均値 (相関値および時間ずれ) について t 検定 (閾値 $p < 0.05$) を行ったところ、相関値について有意差がみられた。つまり温度感覚が正常な被験者にとっては温度が上昇した際に把持力が減弱し、温度が下降した際に把持力が上昇することを示す。

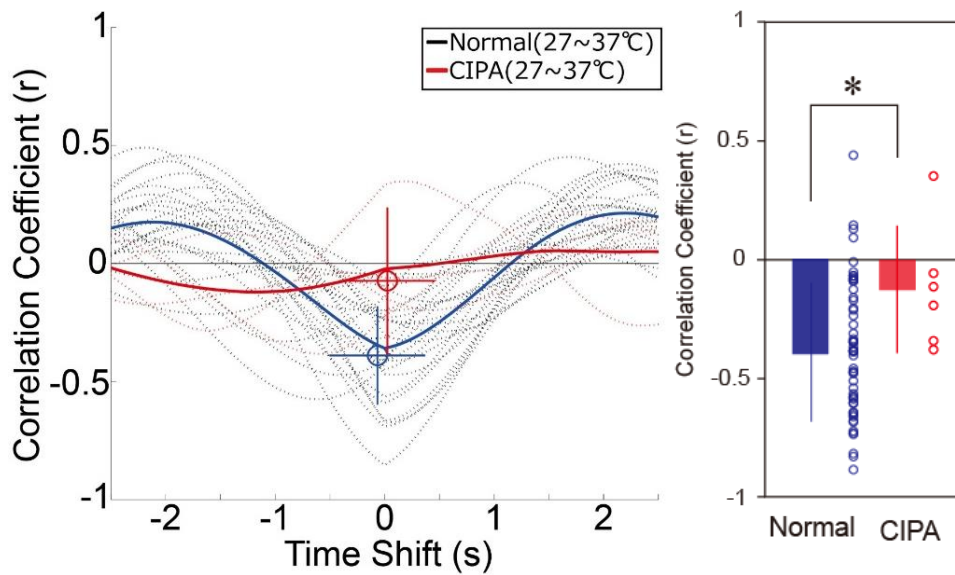


図 5-3 左：全体の相関曲線 右：相関値

図 5-4 に健常群の 3 条件について平均相関曲線を示す．条件(2)(3)における傾向も(1)と同じく負の相関がみられた．3 条件間に検定 (Tukey-Kramer test, 閾値 $p < 0.05$) を行った結果, 条件(1)と(3)の間に有意差が見られた．

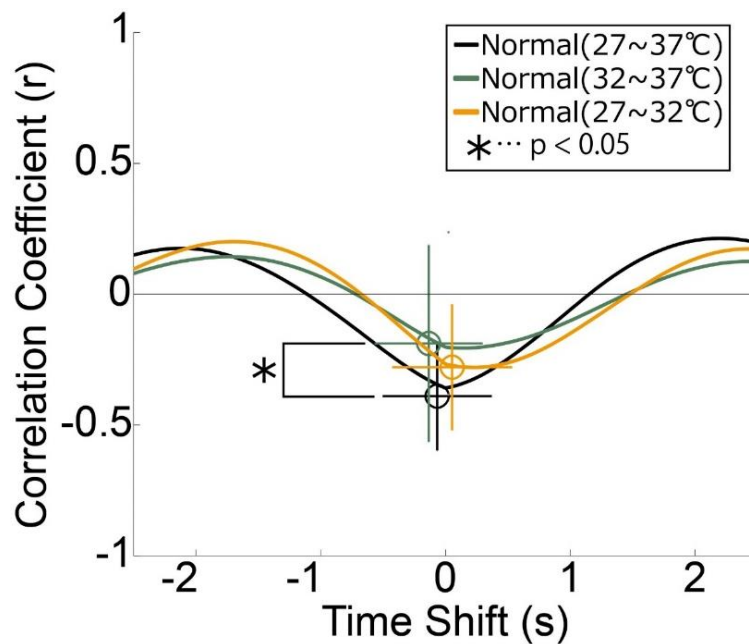


図 5-4 3 条件における相関曲線

5.1.5 考察

実験では温度感覚の正常な健常群において温度変化と把持力推移に関係が見られた一方で，温度感覚の脱出した CIP 群にはみられないことから，温度感覚の把持力調節への寄与が示唆された．また，温度変化幅が大きい場合に相関値も大きくなることも観察された．これは知覚する温度感

覚の強度を計測できる可能性を示す。つまり、温度感覚の有無の検査だけではなく、温度感覚の鈍麻の程度の計測への応用の可能性を示すものである。

5.2 手掌部への温度提示による加重推移

5.2.1 手掌部における力触覚生起実験

前節では温度感覚が把持力の調節に寄与することを示したが、こうした調節は把持動作に特有のものなのか、それとも運動一般にみられるものなのか検証する必要がある。その手始めとして、手掌部を平面上に置いたままの状態、接地面の温度が変化した場合の加重推移を観察した。予備実験では手掌部に静的に接触した温度素子から提示する温度を急速に変化させた際に触力覚や移動する感覚が生起することが確認された(図 5-5)。この触力覚や移動感は把持力の場合にみられた無意識の運動調節が行われた結果生起したという解釈が可能であった。実験ではこの触力覚の生じる割合を被験者実験により検証したほか、被験者が生起した触力覚をどのようなものとして解釈したかを観察した。

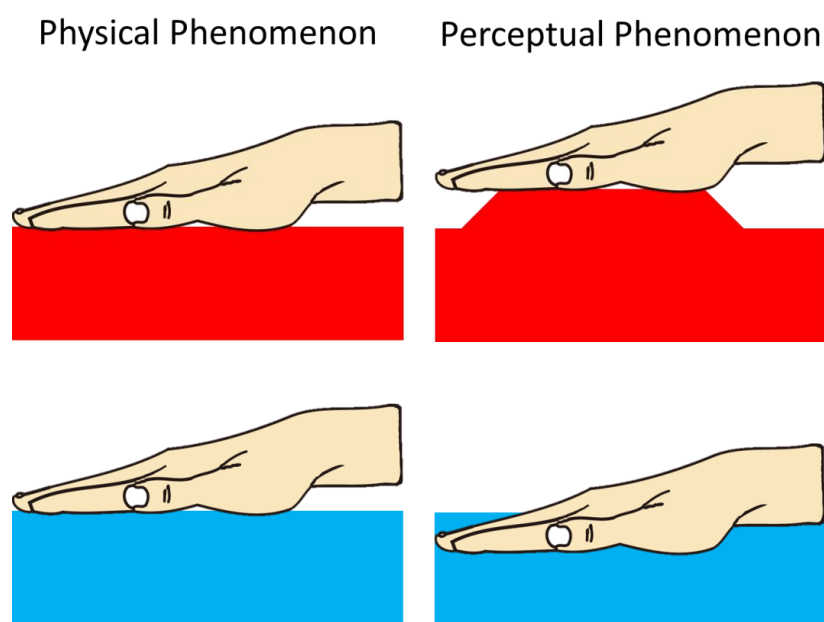


図 5-5 生起する感覚

5.2.1.1 実験システム

実験に用いた温度提示装置を図 5-6 に示す。装置はヒートシンクおよび冷却ファン、温度制御用サーミスタ、ペルチェ素子から構成される。サーミスタにより温度を計測し、モータドライバによりペルチェ素子に加える電圧を PID 制御することにより、提示温度を制御する。被験者の皮膚に接触する温度提示面は 40mm×80mm であった。

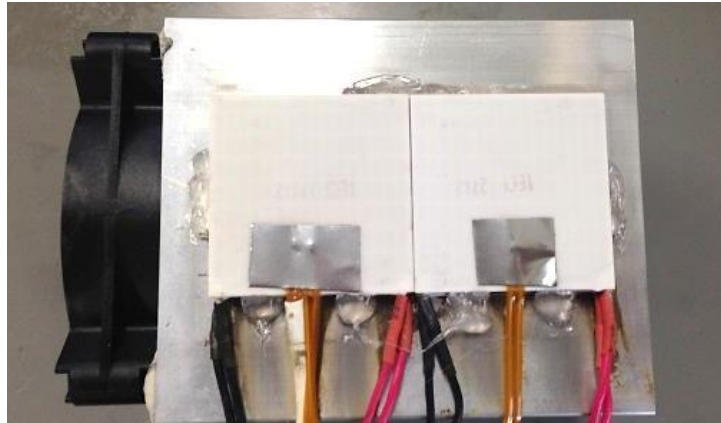


図 5-6 温度提示装置

5.2.1.2 実験条件

被験者は男性 6 名（年齢 21～25 歳）であり，うち 5 名は右利き，1 名は両利きであった．実験は室温 28℃の環境下で行われた．

温度提示装置から提示された刺激パターンは以下の 3 条件であった．

- (a) 定常的に 37℃を提示
- (b) 定常的に 27℃を提示
- (c) 27～37℃を周期 4 秒の正弦波状に変化する

37℃，27℃は皮膚表面の温度 32℃からそれぞれ 5℃の温度差にあり，どちらも皮膚を傷つけない温度である．

5.2.1.3 実験手順

被験者は全 3 条件それぞれに対し 10 試行ずつ，計 30 試行をランダムな順序で行った．以下に 1 試行の手順を示す．被験者は右手掌部を装置の温度提示面においた状態を 30 秒間保った．30 秒後，装置から右手を離し，温度提示中に右手に上下方向の感覚（上下の移動感や圧覚，力覚）が生じたか否か回答を行った．また，生じた感覚が具体的にどのようなものであったかも回答した．

5.2.1.4 実験結果

図 5-7 に各条件において被験者が上下方向の感覚が生起したと回答した割合を示す．一定の温度を提示した(a)(b)での回答率は 1 割前後にとどまるのに対して，(c)では 8 割弱と非常に高い．Holm 法による多重解析の結果，(c)と(a)の間および(c)と(b)の間に 5%有意差が認められた．

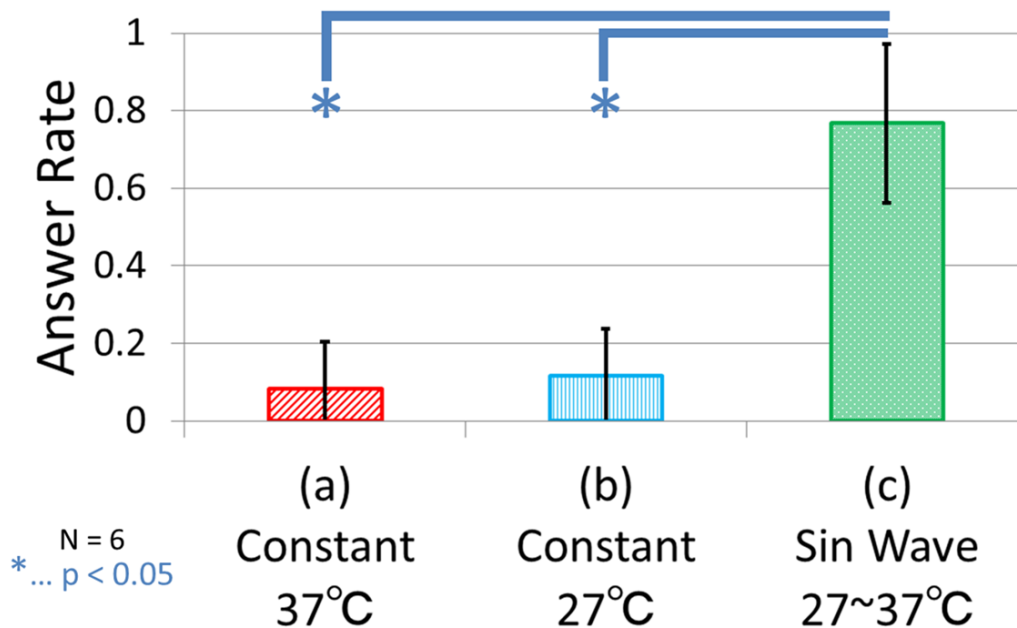


図 5-7 触力覚の生起率

生じた感覚についての内観報告は様々であり，被験者ごとに大きく異なる場合もあった．すべての被験者は提示温度の上昇時に上方向の，下降時に下方向の感覚を生じたと回答したが，うち 1 名の被験者は試行によってこの温度と感覚の方向が逆転することがあったと回答した．内観報告はほかに，以下の様なものがあった．

- 掌を装置に置いてから上下方向の感覚を生じるまでにある程度時間がかかった．
- 温度の上昇，下降と同期して刺激提示面が上下動したように感じた．
- 温度が下降する際に，掌が下方向に吸い込まれる感覚があった．
- 温度が上昇する際に刺激提示面が隆起し，下降時には平らになる感覚があった．
- 温度が変化する際にひりひりする感覚があった．

5.2.1.5 考察

実験結果から，提示温度を周期的に変化することで上下方向に何らかの触力覚が生じるといえる．この現象の機序についての 1 つの仮説として，皮膚と物体が接触する際に起こる急速な温度変化が触力覚を生む可能性が挙げられる．異なる温度の皮膚と物体が接触した際には，それぞれの接触面に急速な温度変化が生じ，温度が釣り合う．つまり (c) の条件で繰り返された急速な温度変化は，人間がものを触った際状況と類似するところがある．これにより実際には掌と素子は静的に接触しているにもかかわらず，急速な温度変化のたびに，あたかも動的に素子に接触したかのような感覚を得，これを力覚と解釈した可能性がある．これに関連して，材質感の変調が起きた可能性も挙げられる．皮膚と物体が接触した際に起こる急速な温度変化が物体の材質を判別するための大きな要因となることが知られており，手指と接触する際の温度素子の表面温度を制御することにより，異なる材質の物体と接触した感覚（材質感）を再現した例もある[39]．触力覚を生じた(c)の条件では絶えず温度が変化し続けていた．この絶え間ない温度の変化が，温度素子表面の材質感を変化させ続け，硬さが変化したような感覚，触力覚として知覚された可能性は否定

できない。ほかに触覚受容器の温度依存性の関連も考慮すべきであろう。触力覚のセンサである触覚受容器の感覚閾値は温度によって上下することが知られており、温度変化によって触力覚の強度が変化する可能性も考えられる[59]。ただし、動物実験において高温時に機械受容器の活動が低くなることが報告されており、この仮説は棄却すべきであろうと考えられる[8]。

このような感覚的錯覚としての可能性のほかに、把持力の場合にみられた温度変化に対する無意識の運動調整が行われたという可能性も考えられる。つまり、温度が上昇する際に無意識的に手をわずかに持ち上げる、ないしは加重を減らし、温度が下降するにつれ手をもとの位置に下げ、または加重を増やすという運動調節が行われた結果、触力覚が生じているのではないかと考えた。この点について次の実験にて検討する。

5.2.2 手掌部における触力覚生起と加重変化

前節では感覚的な面の検証のみに偏り、運動調整という観点の検証を行っていなかった。本節では提示温度変化と加重調節の間の関係を検証するため、温度提示中に被験者の手掌部が提示装置にかける力の推移が温度提示パターンによってどのように変化するか観察を行った。

5.2.2.1 実験システム

実験に用いた温度提示装置を図 5-8 に示す。装置はヒートシンクおよび冷却ファン、温度制御用サーミスタ、ペルチェ素子、圧力センサから構成される。サーミスタにより温度を計測し、モータドライバによりペルチェ素子に加える電圧をPID制御することにより、提示温度を制御した。被験者の皮膚に接触する温度提示面は 40mm×80mm であった。装置を支える 4 本の足の底面に圧力センサを配置し、装置にかかる力を計測する。

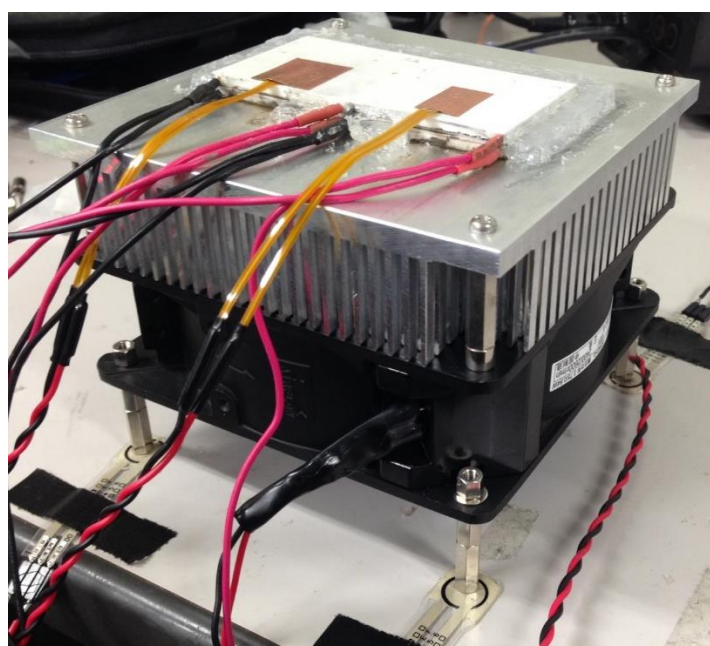


図 5-8 温度提示装置

5.2.2.2 実験条件

被験者は男性 6 名（年齢 21～25 歳）であった。実験は室温 28℃の室内で行われた。温度提示装置から提示された刺激パターンは以下の 3 条件であった。

- (a) 定常的に 32℃を提示
- (b) 提示温度が 27～37℃を周期 4 秒の正弦波状に遷移
- (c) 提示温度が 37～47℃を周期 4 秒の正弦波状に遷移

37℃、27℃は皮膚表面の温度 32℃からそれぞれ 5℃の温度差にあり、どちらも痛みを生じる温度 42℃以下である。一方で、(c)では提示温度が 42℃を上回る時間が 5 割ある。(c)では痛みが生じるため、いわば危険回避のためにより大きく手を上に動かすことが予想された。

5.2.2.3 実験手続

被験者は全 3 条件それぞれに対し 1 試行ずつ、計 3 試行をランダムな順序で行った。被験者は右手掌部を装置の温度提示面においた状態を 30 秒間保った。この間の温度、圧力の遷移を記録した。刺激提示後、被験者は装置から右手を離し、温度提示中に右手に上下方向の感覚（上下の移動感や圧覚、力覚）が生じたか否か回答を行った。

5.2.2.4 実験結果

Fig. 2 に各条件において被験者が上下方向の感覚が生起したと回答した割合を示す。一定の温度を提示した(a)条件下では生起率は 0 であった。対して、(b)では 8 割強、(c)では 6 割弱の生起率であった。(b)条件下では感覚の生起を回答したすべての被験者が温度上昇時に上方向の感覚が、温度下降時には下方向の感覚が生起したことを報告した。また、(c)条件下で感覚の生起を回答した被験者のすべてが温度上昇時に上方向の感覚が生起したが、温度下降時には上下方向の感覚は生起しなかったことを報告した。

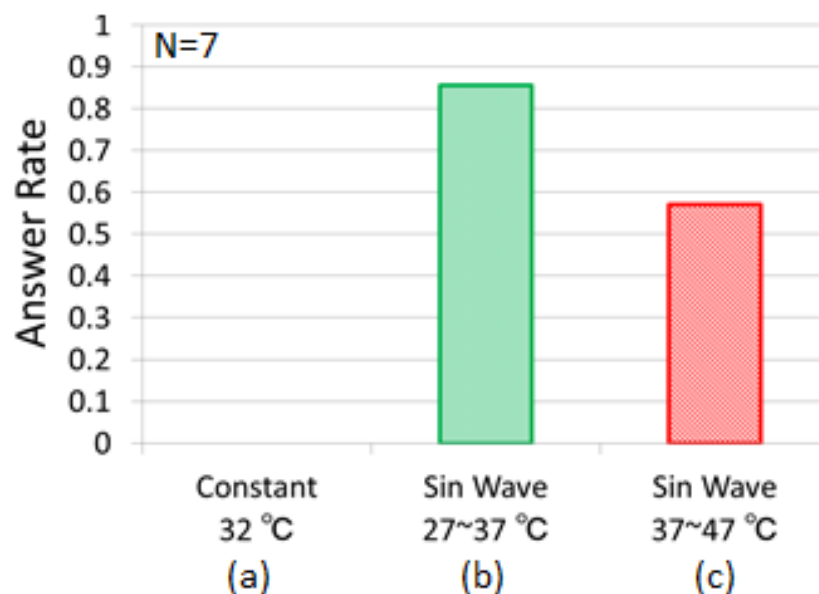


図 5-9 触力覚の生起率

把持力における実験と同様，温度変化の各周期における加重との相関を観察する．図 5-10 にある被験者 1 名の (b) 条件下における計測結果を，図 5-11 に温度変化の周期ごとの相関を示す．

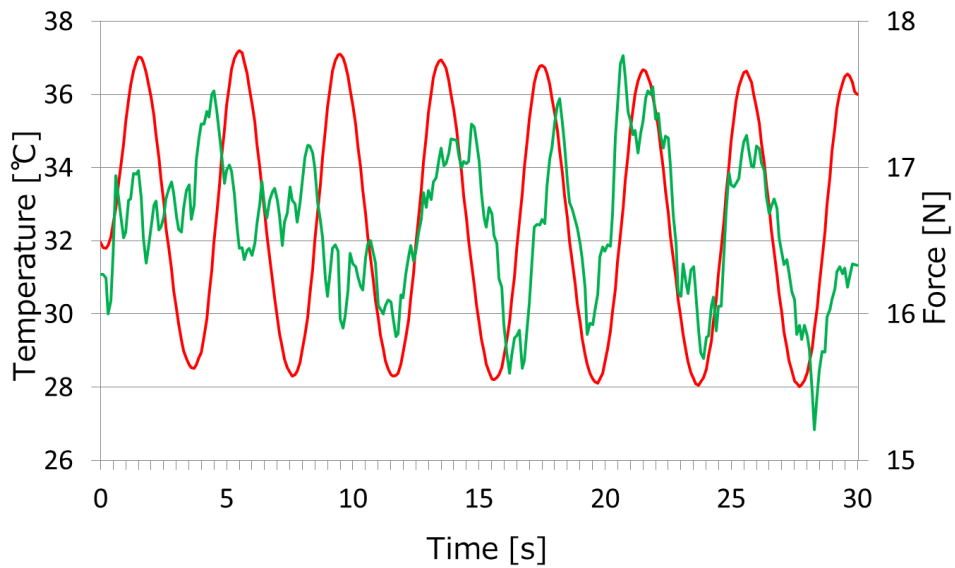


図 5-10 被験者 1 名の計測結果 (赤：温度 緑：加重)

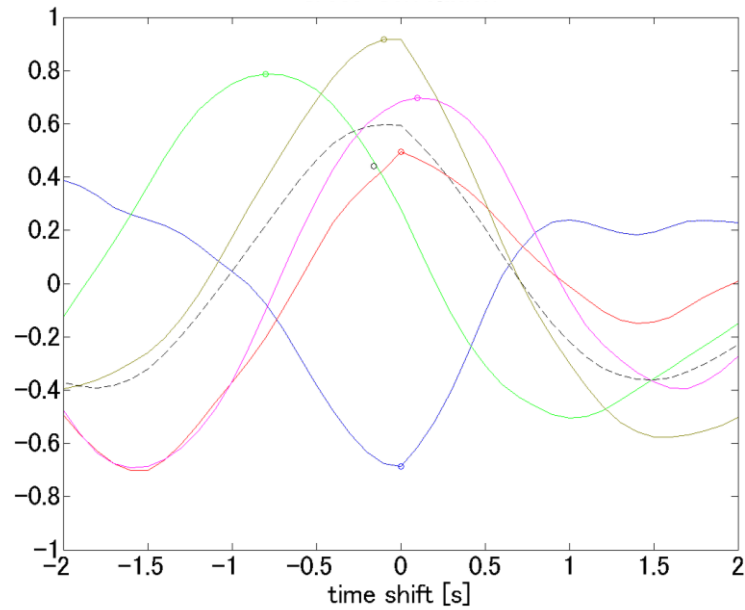


図 5-11 被験者 1 名の相関曲線 (点線は 5 周期の平均)

図 5-12 に全被験者の結果を条件ごとに示す．各周期計 35 の極値をプロットし，各試行の相関曲線をもその極値の正負によって分け，それぞれ被験者ごとの平均曲線，全被験者の平均曲線 (水色)，平均の極点をプロットした．(b) 条件では 35 の相関曲線のうち，正の極値を持つものは 20，負の極値を持つものは 15 であった．(c) 条件では 35 の相関曲線のうち，正の極値を持つものは 13，負の極値を持つものは 22 であった．

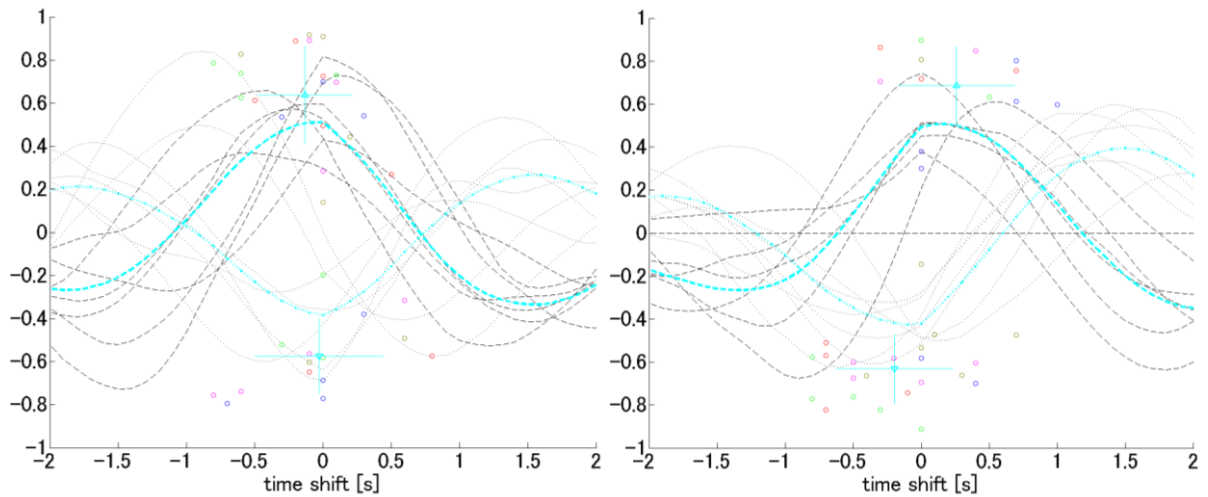


図 5-12 実験結果 (左 : (b) 27~37°C 右 : (c) 37~47°C)

5.2.2.5 考察

内観報告から温度上昇時に上方向の、温度下降時に下方向の感覚が生起していたことがわかるのに対し、提示温度と加重の相関は正負に大きく分かれた。このことから、温度提示により加重に影響のある可能性は否定できないが、加重変化が上下方向の触力覚に寄与する可能性は低いと考えられる。つまり手掌部においては純粹に感覚的な触錯覚が生起し、仮に温度変化による運動調節が行われているとしても錯覚現象が引き起こす感覚とは関係ないと考えることは可能である。

前節で扱った把持動作と本実験の手掌部を置いたままにするだけの動作を比較して大きく異なる点は、把持動作には、「把持した物体を落さない」という明確な目的がある点が挙げられる。つまり力の調整が行われなければ動作に失敗する可能性があるということである。一方で手掌部の場合には、どのような加重であろうと失敗することはなく、そのために温度に対する一定の運動調節が起きなかった可能性がある。

5.3 足裏への温度提示による重心遷移

手掌部における実験では把持動作のように合目的調整が必要とされる動作を用いなかったことが問題とされた。本節では把持動作のように合目的な調整が必要な動作として、立位に着目した。立位の場合には左右および前後を軸とした 2 次元方向について姿勢調節（重心の移動）を誤ると転倒する恐れがあり、把持力の場合と同様に温度変化による調節が行われるのではないかと考えた。実験では前後左右 2 次元方向への調整が行われることを意図した温度提示を行い、温度変化と重心の推移を観察した。

また足裏における温度提示により姿勢調節が行われる場合には温度知覚能力検査以外の応用が考えられた。足裏温度提示による姿勢制御によって、第 3 章に引用した重心動揺リアルタイムフィードバックシステム BASYS のような立位姿勢制御への応用を考えた。温度提示による姿勢制御であれば、機械的な構造をもたずに実装可能であり、装置の簡便化、ポータブル化が容易である。

5.3.1 左右方向の重心制御

重心動揺を起こすために、両足裏へ提示する温度変化に位相差を付ける方法が考えられる。掌の場合を鑑みれば位相差のある温度変化を提示した際、一方の足に上方向の感覚が生起する際に、もう一方の足に下方向の錯覚が生起することが予想され、左右の足場の間に段差がある、または足場が斜めに傾いているような感覚が生起される可能性がある（図 5-13）。この揺れが手掌部のように単に錯覚を生むのみに留まるか、実際の姿勢制御に影響するのか、検証実験を行った。

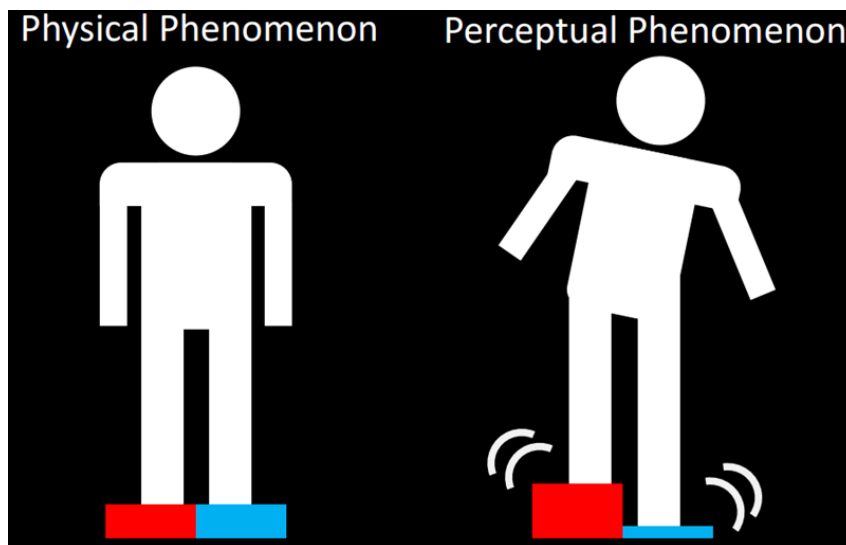


図 5-13 生起する感覚のイメージ

5.3.1.1 実験システム

実験に用いたシステムを図 5-14 に示す。システムは 2 台の温度提示装置と、重心動揺計（バランス Wii ボード）から構成される。2 台の提示装置は約 15cm の距離をおいて配置された。温度提示装置はペルチェ素子（TEC1-12730）およびヒートシンク、冷却ファン、フィルム状サーミスタから構成される。被験者の皮膚に接触するペルチェ素子表面の温度はサーミスタにより計測され、モータドライバによって PID 制御された。



図 5-14 実験装置

5.3.1.2 実験条件

被験者は 13 名（男性 11 名，女性 2 名）であった。実験は約 28℃の室内で行われた。温度提示装置から提示された刺激パターンは以下の 2 条件であった。

(a) 定常的に 32℃を提示

(b) 提示温度が 27~37℃を周期 5 秒の正弦波状に遷移

37℃，27℃は皮膚表面の温度 32℃からそれぞれ 5℃の温度差にあり，どちらも痛みを生じる温度 42℃以下である。条件(b)では左右の装置間で提示温度の変化パターンは半周期の位相差をもって提示され，一方の装置の提示温度が上昇している際には，もう一方の装置の提示温度は下降する。

5.3.1.3 実験手続き

各被験者に対して 2 条件それぞれに 1 試行ずつ行った。被験者は裸足で左右それぞれの温度提示装置の上に爪先立ちで乗り，閉眼状態で両腕を横に垂らし，脱力したまま 30 秒間立位を保った。被験者は実験終了後，体の揺れ（重心の動揺）および足裏に下方向の感覚（上下の移動感や圧覚，力覚）を知覚したかどうか回答した。

5.3.1.4 実験結果

総被験者数の 77%にあたる 10 名の被験者が温度変化にあわせた重心の傾きと足裏での上下方向の触力覚をともに知覚したことを報告した。図 5-15 にある 1 名の，重心の傾きを報告した被験者の左足裏に提示された刺激の温度と，横方向の重心位置の推移を示す。

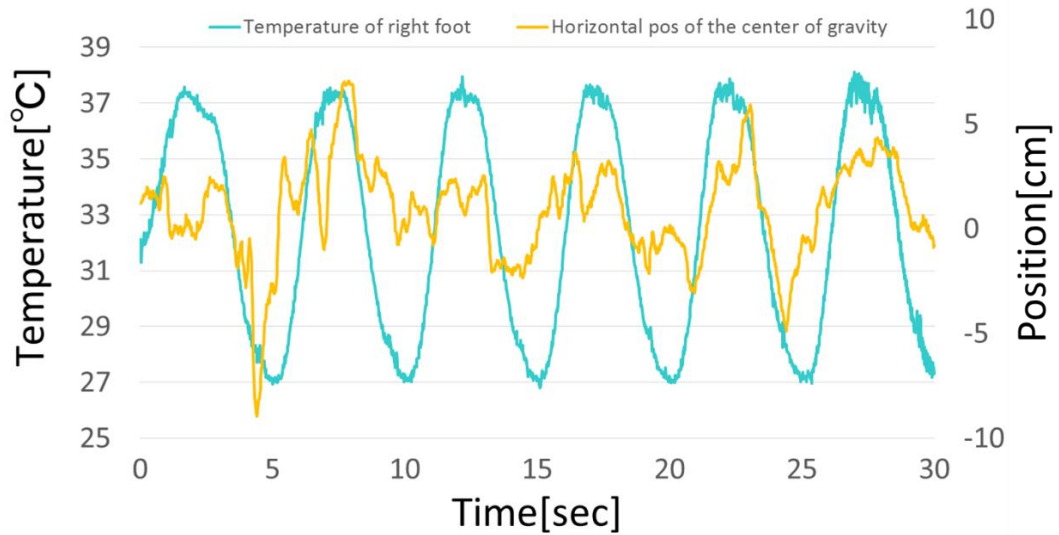


図 5-15 被験者 1 名の記録波形

左足に提示した刺激の温度，重心動揺を温度変化の 1~5 周期に対して一周ごとに相互相関関数をかけた結果を図 5-16 に示す。

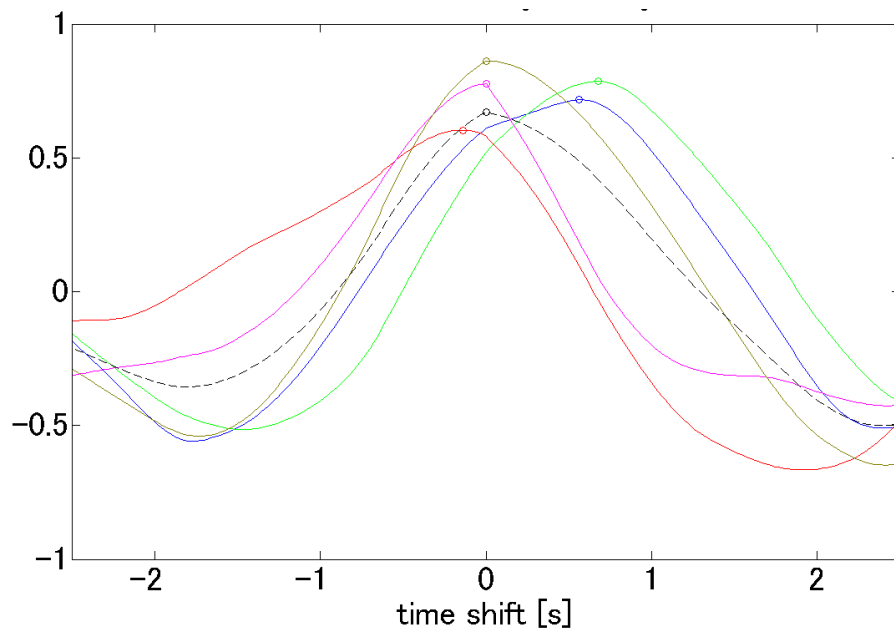


図 5-16 各周期の相関曲線

極値の相関が正であることから，この被験者の場合左足の提示温度が上昇した際に重心が右に傾いたことを表している。つまり，この被験者に場合には体の傾きの感覚が生じたのみならず，実際に体が温度変化に合わせて傾いていたことがわかる。ただし，このような傾向は被験者全体から見ると少数派（3名）であった。

図 5-17 に，被験者全体の相互相関の平均を示す。グラフの実線は被験者全員の平均を，破線は各被験者の平均を示す。黒線は(b)条件下での提示温度，重心の相関を，緑線は温度変化のない(a)条件時の重心と，同一被験者の(b)条件での温度変化との相関を表す。グラフから，黒線で表され

た(b)条件の温度変化と重心の相関は、本来関係ないはずの2データの比較によって得られた緑線と相関値はほぼ同じということがわかる。このことから、温度変化と重心の動揺の間の関連は小さいと示唆される。

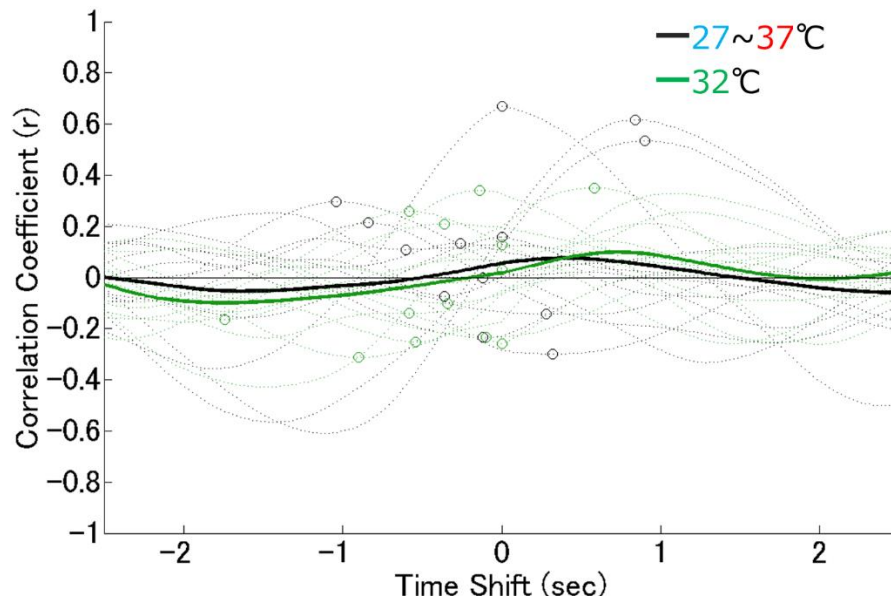


図 5-17 被験者全体の相関曲線

5.3.1.5 考察

以上の結果からは、まず揺れ、姿勢の傾きが実際の重心動揺とは関係なく知覚され、それに対する行動として体を揺らす被験者と揺らさない被験者がいたと推測される。つまり、温度変化による触錯、移動感覚は、必ずしも実際の姿勢変化を誘発するものではないことが示唆された。ただし本節の実験の場合、足を開いた状態での左右方向という、姿勢が安定した条件であった。このため、仮に足裏の温度変化提示が運動調節効果を持つとしても、その影響を受けにくい姿勢であり、実験結果に現れなかった可能性は否定できない。

5.3.2 前後方向の重心制御

前節の実験では重心移動を計測するにあたり、安定した立位姿勢を用いたことが問題になった。一方で前後については比較的安定することが難しく、温度提示の姿勢への影響を検討するにはより望ましいと考えられる。本節では前後方向における実験を行う。前節と同様の機構を用いた装置により、足裏のつま先部と踵部に提示する温度の位相を変化する。前後の提示に位相差のある場合、前後方向の揺れ感覚が生起することが予想されるが、このとき重心も同様に移動していた場合、温度変化により重心を制御可能であるといえる (図 5-18)。

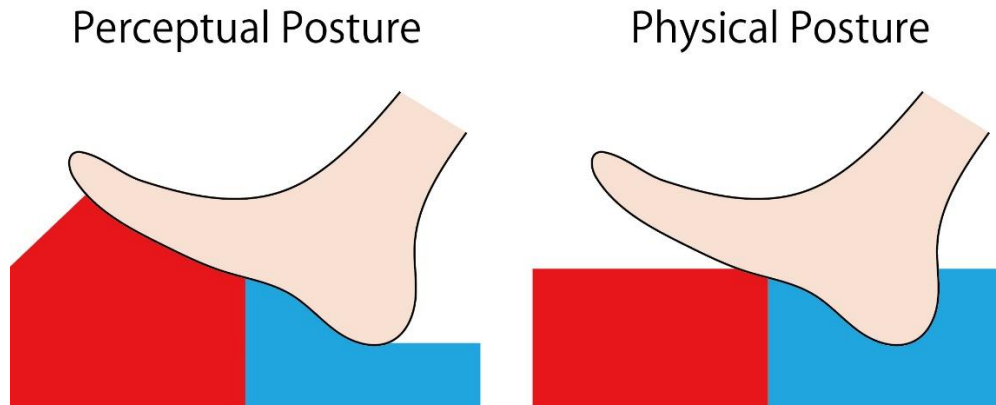


図 5-18 想定される感覚と姿勢

5.3.2.1 実験システム

図 5-19 に実験システムを示す. 前実験と同様の装置から構成されるが, 温度提示装置の配置を改めた.

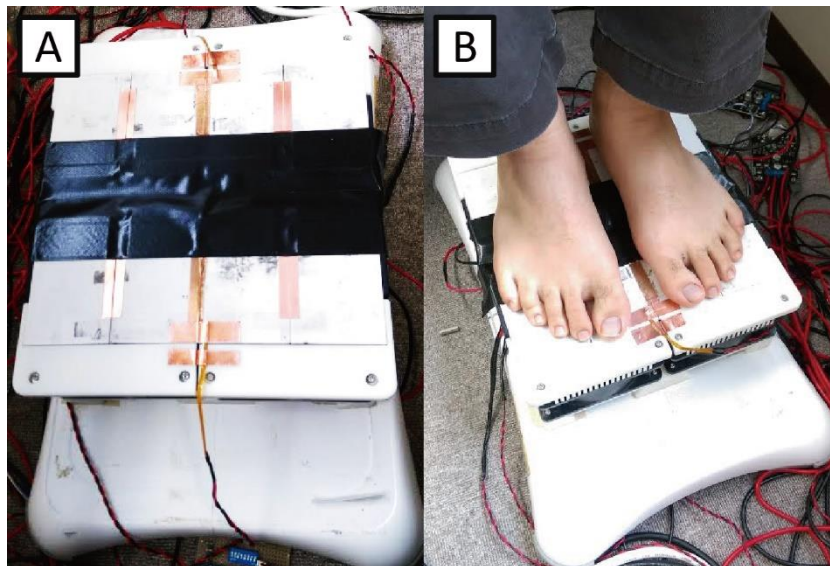


図 5-19 左: 実験装置 右: 実験中の足の位置

5.3.2.2 実験条件

被験者は 31 名 (男性 25 名, 女性 6 名, 年齢 21~45 歳) であった. このうち 18 名の被験者は裸足で実験に参加したが, 女性被験者 2 名はストッキングを着用した状態であった. 温度提示装置は (a)~(e) の 5 条件であった. (a)~(d) では提示温度が 28~36°C の間を周期 5 秒 (0.2Hz) で動的に変化する. これら条件間では提示温度の位相や提示部位が異なる.

- (a) 前後同位相
- (b) 前後逆位相.
- (c) 前 (つま先) のみ提示
- (d) 後 (かかと) のみ提示

(e) 定常的に 32°Cを提示

前実験と同様に、(b)では前後の温度提示が半周期の位相差をもって提示され、一方の装置の提示温度が上昇している際には、もう一方の装置の提示温度は下降する。28°C、36°Cは皮膚表面の温度 32°Cからそれぞれ 4°Cの温度差にあり、どちらも痛みを生じる温度 42°C以下である。

5.3.2.3 実験手順

すべての被験者は 5 条件それぞれに対し 1 試行ずつ実験をランダムな順序で行った。被験者は閉眼状態で両腕を横に垂らし、両足間の距離が極力小さくなるように直立し、脱力したまま 30 秒間立位を保った (図 5-19 左)。この間の提示温度、重心動揺を記録した。被験者は 1 試行終えるごとに体の揺れ (重心の動揺) および足裏に下方向の感覚 (上下の移動感や圧覚、力覚) を知覚したかどうか回答した。試行間には最低で 30 秒の間隔をおいた。

5.3.2.4 実験結果

被験者の回答率を図 5-20 に示す。提示温度が周期的に変化した条件(a)~(d) では触覚、傾き両項目ともに 5 割前後の回答率であった。これまでの実験の結果から、触錯の生じた被験者のうち数割に揺れ感覚が生起するものと予想していたが、図 5-20 に示すように、両感覚をともに報告した被験者は触錯報告の半分程度であるが、揺れ感覚の報告割合は触錯と同程度であった。つまり、予想に反し、温度提示により触錯を生じず、揺れ感覚のみを知覚するケースが見られた。

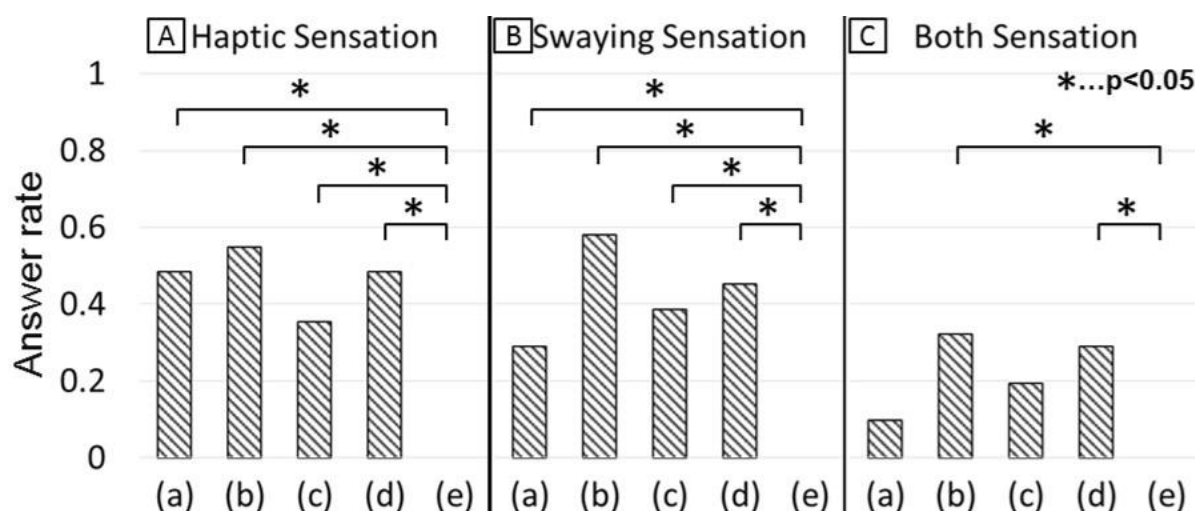


図 5-20 感覚の生起率 (A: 触力覚 B: 揺れ感覚 C: 両感覚ともに知覚した割合)

これまでの実験と同様、温度変化と重心移動の相互相関を計算した。例として図 5-21 左にある 1 名の被験者のかかるとに提示された刺激の温度と、横方向の重心位置の推移を示し、図 5-21 右に各周期の相関曲線を示す。この被験者の場合、すべての周期で負の相関を示しており、温度が上昇した部分の加重が大きくなるように重心を移動する傾向が見て取れる。

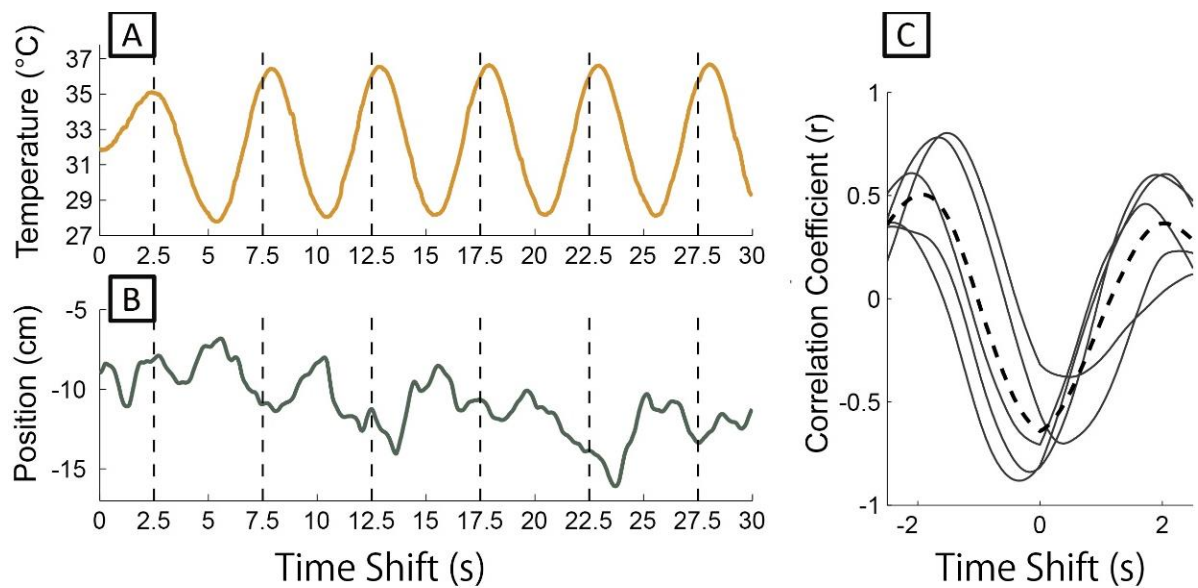


図 5-21 被験者 1 名の計測結果 (A : 提示温度 B : 重心移動) と各周期の相関曲線 (C)

なお、相互相関を行うにあたってはかかとの温度を用い、重心位置は前方向を正とした。つま先のみ提示温度が変化する場合(c)では、ほかの 4 条件との比較のため正負を反転している。つまり、以下のグラフに示すどの条件でも、正の相関は温度が上昇した部位と反対方向に身体が傾いたことを表す。

全被験者における提示温度の変化と重心の前後移動の相互相関を図 5-22 に示す。いずれの条件においても相関値は低い。5 条件間に検定 (Fisher's LSD, 閾値 $p < 0.05$) を行った結果、有意差はみられなかった。

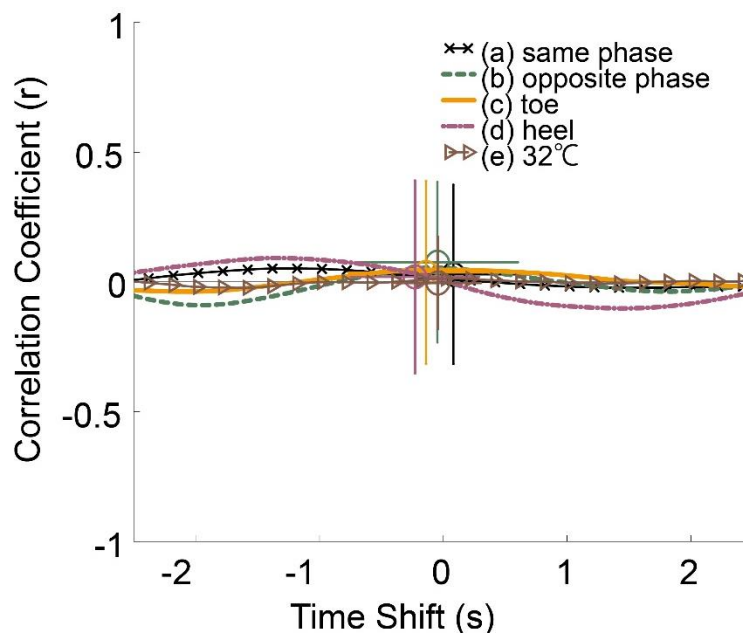


図 5-22 全被験者の平均相関曲線

予想に反して触力覚、揺れ感覚の回答者に共通しない被験者が多くいたため、この2感覚の群間には異なる運動調節が行われているのではないかと考え、それぞれの感覚の群について相互相関を用いた。触力覚を回答した試行における相互相関を図 5-23 左に、揺れ感覚を回答した試行における相互相関を図 5-23 右に示す。「触力覚」群において各条件の該当被験者数は、(a) 15, (b) 19, (c) 11, (d) 14 であった。「揺れ感覚」群において各条件の該当被験者数は、(a) 9, (b) 18, (c) 12, (d) 14 であった。被験者全員を対象とした場合に比して、曲線がやや大きな極値をもち、正の相関をもつもの、つまり高い温度を避けるように重心を移動する傾向が多いように思われる。それぞれの被験者群について4条件間に検定 (Fisher's LSD, 閾値 $p < 0.05$) を行った結果、有意差はみられなかった。

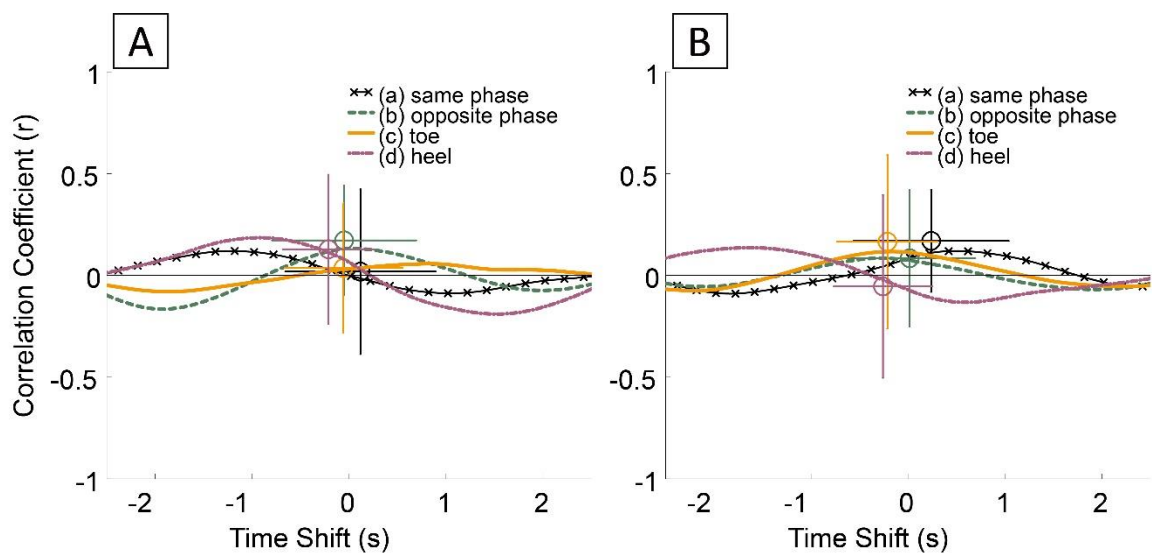


図 5-23 左：触力覚回答試行の平均相関曲線 右：揺れ感覚回答試行の平均相関曲線

先の図 5-23 では触力覚、揺れ感覚ともに回答した試行を含んでいたため、それぞれの特徴が減殺された可能性がある。図 5-24 では触力覚のみ回答した試行 (左) と揺れ感覚のみ回答した試行 (右) についての相互相関曲線を示した。「触力覚」群において各条件の該当被験者数は、(a) 12, (b) 7, (c) 5, (d) 6 であった。「揺れ感覚」群において各条件の該当被験者数は、(a) 6, (b) 8, (c) 6, (d) 5 であった。やはり正の相関をもつもの、つまり高い温度を避けるように重心を移動する傾向を示す曲線が多いが、「揺れ感覚のみ」群では踵のみ温度変化を提示した条件(d)で負の相関を示し、前後に位相差のある温度変化を提示した条件(b)では相関が非常に小さいことがわかる。これは「揺れ感覚のみ」群ではつま先、かかとの刺激に対する反応が正反対であることを示唆している。つま先のみ温度提示を提示した条件(c)の場合、高温を避けるように重心が移動するのに対し、踵のみ刺激を提示した条件(d)では温度が上昇した箇所に体重をかけたことがわかる。条件(a), (b)にもこの性質はあてはまる。条件(a)では前後同位相のために重心が移動し、条件(b)では逆位相のため相殺され、重心が動かないとみることができる。それぞれの被験者群について4条件間に検定 (Fisher's LSD, 閾値 $p < 0.05$) を行った結果、「揺れ感覚のみ」群に有意差がみられた。相関値について(c)-(d)間, 時間ずれについて(b)-(c)間, (b)-(d)間である。

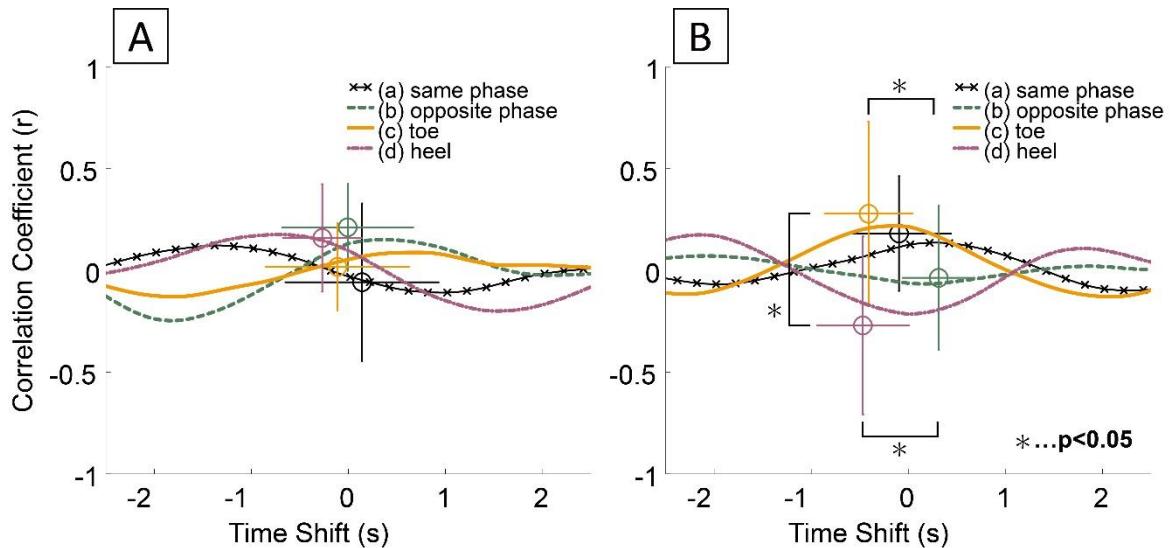


図 5-24 左：触力覚のみ回答試行の平均相関曲線 右：揺れ感覚のみ回答試行の平均相関曲線

5.3.2.5 考察

実験から示唆された被験者の感覚によって運動が異なるという傾向があるとするならば、姿勢制御方法への応用を考えた際には障害となりうる。特に不特定多数を相手に同一の制御を行うことは非常に難しい。しかし、はじめに個別の被験者が温度変化に対しどちらの反応をするのか観察したのちであれば、姿勢制御への適用は十分に可能と考えられる。また、足裏の温度提示に対して重心の移動がみられるという結果は、5.1 に述べた把持動作の場合のように、足裏の温度知覚能力の診断手法として応用可能であることも示唆している。

一方で今回の実験には姿勢の統制の点で問題があった。内観報告から、揺れの錯覚を回答した被験者は「揺れを補正して姿勢が垂直に保たれるよう努め」た場合と「揺れを補正しようとしなない」場合の 2 通りの対応をしていたことが確認された。以下ではこの点を「揺れを補正しようとしなない」対応に統一した実験を行う。

5.3.3 前後方向の重心制御（姿勢の統制）

前節の実験では揺れの感覚に対する被験者の対応が統一されておらず、問題であった。また前節の実験では「つま先に提示される温度が感じにくい」といった報告が複数の被験者から得られた。本節ではこれらの点を改善し、再度の実験を行う

5.3.3.1 実験システム

引き続き図 5-19 左のシステムを用いる。被験者から報告されたつま先温度の感じにくさは、足裏の面積に対して温度提示面積が小さいことが原因と考えた。接触面積が大きくなるよう、図 5-25 のように装置上に乗る際の変更した。

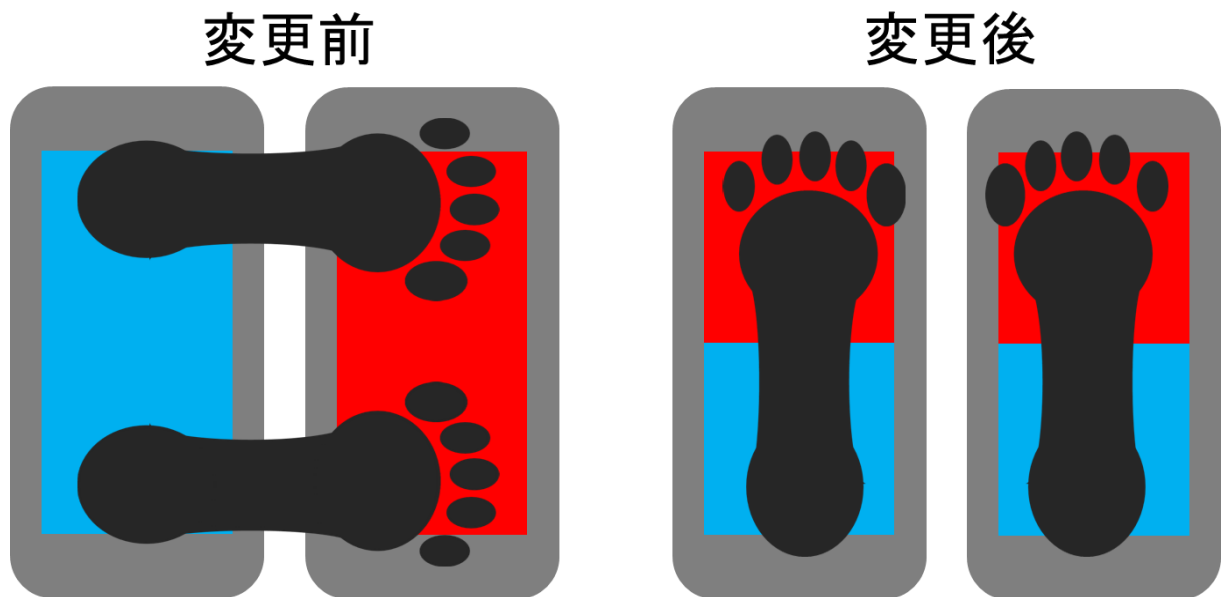


図 5-25 乗り方と温度提示面積

5.3.3.2 実験条件

被験者は 8 名（すべて男性，年齢 20～30 代）であった．以下 5.3.2.2 に準ずる．

5.3.3.3 実験手順

すべての被験者は 5 条件それぞれに対し 1 試行ずつ実験をランダムな順序で行った．被験者は閉眼状態で両腕を横に垂らし，揺れの感覚が生じた際にはそれを補正しないよう教示を受けた．30 秒間の提示温度，重心動揺を記録した．被験者は 1 試行終わるごとに体の揺れ（重心の動揺）および足裏に下方向の感覚（上下の移動感や圧覚，力覚）を知覚したかどうか回答した．試行間には最低で 30 秒の間隔をおいた．

5.3.3.4 実験結果

全被験者における提示温度の変化と重心の前後移動の相互相関を図 5-26 に示す．条件(b)(e)では正の相関つまり高温を避けるように重心を移動する傾向を示し，(a)(c)では反対に負の相関がみられた．5 条件間に検定（，閾値 $p < 0.05$ ）を行った結果，(a)(d)間に有意差がみられた．

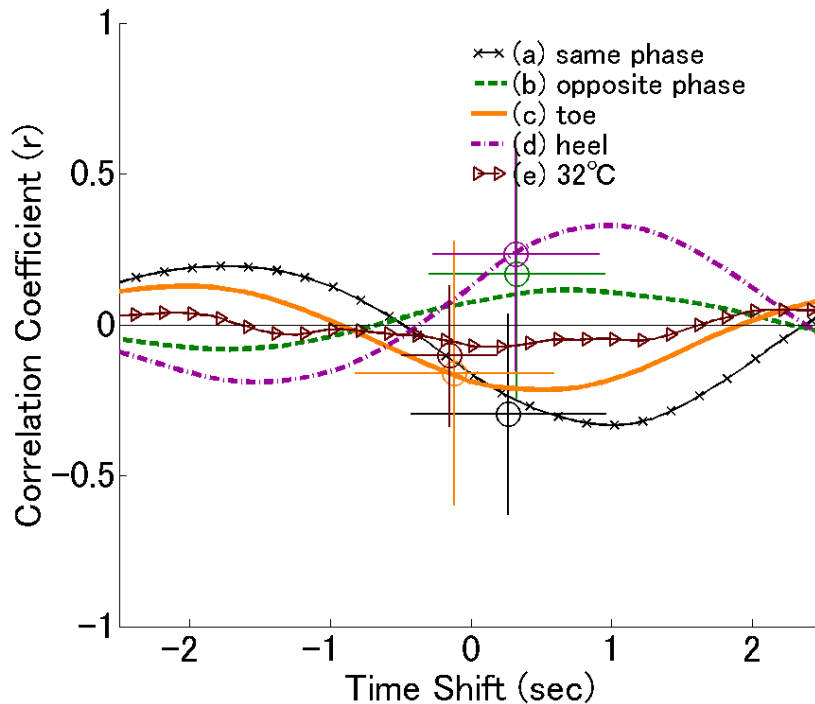


図 5-26 全被験者の平均相関曲線

5.3.3.5 考察

実験から得られた相関曲線は、前実験における「触力覚のみ回答試行」「揺れ感覚のみ回答試行」のいずれとも異なる傾向を示した。しいて言うならば、「揺れ感覚のみ回答試行」と反対の傾向といえる。この前実験の結果との矛盾の理由として、自然な人間の重心動揺の固有周期を考慮していなかったことが挙げられる。人間の重心動揺の固有周期は 0.3-0.6Hz (周期約 1.6-3.3 秒) ともいわれ、実験に用いた 0.2Hz との差は小さい[68]。このため、温度変化によって重心が移動していたとしても、それは人間の自然な重心動揺のうちに隠れてしまい、計測できなかった可能性がある。

5.3.4 長周期の温度変化と重心の推移

前回までの実験で用いた周期 5 秒の温度提示は、人間の重心動揺の固有周期の影響を大きく受ける恐れがあった。そこで今回はより長い周期の温度変化を用い、温度提示の姿勢への影響を検討する。

5.3.4.1 実験システム

5.3.3.1 に準ずる。

5.3.4.2 実験条件

被験者は 11 名 (すべて男性, 年齢 20-30 代) であった。提示温度条件は (a), (b) の 2 条件である。いずれも提示温度が 27~37°C の間を周期 20 秒 (0.05Hz) の矩形波状に変化するが、(a) では前後の温度提示が同位相であるのに対し、(b) では逆位相である。

5.3.4.3 実験手順

すべての被験者は2条件それぞれに対し1試行ずつ実験をランダムな順序で行った。被験者は閉眼状態で両腕を横に垂らし、揺れの感覚が生じた際にはそれを補正しないよう教示を受けた。120秒間の温度提示を行い、提示温度と重心動揺を記録した。試行間には最低で30秒の間隔をおいた。

5.3.4.4 実験結果

全被験者における提示温度の変化と重心の前後移動の相互相関を図5-27に示す。位相差のある条件ではやや負の相関がみられる。2条件間にt検定(閾値 $p < 0.05$)を行った結果、有意差はみられなかった。

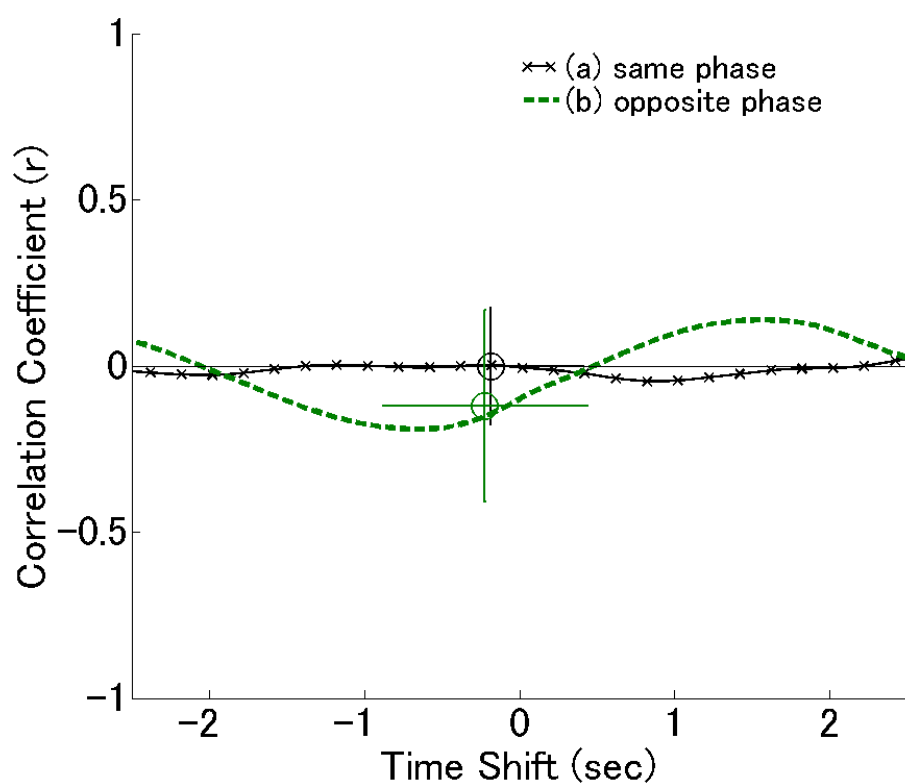


図 5-27 全被験者の平均相関曲線

つま先に高温が提示されている際と低温が提示されている際の重心平均の差を図5-28に示す。前後の温度提示に位相差のない条件(a)では重心の差は小さく、前後位相差のある(b)ではやや大きく、正の値を示した。2条件間にt検定(閾値 $p < 0.05$)を行った結果、有意差 ($p=0.0101$) が確認された。

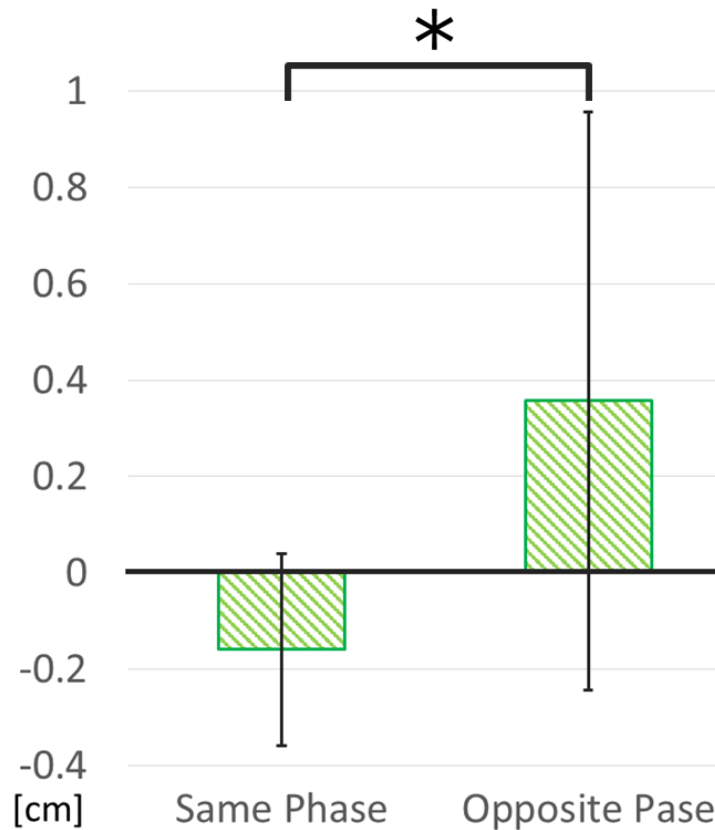


図 5-28 提示温度による重心の差

5.3.4.5 考察

前後の提示温度に位相差のある条件で、わずかではあるが提示温度による姿勢の偏りがあるように見受けられた。これが温度による姿勢制御の結果である可能性は否定できないが、現時点では不明確である。直立姿勢は合目的調整が必要とはいえ、把持力が無意識に極力小さく調節されるのに比較して、とり得る姿勢の選択肢が多く、一定の傾向を見いだせなかった可能性がある。

5.4 まとめ

本章では直接的に温度感覚と把持力の関係性を検討するべく、把持された物体の表面温度を周期的に変化させた際の把持力の変化を観察した。温度の変化に伴う把持力の推移を記録し、温度変化と把持力の関係性を相互相関関数により検討した結果、温度変化に対し把持力は負の相関をもつことが確認された。温度感覚の脱出した CIP 患者群では相関がみられないことから、温度感覚の把持力調節への寄与が示された。温度感覚の有無や鈍麻の程度の検査への応用の可能性が示された。

把持力についてみられた運動調節が他の動作にみられるかを検証するにあたり、まず手掌部を平面上に置いたままの状態、接地面の温度を変化させる実験を行った。手掌部における実験では温度変化時に触力覚の生起が確認されたが、温度と加重の推移に関連はみられなかった。これは把持動作には、「把持した物体を落さない」という明確な目的があるのに対し、手掌部の実験の

場合ただ手を置いているだけでよいため明確な目的がなく加重調節の必要がなかったことに関係すると考えた。

そこで次に立位という明確な姿勢調整の必要性を持つ条件を用いた。足裏に提示する温度変化の位相を足の左右、または前後で差をつけた実験を行い、温度変化に合わせて体の揺れる感覚が生起することを確認した。温度変化と重心の推移の関係性は不明確であったが、人間が直立姿勢をとる際の自然な揺れの周期が実験で用いてきた温度変化の周期に近いことから、より長い周期の矩形波状の温度変化を提示する実験を行った。実験の結果、わずかではあるが、温度提示によって重心が傾くことが示唆された。

本章では温度提示と運動調整の関係性を検証してきたが、その過程でしばしば温度変化に伴う触力覚の生起が確認された。運動調整、触力覚いずれも温度提示が行われることで生起している。ではこの二者、運動調整と触力覚の間には関係性はあるだろうか。一見、把持動作の場合には温度提示により運動調整のみが、手掌部や立位の場合には触力覚のみが生起したようであり、両者は生起の原因となる刺激が同じという以外に関係はないようである。しかし把持実験でも触力覚が生起した可能性について否定できず、仮に生起したとすると、触力覚の生起が運動調節の原因となったと解釈することができる。しかし手掌部や立位の実験では把持動作ほどに運動調節の有無が動作の成功につながらないものであったために、温度変化と明確な相関をもつ運動調節が行われなかったと解釈できる。

第6章

結論

6.1 まとめ

本論文はこれまで一般には注目されてこなかったが近年基礎研究により解明されてきた温度提示がもたらす純粋な知覚としての温度感覚以外の身体作用を医療福祉分野において応用することを目的とした。本論文ではこうした温度提示の身体への作用を「純粋に感覚的なもの」、「身体運動に影響を与えるもの」の2つに分類した。前者は温度提示によって温度感覚以外の感覚を生じるものを指し、後者は温度提示により身体運動が生じるものを指す。

前者に関しては温度錯覚 TGI によって生じる痛覚を用いた皮膚を傷つけない鎮痒装置を試作開発し、その効果を検証した。ほかに TGI を提示する方法として錯覚現象 TR の利用を考え、実験より検証した。加えて先行研究では身体の限定された範囲でしか TR の実験が行われていなかった。全身への適用可能性を検証する実験を行った。

また後者に関しては、温度感覚が把持力の調節に関与するという知見から温度感覚検査への応用可能性が考えられた。温度変化と把持力の関係性を検証したほか掌、足裏における温度変化の影響にも注目し、姿勢制御への応用可能性を検討した。

以下に各章で得られた結果についてまとめる。

6.1.1 温度提示を用いた鎮痒手法（第4章）

第4章では副作用のない鎮痒手法について検討してきた。痛みの提示により痒みが抑制されるという知見に基づき、温冷刺激の同時提示により皮膚を損壊することなく痛みを生起する錯覚現象 Thermal grill illusion（略称 TGI）に着目した。痛みによる鎮痒は一時的なものであり、頻繁に提示する必要があるという観点から、デバイスのポータブル化のために、時空間的に交互に温冷刺激を提示することにより TGI を生起するという手法を提案した。この手法に基づき患部に温冷刺激を交互に提示するローラー型ポータブル鎮痒デバイスの試作、評価を行った。

第1試作デバイスを用いて被験者実験を行ったところ、一定の鎮痒効果が見られた。しかし、第1試作デバイスは設計に問題点が多く見られ、また実験系にも問題があった。そこで、これら問題点の改善により、より大きな鎮痒効果が得られることを見込んで、第2試作デバイスを作成した。第2試作デバイスを用いて2度の被験者実験を行った結果、提案手法である交互の温冷刺激提示は冷刺激のみを提示する場合に比べ高い鎮痒効果を有することを確認した。いまだ最適化されていない部分があるものの、これは安全な鎮痒手法として利用可能なレベルにあると考えられる。

TGI の提示方法として、上記の温冷刺激の時空間的交互提示のほか、温度錯覚 Thermal referral(略称 TR)の利用を提案した。皮膚上の二点において温度提示と触刺激を同時に提示すると、触刺激提示部位にも温度感覚が生じる現象である。TR を利用した TGI 提示が可能かどうか検証実験を行った。その結果、TR を用いて TGI の提示が可能であることを確認したのみならず、これまで明らかでなかった TR の性質についての知見を得た。また TR は先行研究において手指や前腕を用いたものがほとんどであり、全身への適用可能性が未知であった。全身での性質を検証するため、上半身の 4 カ所を用いて実験を行ったところ、TR が上腕や胸部についても生起すること、触刺激、温度提示位置が手首や正中線を跨いだ際には TR が生起しないことが確認された。TR を用いた TGI では、患部に接触しない方法での提示が可能であると予測した。本論文ではこれに先立って、物理的な接触がある場合の TR による TGI 提示が可能であることを示した。

6.1.2 温度感覚提示による運動調節 (第 5 章)

温度感覚が把持力調節に関係することが先行研究によって示唆されていたが、どのような温度によってどのように把持力が推移するのかについては未知であった。温度提示が人間の運動調節に対し影響を与えるのなら、これまでのような主観的な温度知覚検査に代わり、客観的な指標を用いた温度知覚検査に応用可能となる。そこで第 5 章では直接的に温度感覚と把持力の関係性を検討するべく、把持された物体の表面温度を周期的に変化させた際の把持力の変化を観察した。把持力の調整に温度感覚が関わっているならば、温度の変化にあわせて把持力も周期的に変化する可能性があるためである。物体の表面温度を動的に変化させることが可能なキューブ型のマニピュランダム装置を開発し、被験者が拇指、示指で装置を把持した際、表面温度の変化(痛覚を生じない範囲)に伴う把持力の推移を記録し、温度変化と把持力の関係性を相互相関関数により検討した。また、温度感覚の寄与を明確に検証するための補助として、温度感覚の脱出する疾病 CIP の患者の協力を得て実験を行った。実験の結果、温度感覚の正常な健常群において温度変化と把持力推移に関係が見られた一方、温度感覚の脱出した CIP 群にはみられないことから、温度感覚の把持力調節への寄与が示唆された。また、温度変化幅が大きい場合に相関値も大きくなることも観察された。これは知覚する温度感覚の強度を計測できる可能性を示す。つまり、温度感覚の有無の検査だけではなく、温度感覚の鈍麻の程度の計測への応用の可能性を示すものである。鈍麻程度の診断についてはいまだ示唆の段階であるが、温度知覚能力の有無の検査については現在の段階でも十分に行えるレベルにあると考えられる。

次に把持動作についてみられた運動調節が姿勢や状況に依存しない現象であるのか検証を行った。まず手掌部を平面上に置いたままの状態、接地面の温度を変化させる実験を行った。手掌部における実験では温度変化時に触力覚の生起が確認されたが、温度と加重の推移に関連はみられなかった。これは把持動作には、「把持した物体を落さない」という明確な目的があるのに対し、手掌部の実験の場合ただ手を置いているだけでよいため明確な目的がなく加重調節の必要がなかったことに関係すると考えた。そこで次に立位という明確な姿勢調整の必要性を持つ条件を用いた。足裏に提示する温度変化の位相を足の左右、または前後で差をつけた実験を行い、温度変化に合わせて体の揺れる感覚が生起することを確認した。温度変化と重心の推移の関係は不明確で

あった。しかし人間が立位姿勢をとるときの自然な重心動揺が実験条件に近いことから、周期をより大きく変更した実験を行った。その結果、温度変化時にわずかではあるが重心の偏りが生じることが示唆された。

6.2 今後の展望

6.2.1 温度提示を用いた鎮痒手法

第4章では2度の試作及び鎮痒実験を行ったが、TGIを提示する上で必要と考えられるパラメータのすべてを最適化してはいない。特に、温冷刺激の時空間的交互提示によるTGIの生起にもっとも重要なパラメータであるローラーの温冷刺激間のインターバルについての検討が必要である。一般的な(時間的ずれのない)TGIでは通常、温刺激と冷刺激は約1cm毎に配置されるが、試作デバイスにおいては温刺激と冷刺激の間隔が3cm超と大きかった。つまり、時間的ずれのない状態でもTGIが生起しにくい条件であった。今後はTGI生起率の向上を図るべくローラー表面における温冷刺激の配置やローラー径の最適化を行う必要がある。また、本論文ではTRを利用してTGIの提示が可能であることを被験者実験によって確認した。今後はTRを用いて非接触にTGIを生起するデバイスの設計や鎮痒効果の検証を行う必要がある。

本論文では痛覚の生起にあたって温度錯覚TGIに着目したが、TGIは痛覚を副作用なく生起させる一手法にすぎない。温度を用いない同様の痛覚生起手法に電気刺激がある。電気刺激は筋駆動によるリハビリテーションや皮膚刺激による触覚提示等、運動・感覚提示の多くの場面で利用されている。通常の電気刺激では痛覚は忌避すべきものであるが、逆に痛覚提示を目的とした場合には比較的容易に発生させることができる。電気刺激において考える副作用はジュール熱によって生じる局所的な火傷による損傷であるが、これを生じる条件は先行研究にて明らかになっており、皮膚への損傷を生じること無く痛みを提示することは十分可能であると考えられる[32]。

6.2.2 温度提示と温度知覚能力の検査

第5章における実験で健常群において温度変化と把持力推移に関係が見られたこと、温度感覚の脱出したCIP群に相関がみられないことから、温度感覚は把持力調節への寄与が示唆された。このことから温度感覚の有無を診断する一手段としての応用可能性は高いと考えられる。また、同一健常者群の場合でも、提示した温度変化の幅が大きい場合に相関値が優位に大きくなったことは注目に値する。これは知覚する温度感覚の強度を計測できる可能性を示す。つまり、温度感覚の有無の検査だけではなく、温度感覚の鈍麻の程度の診断への応用可能性をも示すものである。また足裏における実験の結果からは、足裏に対する温度変化と重心の推移に相関があることが示唆された。このことから、足裏においても同様の温度知覚能力診断への応用の可能性がある。

本論文では手指の温度と把持力調整、足裏の温度と重心の調整の関係を示したが、それらは十分に診断へ応用し得るものと考えられる。今後、温度提示による運動の調節が身体のどの位置、どのような運動に対して起きるものか検討されるべきである。局所的な温度感覚の脱出を診断する場合、全身における検査が可能であることが望ましく、その動作についても検討が必要である。

6.2.3 温度提示と姿勢の制御

20 秒という長い周期での温度変化を与えた場合には、温度によってわずかに重心の偏りが生じることが示唆された。周期 5 秒の条件で行った複数の実験においても足裏の温度変化と重心の推移に相関があることが示唆されたが、示された傾向は実験ごとに異なり、姿勢制御方法への応用を考えた際、特に不特定多数を相手に同一の制御を行うことは難しいといえる。ただし、はじめに個別の被験者が温度変化に対しどのような反応をするのか観察したのちであれば、姿勢制御への適用可能性は否定できない。第 3 章で紹介した **BASYS** のような、重心動揺の増幅・減弱システムを簡便に作成することも可能性がある。また仮に足裏の温度変化による重心移動が生じない場合でも **BASYS** タイプのリハビリシステム構築の可能性はある。この場合は温度提示によって身体が揺れる感覚のみを提示できるということであり、揺れ感覚が同様のリハビリ効果をもつ可能性がある。

謝辞

本論文を書き上げるにあたり多くの方々ご支援をいただきました。幼少の頃より博士というものに漠然とした憧れを抱いて参りましたが、それがこうして現実に博士号を手にするまでに至ったのは、決して私個人の力だけではあり得ません。

まず、学部4年から計6年間の長きに渡りご指導を賜りました梶本裕之准教授に心より感謝の意を表します。梶本先生からは直接のご指導のほか、研究に取り組む際の姿勢、発想方法など、本当に多くのことを学ばせていただきました。学部4年生の頃、右も左もわからなかった私がここまでたどり着けたのは何をおいても梶本先生のおかげです。重ねて御礼申し上げます。

電気通信大学 兼子正勝教授、坂本真樹教授、板倉直明教授、広田光一教授、児玉幸子准教授には、本論文のご精読および審査を通じて多くの貴重な意見をいただきました。深く感謝いたします。

4.2 節におけるローラー型鎮痒デバイスの評価にあたっては資生堂リサーチセンター 森雄一郎氏、齋藤直輝氏から多くのご協力をいただきました。心より謝意を表します。

5.1 節における把持動作の研究に関しては、国立リハビリテーションセンター研究所神経筋機能障害研究室への短期インターン時に開始した研究が基となっています。同研究室 河島則天室長にはインターン中にご指導を賜り、また現在に至るまで研究に関して多くの貴重な助言をいただきました。深く御礼申し上げます。

梶本研究室の先輩方や後輩の皆さんにも支えられました。研究室の秘書である生田淳子さんには、出張等予算関係の事務手続きについて大変お世話になりました。修士時代の同期であった栗原洋輔君、西村奈令大さんには、研究のみならず日常生活の上でも相談にのっていただきました。深く感謝いたします。

梶本研究室の先輩方の中でも、特に福嶋政期博士には心よりの感謝の意を表します。私が梶本研に配属されて初めての研究テーマは当時博士課程に在籍していた福嶋氏の提案した、温度錯覚現象 Thermal Referral の応用についての研究でした。これは私が今日まで温度感覚について研究するきっかけとなるものでした。あのときの福嶋博士の提案がなければ、本論文で行った研究のどれ一つとして存在しなかったでしょう。重ねて御礼申し上げます。

ここに名前を挙げた方の他にも、多くの方に日頃より支えていただきました。篤く御礼申し上げます。

最後に、生活面で常に支えていただきました母・いづみと、私が博士進学を決意したきっかけでもある父・直行に心からの感謝の意を表し、結言に代えさせていただきます。

参考文献

- [1] Alrutz, S. , On the temperature senses: II , The sensation hot, *Mind*, 7, 140-144, 1898.
- [2] Bach, P. , Becker, S. , Kleinbohl, D. , Holzl, R. , The thermal grill illusion and what is painful about it, *Neuroscience Letters*, 505:31–35, 2011.
- [3] Bickford RG, Experiments in relation to the itch sensation—its peripheral mechanism and central pathways, *Clin Sci*, 3:377–86, 1938.
- [4] Bromma, B. , Scharein, E. , Darsow, U. , & Ring, J, Effects of menthol and cold on histamine-induced itch and skin reactions in man, *Neuroscience letters*, 187(3), 157-160, 1995.
- [5] Bronstein, A.M., and Buckwell, D. Automatic control of postural sway by visual motion parallax. *Exp. Brain Res.* 113, 243-248, 1997.
- [6] Craig, A. D. , and Bushnell, M. C, The thermal grill illusion:Unmasking the burn of cold pain, *Science* 265 , 252–255, 1994.
- [7] Davidson, S. , Zhang, X. , Khasabov, S, G. , Simone, D, A. , & Giesler, G, J, Relief of itch by scratching: state-dependent inhibition of primate spinothalamic tract neurons, *Nature neuroscience*, 12(5), 544-546, 2009.
- [8] Duclaux, R., & Kenshalo, D. R. The temperature sensitivity of the type I slowly adapting mechanoreceptors in cats and monkeys. *The Journal of physiology*, 224(3), 647, 1972.
- [9] Ellis, C, N. , Berberian, B. , Sulica, V, I. , Alan Dodd, W. , Jarratt, M, T. , Katz, H, I. , Prawer, S. , Krueger, G. , Rex, I, H, & Wolf, J, E. , A double-blind evaluation of topical capsaicin in pruritic psoriasis, *Journal of the American Academy of Dermatology*, 29(3), 438-442, 1993.
- [10] Fruhstorfer, H. , Hermanns, M. , & Latzke, L, The effects of thermal stimulation on clinical and experimental itch, *Pain*, 24(2), 259-269, 1986.
- [11] Green, B, G. , Localization of thermal sensation: An illusion and synthetic heat, *Perception & Psychophysics*, 22, 331-337, 1977
- [12] Green, B, G. , Referred thermal sensations: Warmth versus cold, *Sensory Processes*, 2, 220-230, 1978.
- [13] Green, B, G. , Thermo-tactile interactions: Effects of touch on thermal localization, *Sensory functions of the skin of humans* , pp, 223-240, 1979.
- [14] Green, B. G. , Synthetic heat at mild temperatures, *Somatosensory & Motor Research*, 19(2), 130- 138, 2002.
- [15] Hanifin, J, M. , Paller, A, S. , Eichenfield, L. , Clark, R, A. , Korman, N. , Weinstein, G. , Caro, I. , Jaracz, E. , & Rico, M, J, Efficacy and safety of tacrolimus ointment treatment for up to 4 years in patients with atopic dermatitis, *Journal of the American Academy of Dermatology*, 53(2), S186-S194, 2005.

- [16] Ho, H. , Mechanisms Underlying Referral of Thermal Sensations to Sites of Tactile Stimulation, *The Journal of Neuroscience*, 31(1), 208-213, 2011.
- [17] ISO13732-1: Ergonomics of the thermal environment -- Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces -- Part 1: Hot surfaces, 2006.
- [18] ISO13732-3: Ergonomics of the thermal environment -- Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces -- Part 3: Cold surfaces, 2005.
- [19] Johansson, R. S., & Westling, G. Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Experimental brain research*, 56(3), 550-564.
- [20] K, Mizumura, H, Koda Potentiation and suppression of the histamine response by raising and lowering the temperature in canine visceral polymodal receptors in vitro, *Neurosci Lett* , 266 (1), 9-12, 1999.
- [21] Kammers, M, P. , De Vignemont, F. , & Haggard, P, Cooling the thermal grill illusion through self-touch, *Current Biology*, 20(20), 1819-1822, 2010.
- [22] Kawashima, M. , Tango, T. , Noguchi, T. , Inagi, M. , Nakagawa, H. , & Harada, S, Addition of fexofenadine to a topical corticosteroid reduces the pruritus associated with atopic dermatitis in a 1 - week randomized, multicentre, double - blind, placebo - controlled, parallel - group study, *British Journal of Dermatology*, 148(6), 1212-1221, 2003.
- [23] Kawashima, N., Abe, M. O., Iwaya, T., & Haga, N. Abnormal capacity for grip force control in patients with congenital insensitivity to pain. *Experimental brain research*, 218(4), 579-588, 2012.
- [24] Kligman, A, M. , & Frosch, P, J, Steroid addiction, *International journal of dermatology*, 18(1), 23-31, 1979.
- [25] Kon, Y., Nakamura, T., Sato, M., Kajimoto, H., Effect of Hanger Reflex on Walking, *IEEE Haptics Symposium 2016*, April 8-11, 2016.
- [26] Kushiya, K. , Baba, T. , Doi, K. , & Sasada, S, Thermal design display device to use the thermal tactile illusions: Thermo-Paradox, In *ACM SIGGRAPH 2010 Posters* (p, 99), 2010.
- [27] Lederman, S, J. , & Jones, L, A. , Tactile and haptic illusions, *Haptics, IEEE Transactions on*, 4(4), 273-294, 2011.
- [28] Lindstedt, F. , Johansson, B. , Martinsen, S. , Kosek, E. , Fransson, P. , & Ingvar, M, Evidence for thalamic involvement in the thermal grill illusion: an fMRI study, *PloS one*, 6(11), e27075, 2011.
- [29] Lotti, T. , Teofoli, P. , & Tsampau, D, Treatment of aquagenic pruritus with topical capsaicin cream, *Journal of the American Academy of Dermatology*, 30(2), 232-235, 1994.
- [30] Lysy, J., Sistiery-Ittah, M., Israelit, Y. , Shmueli, A. , Strauss-Liviatan, N. , Mindrul, V. , Keret, D. , & Goldin, E, Topical capsaicin—a novel and effective treatment for

- idiopathic intractable pruritus ani: a randomised, placebo controlled, crossover study, *Gut*, 52(9), 1323-1326, 2003.
- [31] Maeda, T., Ando, H., Amemiya, T., Inami, M., Nagaya, N., Sugimoto, M. Shaking the world: galvanic vestibular stimulation as a novel sensation interface. *ACM SIGGRAPH Emerging Technologies*, 2005.
- [32] Merrill, D. R., Bikson, M., & Jefferys, J. G. Electrical stimulation of excitable tissue: design of efficacious and safe protocols. *Journal of neuroscience methods*, 141(2), 171-198, 2005.
- [33] Moritz, A. R. , Henriques, F. C. , Studies of thermal injury: II, The relative importance of time and surface temperature in the causation of cutaneous burns, *Am J Pathol*, 17:695–720, 1947.
- [34] Moritz, A. R., Studies of thermal injury: III, The pathology and pathogenesis of cutaneous burns, An experimental study, *Am J Pathol*, 17:915–941, 1947.
- [35] Reitamo, S. , Rustin, M. , Harper, J. , Kalimo, K. , Rubins, A. , Cambazard, F. , Brennkmeijer, E, E, A. , Smith, C. , Jones, J. , Ruzicka, T. , Sharpe, G. , & Taieb, A, A 4 - year follow - up study of atopic dermatitis therapy with 0· 1% tacrolimus ointment in children and adult patients, *British Journal of Dermatology*, 159(4), 942-951, 2008.
- [36] Sato, M., Matsue, R., Hashimoto, Y., Kajimoto, H., Development of a head rotation interface by using hanger reflex. In: *IEEE Int. Sympos. Robot Human Interactive Comm.*, 534-538, 2009.
- [37] Tarng, D. C., Cho, Y. L. , Liu, H. N. , & Huang, T. P, Hemodialysis-related pruritus: a double-blind, placebo-controlled, crossover study of capsaicin 0. 025% cream, *Nephron*, 72(4), 617-622, 1996.
- [38] Weinstein, S, “Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality. ” *The Skin Senses*, pp, 223-261, 1968.
- [39] Yamamoto, A., Yamamoto, H., Cros, B., Hashimoto, H., and Higuchi, T., “Thermal Tactile Presentation Based on Prediction of Contact Temperature”, *Journal of Robotics and Mechatronics Vol.18 No.3*, 2006.
- [40] Yamamoto, A.: "Control of Thermal Tactile Display Based on Prediction of Contact Temperature", *Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA 2004)*, pp. 1536-1541. 2004.
- [41] Yoshikawa, H., Hachisu, T., Fukushima, S., Furukawa, M., Kajimoto, H., "Vection Field" for Pedestrian Traffic Control. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies Session*, 2011.
- [42] Yosipovitch, G. , & Papoiu, A. D, What causes itch in atopic dermatitis?, *Current allergy and asthma reports*, 8(4), 306-311, 2008.
- [43] Yosipovitch, G. , Duque, M. I. , Fast, K. , Dawn, A. G. , & Coghill, R. C, Scratching and noxious heat stimuli inhibit itch in humans: a psychophysical study, *British Journal*

of Dermatology, 156(4), 629-634, 2007.

- [44] かく恋棒, http://www.sthits.co.jp/shop/item_detail?category_id=0&item_id=127609
- [45] ののじUD 麻姑搔痒, <http://nonoji.jp/products/07/mako.html>
- [46] アトピーはかいて治そう, 福富雅康著, 講談社, 1998.
- [47] オイラックス PZ 軟膏, 第一三共株式会社, http://www.daiichisankyo-hc.co.jp/products/details/eurax_pz_oint/index.jsp
- [48] ケナコルト A, ブリストル・マイヤーズ, <http://www.bms.co.jp/pdf/medical/tenbun/KAim1105.pdf>
- [49] コートリル, ファイザー, <http://pfizerpro.jp/lp/establish-g/products/dc13/cortril/>
- [50] ジフラー軟膏, アステラス製薬, <http://med2.astellas.jp/corp/basic/details/df/expmed/dip-df-oin.pdf>
- [51] ステロイド薬の選び方・使い方ハンドブック, 山本一彦編, 羊土社, 2007.
- [52] テック技研, <http://www.tecgihan.co.jp/p14.htm>
- [53] ネオオーラル, ノバルティスファーマ株式会社, <http://www.neoral.jp/>
- [54] プロトピック軟膏, アステラス製薬, <http://med2.astellas.jp/corp/basic/details/prt/expmed/dip-prt.pdf>
- [55] ベトネベート N 軟膏 AS, 第一三共株式会社, http://www.daiichisankyo-hc.co.jp/products/details/betnevate_n/index.jsp
- [56] ホエイ, ファイザー, <http://pfizerpro.jp/lp/establish-g/products/dc10/prednisolone/>
- [57] リビメックスコーワ軟膏, 興和株式会社, <http://hc.kowa.co.jp/livimex/nanko.php>
- [58] 感覚障害の診察 | “なんとなく” はもう卒業! 今日からわかる神経所見のとり方, <https://www.kango-roo.com/sn/k/view/2010>
- [59] 宮岡, 間野, 皮膚機械受容単位感度の温度依存性, 名古屋大学環境医学研究所年報, vol. 48, pp. 173-175, 1997.
- [60] 串山久美子, 土井 幸輝, 笹田 晋司, 馬場 哲晃, Thermo Drawing : 冷温提示による小型触覚ディスプレイを使用した 温度描画システムの開発, インタラクシオン 2012, 情報処理学会, 2012.
- [61] 古江増隆, 古川福実, 秀道広, & 竹原和彦, 日本皮膚科学会アトピー性皮膚炎治療ガイドライン 2004 改訂版, 日皮会誌, 114(2), 135-42, 2004.
- [62] 古江増隆, 佐伯秀久, 古川福実, 秀道広, 大槻マミ太郎, 片山一朗, 佐々木りか子, 須藤一, & 竹原和彦, アトピー性皮膚炎診療ガイドライン, 日本皮膚科学会雑誌, 119(8), 1515-34, 2009.
- [63] 五十嵐敦之, 中川秀己, & 瀧川雅浩, 治療 アトピー性皮膚炎治療におけるシクロスポリン MEPC の使用指針, 臨床皮膚科, 63(13), 1049-1054, 2009.
- [64] 広井純. アトピー性皮膚炎治療薬タクロリムス軟膏 (プロトピック® 軟膏) の薬理学的特性と臨床効果, 日本薬理学雑誌, 117(5), 351-357, 2001.
- [65] 山田秀和, 野田剛弘, 松倉正治, 杉原和子, 弓立達夫, & 手塚正, VAS 法 (Visual Analog Scale) を用いた痒みの評価法について, 皮膚, 1996.
- [66] 神経疾患の評価と理学療法, 鈴木 俊明, 金井 一暁, 高木 誠一, 関西理学療法学会編,

エンタプライズ, 2004.

- [67] 足利太可雄, 小林浩, 岡本美樹, スティンギングテストの改良に関する研究, サンプル適用における不織布使用と感覚刺激判定におけるカテゴリー評定尺度図の使用, 日本化粧品科学会誌, 27(3), 136-141, 2003.
- [68] 田口喜一郎, 飯島美千穂, 滝沢正臣, 重心動揺の周波数分析. 耳鼻咽喉科臨床, 70.9, p825-831. 1977.
- [69] 渡辺, 大原, 國安, 佐藤, 福嶋, 梶本: 触覚刺激提示部位への温度感覚転写現象の解明, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012.
- [70] 島尾周平, 皮膚科領域におけるステロイド療法とその問題点—特にその副作用を中心として—, 西日皮膚, 1978.
- [71] 透析療法ネクスト XII, 秋葉 隆, 秋澤 忠男編, 医学図書出版, 2011.
- [72] 日本ムーグ, <http://www.moog.co.jp/japanese/products/slip-rings/>
- [73] 日本皮膚科学会, <http://www.dermatol.or.jp/citizens/c-info/031212.html>
- [74] 日本皮膚科学会. タクロリムス軟膏 (プロトピック軟膏) 使用中およびこれから使用される患者さんへ, 日皮会誌, 113: 2080—2083, 2003.
- [75] 富永, カプサイシン受容体: 熱・プロトンで活性化されるイオンチャネル, 生物物理, 39, 3, 159-164, 1999.
- [76] 富永, 温度を感じるしくみ 受容体分子の発見, 総研大ジャーナル, 10, 44-45, 2006.
- [77] 武田克之, 原田種雄, 安里哲時, 石本彰宏, 野本正志, & 倉本昌明, 副腎皮質ホルモン外用剤の全身に及ぼす影響—特に副腎機能抑制を中心に, 医学のあゆみ, 101, 817-829, 1977.
- [78] 北村正樹, アトピー性皮膚炎治療薬, 耳鼻咽喉科展望, 51(6), 465-467, 2008.
- [79] 林啓子, 岩永志津子, 林隆志, 浦山修, 山内恵子, 症司進一, 石井均, 村上和雄, 川井紘一. 2型糖尿病患者における「笑い」の食後血糖値上昇抑制効果. 糖尿病, Vol, 47, p220, 2004.