

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
環境システム学専攻

平成 29 年度

修士論文

脳血流のヘモグロビン濃度計測に基づく温冷感
と快適感の客観的評価

2018 年 2 月 22 日提出
指導教員 吉田好邦 教授

李 和聡

目次

第 1 章	序論	6
1.1	空調利用とエネルギー	6
1.2	温熱感覚の客観的尺度の必要性	6
1.3	脳活動	6
1.3.1	客観的尺度としての脳活動	6
1.3.2	fMRI と NIRS	7
1.4	本研究の目的	7
1.5	本論文の構成	8
第 2 章	研究方法	9
2.1	近赤外分光法 (Near-infrared spectroscopy, NIRS)	9
2.1.1	NIRS の測定原理	9
2.1.2	NIRS の信号の解釈	11
2.1.3	実験デザイン	12
2.1.4	独立成分分析	13
2.2	実験方法	14
2.2.1	実験環境	14
2.2.2	実験装置	15
2.2.3	主観申告	18
2.3	実験手順	18
2.3.1	ファイバホルダおよびプローブの装着	18
2.3.2	実験プロトコル	20
2.3.3	被験者の動作と主観申告のタイミング	21
2.4	計測結果の前処理	23
第 3 章	実験 I	24
3.1	実験概要	24

3.2	温冷感および快適感の申告結果	24
3.3	温冷感および快適感申告との相関	27
3.3.1	被験者 9 人の結果	27
3.3.2	被験者 A の結果	30
3.3.3	被験者 B の結果	33
3.3.4	被験者 C の結果	36
3.3.5	被験者 D の結果	39
3.3.6	被験者 E の結果	42
3.3.7	被験者 F の結果	45
3.3.8	被験者 G の結果	48
3.3.9	被験者 H の結果	51
3.3.10	被験者 I の結果	54
3.4	考察	56
3.4.1	賦活するスポット	56
3.4.2	被験者 9 人の結果	56
3.4.3	被験者個人の結果	57
第 4 章	実験 II	59
4.1	実験概要	59
4.2	温冷感および快適感との相関	59
4.2.1	被験者 8 人の結果	59
4.2.2	被験者 A の結果	62
4.2.3	被験者 C の結果	65
4.2.4	被験者 E の結果	68
4.2.5	被験者 J の結果	71
4.2.6	被験者 K の結果	74
4.2.7	被験者 L の結果	77
4.2.8	被験者 M の結果	80

4.2.9	被験者 N の結果.....	83
4.3	考察	85
4.3.1	ふかつするスポット	85
4.3.2	被験者 9 人の結果.....	85
4.3.3	被験者個人の結果	86
第 5 章	結論	87
	参考文献	88
	謝辞.....	91

第1章 序論

1.1 空調利用と省エネルギー

近年、空調機器の利用は家庭やオフィス、公共施設など、我々の生活にとって必要不可欠な存在となっている。空調機器が利用者の生活快適性を向上させる一方で、過度な利用はエネルギー消費を大きくする。よって近年の省エネルギー促進の対象として空調制御も例外ではなく、空調利用低減によるエネルギー消費削減が進められている。その一例として、環境省が夏期の冷房設定温度として 28℃を推奨するなど行っているが、特定の室内温度に対して快適であるか、またはそうでないかは利用者によって異なるものである。よって、利用者の快適性が損なわれない範囲で、いかにエネルギー消費を抑制できるかが重要となっている。

1.2 温熱感覚の客観的尺度の必要性

従来の温熱感覚の指標は、主観的申告に基づく指標が多い。しかしながら、人間の温熱感覚の主観的申告と生理的な状態は必ずしも一致しない。その一例として、屋内熱中症が挙げられる。屋内熱中症は主に高齢者に多く発症し、その原因は、熱中症状態である自己の体調状態を自らで自覚することができずに対応に遅れをとることにある。このように、人間の温熱感覚においては、主観的申告よりも生理的な状態を客観的にかつ正確に評価することが必要である。省エネルギーを進めるためには、個別の温熱感覚を客観的に評価し、さらに空調制御へと応用することが望ましい。

1.3 脳活動

1.3.1 客観的尺度としての脳活動

脳活動は、人間が環境から受ける外的要因に対する感覚を発する生体反応である。人間の脳は機能局在性を有しており、様々な外的要因それぞれに対応する部位が賦活すると考えられている^[1]。外部からの触覚や温度感覚には体性感覚野が賦活し、一方、快適または不快と感じた場合は前頭前野が賦活すると考えられている^[2]。よって温熱感覚における快適感および不快感においても、前頭前野は賦活する可能性は考えられる。したがって、脳賦活反応を客観的に計測することにより、被験者の主観的な申告ではなく被験者が感じている本来の感覚を評価できると考えられる。

1.3.2 fMRI と NIRS

脳活動における温熱感覚を計測する手法として、機能的磁気共鳴画像法（Functional magnetic resonance imaging, fMRI）と近赤外分光法（Near-infrared spectroscopy, NIRS）NIRS が主に研究されている。

fMRI は脳内の局所的な神経活動に伴う血流量の局所的な変化を計測するものであり、血液中の酸素化の違いによって変化する信号（Blood oxygenation level dependent, BOLD 信号）を計測して脳活動を評価する。Rolls et al.の研究^[3]のように、fMRI で血流変化を計測することにより温熱感覚を客観的に評価できると考えられるが、fMRI は計測時における被験者の拘束性が高く、日常的な状態において計測を行うことは困難である。本研究の最終的目標は、生活環境における空調利用者の温熱感覚を評価することであるため、拘束性の高い fMRI での温熱感覚計測は本研究において不適切である。

NIRS は、波長の異なる近赤外光照射時において、吸収度の違いによって血流中のヘモグロビン濃度変化を計測するものである。計測時は、光を照射および検出するためのプローブを頭部に装着するのみであり、fMRI と比較して扱いやすく、拘束性も高くない。Miyazawa et al.^[4]が運動中の脳活動を計測しているように、動きながらの計測も NIRS は可能である。また、携帯して計測ができる NIRS 計も技術の進歩により開発されている。よって日常的な状態における温熱感覚を脳活動より計測するためには、NIRS が適切であると考えられる。

1.4 本研究の目的

NIRS を用いた温熱感覚に関する研究が行われている。

近藤ら^[5]は、室温を 10 分間変化させ、その間の前頭前野における脳活動を NIRS により計測した結果、前頭前野における酸素化ヘモグロビン(Oxy-Hb)濃度の変化は、室内温度変化との間で、また被験者による温冷感申告とも相関性があるとしている。またこれに続く報告として、俣ら^[6]は、局所的な温冷刺激を与えた際の体性感覚野と前頭前野における脳活動を NIRS により計測し、体性感覚野で、温度差が -20°C のときにほかの温度条件と比較して Oxy-Hb 濃度が増加する傾向があることを示している。

一方、著者らによる関連研究として畑ら^[7]、足部刺激実験では高温の際に Oxy-Hb 濃度が増加し、低温の際に Oxy-Hb 濃度が減少することが確認している。畑ら^[7]は、局所刺激に特化して、被験者の足部に対して温熱刺激を与えた時、冷刺激に関しては脳血流の低下が計測されたとしている。

以上の研究では全身に対して温熱刺激を行う実験の後に局所的な刺激を行う実験を実施しており、全身刺激による計測が容易ではないことが示唆される。そこで本研究では畑ら^[7]に引き続き、局所的な刺激に限定して計測を行う。

1.5 本論文の構成

本論文の構成は、以下のようになっている。

第 2 章では、本研究で用いる NIRS の計測原理および実験の条件や計測方法，結果解析方法などについて述べる。

第 3 章では、実験Ⅰについての結果および結果を踏まえた考察を述べる。

第 4 章では、実験Ⅱについての結果および結果を踏まえた考察を述べる。

第 5 章では、本研究の結論および今後の展望について述べる。

第2章 研究方法

2.1 近赤外分光法 (Near-infrared spectroscopy, NIRS)

近赤外分光法 (Near-infrared spectroscopy, NIRS) について、酒谷他著の「NIRS－基礎と臨床－」(2012) を主に参考にして紹介する。

2.1.1 NIRS の測定原理^[8]

近赤外光を用いて生体内のヘモグロビン酸素代謝変化を非侵襲的に計測できることが報告されている^[9]。近赤外光は波長が約 700~1000nm の電磁波で、可視光 (波長 350~700nm) と異なり生体透過性が高い。近赤外光が頭部に照射されると、頭部の様々な構成成分 (血液、骨、皮膚や脳組織など) により吸収と散乱を受けて減衰する。

生体内の酸素化状態により吸光度が変化する主な成分は血液中のヘモグロビンである。ヘモグロビンは酸素が結合した酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb) と結合していない脱酸素化ヘモグロビン (Deoxy-Hb) では吸光スペクトルが異なる (図 2-1)。近赤外光が通過する組織中のヘモグロビン酸素化状態が変化すると、ヘモグロビンの吸光スペクトルに従って通過する近赤外光の強度が変化する。この光強度変化を計測することで、酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの濃度変化を算出することができる。

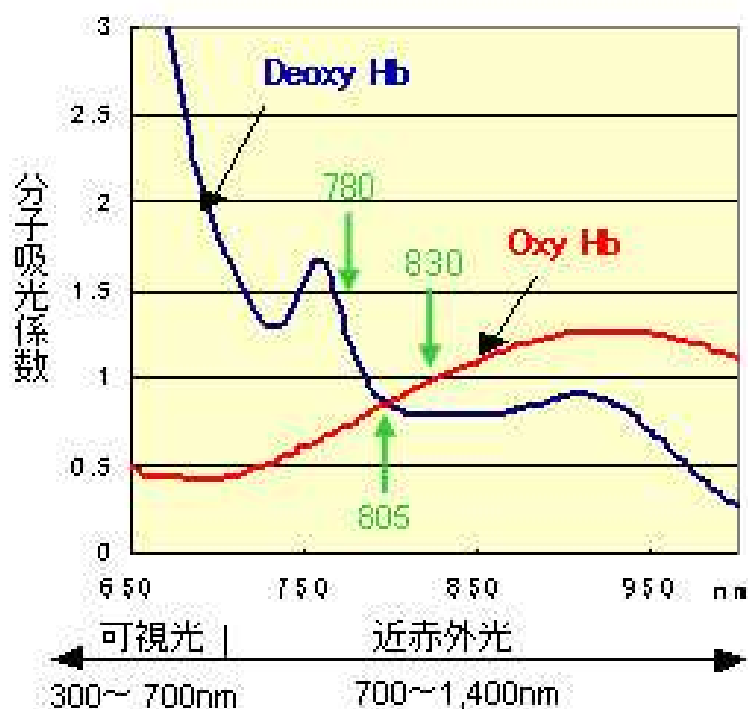


図 2-1 ヘモグロビンの吸光スペクトル^[10]

ヘモグロビン濃度変化は Beer-Lambert 則を基礎として算出している。Beer-Lambert 則は、吸光物質を含む溶液に光を照射したときの光の減衰と吸光物質の濃度関係を示した法則である。光は散乱物質のない媒体の中では直進するが、ミルクのような散乱物質が存在すれば光は様々な方向に散乱する（図 2-2）。

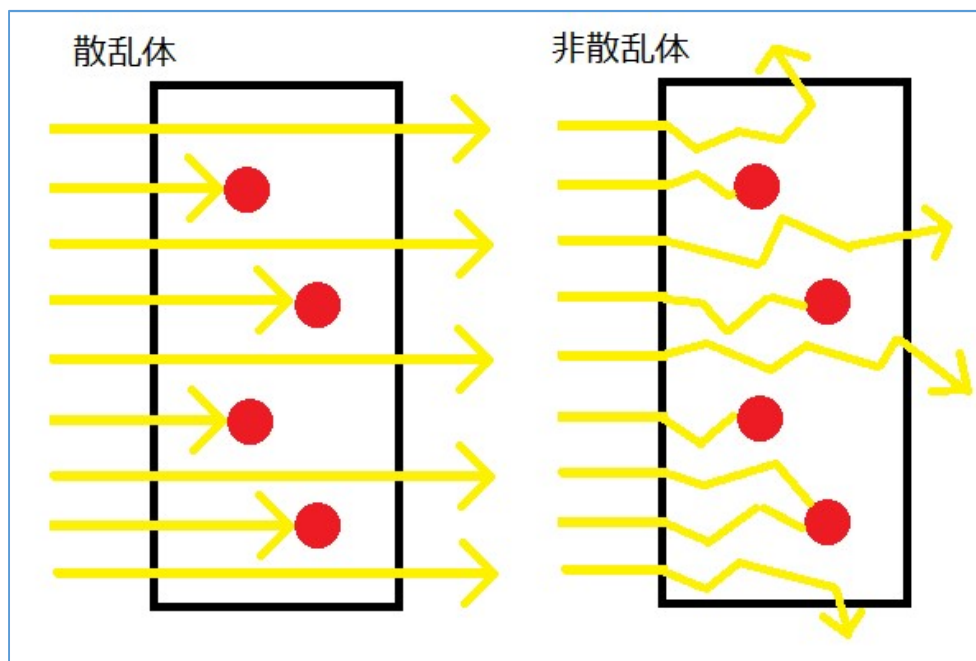


図 2-2 非散乱体と散乱体における光の飛行^[8]

非散乱体の媒質中では直進するが、散乱体では様々な方向に散乱し、光の飛行距離（光路長）は長くなる。Beer-Lambert 則では、光の吸収はあるが散乱のない媒質中に光が入射した時は、光強度は指数関数的に減少し、入射光量（ I_0 ）と透過光量（ I ）の関係は式 2-1 で与えられるとするものである。

$$OD(\lambda) = \text{Log}(I_0/I) = \varepsilon(\lambda) \times c \times L \quad (2-1)$$

OD は吸光度、 λ は光の波長、 ε はモル吸光係数（ $\mu\text{M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ）、 c は吸光物質の濃度（ mM ）、 L は光が飛行する距離、すなわち光路長（ mm ）を示す。なお、式中の Log の底は 10 であり、常用対数を示している。

散乱のない媒質中で光は直進するため、光路長は媒質の厚みと一致する。しかし、生体組織のように光散乱の強い媒質では、光は散乱を繰り返すために実際の光路長は媒質の厚みよりも長くなり、Beer-Lambert 則はこのままでは適用できないため、式 2-2 が考案された^[11]。

$$OD(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \times c \times (d \times B) + OD(\lambda)_R \quad (2-2)$$

B は散乱により光の飛行距離がどれだけ延長するかを示す係数（differential pathlength factor）を示している． d （媒質の厚み）と B の積は光路長（ L ）となる．

$OD(\lambda)_R$ は組織内の光散乱のため検出器に入らずに失われるフォトンを示している． $OD(\lambda)_R$ が一定であると仮定すると、吸光物質の濃度変化に伴う吸光度 $OD(\lambda)$ の変化量（ ΔOD ）を算出すると相殺され、式 2-3（modified Beer-Lambert 則）になる．

$$\Delta OD = \varepsilon(\lambda) \times \Delta c \times L \quad (2-3)$$

吸光物質の濃度変化（ Δc ）は、式 2-4 のように求められる．

$$\Delta c = \Delta OD \div (\varepsilon(\lambda) \times L) \quad (2-4)$$

吸光度の変化（ ΔOD ）は $\text{Log}(I_o/I)$ で示されるので、入射光量（ I_o ）と透過光量（ I ）を測定することにより求められる． $\varepsilon(\lambda)$ はヘモグロビンの吸光度スペクトル（図 2-1）より求められる．

ここで重要なのは、連続光を用いる NIRS、例えば光トポグラフィーでは、光路長 L は頭部の部位、あるいは被験者に関わらず一定と仮定してヘモグロビン濃度変化を算出している点である．しかしながら、時間分解スペクトロスコピーなどを用いて光路長を実測すると、頭部の部位や被験者により異なることが報告されている^[12]．

2.1.2 NIRS 信号の解釈^[13]

測定装置では、実際に計測した物理量を、物理法則や仮定を用いて、目的とする物理量に変換することが行われる．NIRS による脳機能計測において直接計測しているのは、照射プローブと検出プローブを頭皮上装着した時の検出光の強度である．照射プローブから入射された光の強度 $I_s(\lambda)$ と検出光強度 $I_d(\lambda)$ の比の対数を減光度 $OD(\lambda)$ と定義すると、減光度は式 2-5 で表される．

$$OD(\lambda) = \ln(I_s(\lambda)/I_d(\lambda)) = S(\lambda) + N_B(\lambda) + N_H(\lambda) + N_I(\lambda) \quad (2-5)$$

ここで、 S ：脳組織のヘモグロビンによる吸光、 N_B ：脳組織の散乱やヘモグロビン以外の物質の吸収による吸光、 N_H ：脳組織以外の頭部組織における減光、 N_I ：頭部組織とプローブの接触部分や光ファイバーなどにおける装置のアーチファクトによる減光を示している．

脳組織内におけるヘモグロビン濃度を定量的に測定するためには $N_B(\lambda)$ 、 $N_H(\lambda)$ 、 $N_I(\lambda)$ を定量計測する必要があるが、それは不可能なので、現在の NIRS 装置では、安静時の検出光量 I_{db} をベースラインとして、課題による脳機能賦活時の検出光量 I_{dm} との減光度変化 ΔOD

を測定量として用いている。

NIRS 信号はベースライン計測時からの変化を測定したものであるから、ベースライン計測時の状態が異なれば、同じ課題であっても異なる結果が生じる性質を持っている。したがって、安定したベースライン計測は、NIRS 測定において極めて重要である。

測定中に装置のアーチファクトによる減光が変化しないと仮定できれば、 $\Delta N_I(\lambda) = 0$ となる。脳組織以外の頭皮組織の吸収と散乱が測定中に変化しないと仮定できれば、 $\Delta N_H(\lambda) = 0$ となる。さらに、脳機能賦活によってヘモグロビン濃度だけが変化すると仮定すると、 $\Delta N_B(\lambda) = 0$ となる。これにより、式 2-6 が導かれる^[11]。

$$\begin{aligned} \Delta OD(\lambda) &= \Delta S(\lambda) = \Delta \mu_a(\lambda) < L_{act}(\lambda) > \\ &= \varepsilon_{oxy}(\lambda) \Delta c_{oxy} < L_{act}(\lambda) > + \varepsilon_{deoxy}(\lambda) \Delta c_{deoxy} < L_{act}(\lambda) > \end{aligned} \quad (2-6)$$

ここで、 $\Delta \mu_a(\lambda)$ は組織の吸収係数の変化、 $\varepsilon_{oxy}(\lambda)$ 、 $\varepsilon_{deoxy}(\lambda)$ は Oxy-Hb と Deoxy-Hb のモル吸光係数、 Δc_{oxy} 、 Δc_{deoxy} は Oxy-Hb と Deoxy-Hb の濃度変化、 $< L_{act}(\lambda) >$ は脳組織中のヘモグロビン濃度が変化した領域を検出光が伝播した部分的な平均実効光路長である。

賦活領域における部分実効光路長が分かれば、式 2-6 を複数波長に対する連立方程式として解くことで、Oxy-Hb と Deoxy-Hb の濃度変化量を求めることができる。しかし、賦活領域の部分実効光路長を実測することは現在の技術では不可能なので、現在多くの NIRS 装置は、ヘモグロビン濃度変化 Δc_{oxy} と部分実効光路長 $< L_{act}(\lambda) >$ を分離せず、NIRS 信号として $\Delta c_{oxy} \cdot < L_{act}(\lambda) >$ を出力している。

2.1.3 実験デザイン^[14]

一般に広く用いられている NIRS 装置は、連続光を組織に照射して検出された光の減光度を計測して、modified Beer-Lambert 則に基づいてヘモグロビン濃度変化を算出している。しかし、NIRS 信号はヘモグロビン濃度そのものではなく光路長との積であり、光路長は波長によって変化するので、装置ごとに用いられている波長は異なる。さらに単純にヘモグロビン濃度と光路長との積の形として算出しない演算式を用いている装置もあり^[15]、NIRS 信号は [mM・mm] (濃度×長さ) の単位で表現されることもあるが、単位がないあるいは任意単位として表現されるのが適切である。

光路長は散乱の影響で照射-受光間距離よりも長く、計測部位によって異なる。脳賦活のように脳局所に血流変化が限局している場合はその領域での光路長との積である。部分光路長の計測部位間でのばらつきは総光路長のばらつきよりも大きい^[16]。このように光路長が一定でないのは、主に脳外組織の解剖学的構造と、そこにおける光の吸収と散乱の程度が計測部位によって異なるためと考えられる。したがって、NIRS 信号の振幅の大小でヘモグロビン濃度の変化の大小を論ずることはできない。このことは、NIRS 信号の振幅の個体間

比較や同一個体における部位間比較をするような実験デザインは NIRS 計測では不適切であることを意味している。

NIRS 計測でよく用いられている実験デザインは、基本的には fMRI の実験デザインと同じである。fMRI の実験デザインには表 2-1 に示すような分類がある。

表 2-1 実験デザインの分類

刺激呈示方法	ブロックデザイン	一定時間の課題，刺激，安静状態を繰り返す (図 2-3)
	事象関連デザイン	短い刺激を複数回繰り返し， 施工ごとの加算平均としてとらえる
データ分析方法	categorical design	2 つの状態の脳活動の差を調べる（差分法）
	parametric design	NIRS 計測の実験デザインとして不適切なことが多い
	factorial design	部位間比較ができないことを念頭において用いる



図 2-3 ブロックデザインのイメージ

実験デザインを工夫することで、NIRS 計測でもブロックデザインを活用することができる。

2.1.4 独立成分分析^[17]

独立成分分析とは、「混ぜ合わさった信号を信号源に分離する方法」である。

n 個の信号源 $S_1(t)$, $S_2(t)$, \dots , $S_n(t)$ が、混合係数 a_{ij} の重みづけで混ぜ合わされて、 n 個の信号 $X_1(t)$, $X_2(t)$, \dots , $X_n(t)$ が観測されるモデルを考える。行列を用いた数式でこのモデルを示すと式 2-7 となる。

$$\begin{pmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ \vdots \\ X_n(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ \vdots \\ S_n(t) \end{pmatrix} \quad (2-7)$$

ここで、ここで、混合行列 A (混合係数 a_{ij} からなる行列) の値が分かっているならば、混合行列 A の逆行列を求めることによって、信号源 S は容易に求められるが、一般には混合行列 A も未知である。したがって、そのままでは信号源 S を求めることはできない。

そこで、観測信号 X や信号源 S を確率変数の標本と考え、信号源 S に対して、統計的な原則を用いることで、混合行列 A を決定し信号源 S を求めることを考える。独立成分分析では、信号源 S の各成分が統計的に独立であるということを、統計的な原則として用いる。これは、信号源 S のどの成分も他の成分に関する情報を一切含んでいないことを意味する。

独立成分分析の NIRS への応用としては、脳賦活信号の抽出^{[18][19][20]}、頭皮血流の除去^[21]、アーチファクトの除去^[22]などがある。

2.2 実験方法

2.2.1 実験環境

本研究では畑^[7]らが使用した実験室内にて実験を行った。なお、本実験は東京大学研究倫理委員会の承認を得て実施した。実験室の外観および内観を図 2-4 および図 2-5 に示す。室内には NIRS 計のほかに、被験者が実験中に着席するための椅子、被験者が申告を行うための机が用意されている。



図 2-4 実験室の外観^[7]



図 2-5 実験室の内観^[7]

2.2.2 実験装置

本実験では、脳血流中の Oxy-Hb 濃度を計測する NIRS 計として株式会社島津製作所の LABNIRS (図 2-6) を使用した。



図 2-6 LABNIRS^[10]

また，温冷刺激装置として株式会社ビックスの低電圧電子冷却ユニット（LVPU-40）（図 2-7），同社のペルチェ温度コントローラ（VPE-35）（図 2-8）を使用した．設定可能な温度範囲は -30°C ～ $+110^{\circ}\text{C}$ ，また温度設定分解能は 0.1°C である．これらの温冷刺激装置を 2 つ用意することでタスクの温度差をつくった．



図 2-7 低電圧電子冷却ユニット (LVPU-40) [23]

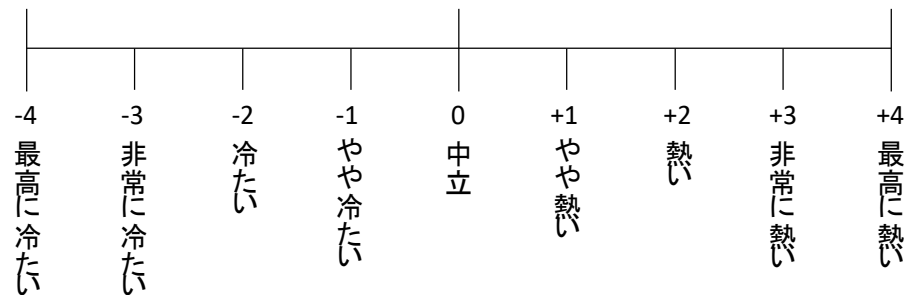


図 2-8 ペルチェ温度コントローラ (VPE-35) [23]

2.2.3 主観申告

脳血流中の Oxy-Hb と主観的な温冷感および快適感の相関を調査するために、温冷感と快適感について申告を尋ねた（実験中の具体的なルールおよびタイミング等は次節にて後述する）。申告には Visal Analogue Scale を使用した。図 2-9 に示すように、中心を中立点とした温冷感および快適感の申告スケール上に、被験者は自身の感覚を線をスケールと交わるように線を記入できる用紙を作成し使用した。中立点から記入された線までの距離を測定することで温冷感および快適感を連続的な数値として評価できる。

・温冷感



・快適感

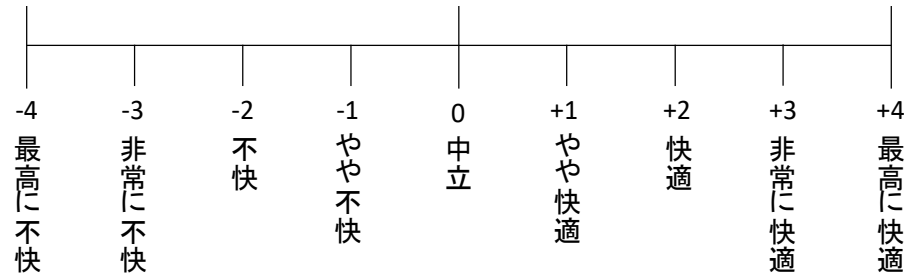


図 2-9 Visal Analogue Scale ^[7]

2.3 実験手順

2.3.1 ファイバホルダおよびプローブの装着

実験を行うにあたって被験者には着席してもらう。鼻根（ナジオン）と後頭部の骨の出っ張り（イニオン）を結ぶ線と、左と右の耳介前点を結ぶ線の交差点にしるしをつけ、その交差点がファイバホルダ（図 2-10）の中心スポットと一致するようにファイバホルダを装着する。次にチャンネル配置図（図 2-11）に従って ch1～ch44 に対応するスポットへとプローブを装着していく。その後皮膚血流計測のために、ch45, ch46, ch47 に対応する左右の

眉の上および後頸部にプローブを貼り付ける．ch1～ch47 に対応する全てのプローブを装着し終えたのち，感度の確認および調整を行い，光量が不足するチャンネルがあれば，対応するプローブを装着し直した．図 2-12 は装着が完了した際の状態である．



図 2-10 ファイバホルダ^[10]

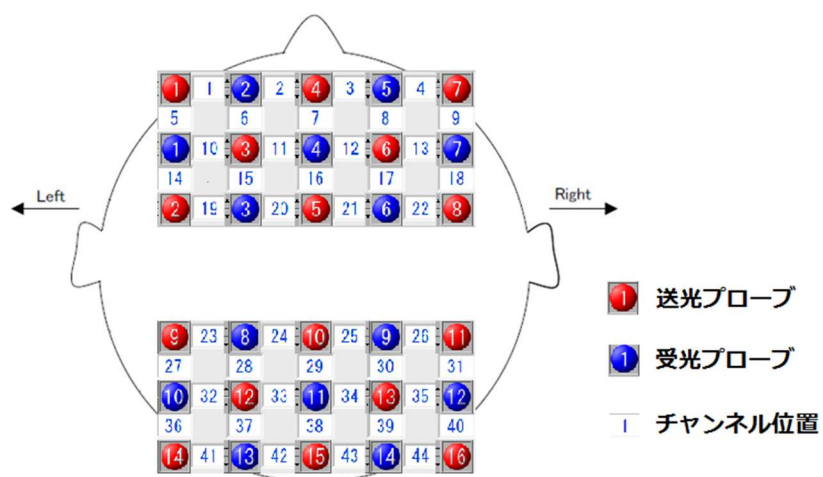


図 2-11 チャンネル配置図

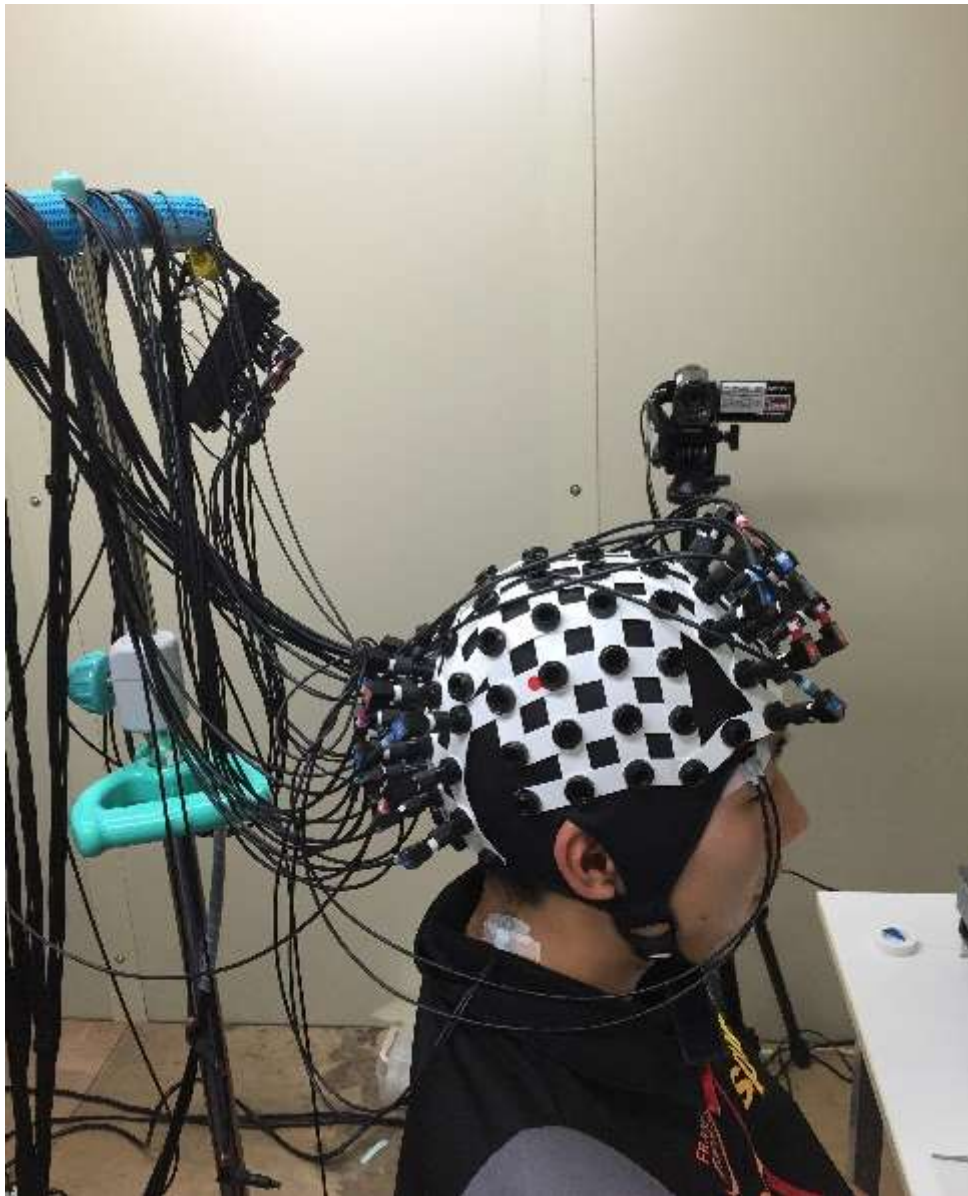


図 2-12 装着完了時の様子^[24]

2.3.2 実験プロトコル

上述したように、実験Ⅰは2016年11月29日～12月12日に、実験Ⅱは2017年7月12日～7月25日に行った。実験Ⅰ実験Ⅱともに、2.1.3節でも紹介したブロックデザインを用いた。レストとして基準温度を設け、タスクとして温冷刺激温度をつくった。それぞれの温度は以下のものであり、図 2-13 に本実験のプロトコルを示す。

- レスト（基準温度）：33℃（皮膚体温に近い温度）
- タスク（刺激温度）：40℃，45℃，23℃，13℃

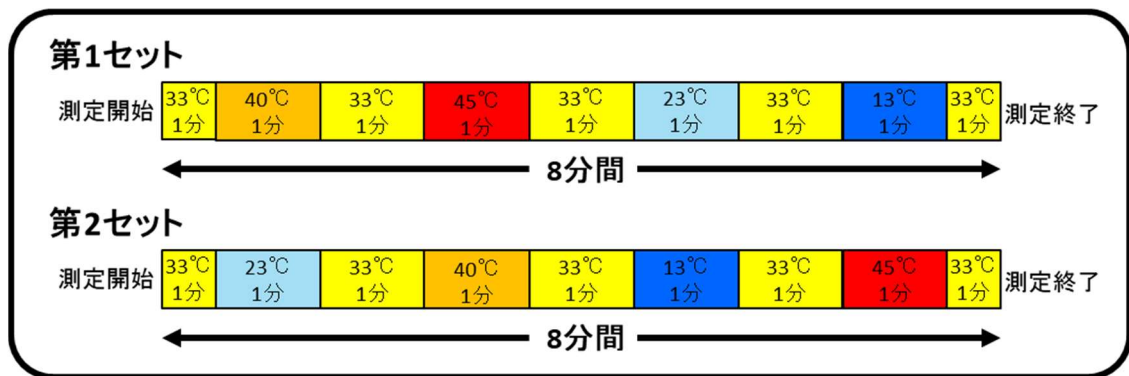


図 2-13 実験のプロトコル

以降，図 2-13 における上段のパターンを第 1 セット，下段のパターンを第 2 セットと呼ぶ．第 1 セットと第 2 セットの間には数分の安静期間を設けた．また第 1 セットと第 2 セットを通して行った計測を「1 回」の実験とする．

2.3.3 被験者の動作と主観申告のタイミング

本実験では左手に対する温冷刺激に対する脳活動を計測する．被験者には図 2-14 に示すように，右手にはボールペンを持ち，左手は L 側ユニットに触れた姿勢をとってもらい，実験を開始した．

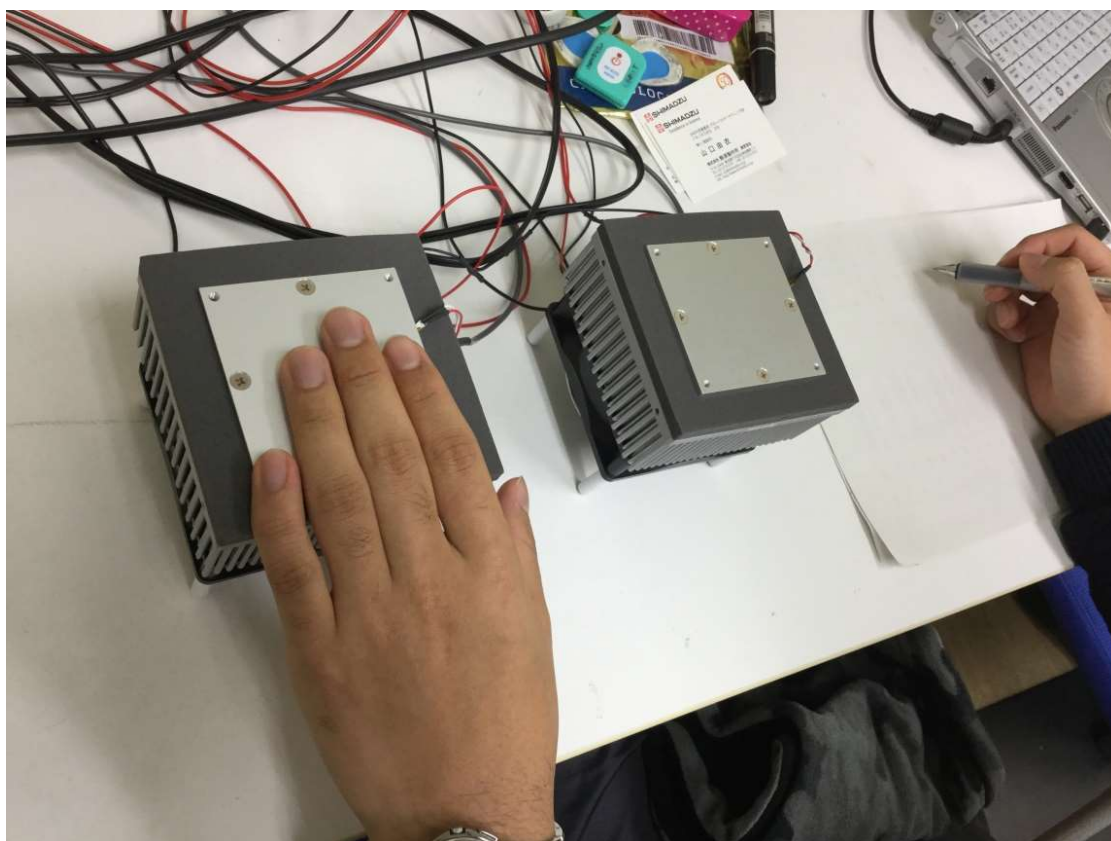


図 2-14 L 側ユニットに左手を触れた被験者の姿勢^[24]

8 分間の実験中におけるレストとタスクの変化点，すなわち 30 秒，1 分 30 秒後，2 分 30 秒後，3 分 30 秒後，4 分 30 秒後，5 分 30 秒後，6 分 30 秒後，7 分 30 秒の 8 点において「申告をお願いします。」と口頭で被験者に伝え，被験者にはその時点での温冷感および快適感を 2.2.3 節で述べた VAS で申告をしてもらった．被験者には申告を行った後に，左手の触れるユニットを移動 L 側から R 側，または R 側から L 側へと移動してもらった．

またこの際，被験者には申告するタイミングを知らせてはおらず，さらに実験中に時間を確認できない状況をつくった．これは申告のタイミングに向かう心理的なプレッシャーや，温冷感および快適感を事前に考えるストレスを除去するためである．また，「申告をお願いします。」以外は被験者には尋ねず，申告後に「ユニットを移動して下さい。」等の不要な発言は控えた．さらに，ユニットの温度は被験者には確認できない状況をつくった．これは温冷刺激以外の被験者に対する外的要因を可能な限り小さくするためである．

2.4 計測結果の前処理

NIRS によって計測できる脳活動には Oxy-Hb 濃度変化と Deoxy-Hb 濃度変化があるが、Oxy-Hb 濃度変化はラットを用いた実験において局所脳血流の変化と関連があり^[25]、脳賦活反応を最も反映するパラメータとされている^[26]。畑^[7]も脳活動の指標としており、本研究でも Oxy-Hb 濃度変化を解析の対象とする。

NIRS によって計測された ch1～ch44 の脳血流には ch45～ch47 の皮膚血流が影響している可能性があり、影響を排除するために独立成分分析による皮膚血流成分の除去を行った。本研究では、畑^[7]と同様に、NIRS 計の解析ソフトウェア内の SegICA を全ての計測結果に対して使用した。脳血流 44 チャンネルと皮膚血流 3 チャンネルを区別した 2 つのセグメントでそれぞれ ICA を行い、皮膚血流の 3 成分それぞれについて、空間均一係数 Coefficient of Spatial Uniformity (CSU) を算出し、 $CSU > 0.5$ となる成分が選択される。その選択された成分それぞれについて、脳血流の 44 成分の中で一番相関が高い成分を除去対象とする。上記の条件を満たす成分がない場合は、頭皮血流の影響が含まれていないと判断して成分の除去は行わない。

また、Oxy-Hb 濃度変化は測定開始時からの相対値であり、被験者間やチャンネル間の比較を直接行うことは適切ではない^[27]。よって、被験者間およびチャンネル間での比較を行うために、皮膚血流除去を行ったデータに対して式 2-8 により標準化 (Z-score 化) を行う^{[5][6][7]}。

$$Zscore(t) = \frac{\Delta Oxy(t) - \mu_{\Delta Oxy(t)}}{\sigma_{\Delta Oxy(t)}} \quad (2-8)$$

ここで、 μ は $\Delta Oxy(t)$ の加算平均、 σ は標準偏差を示す。

Z-score 化を行ったデータについて、線形成分の除去を行う。計測した 8 分間全体での線形変化を温度刺激以外によるものであると仮定し^[7]、式 2-9 により線形成分の影響を除去する。

$$Zscore'(t) = Zscore(t) - mt \quad (2-9)$$

ここで、 m は 8 分間の近似直線の傾きを示す。

以上の処理を行うことで、 $Zscore'$ は温度刺激による変化のみを反映していると考えられる。以降の第 3 章では $Zscore'$ によって脳血流中 Oxy-Hb 濃度の評価を行う。

第3章 実験I

3.1 実験概要

実験Iは王^[24]と共同で実験を行った。場所は2016年11月29日～12月12日の期間に東京大学柏キャンパス内の実験室内に設置した、室温等をコントロールした環境試験室内である。被験者は20代男子学生9名である。図3-1に実験のプロトコルを示す。1セット8分間とし、刺激温度の順序を変えた計2セットを行った。基準温度（33℃）に触れているときをレスト期間とし、タスクとして温刺激を40℃と45℃、冷刺激を13℃と23℃とし、タスクの前にはレスト期間をはさむようにしている。

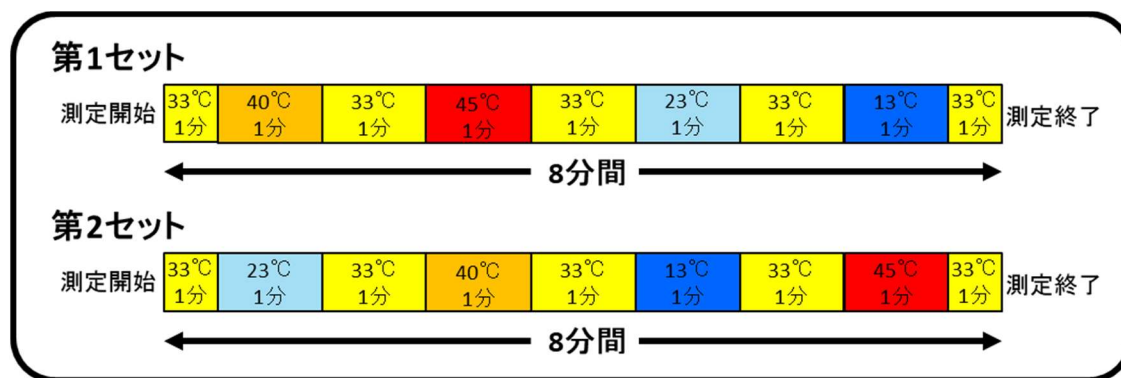


図3-1 実験Iの温度刺激プロトコル

刺激時のOxy-Hb濃度変化は、レスト終了時が基準温度の33℃における感覚、タスク終了時が刺激温度における感覚を表すことを鑑み、レストおよびタスクの終了直前の5秒間平均をとり、両者の差分を温度刺激による効果とした。

3.2 温冷感および快適感の申告結果

第1セットの温冷感申告結果を図3-2、第1セットの快適感申告結果を図3-3、第2セットの温冷感申告結果を図3-4に、第2セットの快適感申告結果を図3-5に示す。温冷感においてはプラスが温感、マイナスが冷感を示している。また、快適感においてはプラスが快適感、マイナスが不快感を示している。グラフの値は21回の実験の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。図3-3より、第1セットにおいて、ほとんどの被験者が40℃に対して快適、45℃、23℃、13℃に対して不快と申告していた。第1セットと第2セットを比較すると、温刺激と冷刺激を交互に与えた第2セットの方が、特定の温度刺激に対する申告に変動が大きい結果となった。

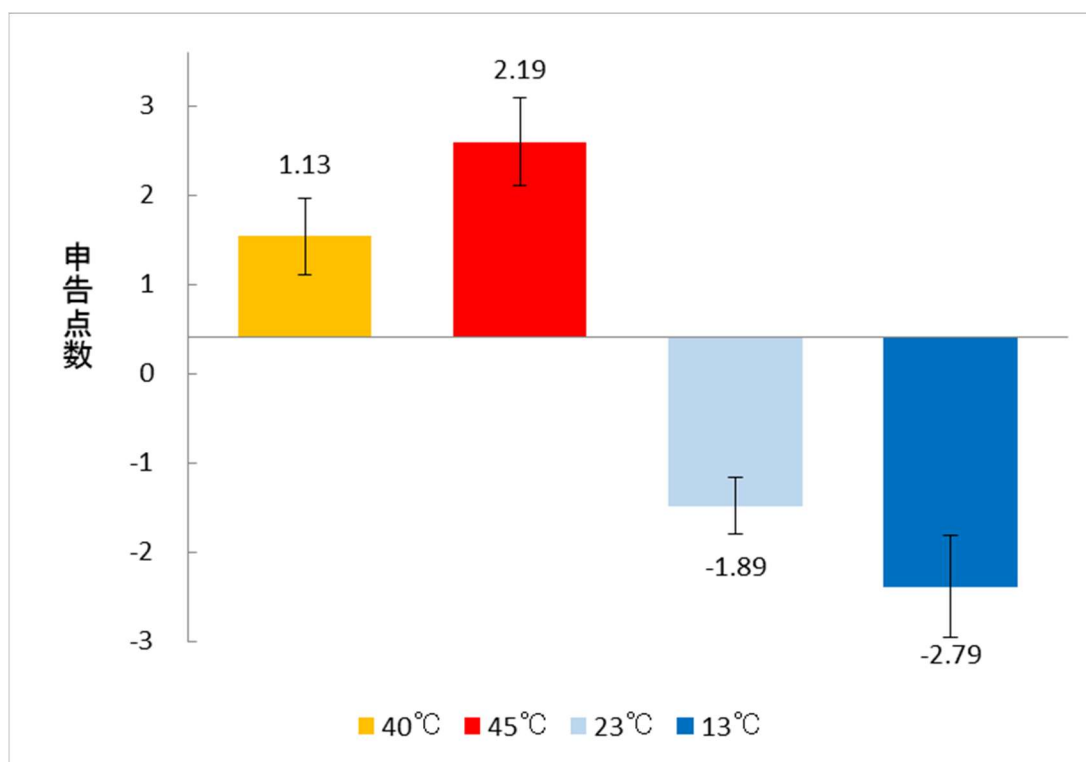


図 3-2 第 1 セットの温冷感申告結果

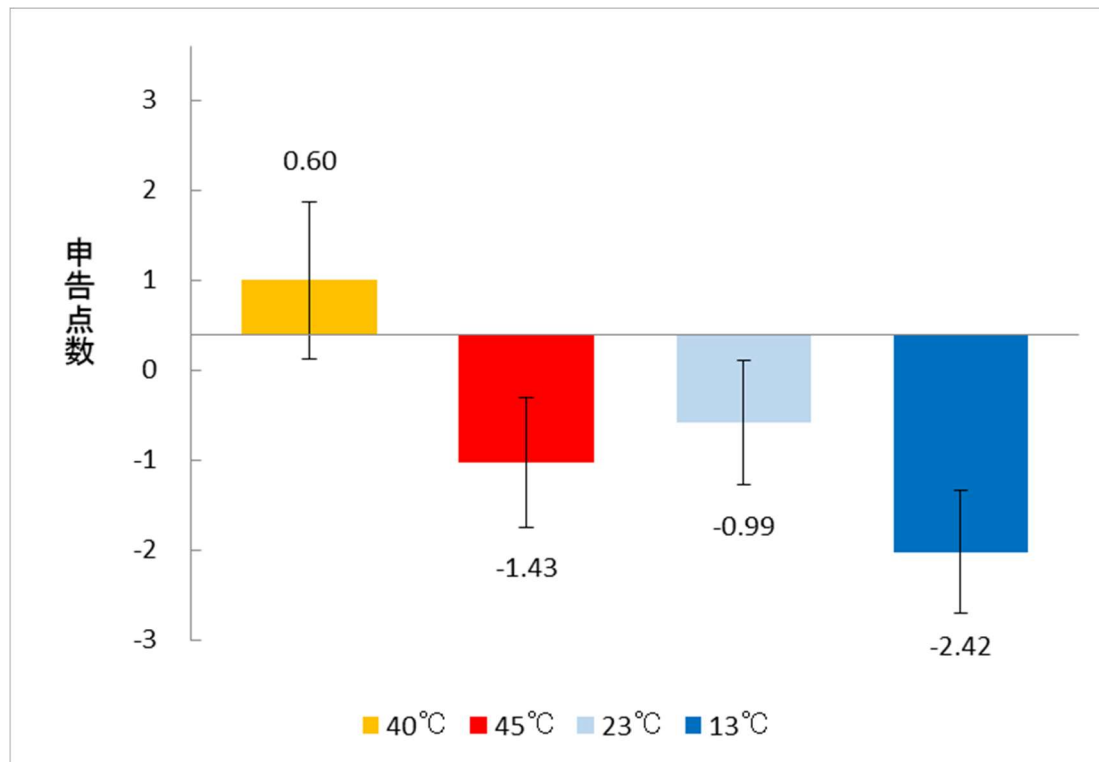


図 3-3 第 1 セットの快適感申告結果

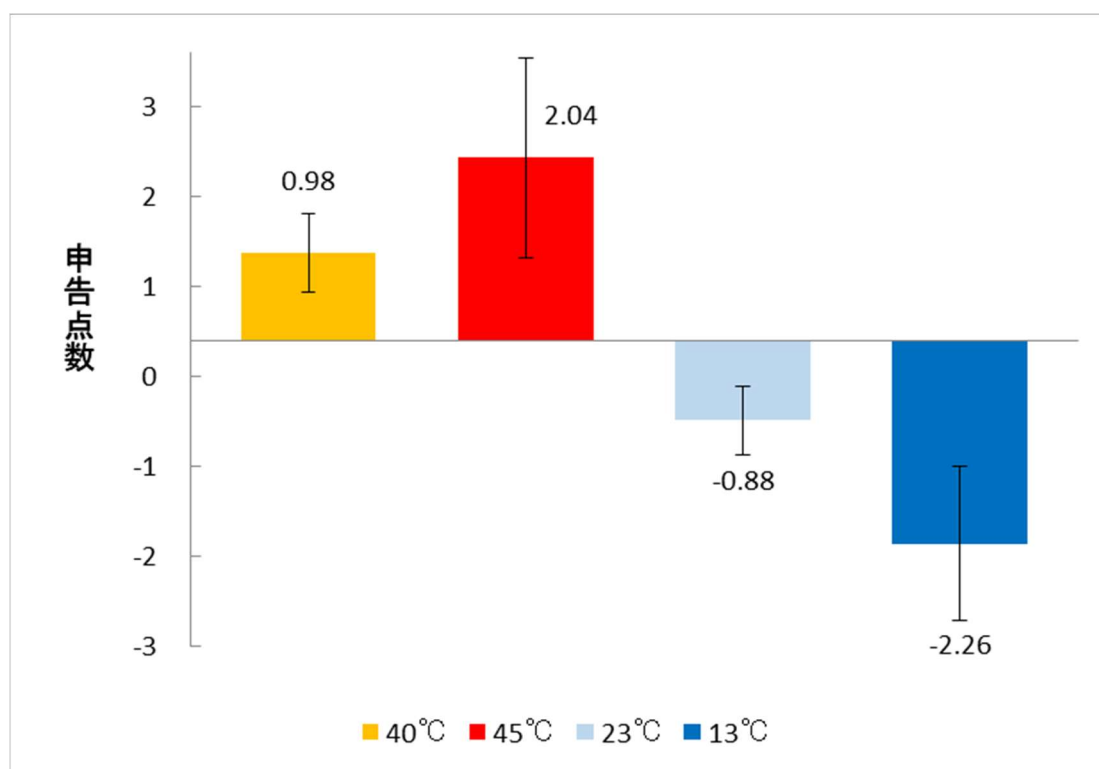


図 3-4 第 2 セットの温冷感申告結果

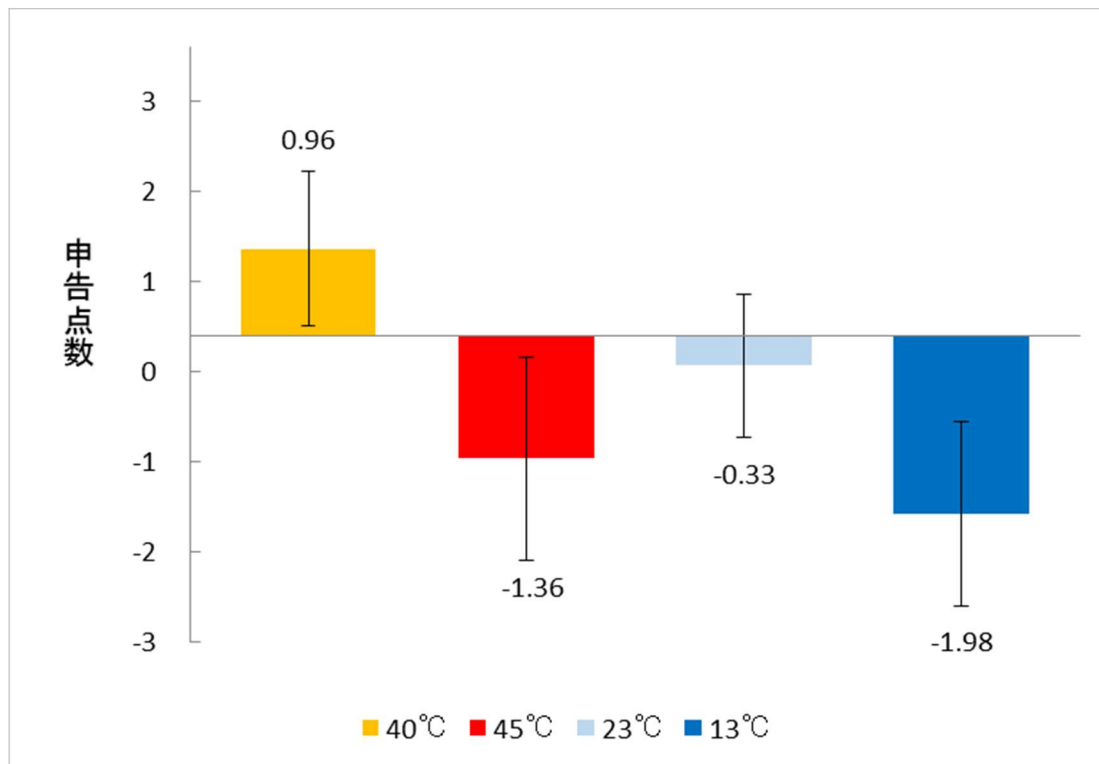


図 3-5 第 2 セットの快適感申告結果

3.3 温冷感および快適感申告との相関

第2章で示した方法で処理したした $Zscore'$ について、40℃、45℃、23℃、13℃それぞれのタスク終了(申告)直前の5秒間平均とタスク開始(申告)直前の5秒間平均の差分を算出し、それぞれの温冷感および快適感との相関性を調べた。4つの刺激温度を図3-6のように色を分けて示した。



図 3-6 温度別の色分け

3.3.1 被験者9人の結果

図3-7および図3-8に、被験者9人の1回目第1セットの前頭(ch1～ch22)における結果を示す。前節と同様に、縦軸は40℃、45℃、23℃、13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。また、散布図の相関関係を線形近似で求めている。

温冷感申告相関については、全てのチャンネルにおいてプラスの傾きをもつ近似直線となり、また快適感申告相関についても、全てのチャンネルにおいてプラスの傾きをもつ近似直線となった。

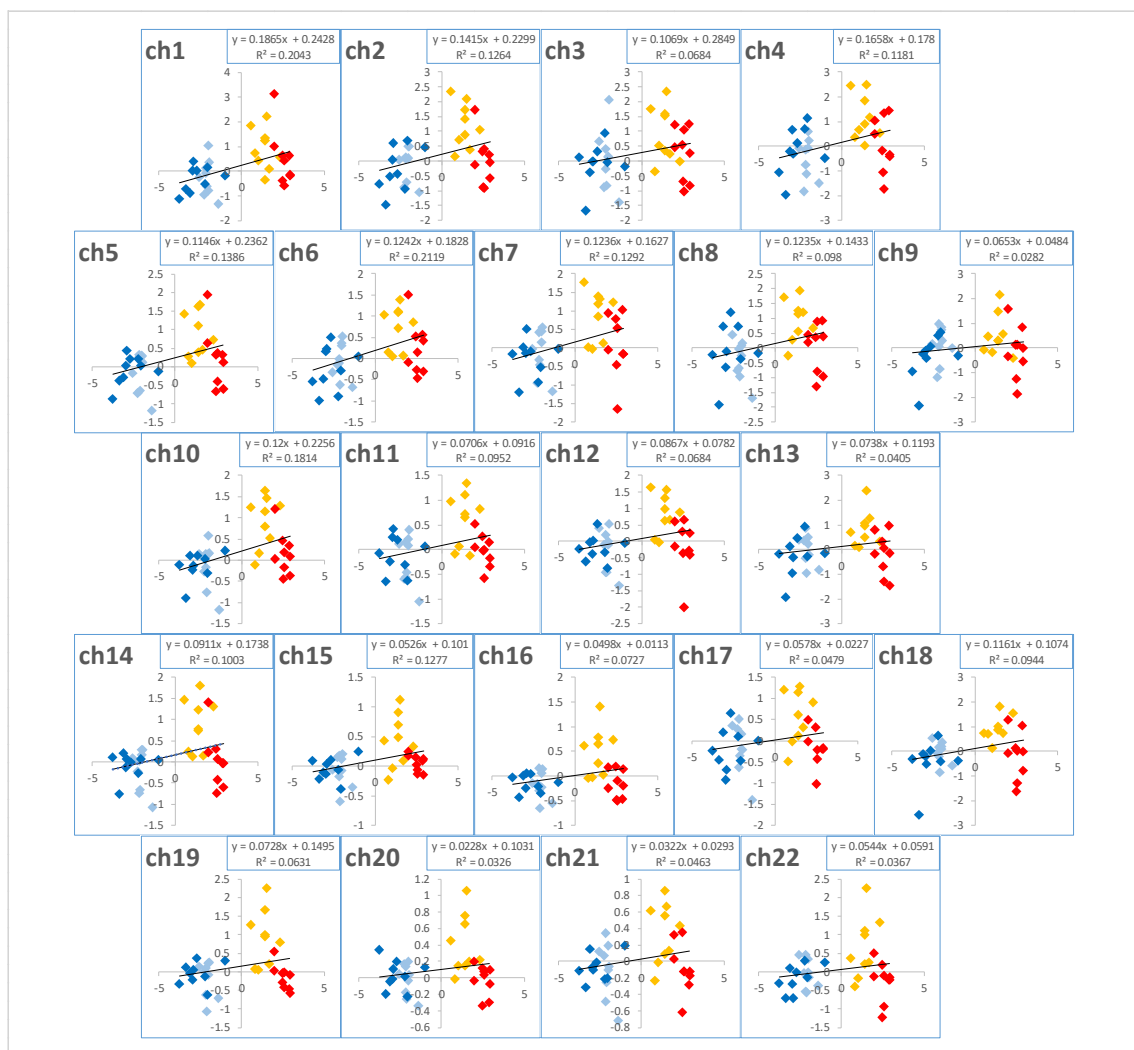


図 3-7 被験者 9 人の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

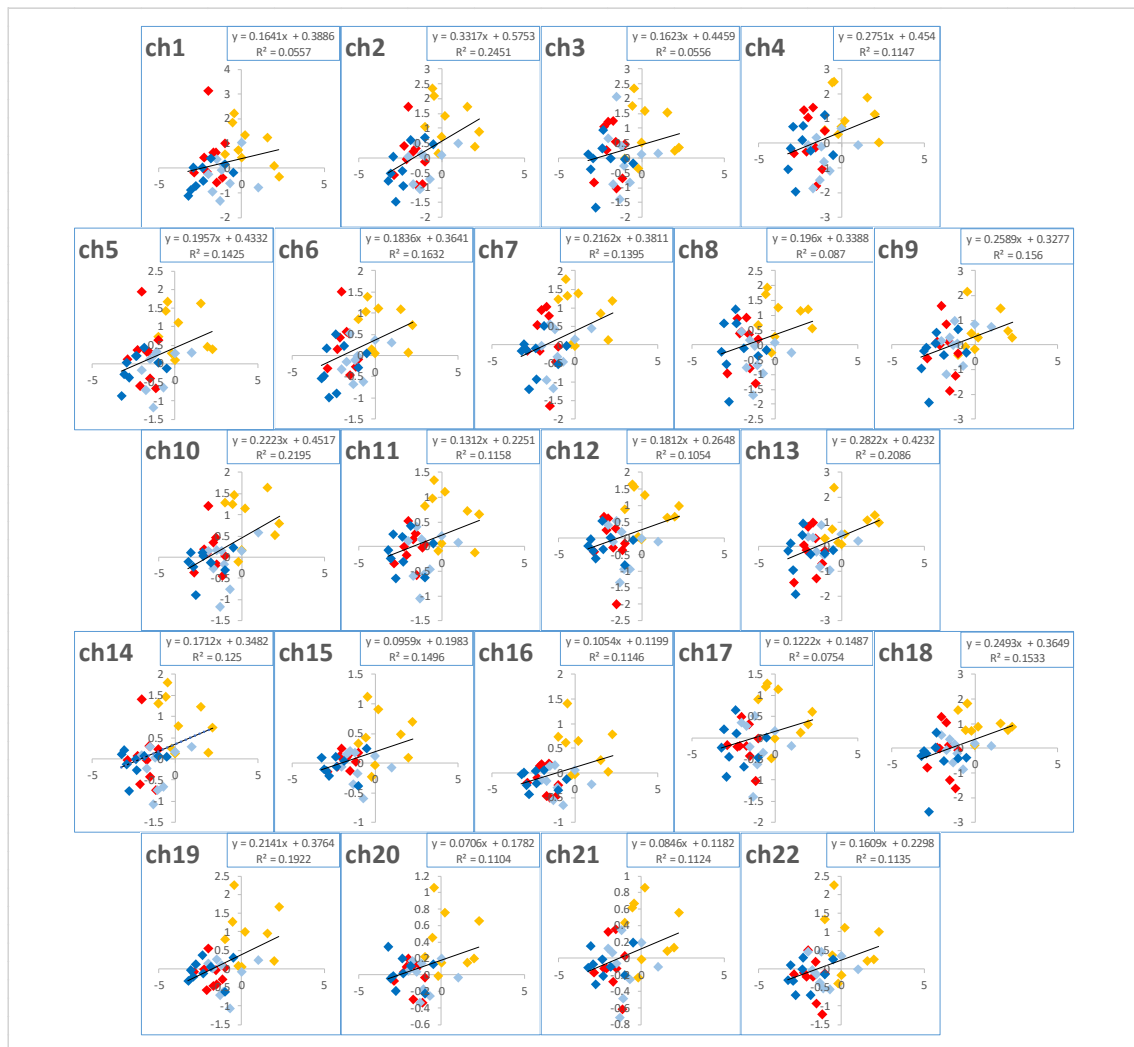


図 3-8 被験者 9 人の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

3.3.2 被験者 A の結果

図 3-9 および図 3-10 に、被験者 A の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分, 横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 3-11 に、被験者 A の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

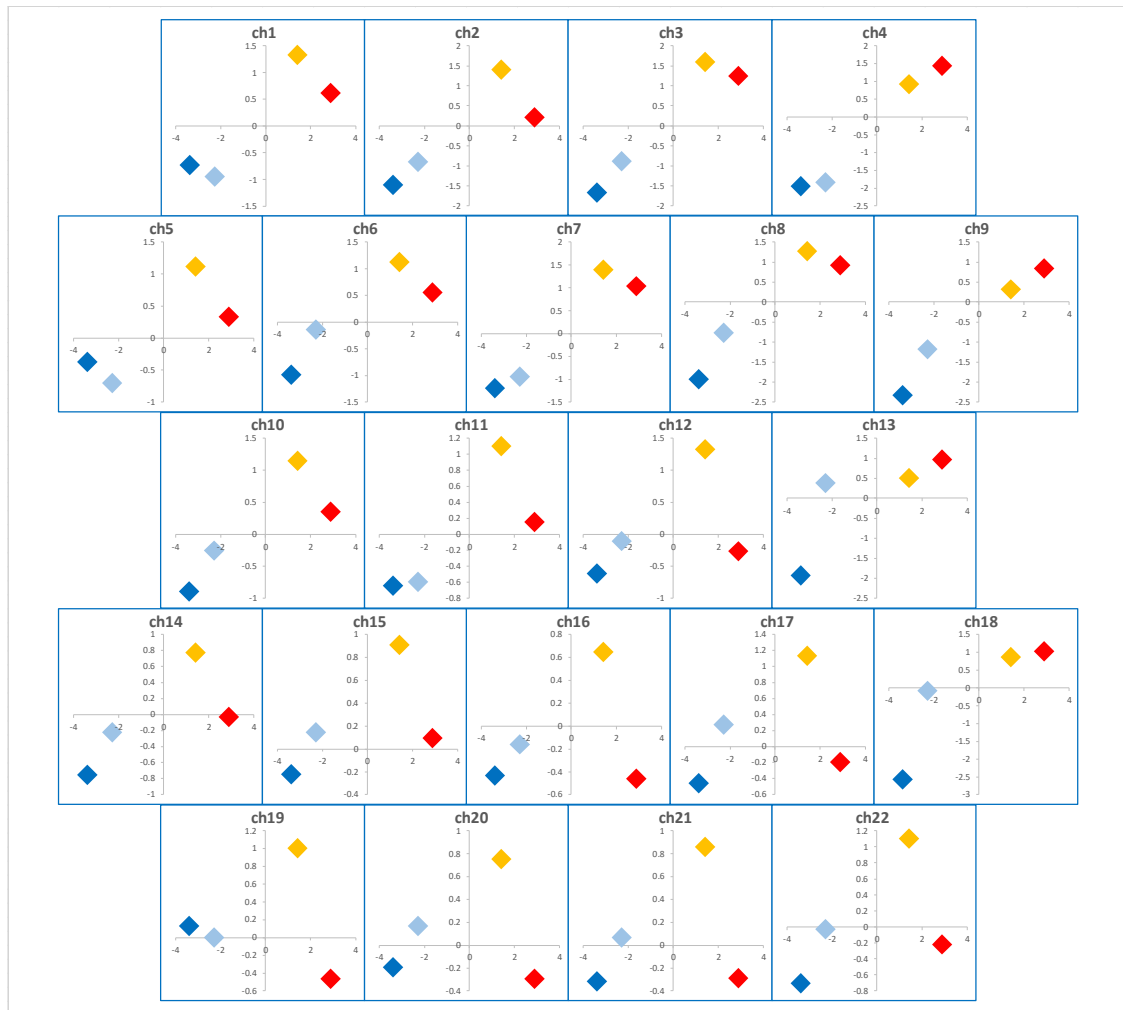


図 3-9 被験者 A の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸 : 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分
横軸 : 温冷感の申告値

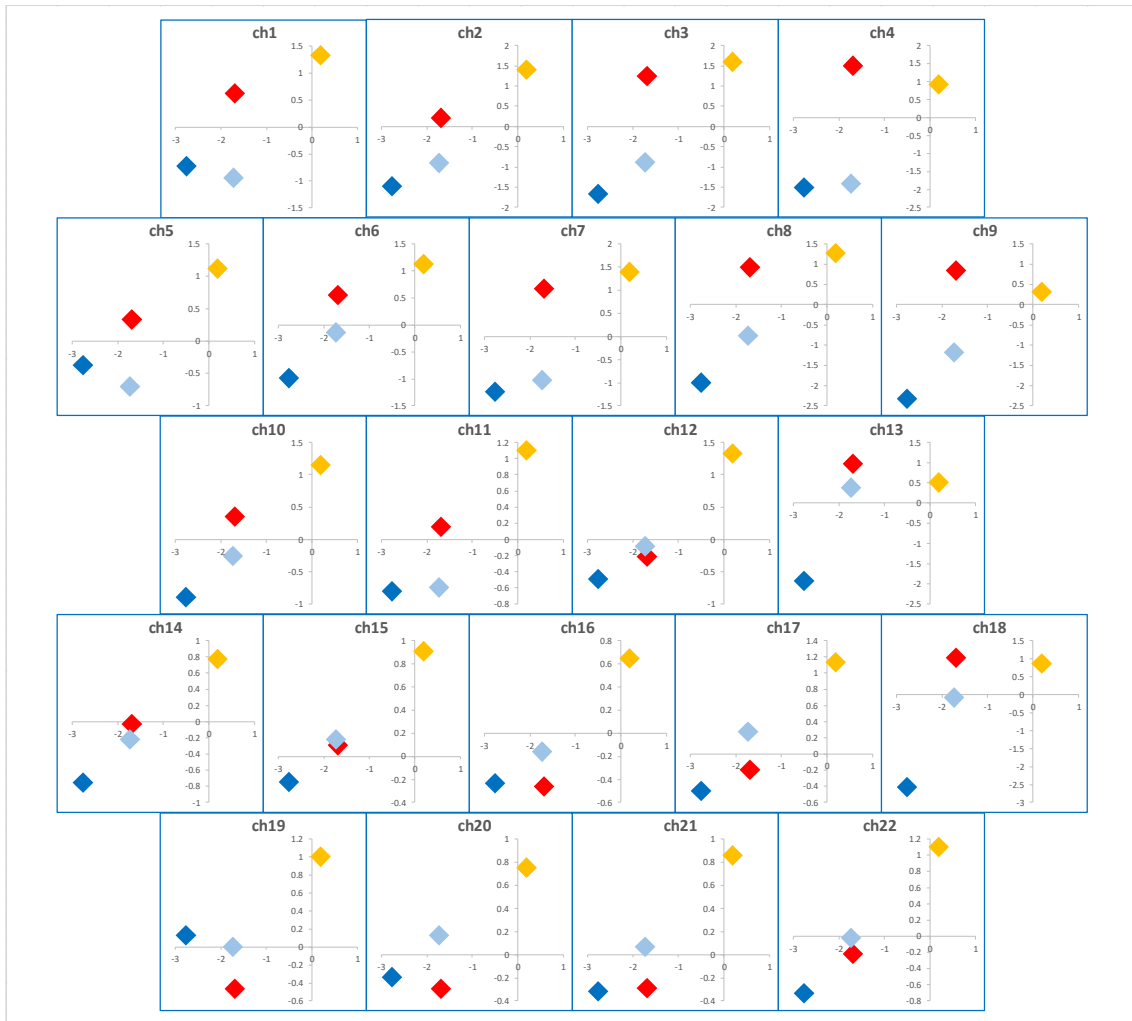


図 3-10 被験者 A の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃、45℃、23℃、13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分
 横軸：快適感の申告値

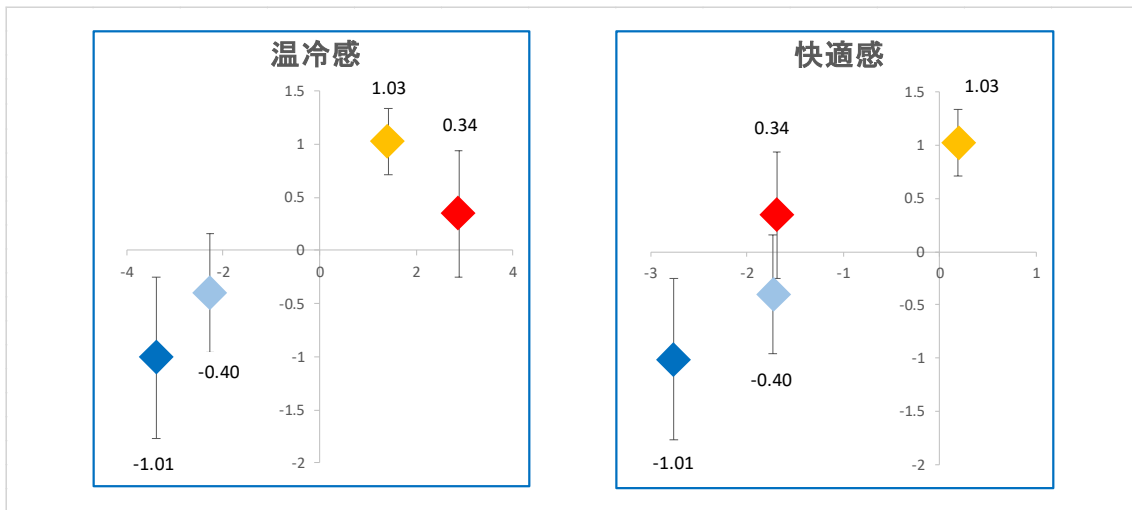


図 3-11 被験者 A の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1~ch22 の平均)

3.3.3 被験者 B の結果

図 3-12 および図 3-13 に、被験者 B の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40°C, 45°C, 23°C, 13°C の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33°C の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 3-14 に、被験者 B の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

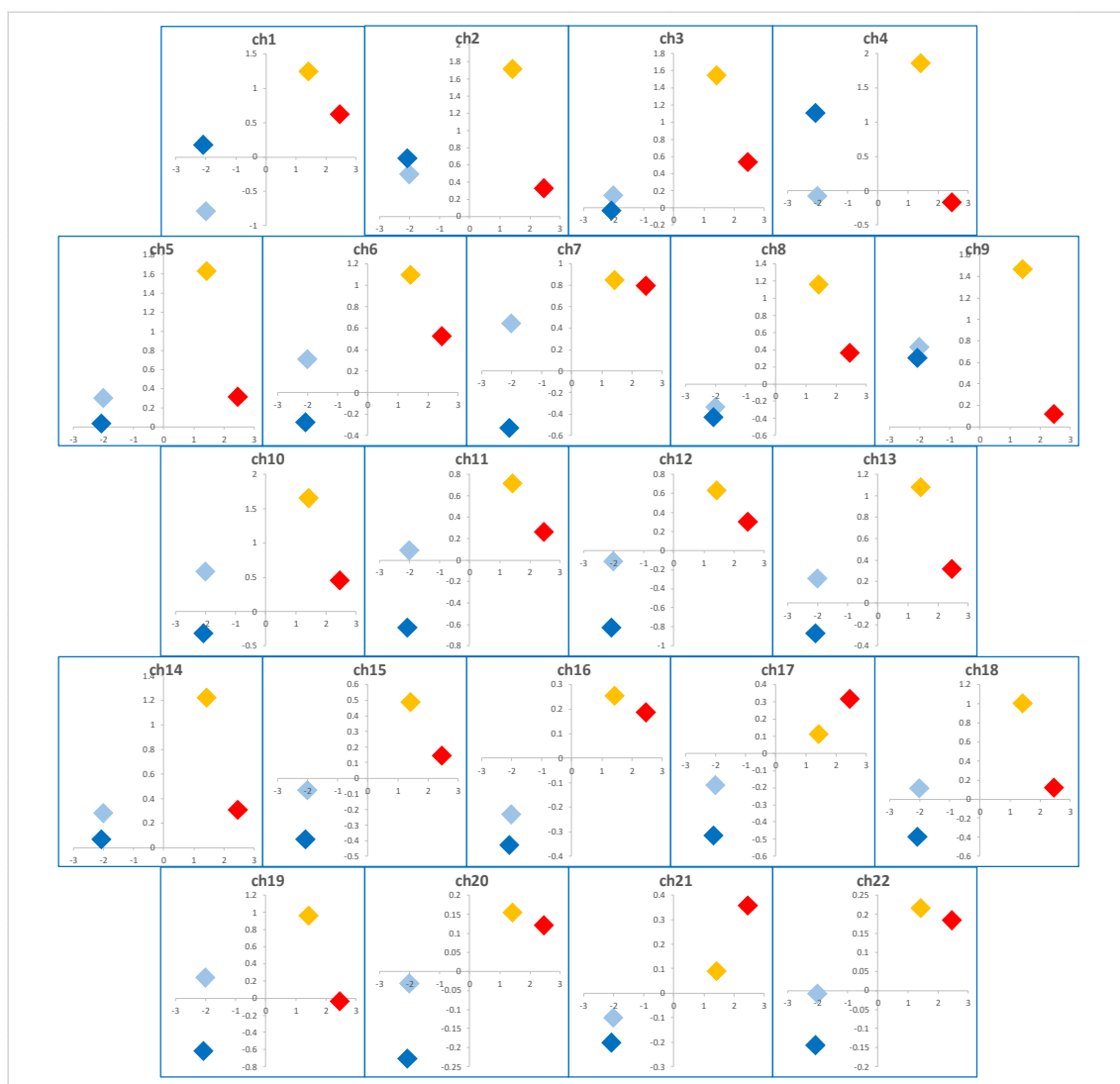


図 3-12 被験者 B の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40°C, 45°C, 23°C, 13°C の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33°C の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

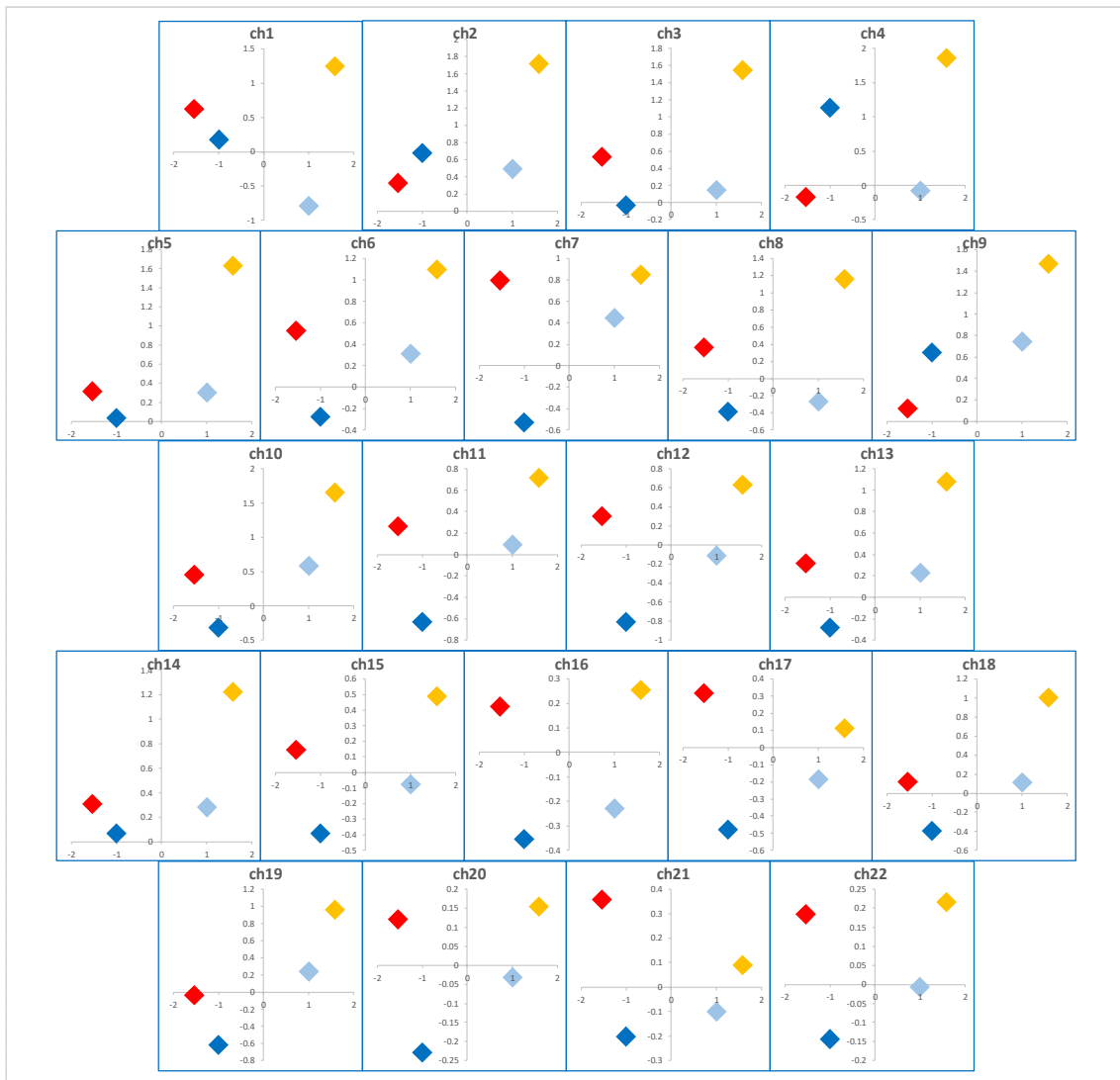


図 3-13 被験者 B の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

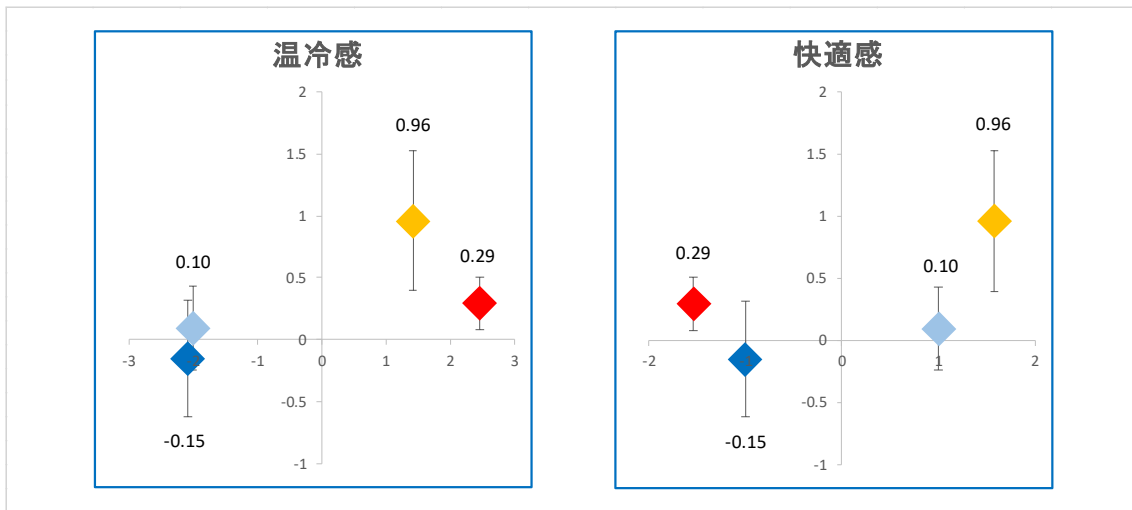


図 3-14 被験者 B の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1~ch22 の平均)

3.3.4 被験者 C の結果

図 3-15 および図 3-16 に、被験者 C の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 3-17 に、被験者 C の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

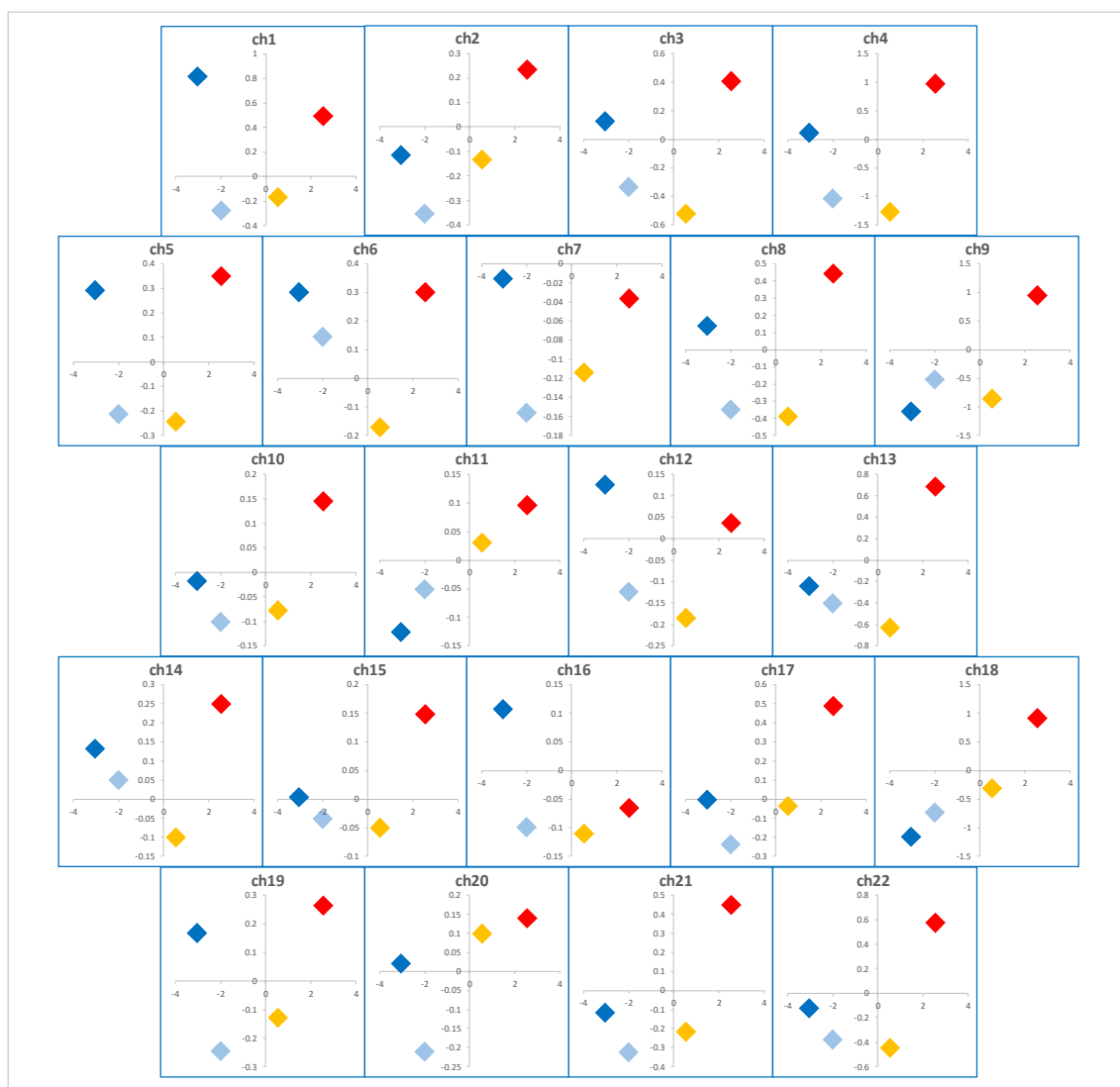


図 3-15 被験者 C の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

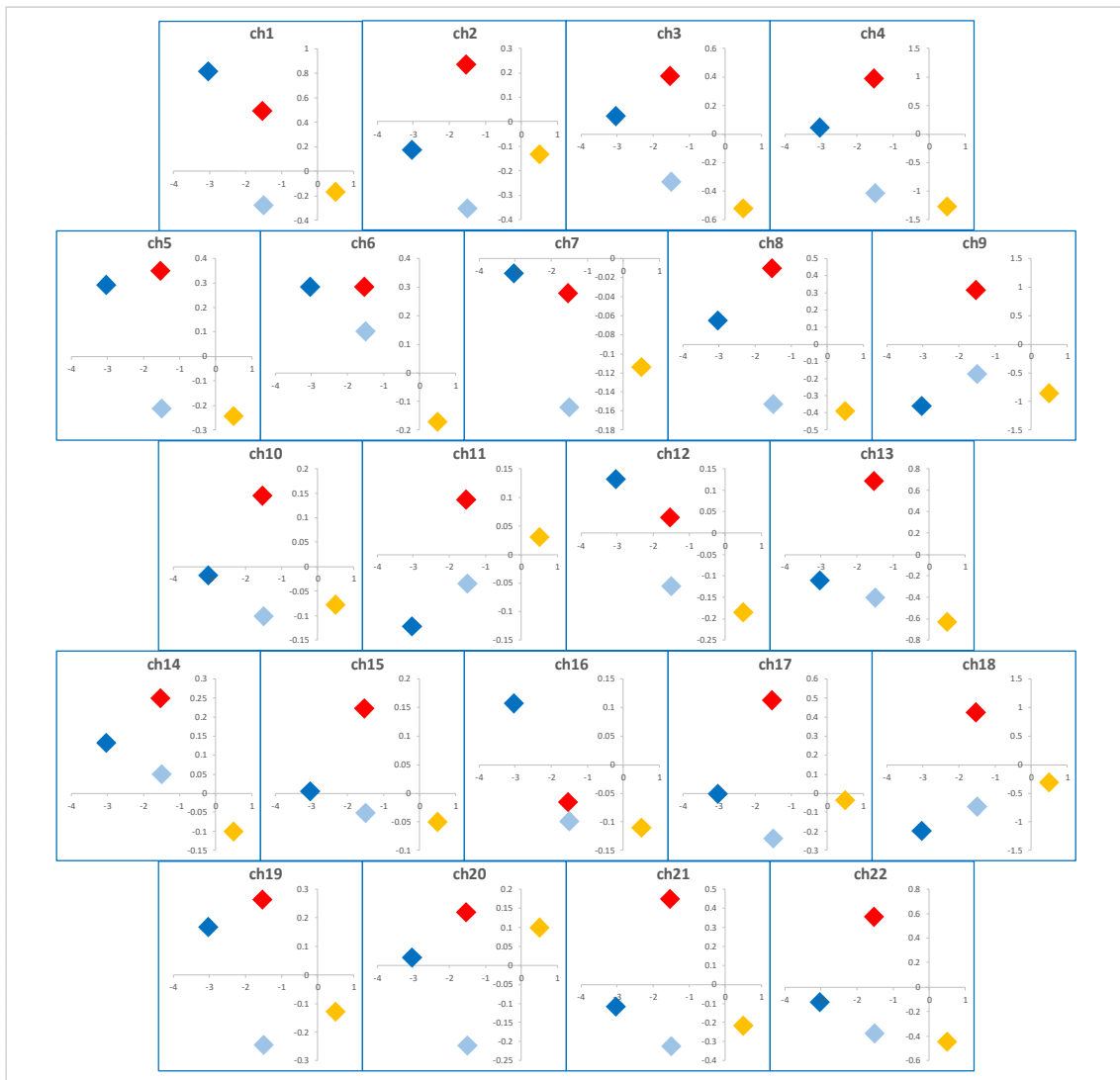


図 3-16 被験者 C の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

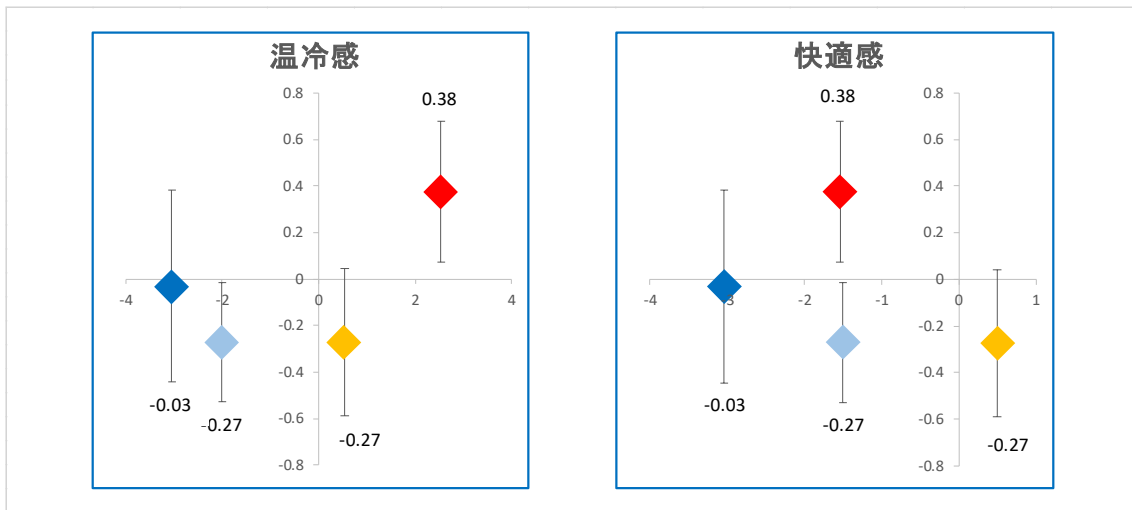


図 3-17 被験者 C の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1～ch22 の平均)

3.3.5 被験者 D の結果

図 3-18 および図 3-19 に、被験者 D の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 3-20 に、被験者 D の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

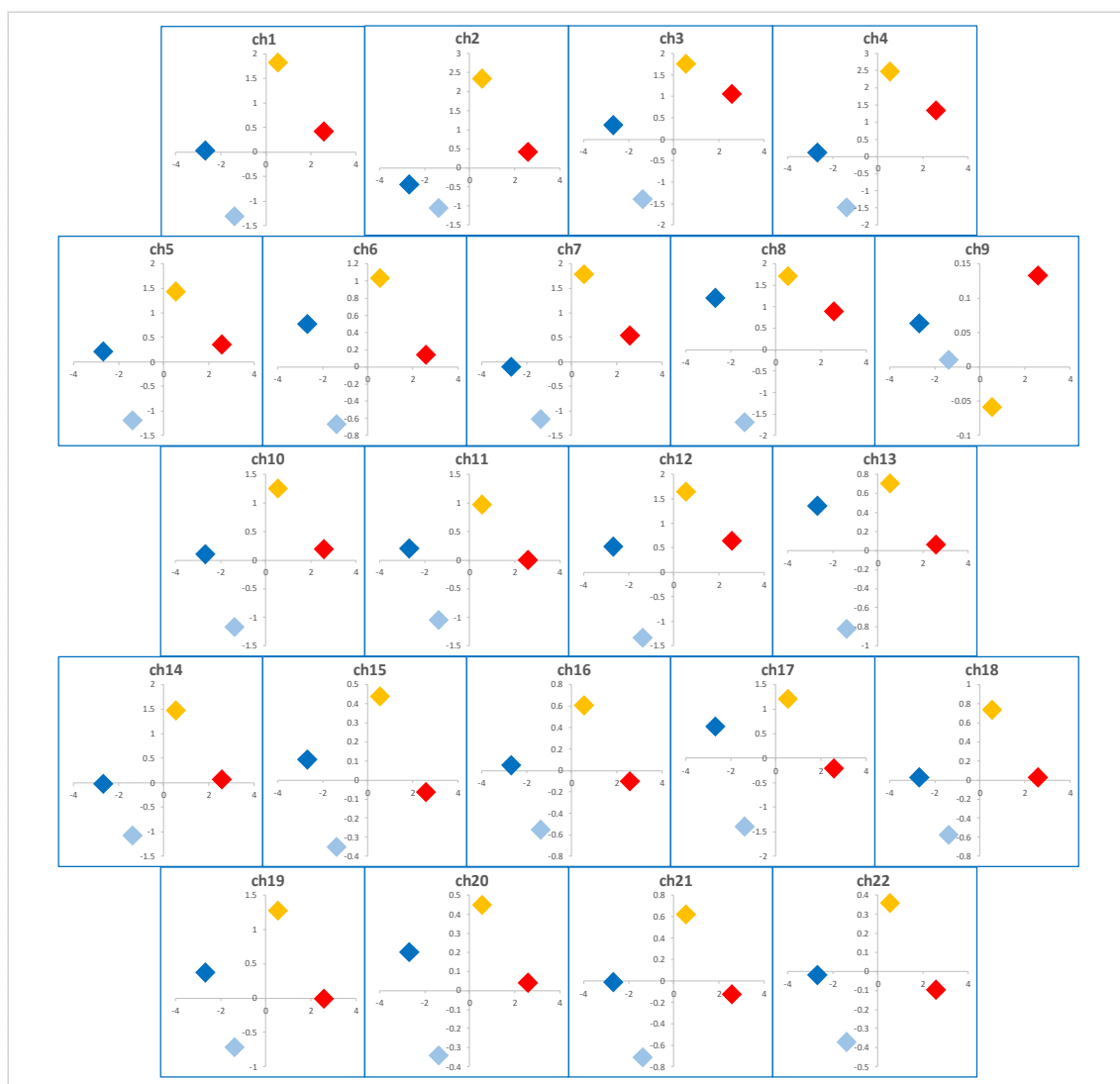


図 3-18 被験者 D の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

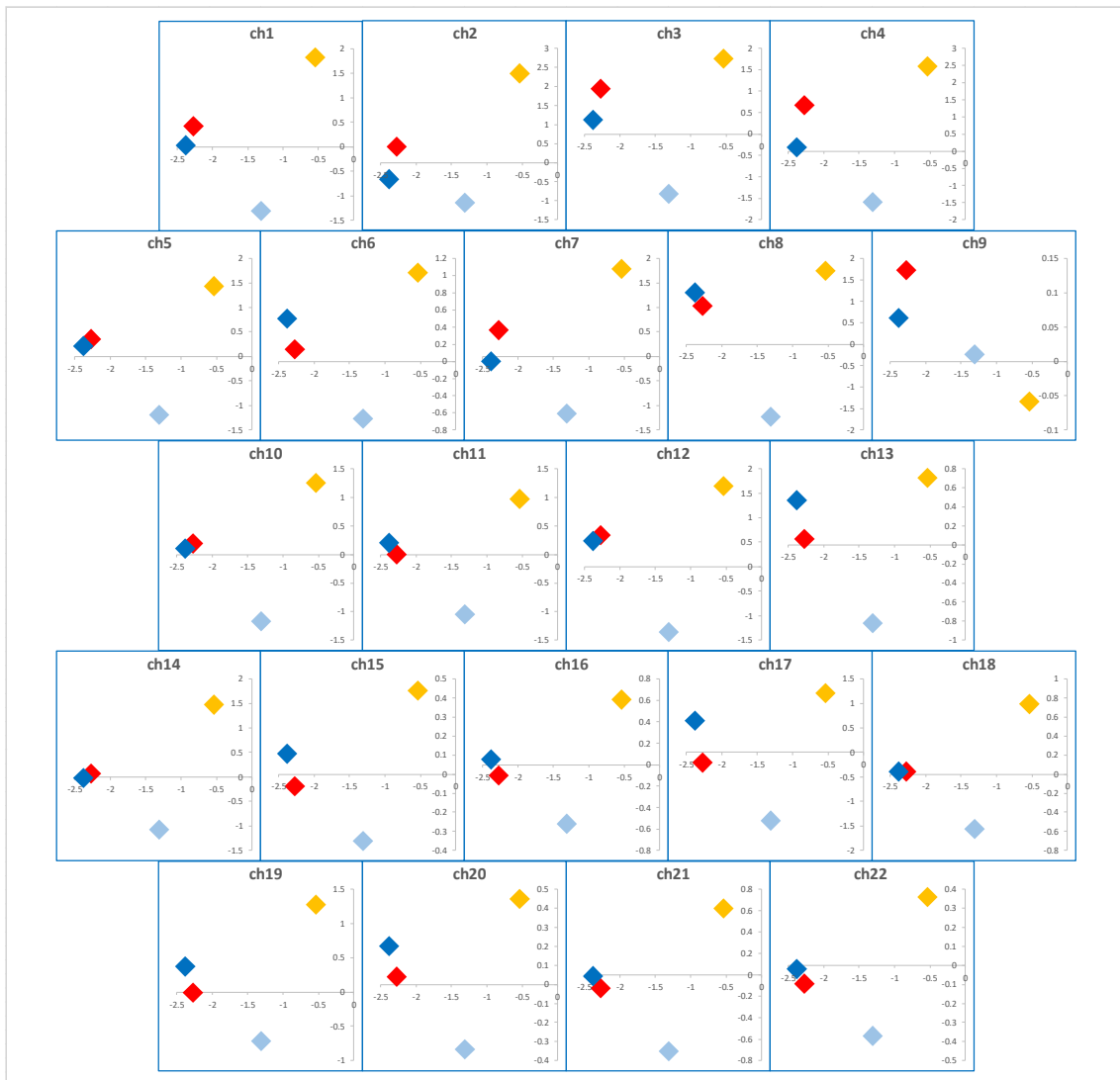


図 3-19 被験者 D の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

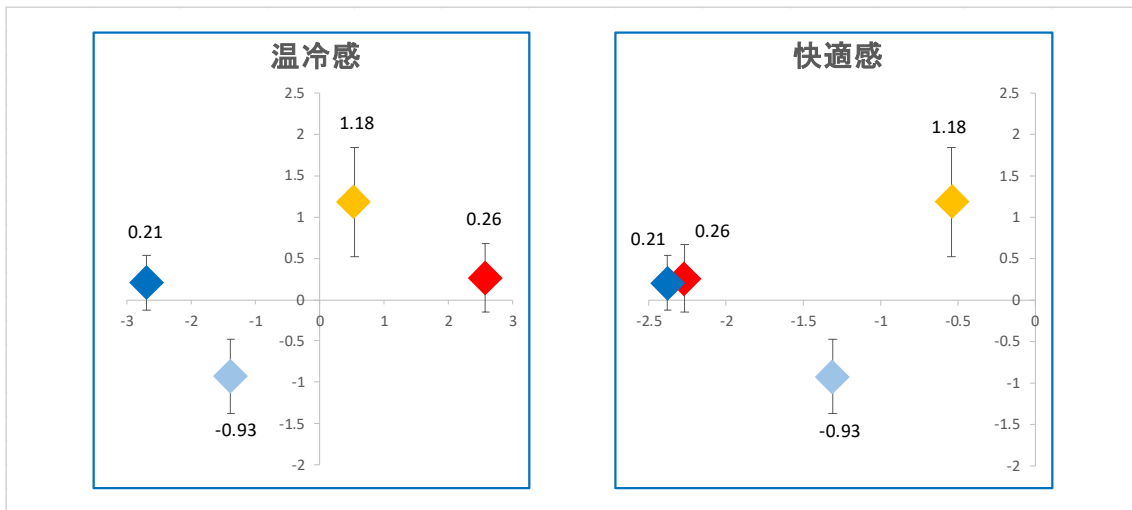


図 3-20 被験者 D の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1~ch22 の平均)

3.3.6 被験者 E の結果

図 3-21 および図 3-22 に、被験者 E の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 3-23 に、被験者 E の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

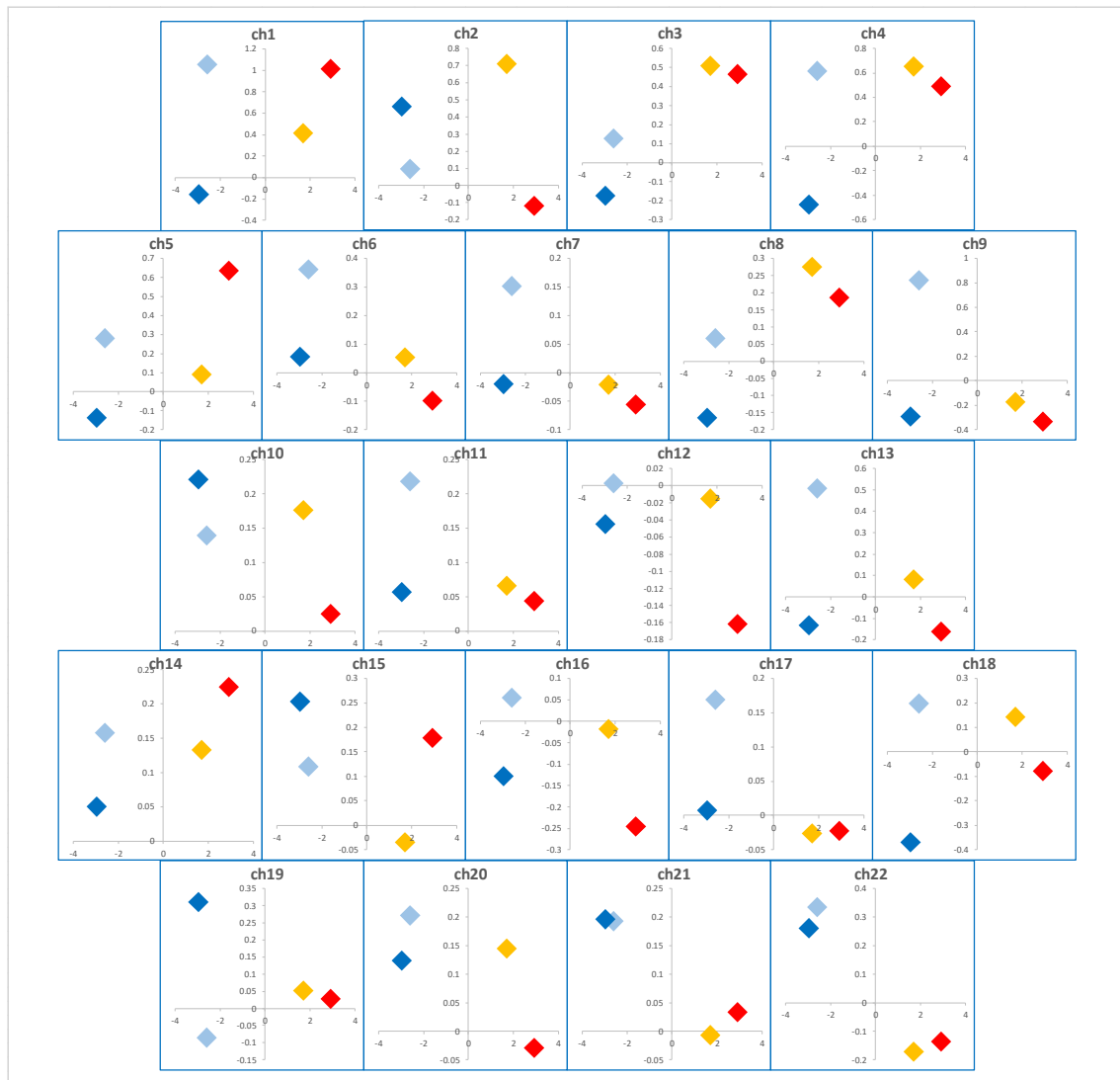


図 3-21 被験者 E の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

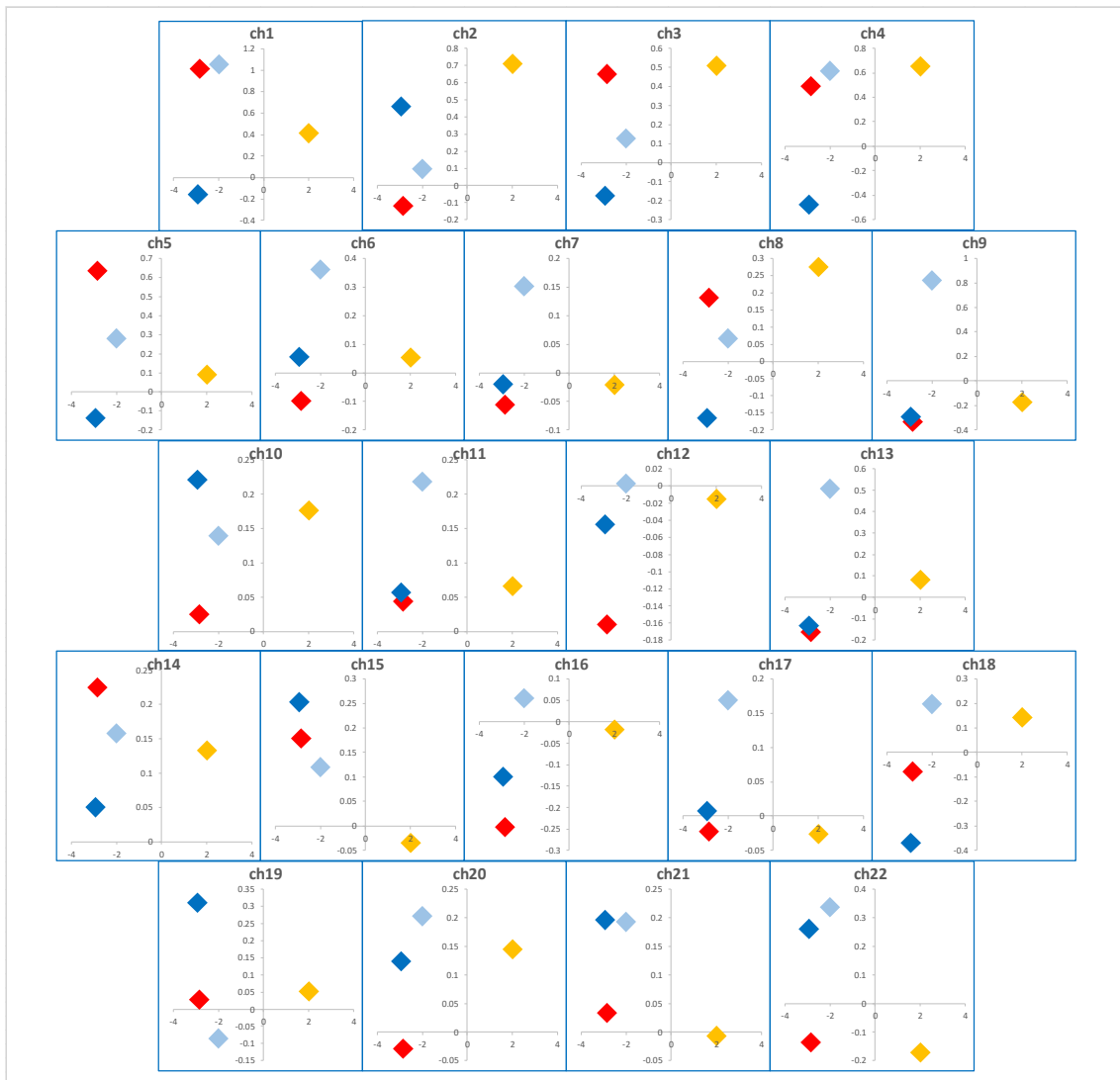


図 3-22 被験者 E の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

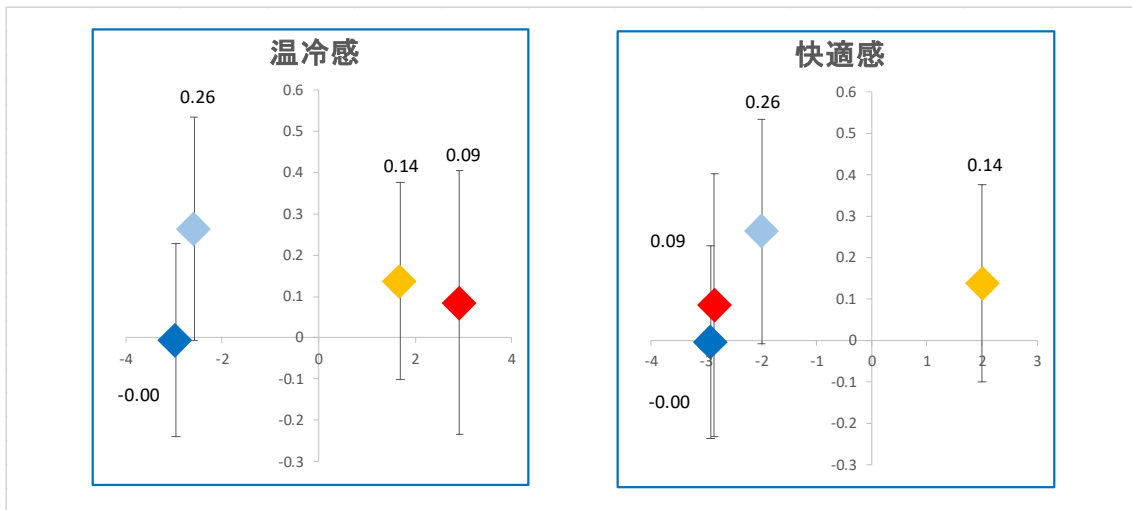


図 3-23 被験者 E の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1～ch22 の平均)

3.3.7 被験者 F の結果

図 3-24 および図 3-25 に、被験者 F の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 3-26 に、被験者 F の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

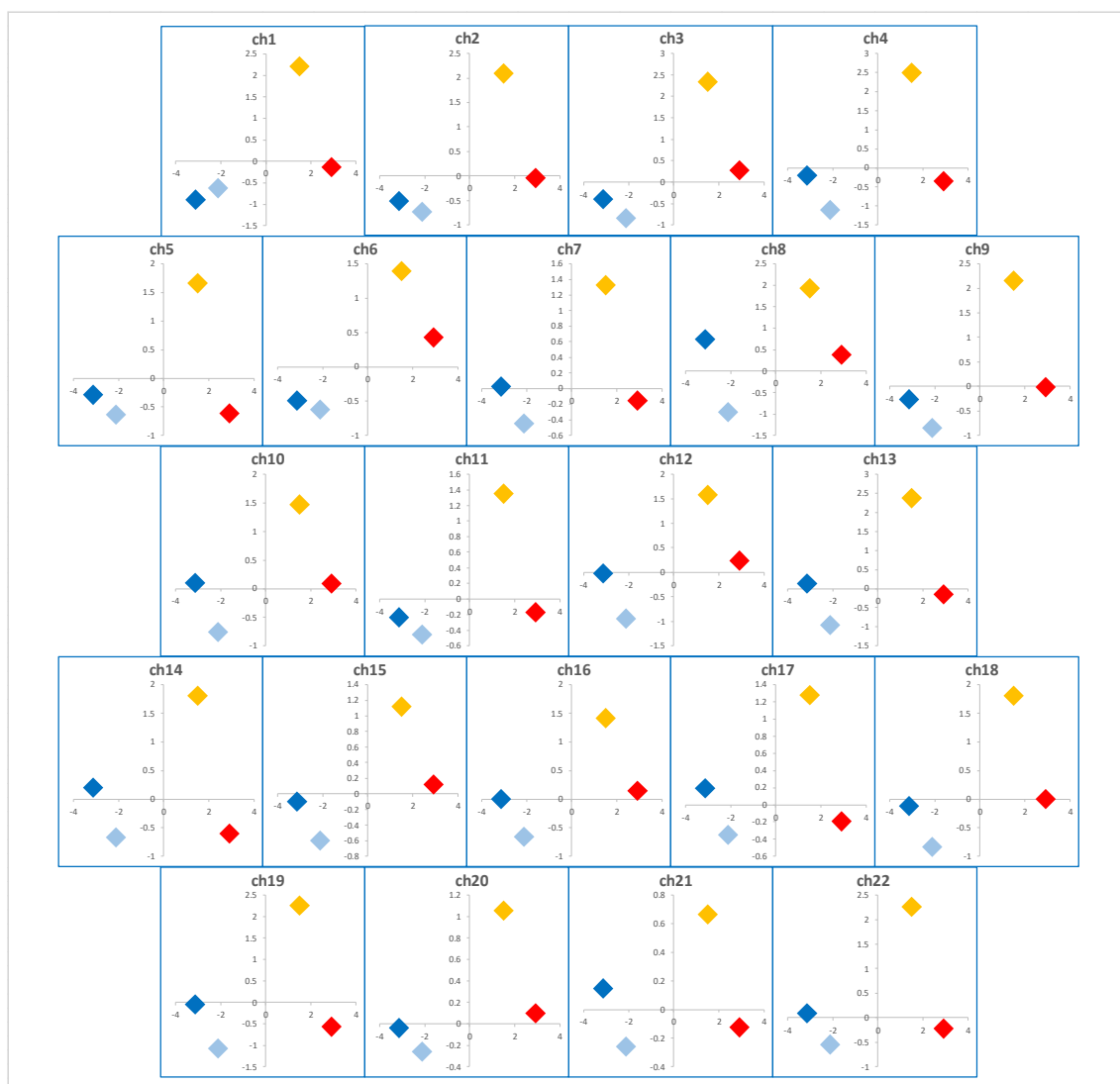


図 3-24 被験者 F の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

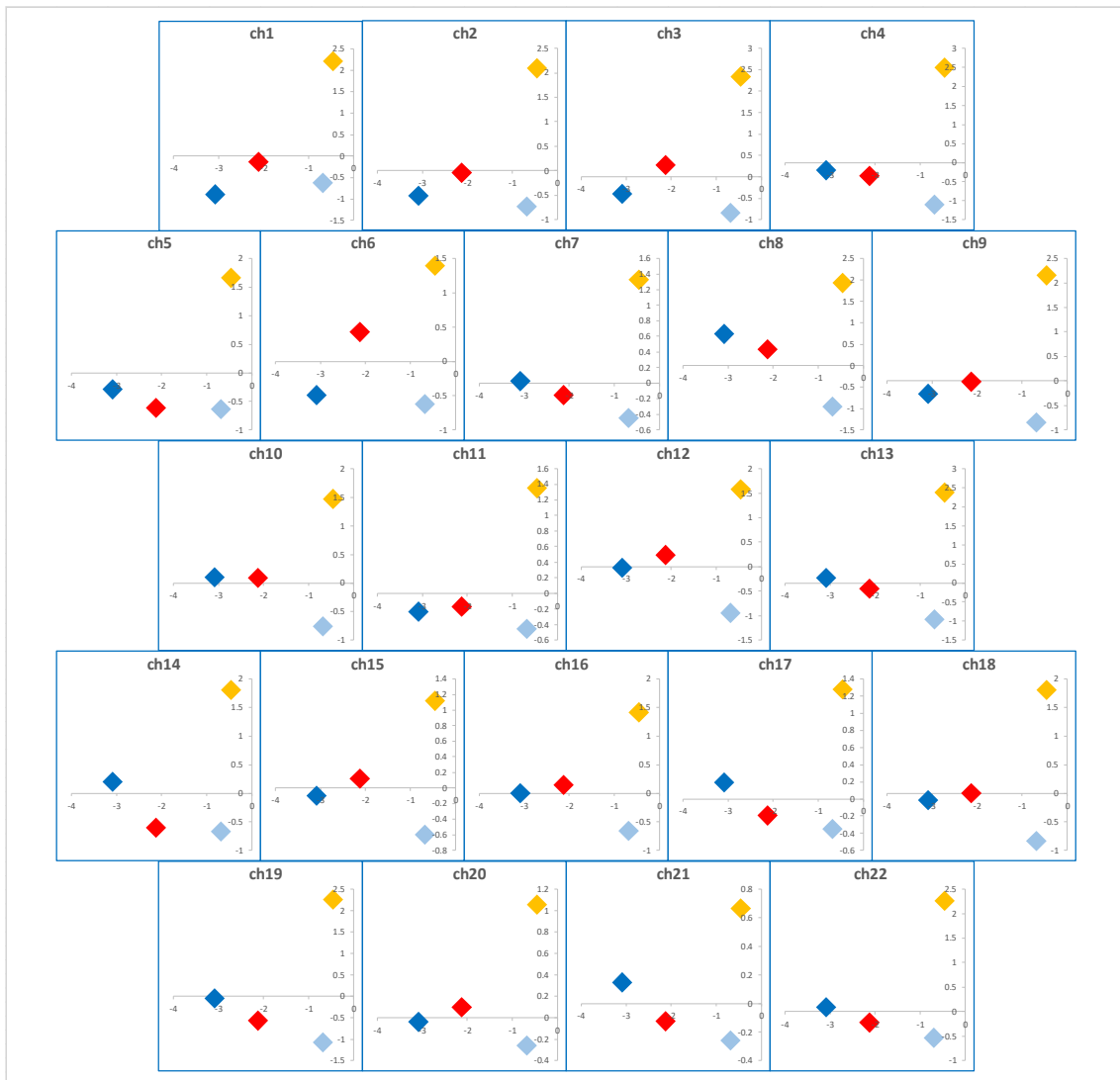


図 3-25 被験者 F の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

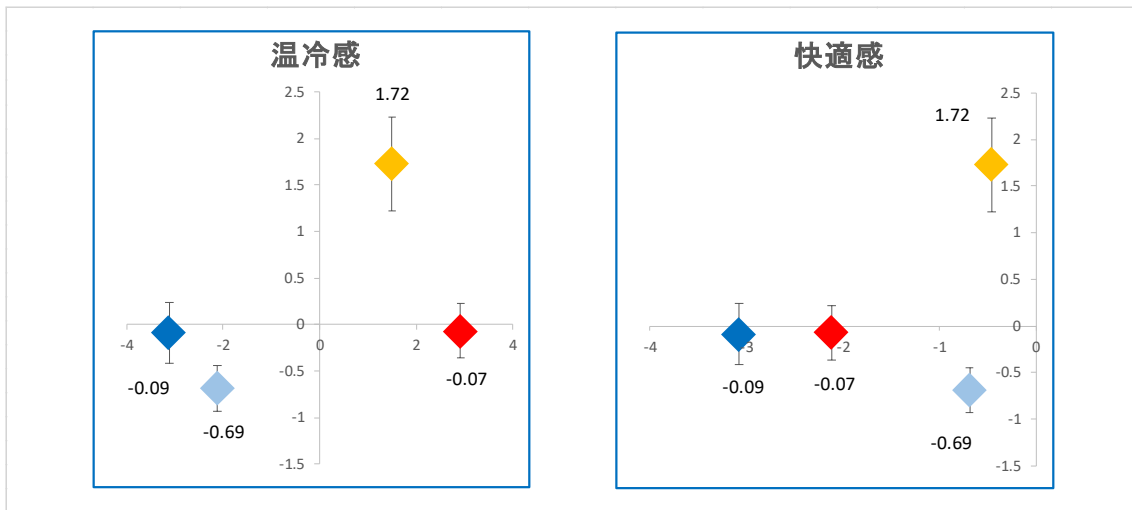


図 3-26 被験者 F の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1~ch22 の平均)

3.3.8 被験者 G の結果

図 3-27 および図 3-28 に、被験者 G の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 3-29 に、被験者 G の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

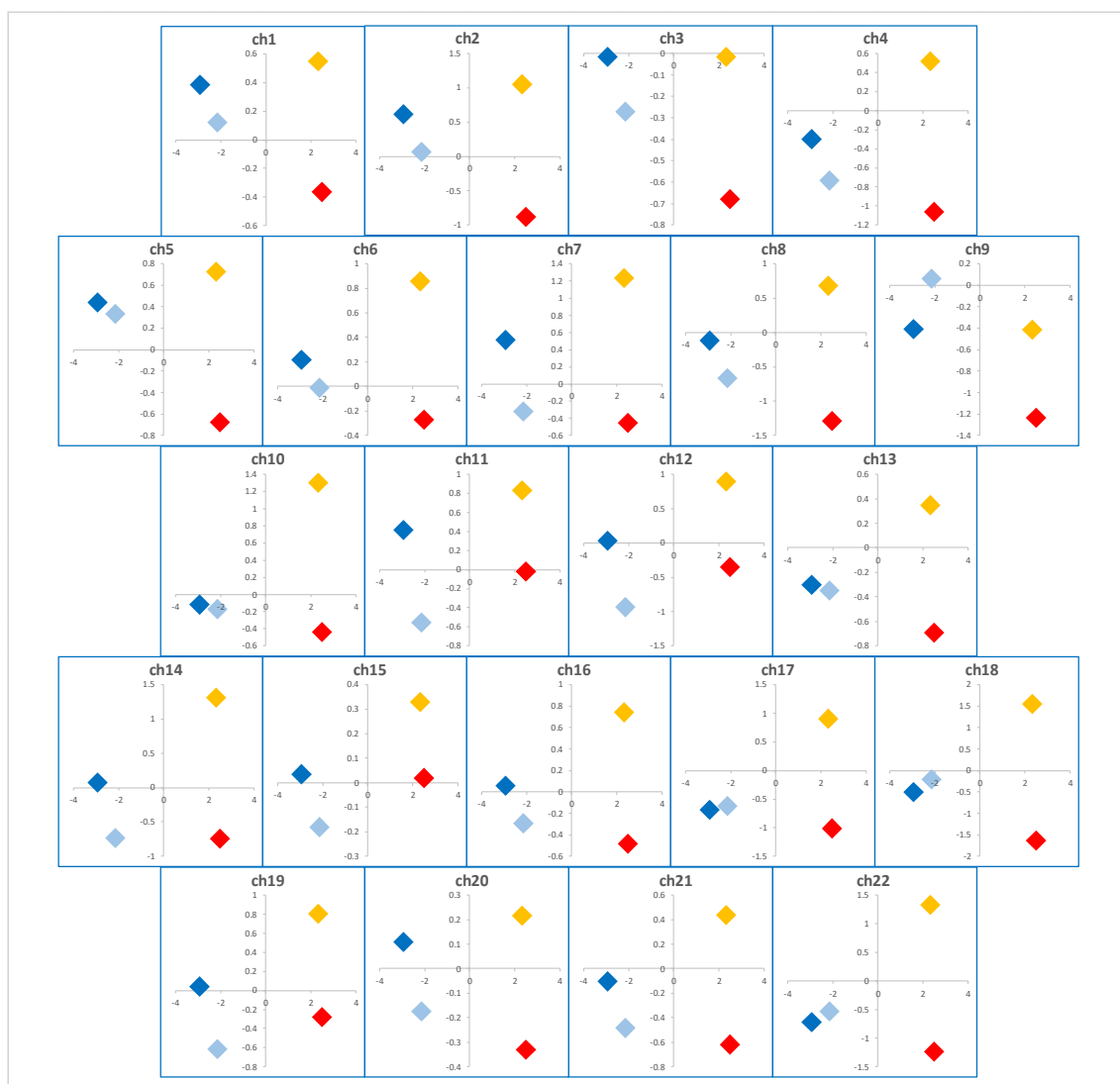


図 3-27 被験者 G の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

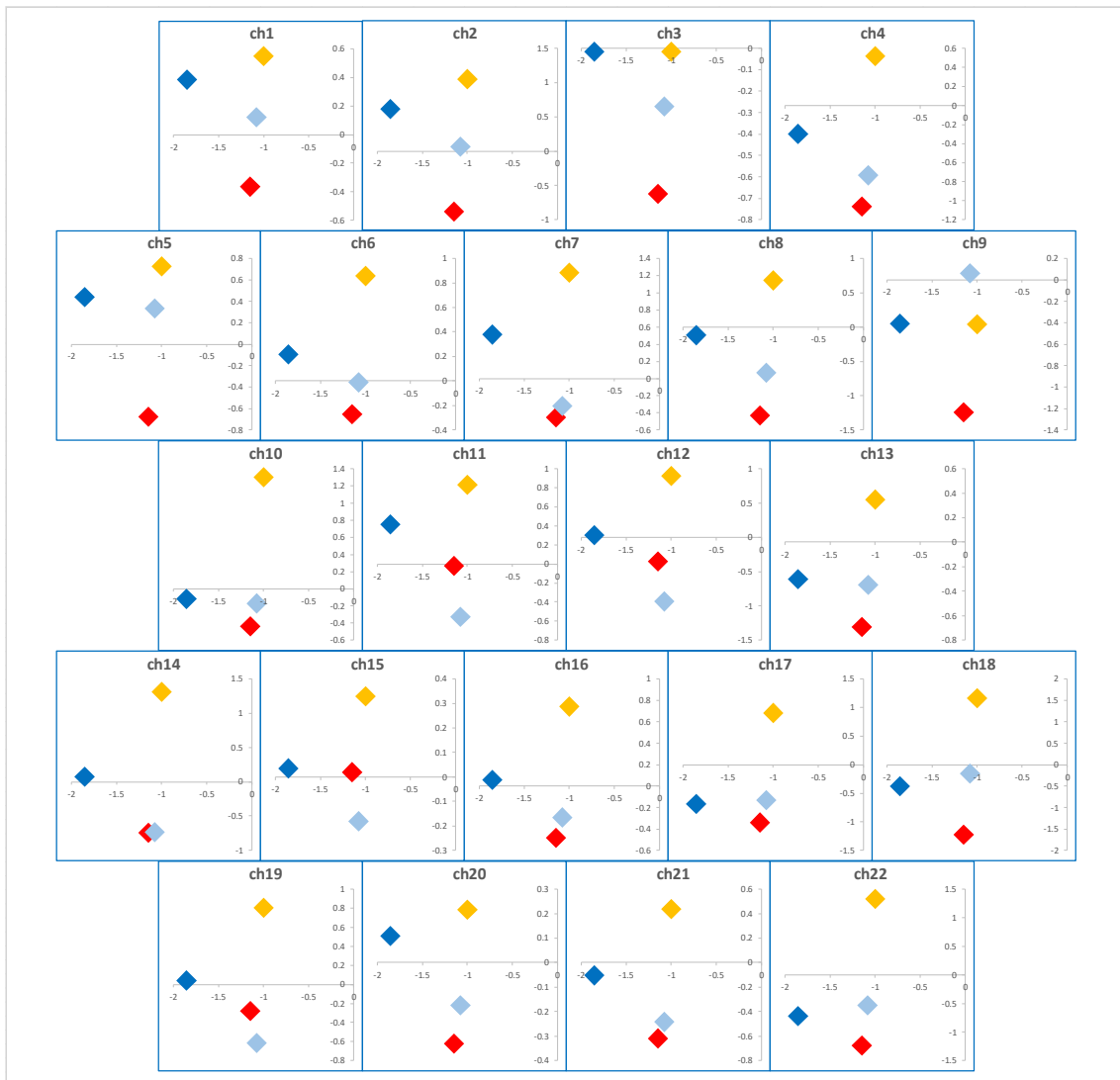


図 3-28 被験者 G の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

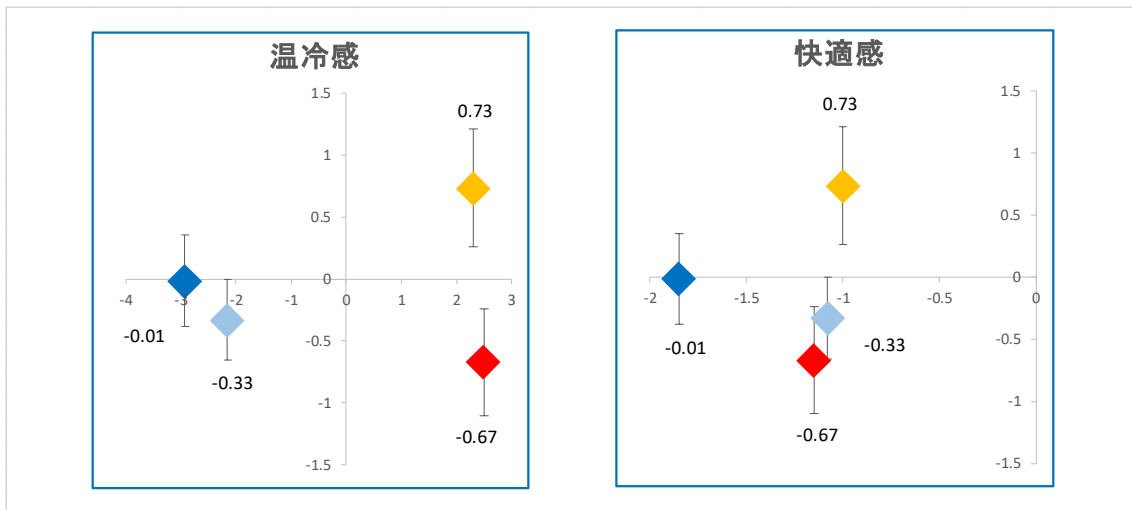


図 3-29 被験者 G の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1～ch22 の平均)

3.3.9 被験者 H の結果

図 3-30 および図 3-31 に、被験者 H の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 3-32 に、被験者 H の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

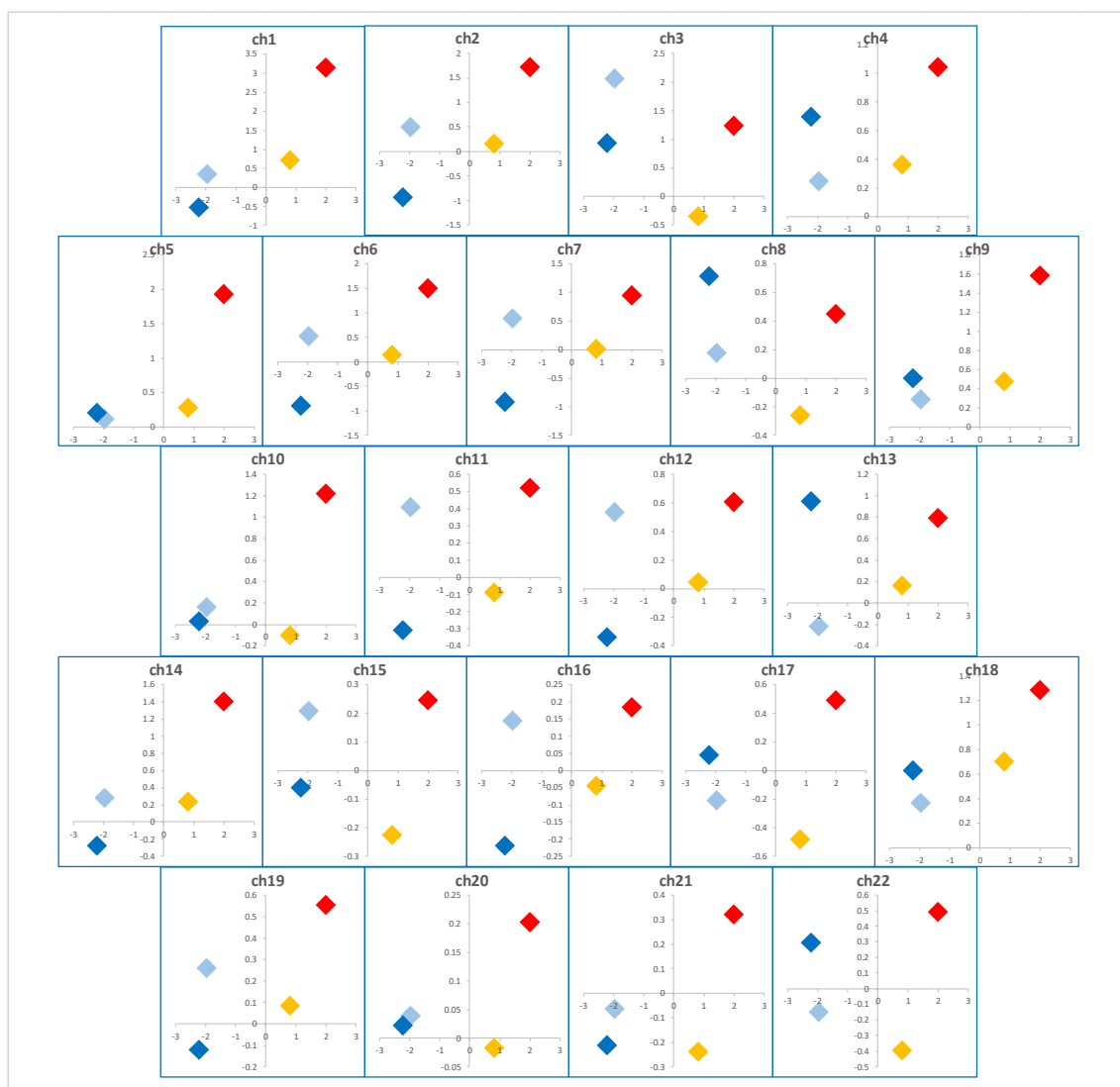


図 3-30 被験者 H の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

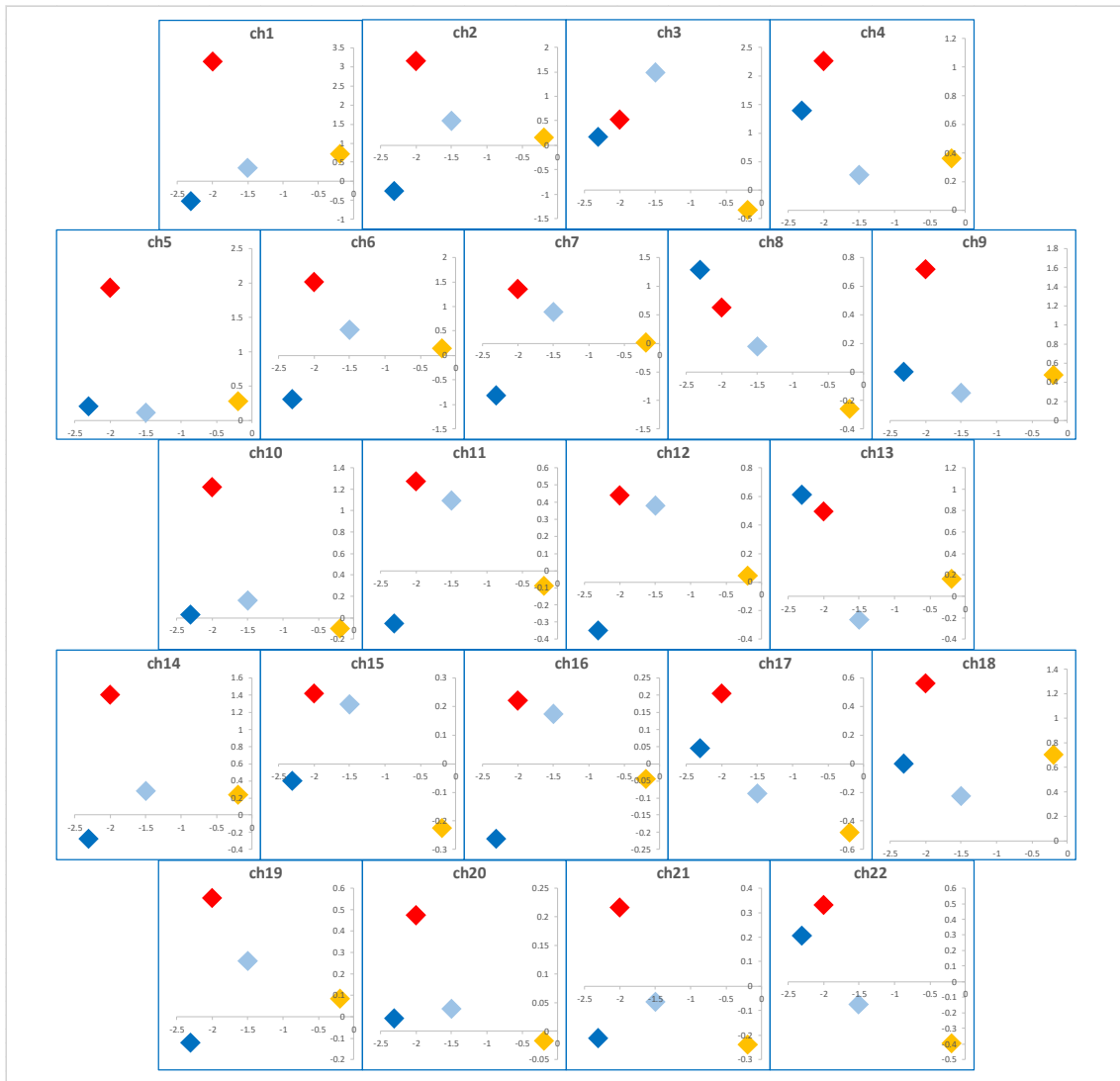


図 3-31 被験者 H の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分
 横軸：快適感の申告値

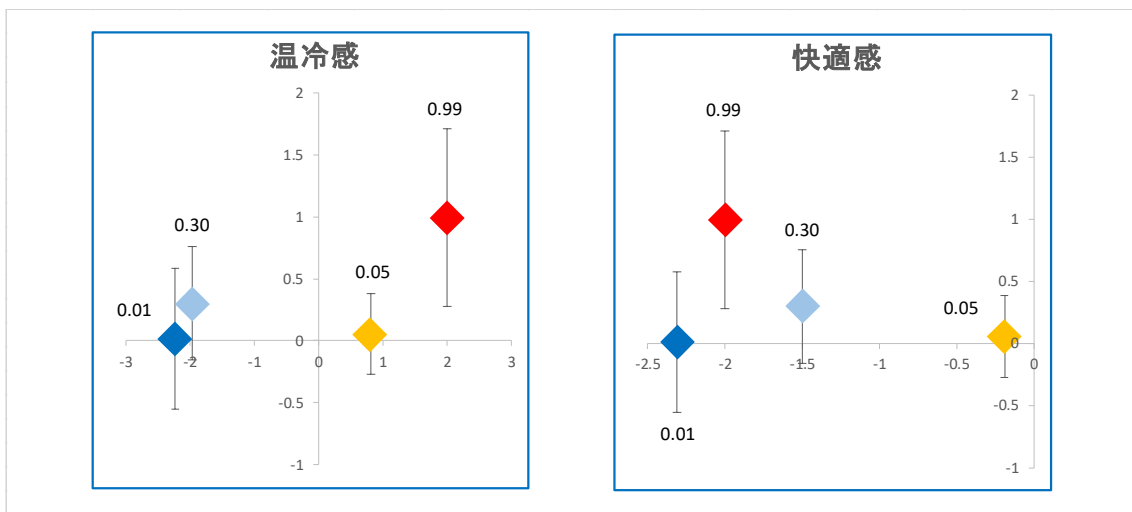


図 3-32 被験者 H の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1～ch22 の平均)

3.3.10 被験者 I の結果

図 3-33 および図 3-34 に、被験者 I の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分, 横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 3-35 に、被験者 I の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し, エラーバーは標準偏差を示している。

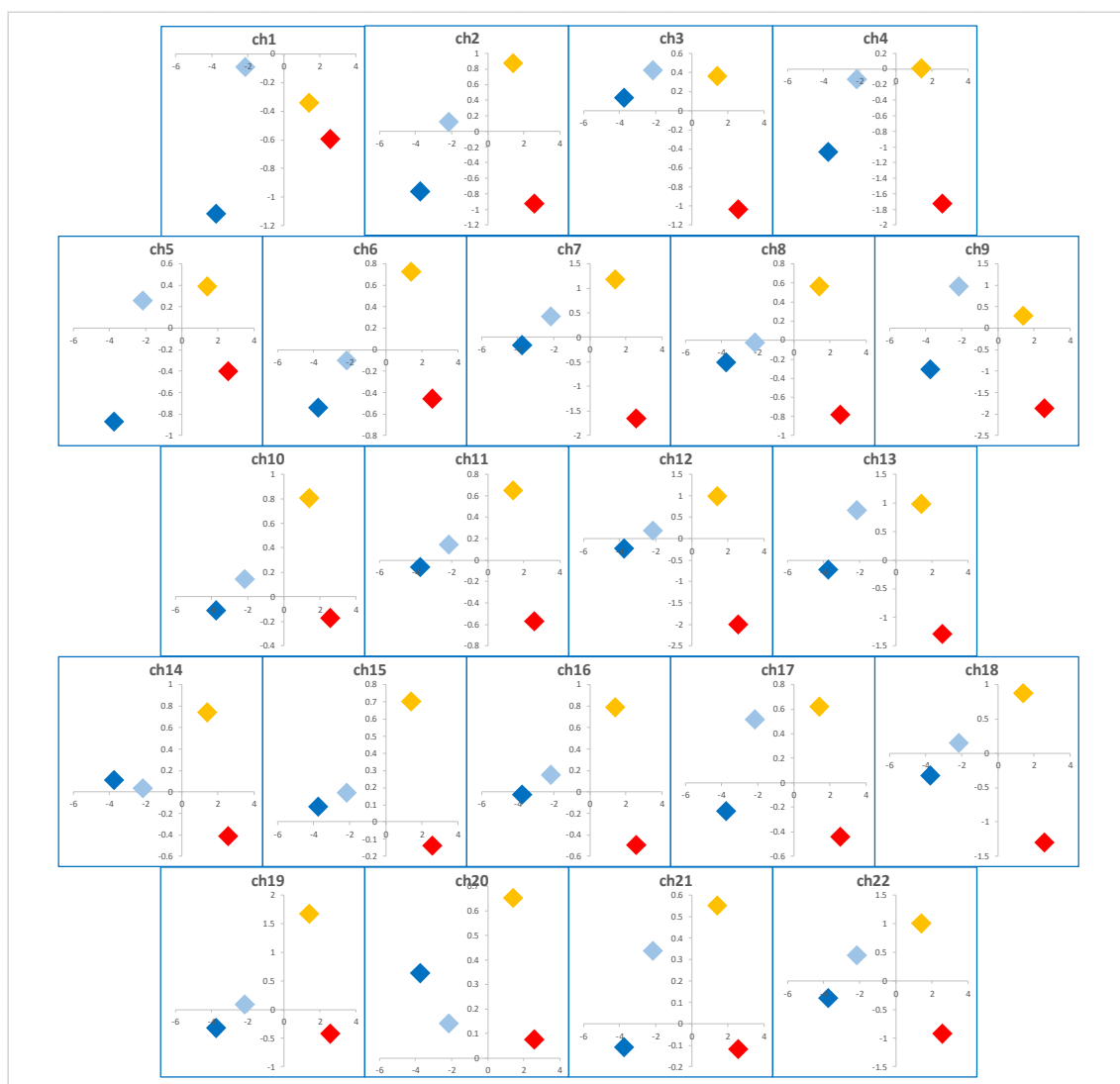


図 3-33 被験者 I の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸 : 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分

横軸 : 温冷感の申告値

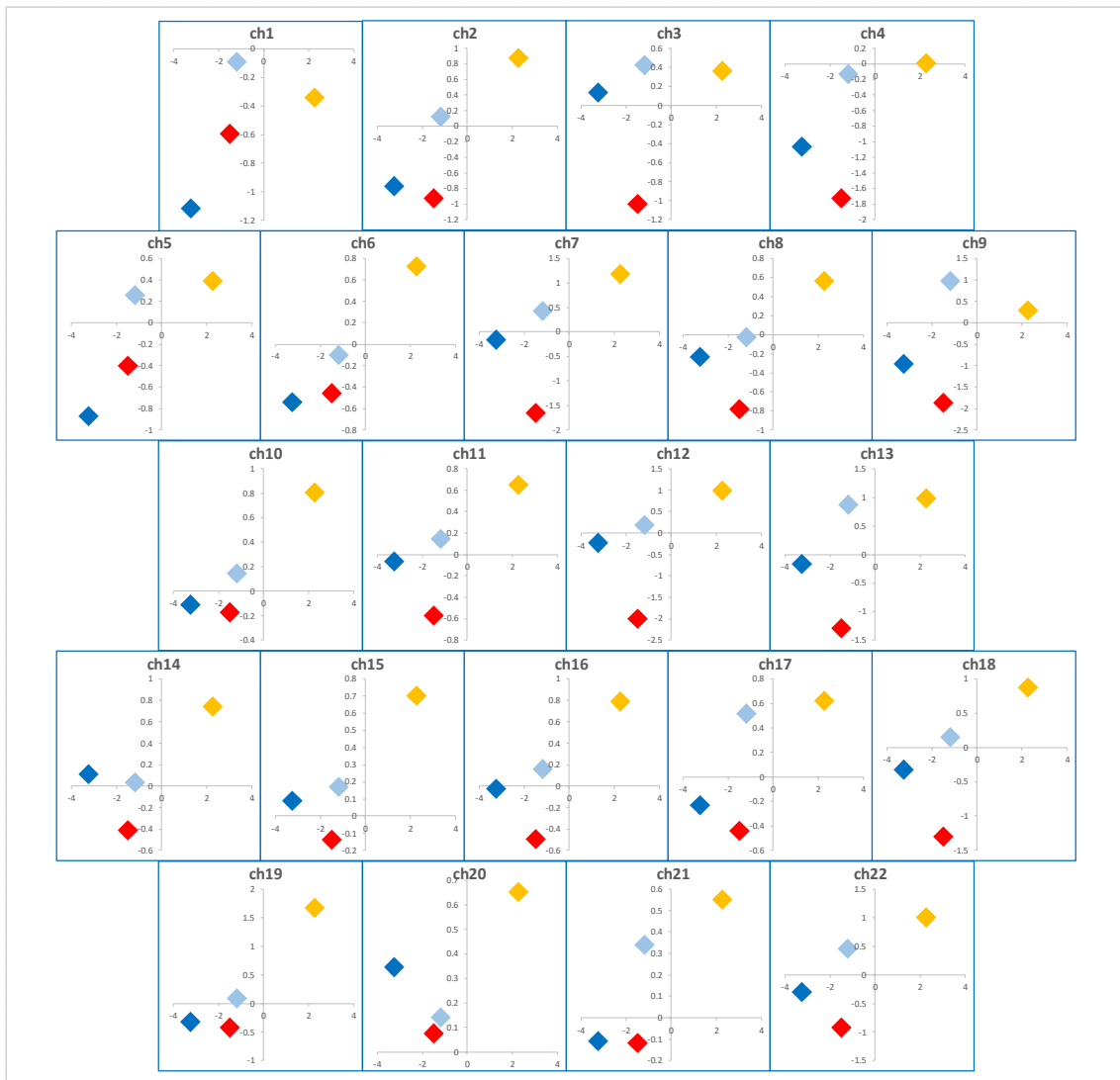


図 3-34 被験者 I の 1 回目第 1 セットの快適感申告関連 (前頭)

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

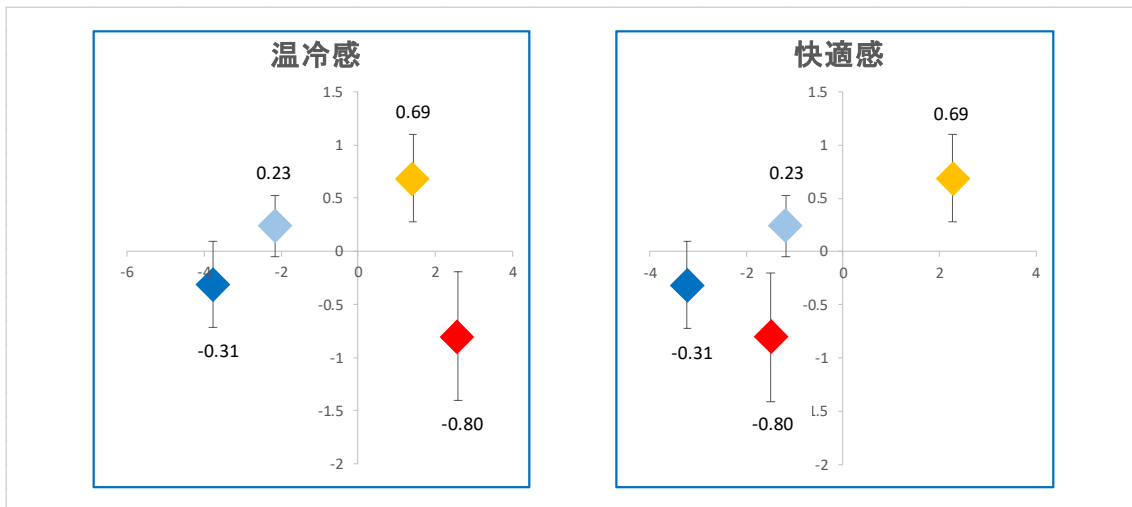


図 3-35 被験者 I の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1～ch22 の平均)

3.4 考察

3.4.1 賦活するスポット

図 3-9, 図 3-10 から分かるように, チャンネルによって縦軸のスケールが異なり, プロットの位置関係は同様であっても, より前頭のチャンネル(主に ch1～ch4)において感度が高い結果となった. また, 被験者 A に注目すると, 図 3-11 に示された温冷感および快適感のプロットの位置関係は, 図 3-9 および図 3-10 における, より前頭のチャンネル(特に ch3)のプロット位置関係と相違がない. より前頭における感度が特に高いためであると考えられる. 図 3-12～図 3-34 から同様の傾向が確認されるため, 被験者 A 以外の被験者においても共通の結果となった. 以上の結果から, Oxy-Hb 濃度変化を全 44ch について計測した結果, 主に前頭 (ch1～ch22), 特に前頭の額近辺 (ch1～ch4) における感度が高く, 賦活する部位としての傾向が見られた.

3.4.2 被験者 9 人の結果

9 人の温冷感との相関は, 図 3-7 から分かるように, 温冷感の申告は 40℃と 45℃が中立より右に, 23℃と 13℃が中立より左にプロットされている. Oxy-Hb 濃度変化は 40℃で増加, 23℃と 13℃で減少しており, 温感が高いほど Oxy-Hb 濃度が増加する傾向がみられる.

一方, 9 人の快適感との相関では, 図 3-8 から分かるように, 中立よりも相対的に快適である図の右半分の領域にプロットされたのは 40℃がほとんどであった. その結果, 快適感

が増加するほど、Oxy-Hb 濃度が増加する傾向が観察された。

3.4.3 被験者個人の結果

被験者個人の温冷感に注目する。以下のような定義のもと、温冷感のプロットパターンを
図 3-36 のように、パターン A、パターン B、パターン C、パターン D の 4 つに分類する。

- パターン A : $\Delta \text{Oxy-Hb}$ が $13^{\circ}\text{C} < 23^{\circ}\text{C}$, かつ $40^{\circ}\text{C} > 45^{\circ}\text{C}$
- パターン B : $\Delta \text{Oxy-Hb}$ が $13^{\circ}\text{C} < 23^{\circ}\text{C}$, かつ $40^{\circ}\text{C} < 45^{\circ}\text{C}$
- パターン C : $\Delta \text{Oxy-Hb}$ が $13^{\circ}\text{C} > 23^{\circ}\text{C}$, かつ $40^{\circ}\text{C} < 45^{\circ}\text{C}$
- パターン D : $\Delta \text{Oxy-Hb}$ が $13^{\circ}\text{C} > 23^{\circ}\text{C}$, かつ $40^{\circ}\text{C} > 45^{\circ}\text{C}$

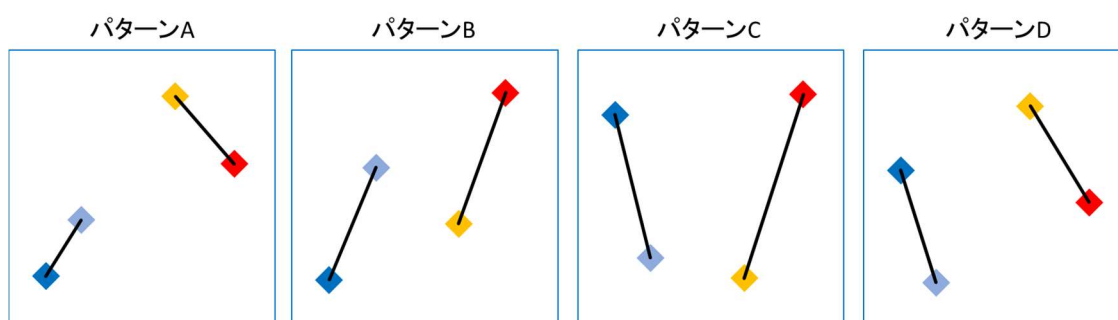


図 3-36 温冷感のプロットパターン

図 3-11, 図 3-14, 図 3-17, 図 3-20, 図 3-23, 図 3-26, 図 3-29, 図 3-32, 図 3-35 から被験者 A~I の温冷感の結果をパターン A~D に分類した表を表 3-1 に示す。

表 3-1 被験者 9 人の温冷感プロットパターンの分類

パターンA	4
パターンB	1
パターンC	1
パターンD	3

表 3-1 より、パターン A が最多であることが分かる。この結果は 3.4.2 節の結果と矛盾する。しかしながら、これはパターン A は 40°C と 45°C の $\Delta \text{Oxy-Hb}$ の差が小さいこと、その他パターン B~D のプロットが影響するためであり、傾向として断定はできない結果である。

一方、快適感に注目すると、図 3-11、図 3-14、図 3-17、図 3-20、図 3-23、図 3-26、図 3-29、図 3-32、図 3-35 から分かるように、最も快適と申告された温度は被験者全員において 40℃である。また、40℃においては、被験者 C を除く被験者全員でプラスの値をとっており、Oxy-Hb が増加していることが分かる。これらの結果より、Oxy-Hb 濃度の増加と、温感または快適感の相関が示唆されるが、40℃に対する多くの VAS 申告が、温感と快適感の両方を示しているため、温感と快適感を区別することが困難であった。したがって、冷感と快適感が共通する VAS 申告を得ることを想定し、別途、夏季における実験を行うことにした。

第4章 実験Ⅱ

4.1 実験概要

実験Ⅱは2017年7月12日～7月25日の期間に、実験Ⅰ同様に東京大学柏キャンパス内の実験室内に設置した、室温等をコントロールした環境試験室内で行った。実験プロトコルは実験Ⅰと同様である。また、実験Ⅰと同様に被験者は20代男子学生のみを対象とした。

4.2 温冷感および快適感との相関

4.2.1 被験者8人の結果

図4-1および図4-2に、被験者8人の1回目第1セットの前頭(ch1～ch22)における結果を示す。前節と同様に、縦軸は40℃、45℃、23℃、13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。また、散布図の相関関係を線形近似で求めている。

温冷感申告相関については、全てのチャンネルにおいてプラスの傾きをもつ近似直線となったが、快適感申告相関については、チャンネルによって傾きの正負が変動しており、統一的な結果とならなかった。

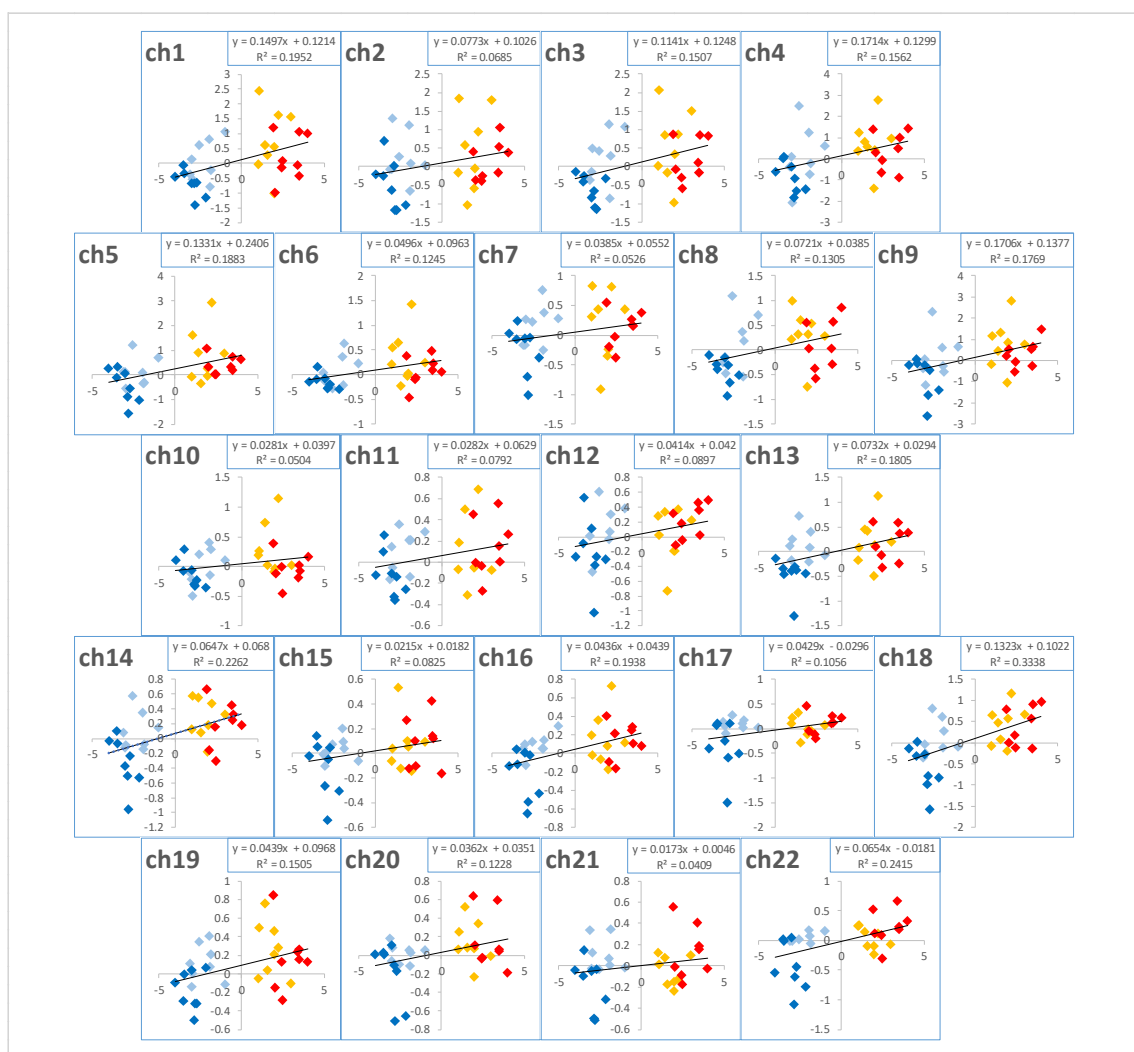


図 4-1 被験者 8 人の 1 回目第 1 セット温冷感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

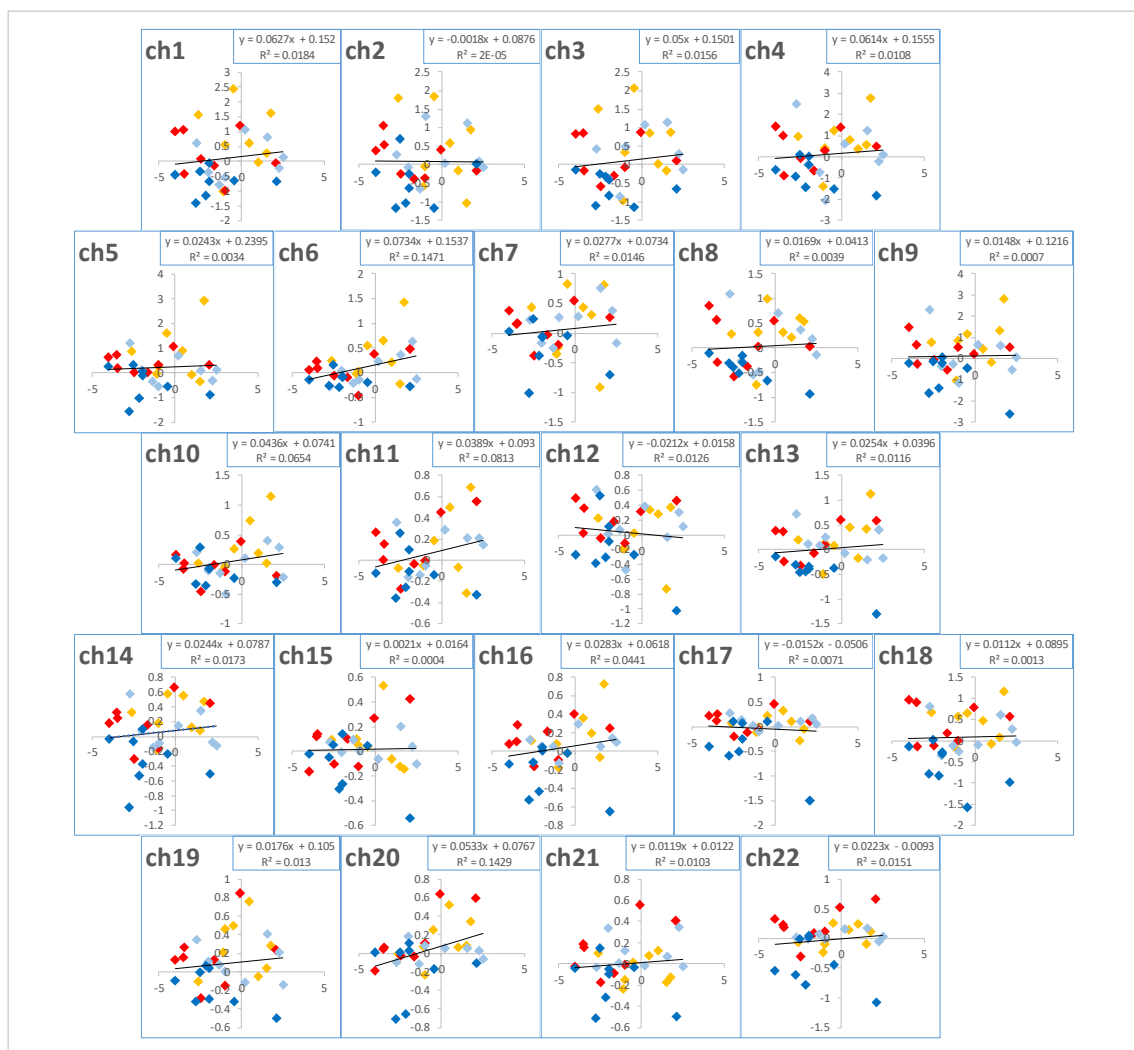


図 4-2 被験者 8 人の 1 回目第 1 セット快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の Zscore' 値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

4.2.2 被験者 A の結果

図 4-3 および図 4-4 に、被験者 A の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分, 横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 4-5 に、被験者 A の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し, エラーバーは標準偏差を示している。

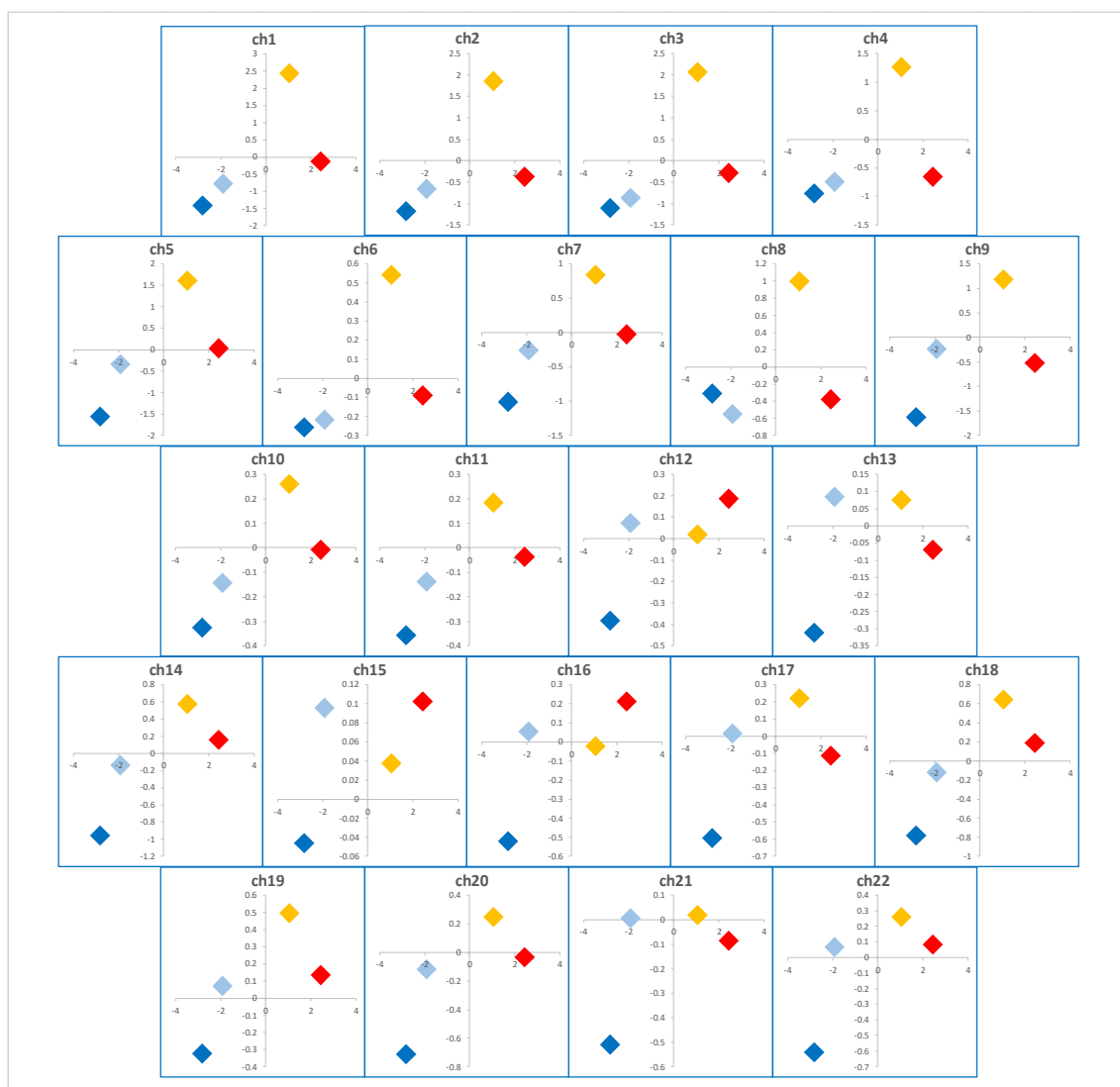


図 4-3 被験者 A の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸 : 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分

横軸 : 温冷感の申告値

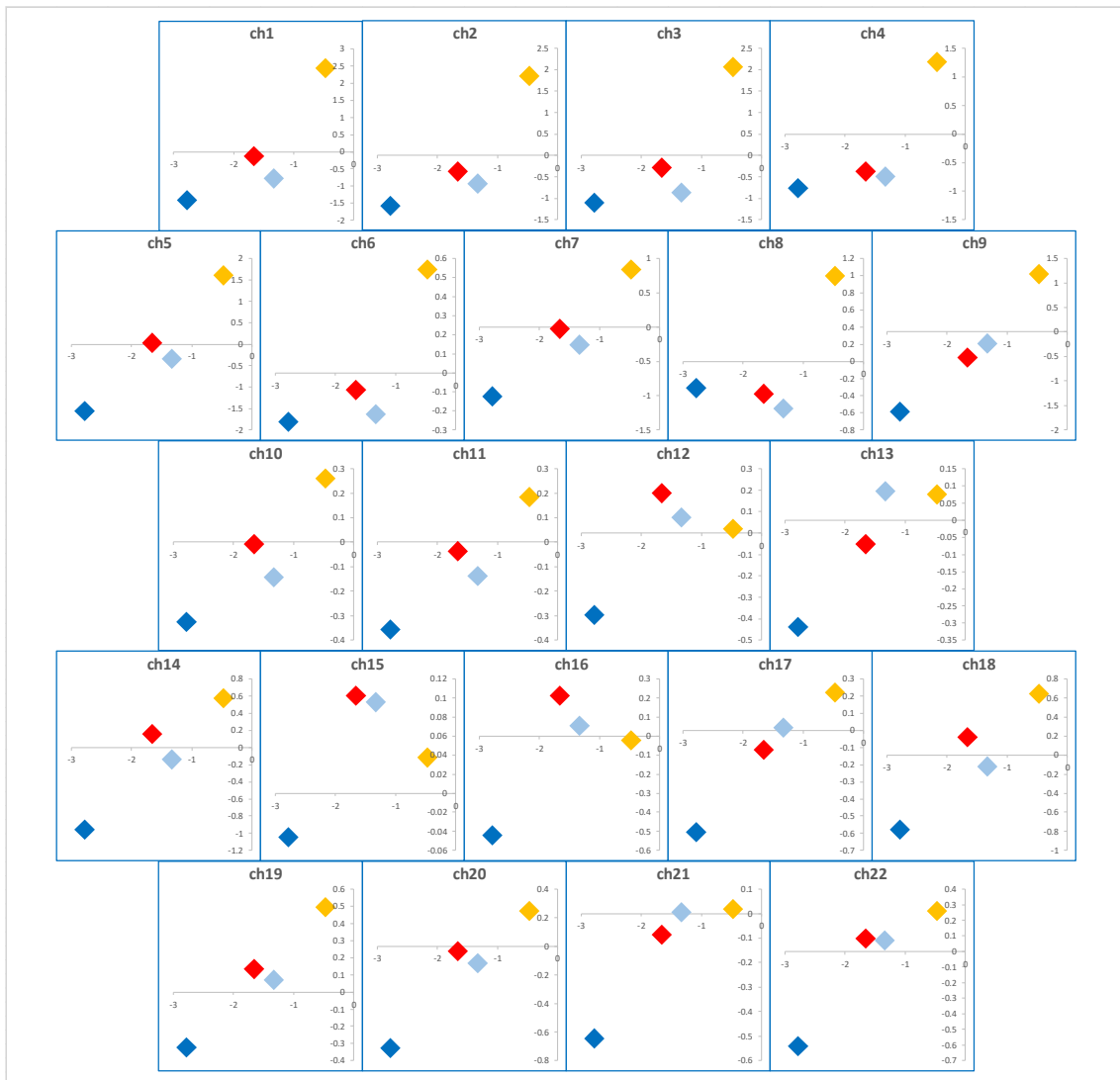


図 4-4 被験者 A の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

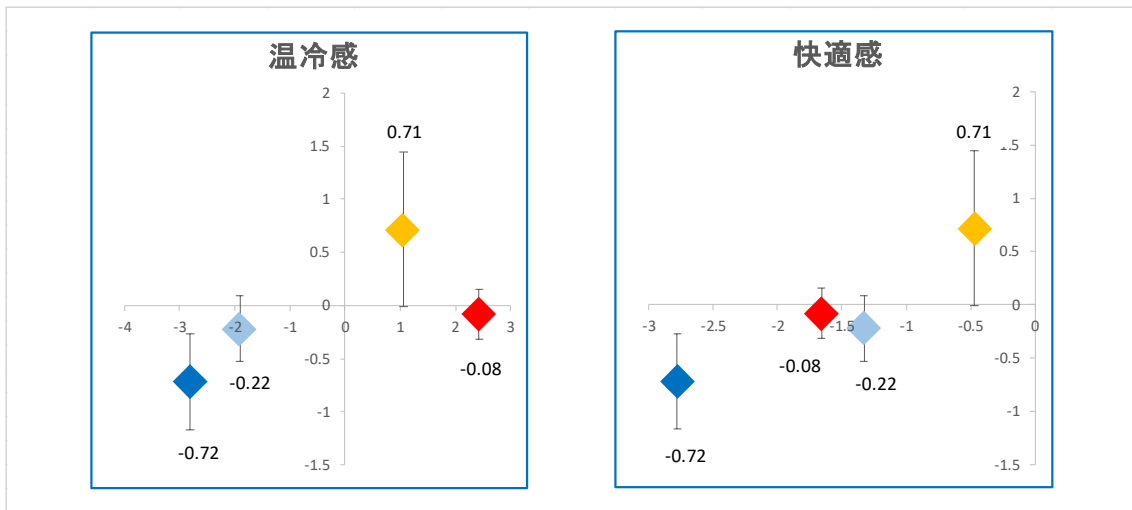


図 4-5 被験者 A の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1~ch22 の平均)

4.2.3 被験者 C の結果

図 4-6 および図 4-7 に、被験者 C の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分, 横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 4-8 に、被験者 C の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

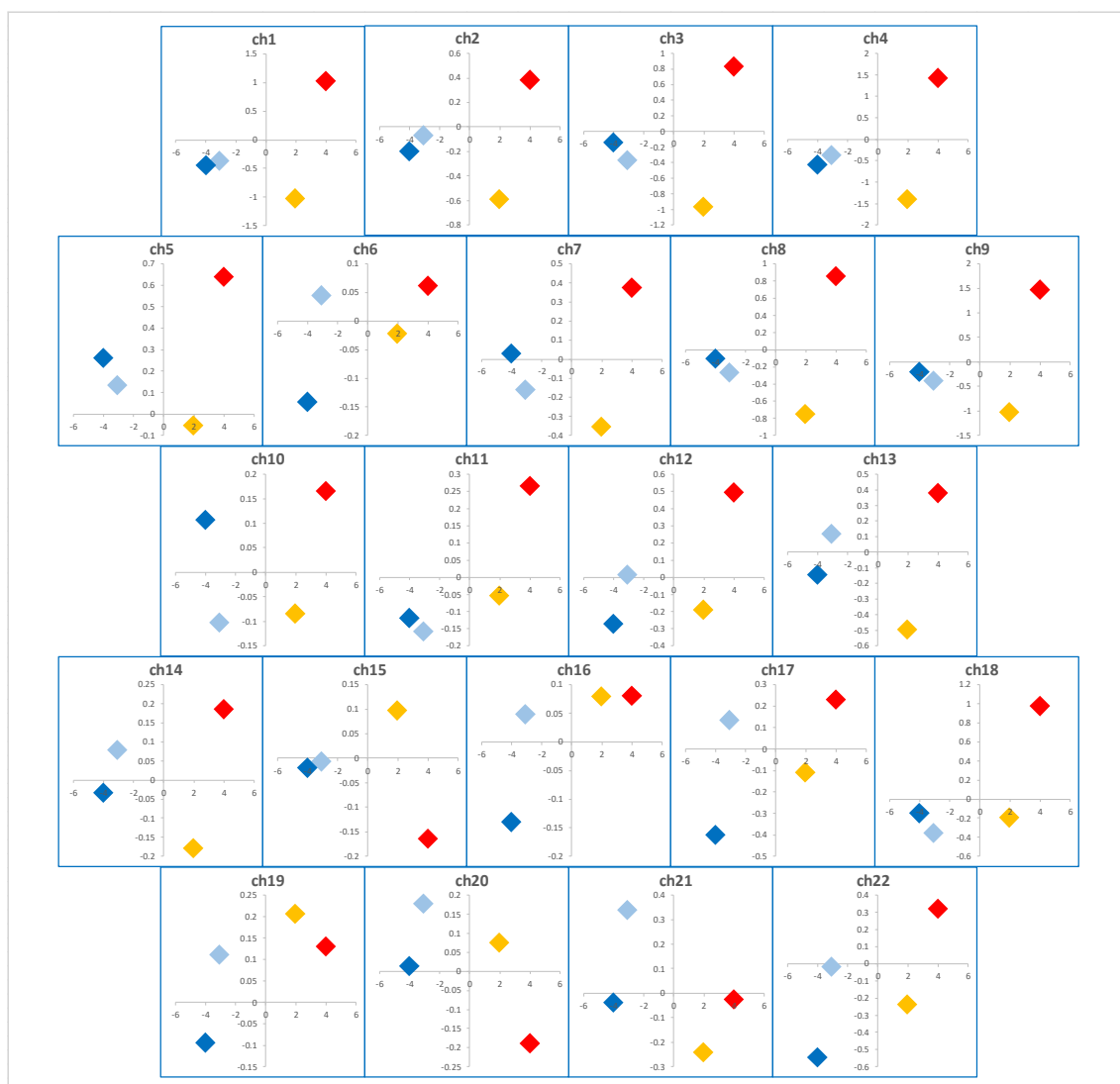


図 4-6 被験者 C の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸 : 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸 : 温冷感の申告値

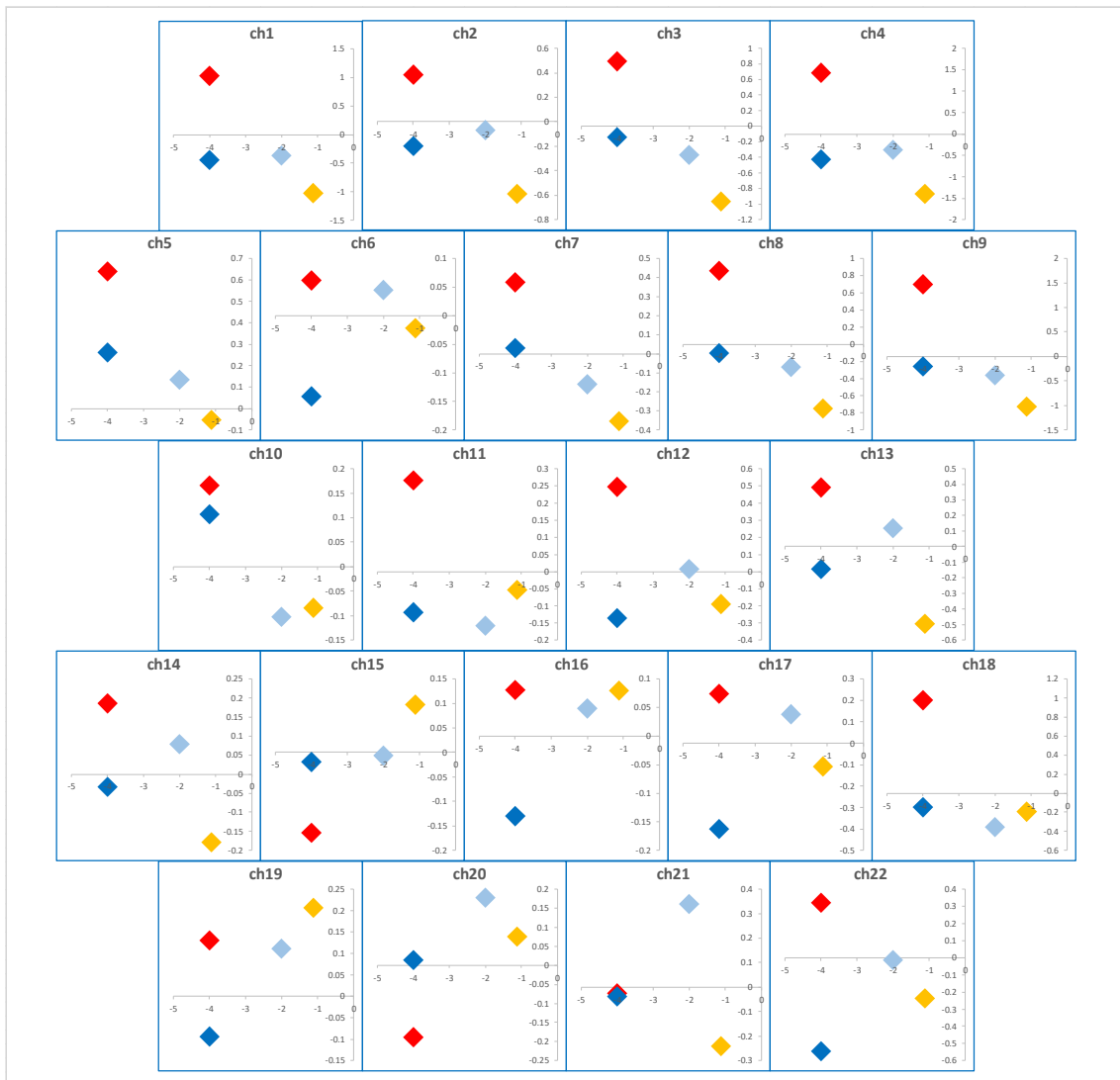


図 4-7 被験者 C の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

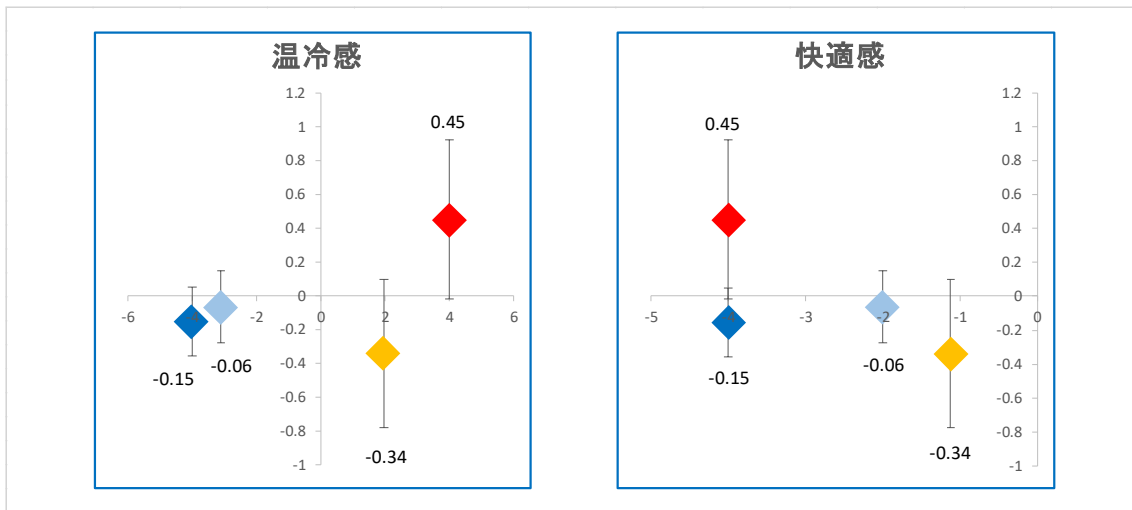


図 4-8 被験者 C の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1～ch22 の平均)

4.2.4 被験者 E の結果

図 4-9 および図 4-10 に、被験者 E の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分, 横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 4-11 に、被験者 E の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し, エラーバーは標準偏差を示している。

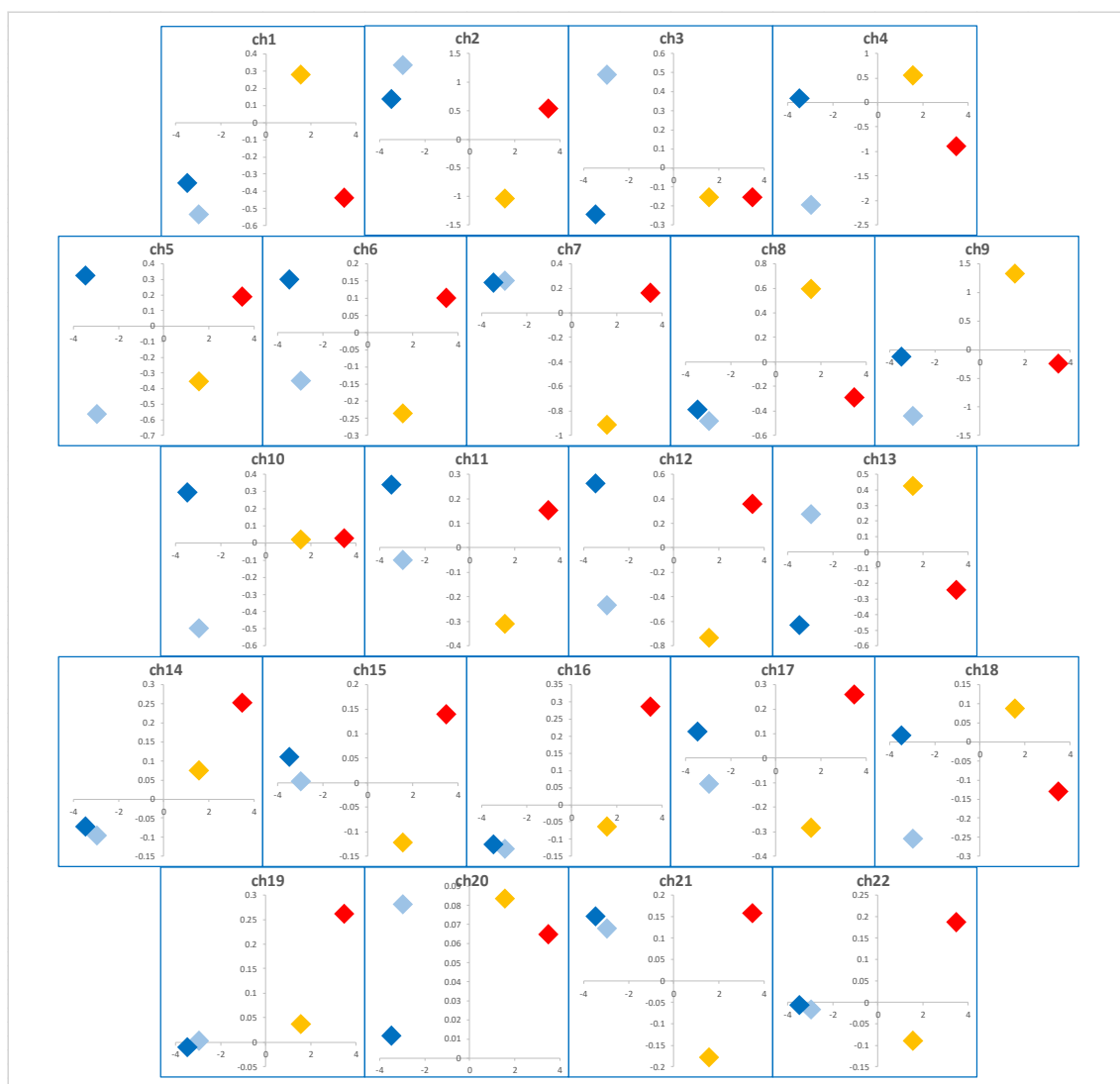


図 4-9 被験者 E の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸 : 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分
横軸 : 温冷感の申告値

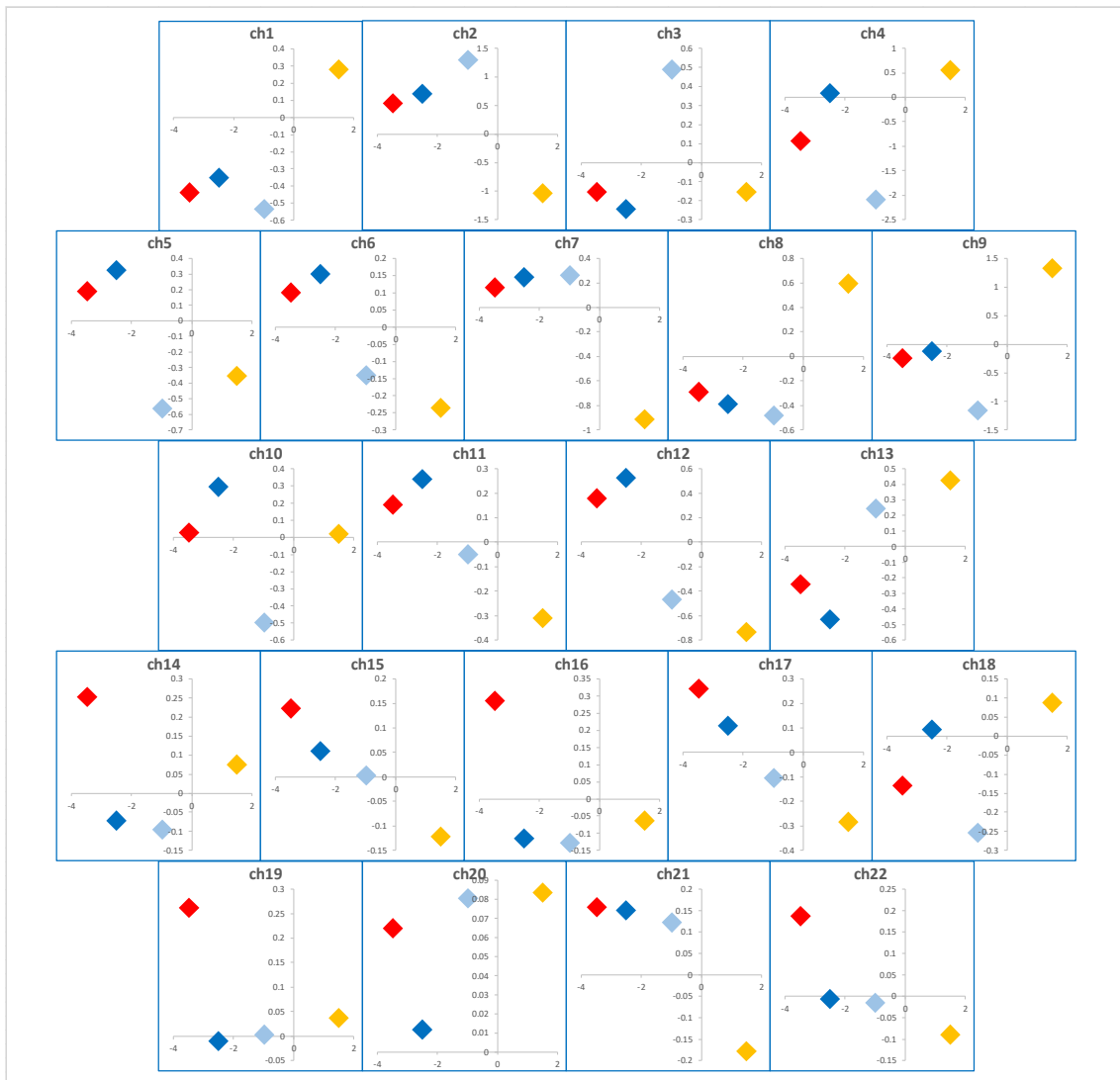


図 4-10 被験者 E の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

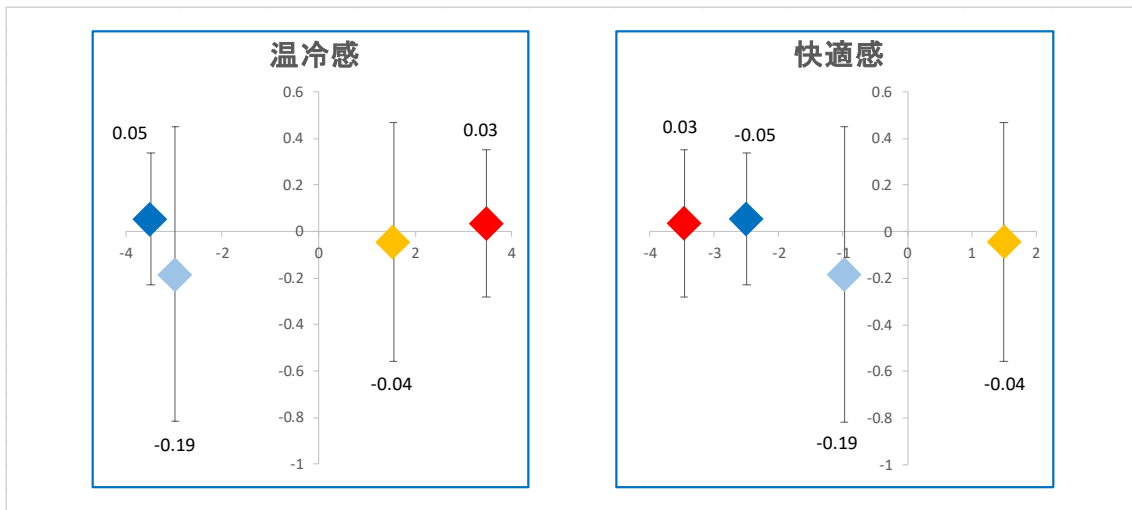


図 4-11 被験者 E の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1~ch22 の平均)

4.2.5 被験者 J の結果

図 4-12 および図 4-13 に、被験者 J の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃、45℃、23℃、13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 4-14 に、被験者 J の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

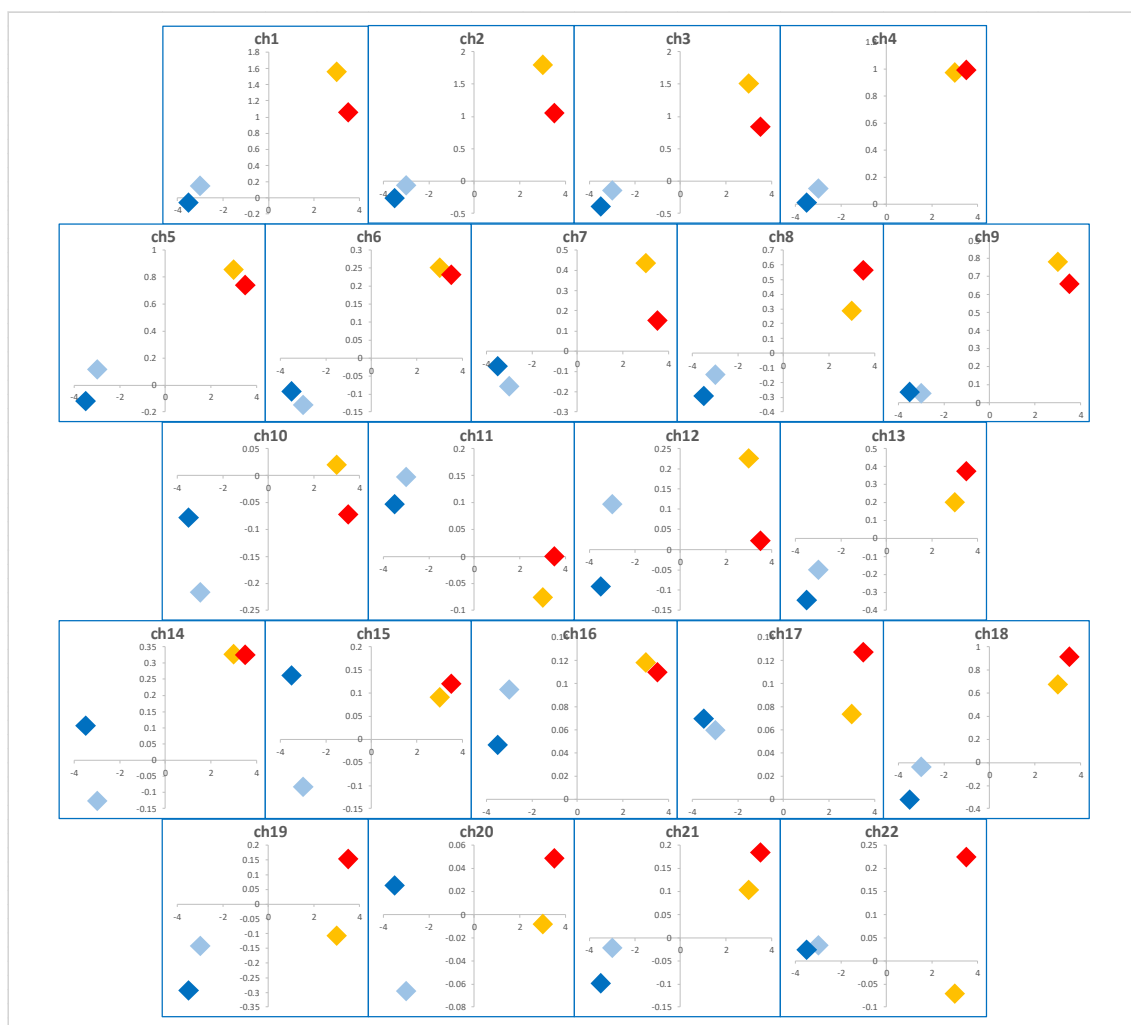


図 4-12 被験者 J の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃、45℃、23℃、13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分
横軸：温冷感の申告値

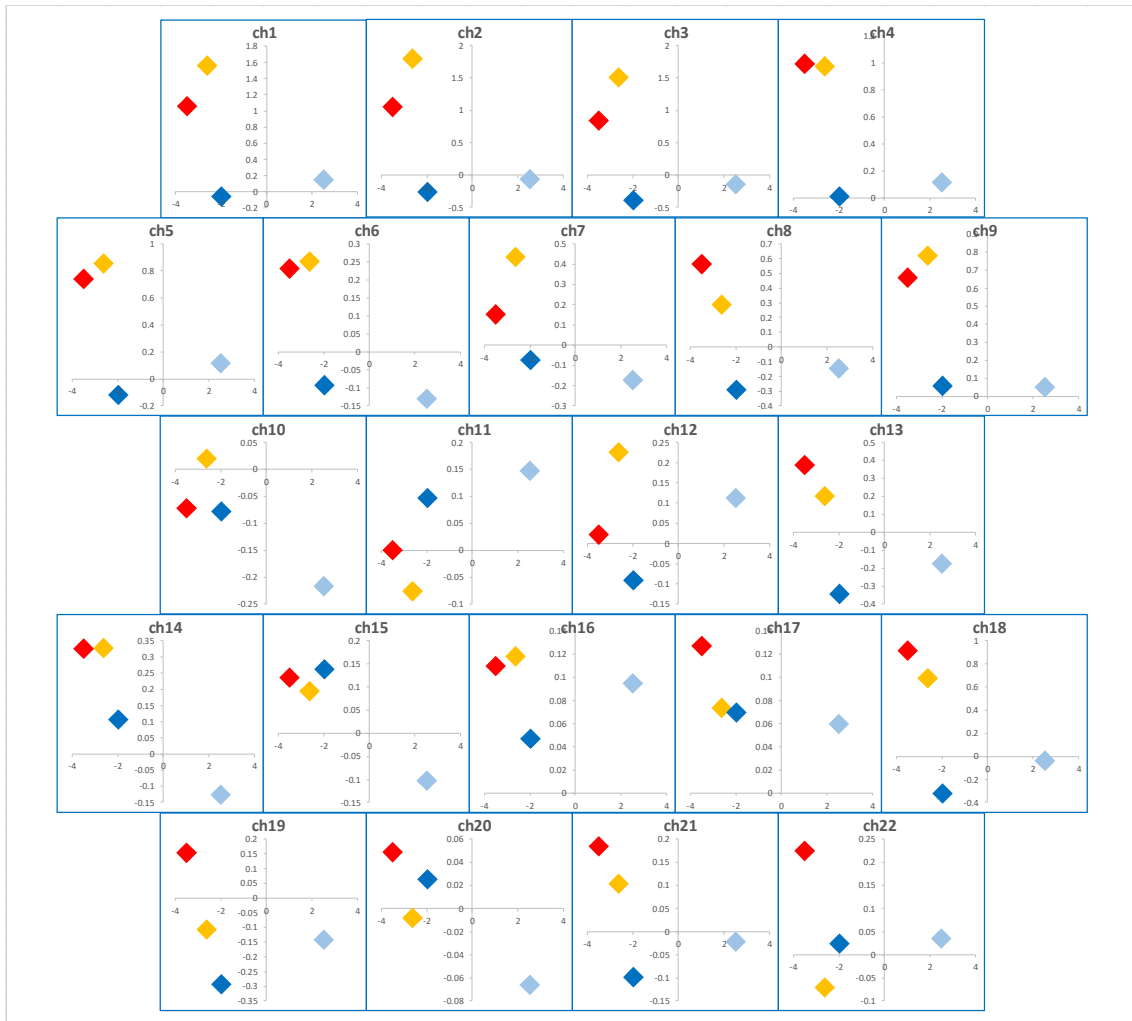


図 4-13 被験者 J の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分
 横軸：快適感の申告値

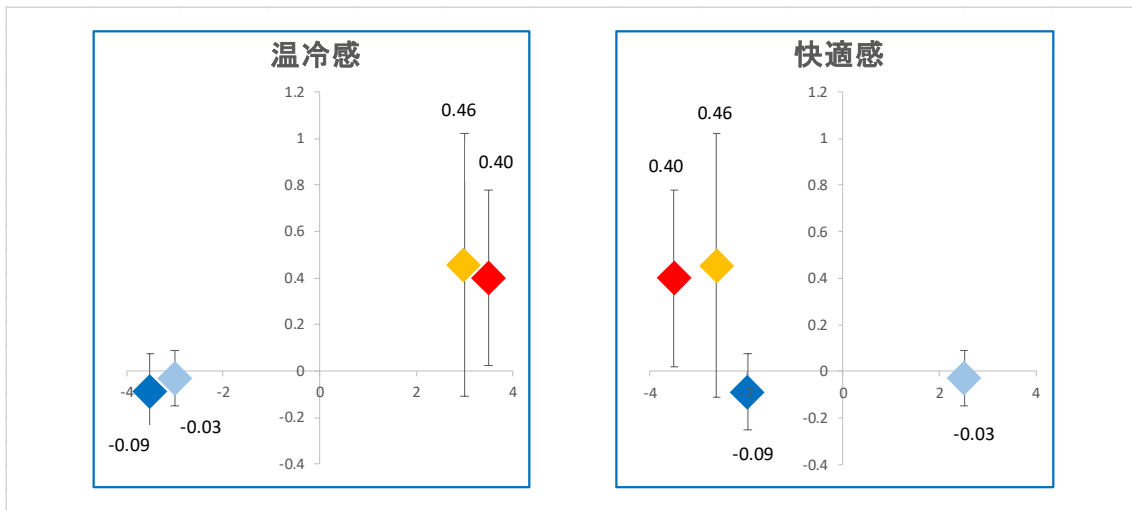


図 4-14 被験者 J の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1~ch22 の平均)

4.2.6 被験者 K の結果

図 4-15 および図 4-16 に、被験者 K の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 4-17 に、被験者 K の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

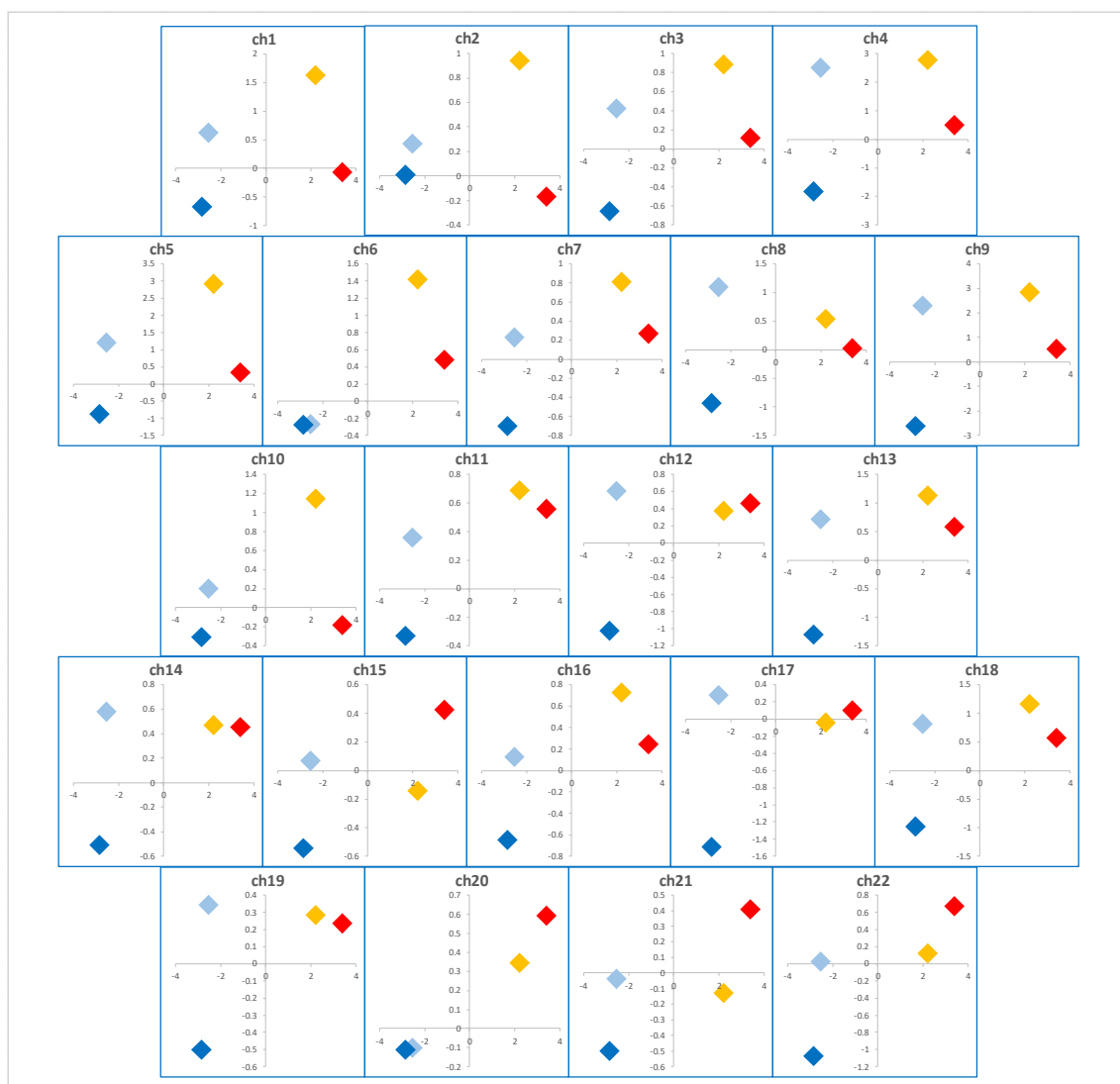


図 4-15 被験者 K の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分
横軸：温冷感の申告値

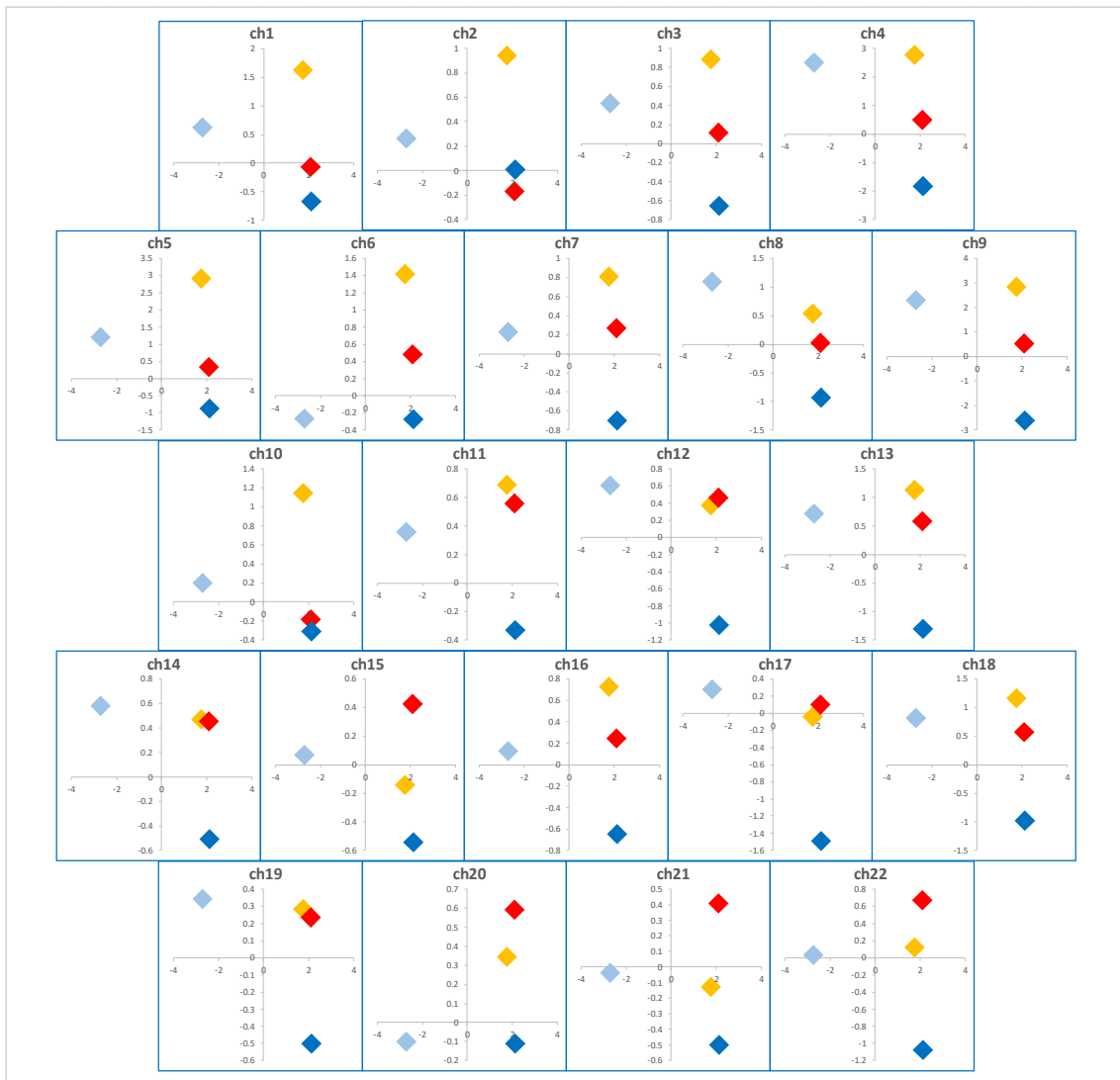


図 4-16 被験者 K の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

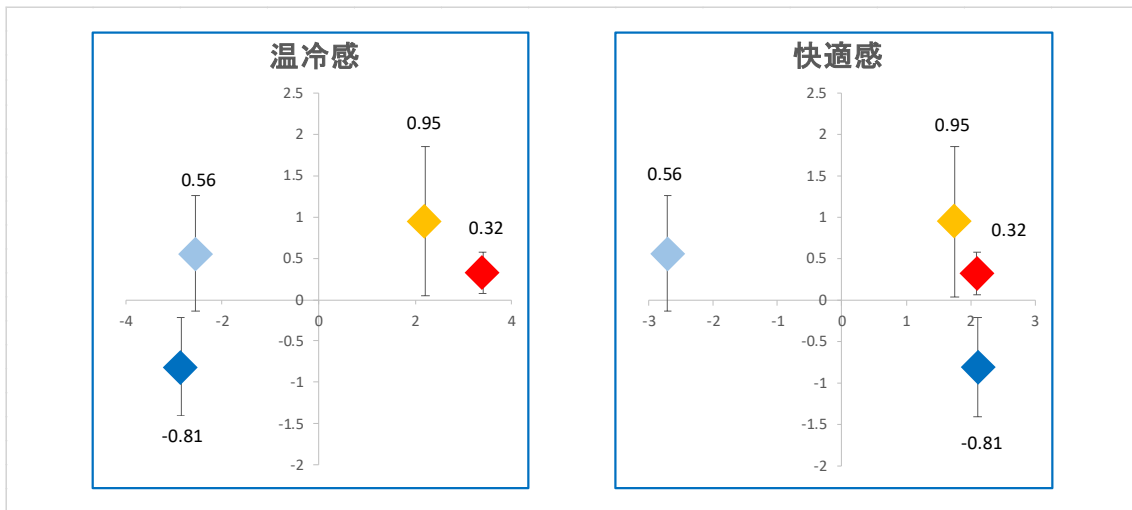


図 4-17 被験者 K の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1～ch22 の平均)

4.2.7 被験者 L の結果

図 4-18 および図 4-19 に、被験者 L の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 4-20 に、被験者 L の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

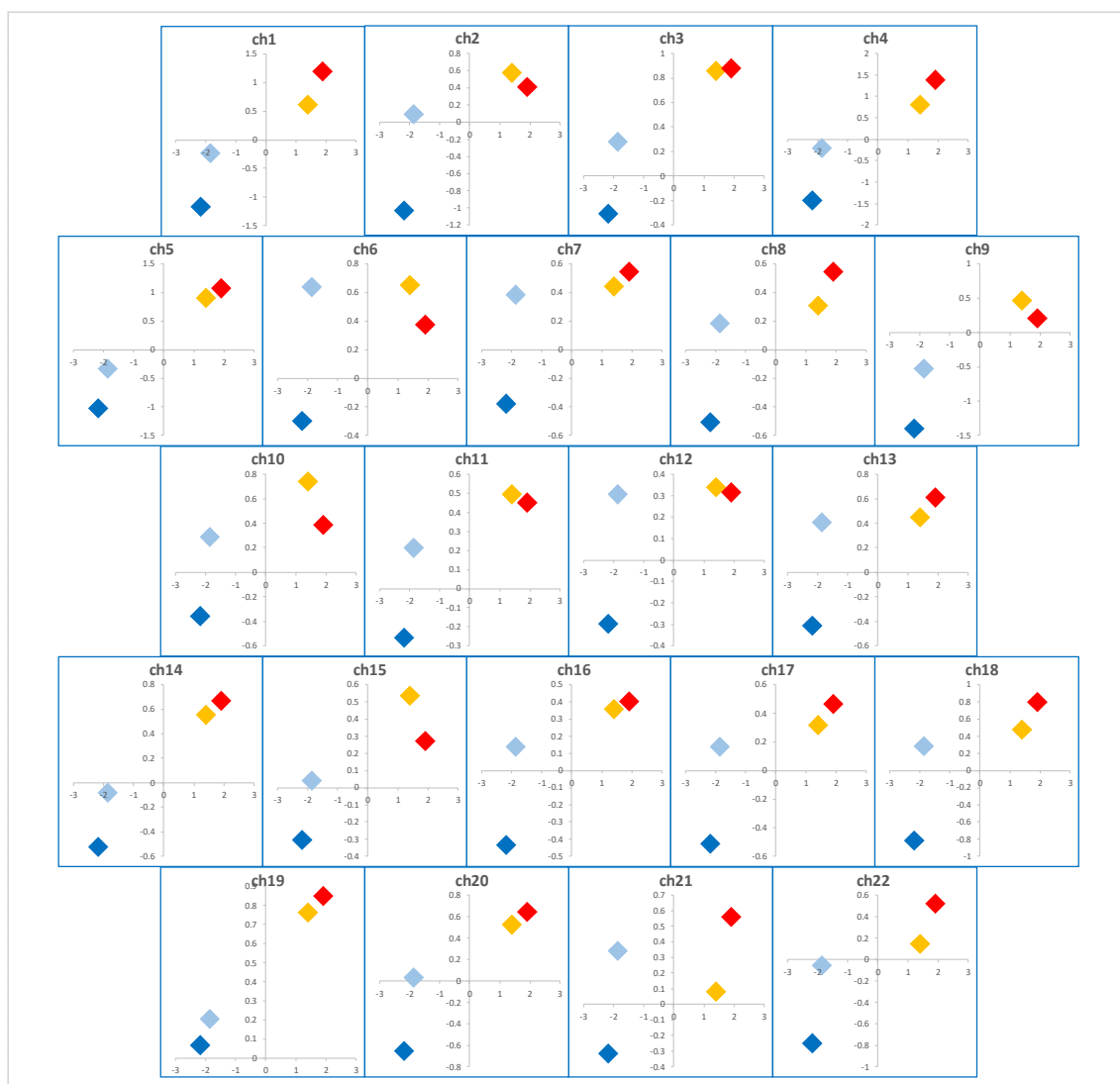


図 4-18 被験者 L の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間の $Zscore'$ 値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

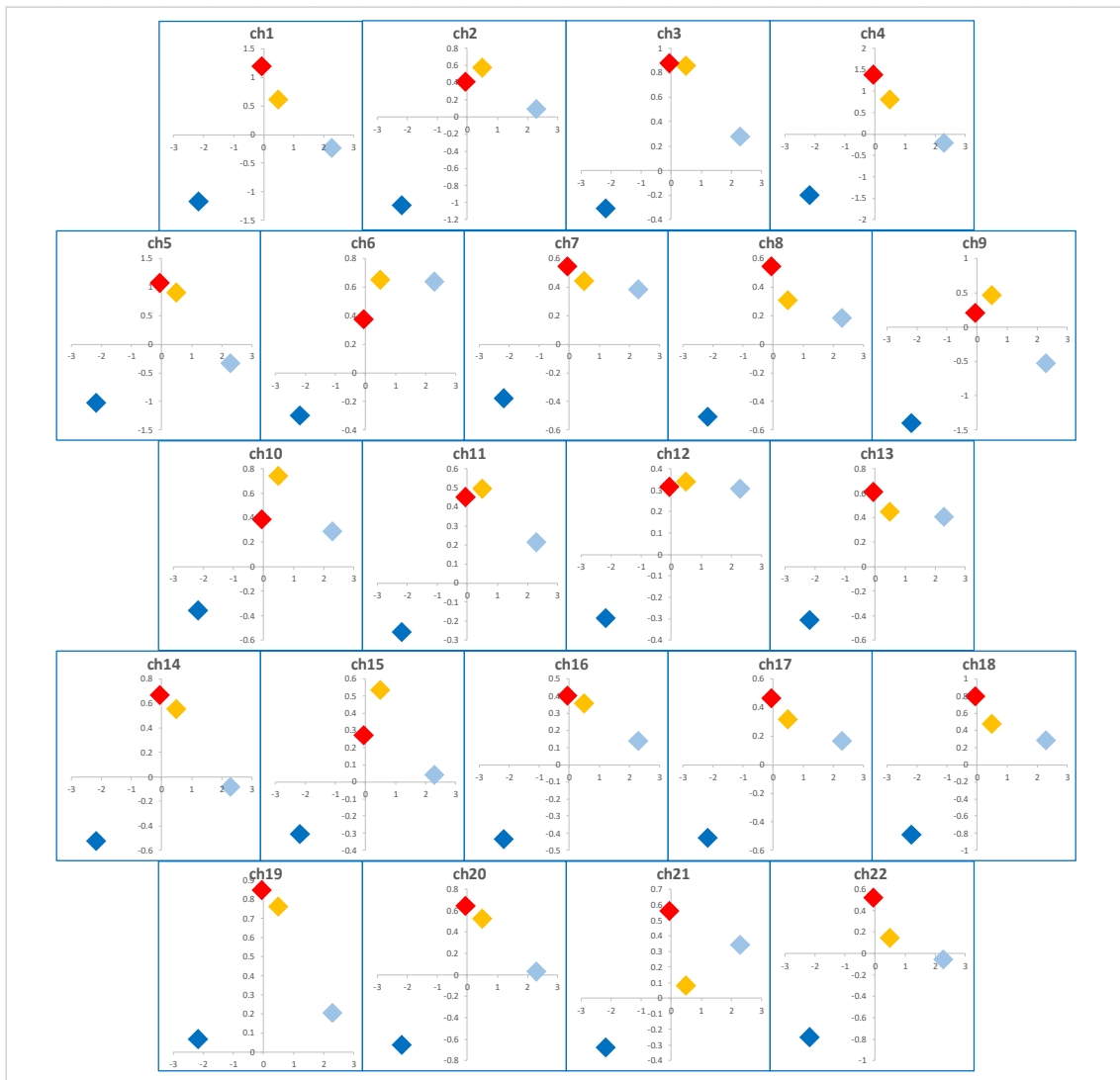


図 4-19 被験者 L の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

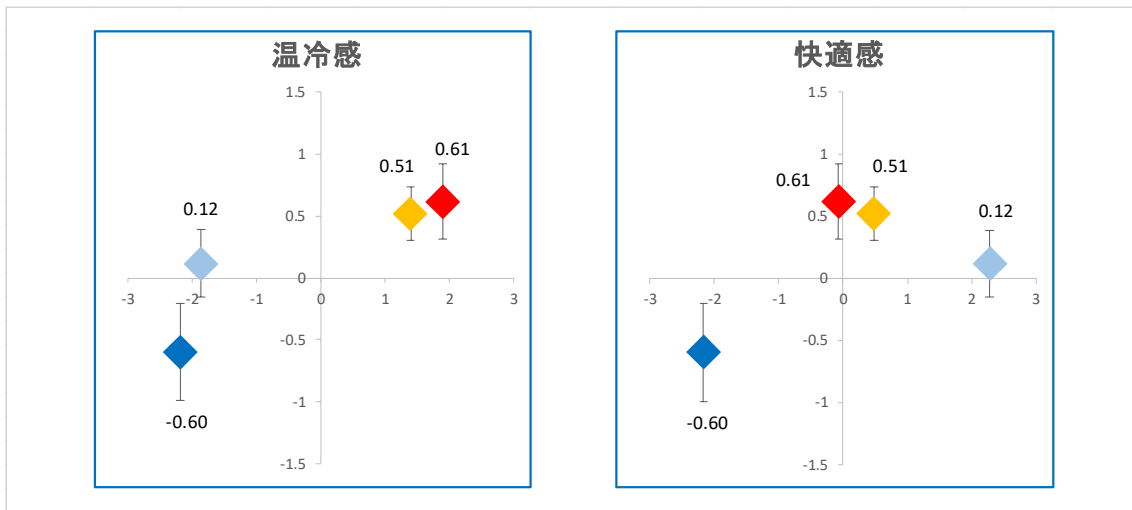


図 4-20 被験者 L の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1~ch22 の平均)

4.2.8 被験者 M の結果

図 4-21 および図 4-22 に、被験者 M の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 4-23 に、被験者 M の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

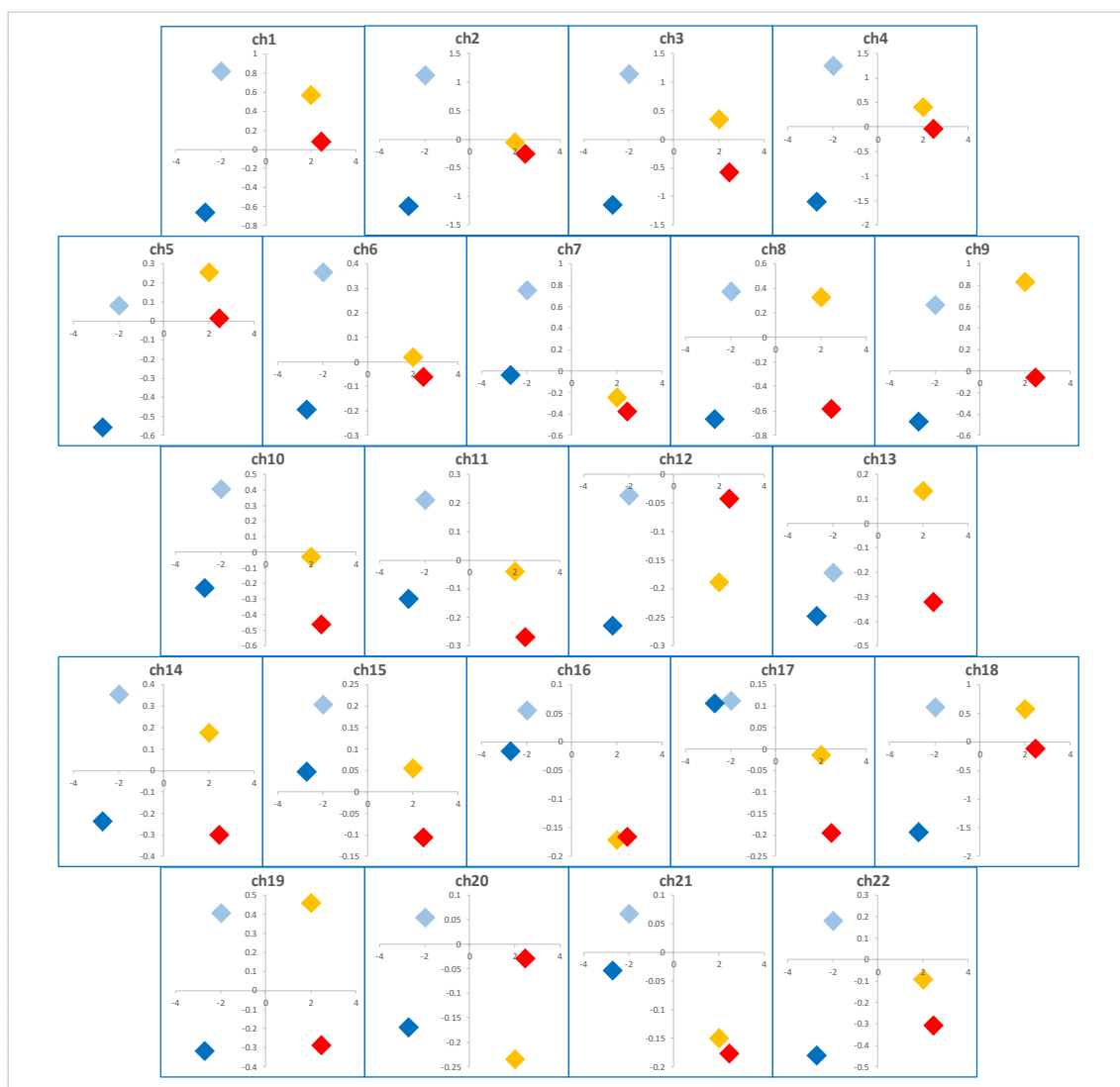


図 4-21 被験者 M の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

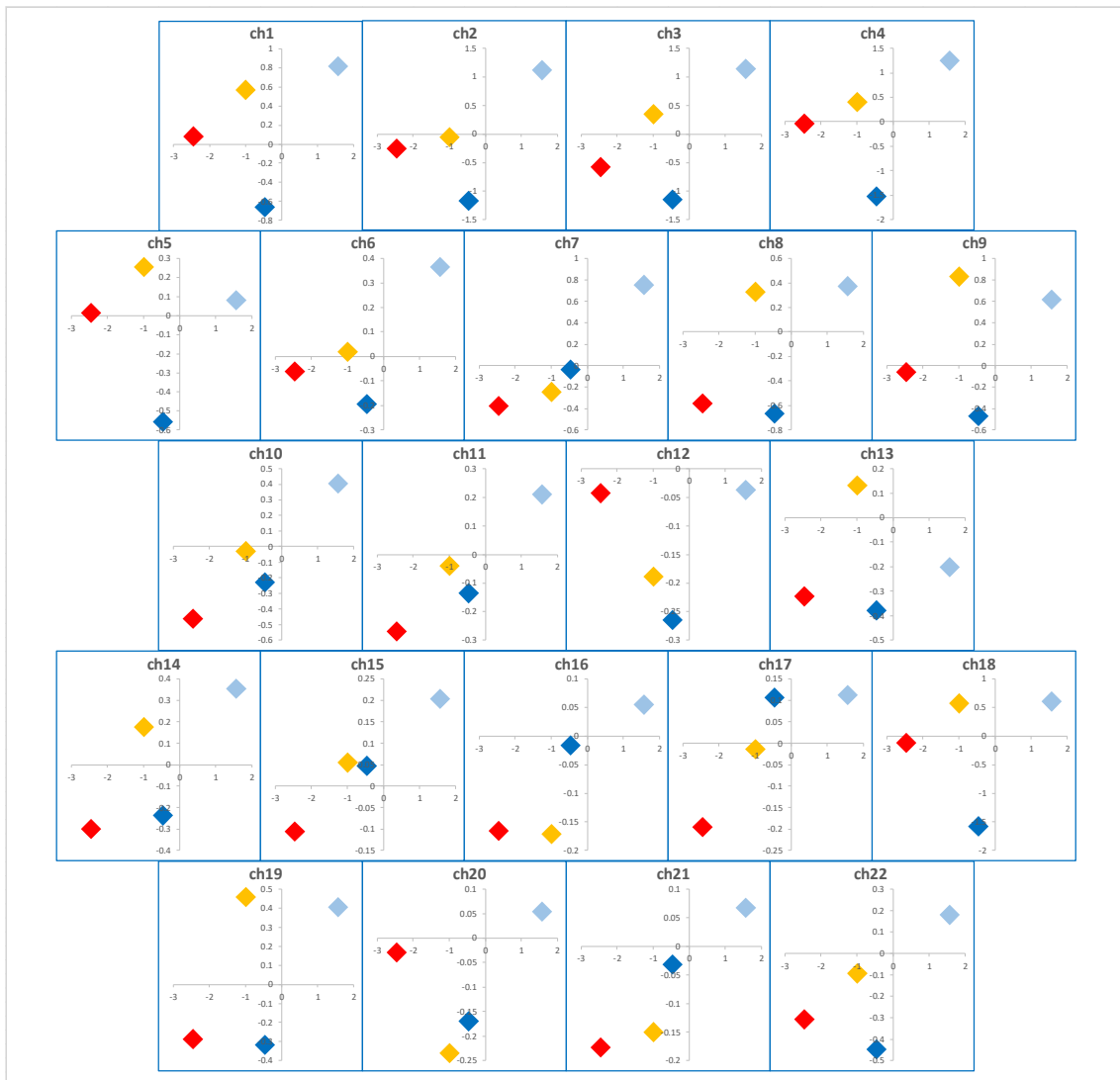


図 4-22 被験者 M の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

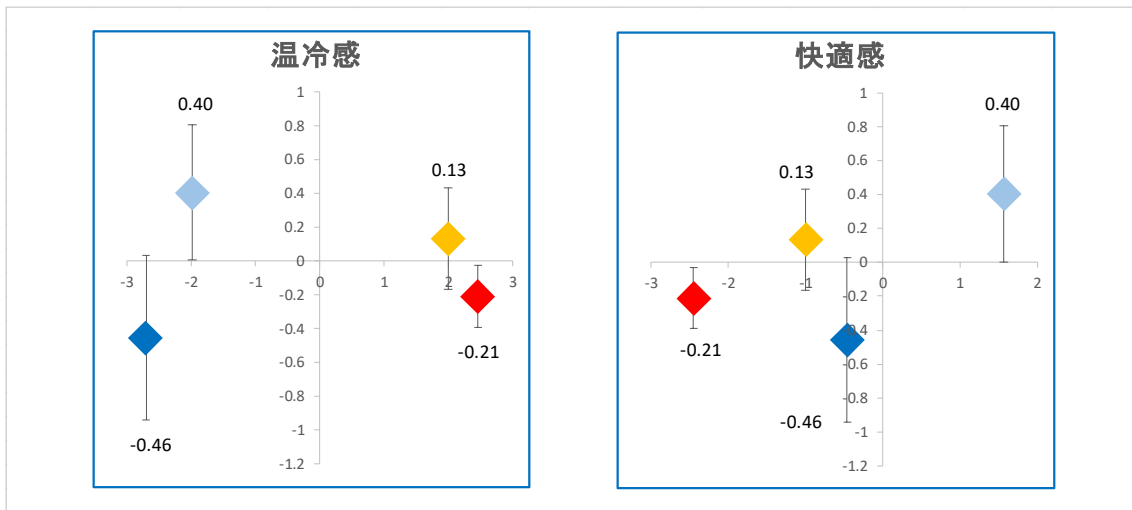


図 4-23 被験者 M の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1～ch22 の平均)

4.2.9 被験者 N の結果

図 4-24 および図 4-25 に、被験者 N の 1 回目第 1 セットの前頭 (ch1~ch22) における結果を示す。縦軸は 40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前平均値との差分、横軸は温冷感または快適感の申告値を表している。

図 4-26 に、被験者 N の 1 回目第 1 セット ch1~ch22 平均値における結果を示す。グラフの値は ch1~ch22 の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示している。

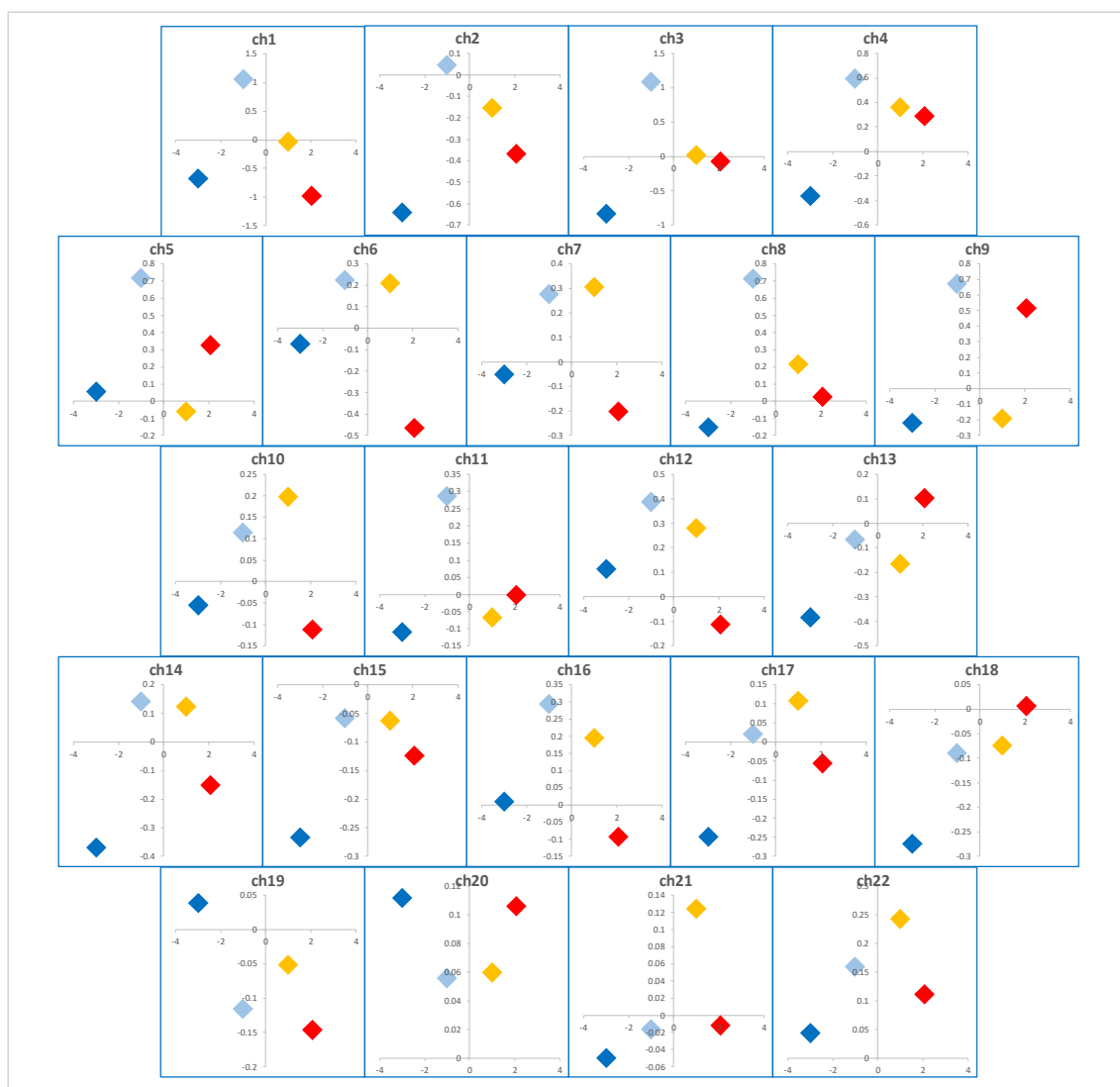


図 4-24 被験者 N の 1 回目第 1 セットの温冷感申告相関 (前頭)

縦軸：40℃, 45℃, 23℃, 13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：温冷感の申告値

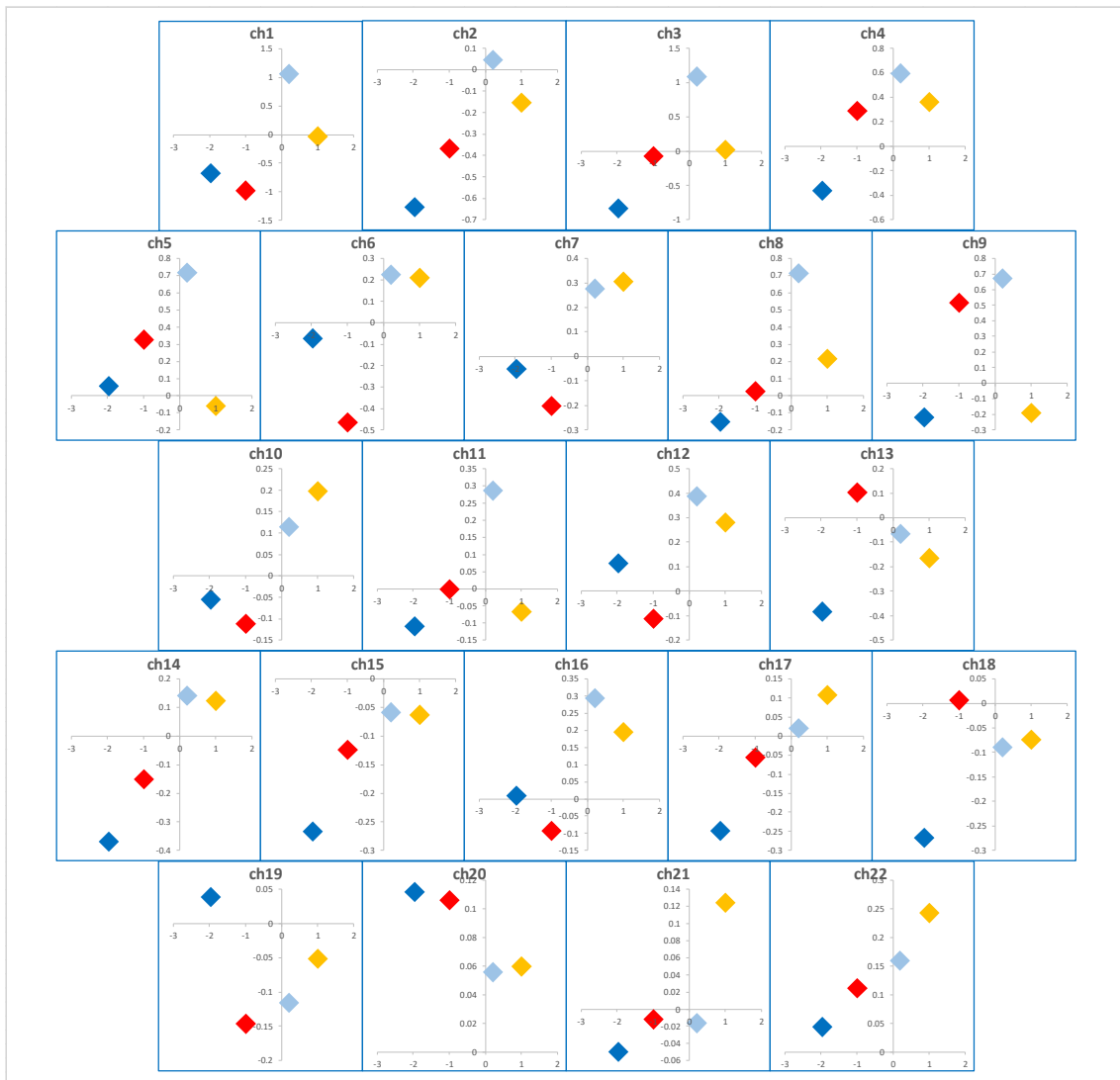


図 4-25 被験者 N の 1 回目第 1 セットの快適感申告相関（前頭）

縦軸：40℃，45℃，23℃，13℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値とそのそれぞれの直前の 33℃の申告直前 5 秒間のZscore'値平均値との差分

横軸：快適感の申告値

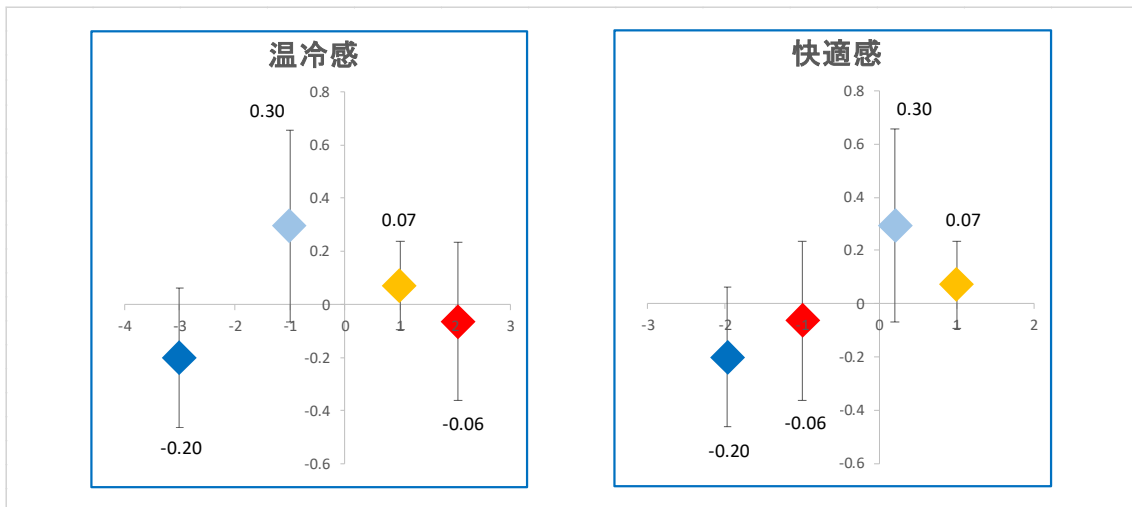


図 4-26 被験者 N の 1 回目第 1 セットの温冷感と快適感申告相関 (ch1～ch22 の平均)

4.3 考察

4.3.1 賦活するスポット

図 4-3, 図 4-4, 図 4-5 から分かるように, 被験者 A において, より前頭のチャンネル(主に ch1～ch4)で感度が高い結果となった. 図 4-6～図 4-26 より, 被験者 A 以外の被験者においても, 前頭において高い感度を示すことは, 共通の結果となった. 以上の結果から, 第 3 章と同様に, Oxy-Hb 濃度変化を全 44ch について計測した結果, 主に前頭 (ch1～ch22), 特に ch1～ch4 の部位 (前頭の額近辺) における感度が高く, 賦活する部位としての傾向が見られた.

4.3.2 被験者 9 人の結果

図 4-1 から分かるように, 実験 I と同様, 温冷感の申告は 40℃と 45℃が中立より右に, 23℃と 13℃が中立より左にプロットされている. Oxy-Hb 濃度変化も実験 I と同様に, 40℃で増加, 23℃と 13℃で減少するプロットが多く観察され, 温感が高いほど Oxy-Hb 濃度が増加する傾向がみられる.

一方で, 快適感については, 図 4-2 から分かるように, 夏季に行った本実験では 23℃, 13℃を快適とする VAS 申告が多くなった一方で, その Oxy-Hb 濃度の変化は個人差が大きい傾向を示しており, 図 3-8 の結果とあわせて, 快適感の増加と Oxy-Hb 濃度の増加に相関があるということはいえない.

4.3.3 被験者個人の結果

被験者個人の温冷感に注目する．3.4.3 節の定義に基づいてパターン，パターン B，パターン C，パターン D の 4 つに分類する．図 4-5，図 4-8，図 4-11，図 4-14，図 4-17，図 4-20，図 4-23，図 4-26 から被験者 8 人の温冷感の結果をパターン A～D に分類し，3.4.3 節の分類表と合わせた結果を表 4-1 に示す．

表 4-1 実験Ⅰおよび実験Ⅱの温冷感プロットパターンの分類

	実験Ⅰ	実験Ⅱ
パターンA	4	5
パターンB	1	2
パターンC	1	1
パターンD	3	0

表 4-1 より，実験Ⅰに続き実験Ⅱにおいてもパターン A が最多であることが分かる．よって温感が高いほど濃度が増加する一方で，ある温度からは Oxy-Hb が減少する可能性が考えられる．

第5章 結論

本研究では、局所的な温熱刺激時の脳活動を NIRS を用いて計測することで、NIRS による Oxy-Hb 濃度計測が人間の温熱感覚を客観的に評価する指標となる可能性を検討した。冬季に行った実験Ⅰでは、温感と快適感の申告値が増加するほど、Oxy-Hb 濃度が増加する傾向が観察された。夏季に行った実験Ⅱでは、冷感と快適感を両立する温度刺激（23℃，13℃）において、快適感の増加は観察されず、実験Ⅰと実験Ⅱの結果から、必ずしも快適感の増加と Oxy-Hb 濃度変化が相関しないとの結果を得た。この結果より、温感を増加させる温度刺激（40℃）と Oxy-Hb 濃度の増加が相関していることが観察された。したがって、温冷感の申告結果と NIRS の計測値との相関性が確かめられた。冷感と Oxy-Hb の相関性については、畑^[7]により NIRS 計測値が申告結果と有意な正の相関を持つことが示されており、本研究と一致する結果となった。一方で、温感に関しては、温感と Oxy-Hb の相関性については、40℃に比べて 45℃の方が Δ Oxy-Hb が小さい結果も得られ、温感に対して Oxy-Hb 濃度が増加する傾向に加えて、ある温度からは Oxy-Hb が減少する傾向を持つ可能性が考えられる。

また温熱刺激による脳の賦活部位については、前頭に近づくほど Oxy-Hb 濃度が増加することが観察された。

今後、局所温熱刺激に対する脳活動をより明らした後に、その結果をもとに全体温熱刺激の実験を行う予定である。皮膚温に近い温度についての計測値との差分により温熱快適性が評価可能となれば、将来的に個人の温熱快適感にあわせた空調の自動制御が実現できると考えられる。

参考文献

- [1] 後藤昇, 後藤潤. 脳機能局在. リハビリテーション医学, Vol.38(4), pp.296–302, 2001
- [2] 岡本泰昌, 小野田慶一. ストレスを感じる前頭前野ーストレス適応破綻の脳内機構ー. 日本薬理学雑誌, Vol.126(3), pp.194–198, 2005
- [3] Rolls ET, Grabenhorst F, Parriss BA. Warm pleasant feeling in the brain. *NeuroImage* 41:1504–1513, 2008
- [4] Miyazawa T, Horiuchi M, Komine H, Sugawara J, Fadel PJ, Ogoh S. Skin blood flow influences cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy during dynamic exercise. *Eur J Appl Physiol* 113(11):2841–2848, 2013
- [5] 近藤祐樹, 侯磊, 綿貫啓一. NIRS を用いた室内空調の温熱的快適性評価 (室内温度変化に伴う脳賦活解析). 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79(807), pp.4075–4083, 2013
- [6] 侯磊, 綿貫啓一, 外池雄亮. NIRS を用いた局所温冷刺激に対する脳賦活反応解析 (冷刺激により痛覚刺激が生じた際の脳賦活反応) 日本機械学会論文集, Vol.81, No.830, 2015
- [7] 畑智也. NIRS を用いた脳活動計測による温熱感覚の客観的評価の試み. 東京大学修士論文, 2016
- [8] 酒谷薫. NIRS の測定原理. 酒谷薫他, NIRS - 基礎と臨床 -, 新興医学出版社, 2012
- [9] Jöbsis FF. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science* 23(198):1264–1267, 1977
- [10] 島津製作所. 製品情報:近赤外光イメージング装置. 島津製作所
<http://www.an.shimadzu.co.jp/bio/nirs/nirs2.htm>
<http://www.med.shimadzu.co.jp/products/nirs/01.html>
<http://www.med.shimadzu.co.jp/products/om/qa01.html>
<http://www.med.shimadzu.co.jp/products/om/qa03.html>
- [11] Delpy DT, Cope M, van der Zee P, Arridge S, Wray S, Wyatt J. Estimation of optical pathlength through tissue from direct time of flight measurement. *Phys Med Biol* 33:1433–1442, 1988
- [12] Zhao H, Tanikawa Y, Gao F, et al. Maps of optical differential pathlength factor of human adult forehead, somatosensory motor and occipital regions at multi-wavelengths in NIR. *Phys Med Biol* 47 : 2075-2093, 2002
- [13] 岡田英史, 川口拓之. NIRS トポグラフィー. 酒谷薫他, NIRS - 基礎と臨床 -, 新興医学出版社, 2012
- [14] 星祥子. 実験デザイン. 酒谷薫他, NIRS - 基礎と臨床 -, 新興医学出版社, 2012
- [15] Hoshi Y, Hazeki O, Kakihara Y, et al. Rebox behavior of cytochrome oxidase in the rat brain measured by near-infrared spectroscopy. *J Appl Physiol* 83 : 1842-1845,

1997

- [16] Hoshi Y, Shimada M, Sato C, et al. Reevaluation of near-infrared light propagation in the adult human head : implications for functional near-infrared spectroscopy. *J Biomed Opt* 10 : 064032, 2005
- [17] 河野理. 独立成分分析. 酒谷薫他, NIRS - 基礎と臨床 -, 新興医学出版社, 2012
- [18] Akgul CB, Akin A, Sankur B. Extraction of cognitive activity-related waveforms from functional near-infrared spectroscopy signals. *Med Biol Eng Comput* 44(11):945–958, 2006
- [19] Virtanen J, Noponen T, Merilainen P. Comparison of principal and independent component analysis in removing extracerebral interference from near-infrared spectroscopy signals. *J Biomed Opt* 14(5):054032, 2009
- [20] Katura T, Sato H, Fuchino Y, Yoshida T, Atsumori H, Kiguchi M, Maki A, Abe M, Tanaka N. Extracting taskrelated activation components from opticaltopography measurement using independent components analysis. *J Biomed Opt* 13(5):054008, 2008
- [21] Markham J, White BR, Zeff BW, Culver JP. Blind identification of evoked human brain activity with independent component analysis of optical data. *Hum Brain Mapp* 30(8):2382–2392, 2009
- [22] Robertson FC, Douglas TS, Meintjes EM. Motion artifact removal for functional near infrared spectroscopy: a comparison of methods. *IEEE Trans Biomed Eng* 57(6):1377–1387, 2010
- [23] VICS 株式会社ビックス. ペルチェ温度コントローラセット. 株式会社ビックス http://www.vics.co.jp/product/temp_controller/lvpu-40.html
- [24] 王子艦. 脳活動の計測による温冷感・快適感の客観的評価. 東京大学卒業論文, 2017
- [25] Hoshi Y, Kobayashi N, Tamura M. Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *J Appl Physiol* 90:1657–1662, 2001
- [26] 福田正人. 精神疾患の診断・治療のための臨床検査としての NIRS 測定. *MEDIX*, Vol.36, pp.4–10, 2003
- [27] 野澤孝之, 近藤敏之. NIRS 脳計測データのオンライン分析のためのアーティファクト除去手法の比較. 第 24 回生体・生理工学シンポジウム講演資料集, pp.381–384, 2009

謝辞

本研究をおこなうにあたって、指導教員の吉田好邦教授からは研究内容の決定からはじまり、実験の計画・準備、計測結果の解析、そして卒業論文の執筆まで、本当にたくさんのことをご指導いただきました。深く感謝申し上げます。

井原智彦准教授からは、お忙しい中にもかかわらず、実験計画について様々なアドバイスを頂きました。深く感謝いたします。

また、被験者を引き受けてくださった環境システム学専攻の学生の方々にも感謝いたします。

NIRS 計測実験をおこなうにあたっては、株式会社島津製作所の井上正雄様から、多くの技術的な指導をしていただきました。専門家の視点からのアドバイスは、研究をスムーズに進めるのに非常に有効となりました。

最後に、私の研究を支えてくださったすべての方々に感謝申し上げます。

李 和聡