



# 高温・低温放射源を用いた非接触温度情報提示システム

A Non-contact Thermal Display System by Higher and Lower Temperature Radiation Sources

久米祐一郎<sup>1)2)</sup>, 水野統太<sup>1)</sup>, 米澤李音<sup>1)</sup>

Yuichiro KUME, Tota MIZUNO and Rio YONEZAWA

- 1) 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, ykume1583@uec.ac.jp, mizuno@uec.ac.jp)  
2) 平由商店研究部 (〒176-0001 東京都練馬区練馬 1-20-8 日建練馬ビル 2F, hirayoshishoten@x.email.ne.jp)

**概要:** 非接触で温覚・冷覚のみを刺激できれば、臨場感や自由度が高いバーチャル環境構築が可能となる。本研究では、人体より高温および低温の放射源を用いた非接触温度情報提示システムの開発を行っている。基礎実験では高温放射源として赤外線電球、低温放射源として保冷材を用いて、離れた位置の物体の加温、冷却特性について測定した。その結果、加温および冷却を連続的に行えることを明らかにした。また心理物理実験により温感、冷感を人体に生起できることを明らかにした。さらに実験結果を基にした非接触温度情報提示システムの構築も試みた。

**キーワード:** 温度ディスプレイ, 温覚・冷覚, 放射, 非接触

## 1. はじめに

高臨場感を提示して操作性や表現を高めるバーチャルリアリティ構築のために、体性感覚情報提示の研究開発が盛んに行われている。体性感覚の1つに温覚・冷覚があり、これまでも温度ディスプレイについて検討されているが[1]、他の力触覚ディスプレイ等と比較すると研究例は多くはない。もしバーチャル環境に温度情報を提示できれば、より高度な感覚情報提示が可能となり、応用も拡がると考えられる。

熱の伝搬には伝導、対流、放射(輻射)の三様があり[2]、温度ディスプレイの開発のためには、これらの性質を上手く応用する必要がある。伝導を用いた研究として、ペルチエ素子によって、人体との接触により温度情報を提示する例が多い。ペルチエ素子は、高温、低温を簡単に電気制御できる利点がある一方、機械的な接触によって触覚も同時に刺激するため、人体が物体に接触する状況に利用が限定される。温風や冷風による強制対流を利用する温度ディスプレイも考えられているが、非接触ではあるものの風圧によって触覚も刺激してしまう。

より自由度が高く、より広い応用のためには温覚・冷覚のみを他の体性感覚とは独立して刺激できる温度ディスプレイが好ましいと考えられる。

これに対し我々は、先行研究において放射による温度ディスプレイについて研究開発を行ってきた[3]-[5]。

放射による加温は赤外線を放射するランプやヒーター等を使用すれば容易に実現できるが、反対に冷却は難し

く、研究例は少ない。我々は先行研究において、反射導光筒を用いる等の工夫によって、放射によって冷覚を生起できることを既に確認している[5]。

バーチャル環境構築のために温度ディスプレイとしては、人が苦痛なく温冷を知覚できる温度範囲[6]を提示できることが必要である。本研究では人の体表より高い温度の放射源と低い温度の放射源を用い、提示する人の体表において放射および入射する赤外線を制御し、温感、冷感を高速に提示できる温度ディスプレイの実現を目標としている。本研究では体表より高温、および低温の放射源を用いて物理的な加温・冷却特性、人間の温覚・冷覚の特性を明らかにすることを目的とした。また本稿では実験結果を応用した温度ディスプレイの試作についても述べる。

## 2. 放射による温度提示の原理

放射による物体の加温と冷却は、対象となる物体と周囲の放射源との間の、電磁波のエネルギー収支によって決まり、この現象は Stefan-Boltzmann の法則として知られている[2]。

物体を放射率  $\epsilon$  が 1.0 の黒体と仮定すると、その放射発散度  $I$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) は絶対温度  $T$  (K) とすると、(1)式となる。

$$I = \sigma T^4 \quad (1)$$

$\sigma$  は Stefan-Boltzmann 係数 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) である。

絶対温度が  $T_0$ ,  $T_1$  の物体間の熱収支は(2)式となる.

$$I = \sigma(T_0^4 - T_1^4) \quad (2)$$

物体においてエネルギー収支を考えると, 放射するエネルギーが入射するエネルギーより大きい場合は冷却され, その逆の場合は加温される.

本研究では, 人体表面の絶対温度を  $T_0$ , それより高い温度  $T_1$  の物体と低い  $T_2$  の物体を, 温度情報を提示する人の周囲に配置して,  $T_1$ ,  $T_2$  の温度を制御して人体から放射, 入射するエネルギーを(3)式に基づいて制御する. 人体および2物体の放射率  $\varepsilon$  は 1.0 と仮定している.

$$I = \sigma(T_0^4 - T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

この様子を図1に示すが, これにより  $T_1$  と  $T_2$  を適切な温度にすることによって,  $I > 0$  のとき体表の冷却,  $I < 0$  のとき加温が可能となる. この現象を利用して人の体表温度を痛覚等の不快感が生じない 15~42°Cの範囲[6]で制御することを目標とした.

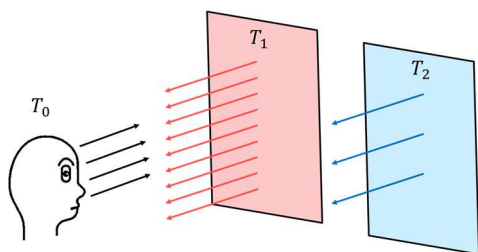


図1: 高温低温放射源による熱収支と温度情報提示

### 3. 実験装置

放射を用いる温度ディスプレイの原理を検証するために, 図2に示すような実験装置を製作した. 高温の放射源として, ペット飼育用 150W 赤外線電球 (GEX PT2146), 低温の放射源として冷凍庫と保冷材(Logos GT-16°C)を用いた. 実験時の保冷材の表面温度は約-25°Cとした.

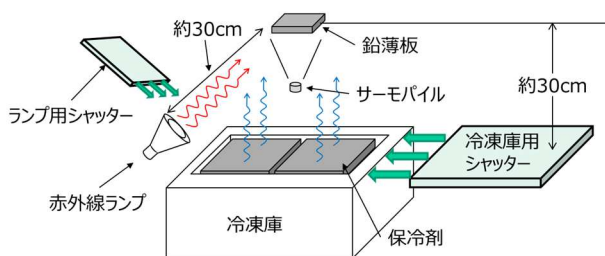


図2: 高温低温放射源による温度変化実験装置

赤外線電球の温度は印加電圧の制御によって可変であるが, 保冷材の表面温度制御は難しい. そのため保冷材からの放射は一定とし, 赤外線電球からの放射強度を変える

ことによって, 対象物表面のエネルギー収支を変化させ, 温度を変化させた.

物理特性として対象物体の表面温度変化を測定した. 対象物体として背面を断熱材 (スタイロフォーム) とした比熱が小さい 0.2mm 厚の鉛薄板を設け, その表面温度をサーモパイルセンサー (ハイマンセンサー HTIA-E) で非接触計測した. また放射源からの放射を高速で開閉, 切り替えるために赤外線電球の前にアルミ板, 保冷材の前に断熱材のシャッターを設けた. 周囲の環境として実験室内の気温は約 25°Cとした.

### 4. 物体の加温と冷却特性

赤外線電球および保冷材による放射の開閉, さらに赤外線電球への印加電圧をパラメータとして, 鉛薄板の温度変化を測定した.

実験はシャッターを閉じた状態, すなわち赤外線電球および保冷材からの放射が鉛薄板に入射しない状態で赤外線電球を所定の電圧で点灯, 1分後にシャッター開き, 6分経過後にシャッターを閉じ, その後3分間の温度変化を測定した.

図3に結果の一例を示す. 凡例に示すように, グラフの最も下の曲線は赤外線電球を点灯せずに, 保冷材のみの放射の場合である. 最も上の曲線は電球への印加電圧を 100%とし, 保冷材のシャッターを閉じ, 電球のみで加温したときの温度変化である. その中間の曲線は印加電圧を変化させ, 保冷材シャッター開閉したときの鉛薄板の温度の変化を示している.

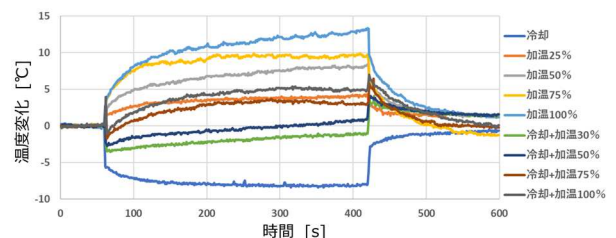


図3: 高温低温放射源による鉛薄板の温度変化

シャッター開閉直後に入射する赤外線に応じて鉛薄板の温度が急激に変化し, 徐々に平衡状態になりつつあった. またこの温度変化は電圧を 100%印加した赤外線電球のみと, 保冷材のみによる温度の範囲内では, シャッターと赤外線電球への印加電圧を制御して, 任意の温度提示が可能であることが示された.

冷却時は保冷材の表面温度を制御することが難しいため, 赤外線電球と組み合わせて提示温度を設定しなければならない. 保冷材の表面温度を-30°C以上に冷却することは困難であり, 体表温との温度差を大きくすることは難しい. , また保冷材表面への着霜の発生も問題となる[5]. そのため, 冷却効果を上げるためには冷却部分の面積を増加させる必要もある.

### 5. 人体の加温と冷却

放射による温度変化の物理特性は鉛薄板を用いて測定したが、温度ディスプレイでは人を対象とするため、放射による皮膚表面の温度変化特性を明らかにしなければならない。皮膚の熱容量は鉛薄板より大きく、皮膚の発熱の影響も予想された。本研究の目標は人に温覚・冷覚を生起させる温度ディスプレイであるため、体表における放射の変化に対する温覚と冷覚の主観評価を合わせて行った。

#### 5.1 体表の温度変化特性

図 2 に示す実験装置の鉛薄板の場所に手掌部を置いて、同様の実験条件で体表温度の変化を測定した。被験者は 20 歳台 6 名とした。

ある被験者 (23 歳男性) の測定結果を一例として図 4 に示す。図 3 に示した鉛薄板の結果と比較すると温度変化が小さくなっている。また加温 50%のみ、冷却と加温 50~100%の場合、皮膚温度の変化に大きな差はなかった。この結果は、測定時の体表の初期温度が高いこと、皮膚の熱容量が鉛薄板より大きいこと、皮膚に発熱作用があることが原因の可能性があり、更なる検討が必要である。測定開始時の鉛薄板の表面初期温度はほぼ室温であったが、手掌は 30-33℃であった。

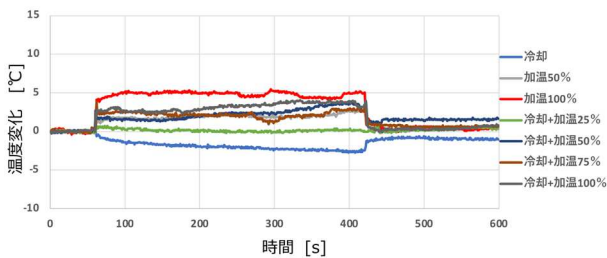


図 4： 高低温放射源による手掌部の温度変化

#### 5.2 温覚・冷覚の主観評価

本研究の目的は温覚・冷覚を生起させる温度ディスプレイの実現であるため、放射による温覚・冷覚の心理物理評

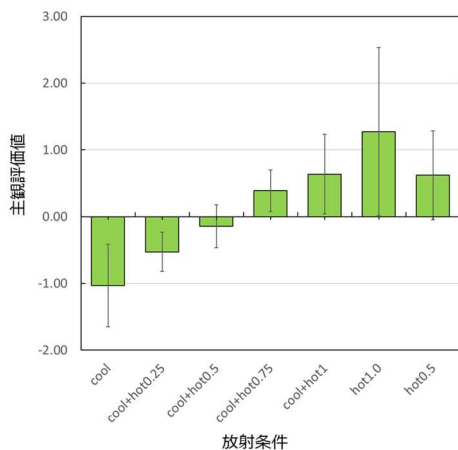


図 5： 高低温放射源による手掌部温度変化の主観評価

価が重要である。このため温冷についての主観評価を体表温度測定時に以下の手続きで行った。

シャッターを閉じた初期状態を 0、温かさの限界、不快になるときを+5、冷たさの限界、不快になるときを-5 として、体表温度の測定時にシャッターを開いて 3 分経過時の温覚、冷覚について、被験者には-5 から+5 の数値で解答させた。

図 5 に被験者 6 名の平均値を示す。冷却のみの場合、加温のみの場合は冷たさ、温かさの主観評価も大きくなっている。冷却しつつ赤外線電球で赤外線照射した場合、電球への印加電圧の増加に合わせて温かさも増加し、知覚する温度情報を可変できた。この結果から放射によって温覚、冷覚を生起させ、連続的に変化する温度情報を伝達できることが明らかになった。

しかし、この結果は皮膚温度の変化とは一致していない。赤外線の放射、入射による皮膚温度の変化とは異なっている。赤外線の皮膚への透過と吸収、測定もサーモパイルを使用して赤外線を検出しているため測定場所等の特性など解明すべき点も多い。今後は放射による皮膚に対する加温冷却効果と温覚・冷覚の関係など詳細に調べる必要がある。

また温覚・冷覚は刺激の時間変化に影響されることを知られており[6]、時間変化を伴う放射による、温覚・冷覚の特性について検討する必要がある。

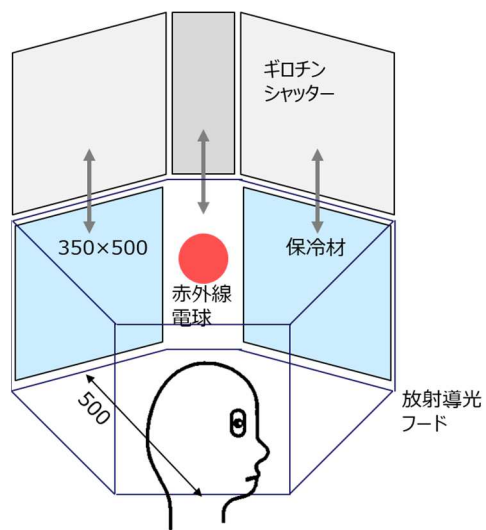


図 6： 試作した温度ディスプレイの概念図

### 6. 温度ディスプレイシステムの試作

基礎実験の結果を基にして、放射による非接触温度ディスプレイシステムの試作を行った。製作したシステムの概略を図 6 に示す。

放射については三面構造となっており、使用する人の正面に高温放射源である赤外線電球、低温放射源は面積を増やすために左右に保冷材を配置した。

また放射源と人との間の加温・冷却の放射の効率を上げ

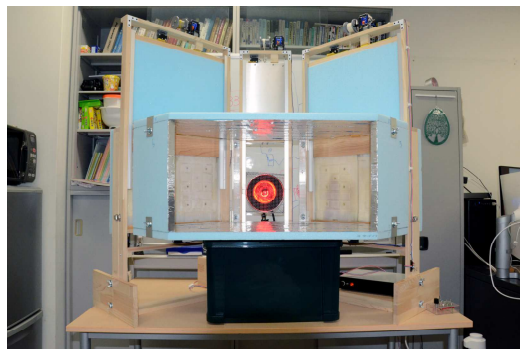


図 6 : 試作した温度ディスプレイの外観

るために、赤外線導光用に内面が赤外線反射率が高いアルミニウムで覆われたフードを設けた。赤外線電球前にアルミ板、保冷材前には断熱材のギロチンシャッターを設け、これらのシャッターは重力と巻上機によって開閉し、放射を制御した。図 7 に試作した温度ディスプレイの外観写真を示す。

放射導光フード開口部の提示部に、基礎特性測定実験と同様に背面を断熱材とした鉛薄板を置き、サーモパイルセンサーでシャッターの開閉による温度変化を測定した。

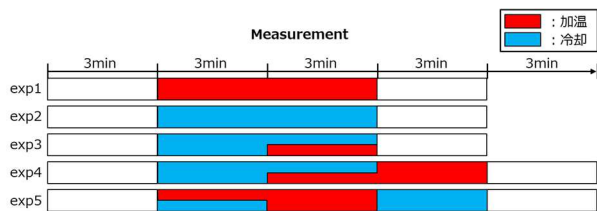


図 8 : 温度ディスプレイの特性測定用放射プロトコル

図 8 に特性測定の放射制御プロトコルを示す。加温の場合は赤外線電球前のシャッターを開き、冷却の場合は保冷材前のシャッターを開いた。なおこの実験では赤外線電球への印加電圧は一定で点灯し、放射の制御はシャッター開閉のみで行った。

実験結果の一例を図 9 に示す。赤外線ランプのみ、保冷材のみ、また両者を合わせた場合の鉛薄板の温度変化であり、放射によって加温、冷却して、対象物の温度が変化している。これまで同様、シャッター開閉後に急減に温度は変化して、徐々に平衡状態に達した。また(3)式で示した放射によるエネルギー収支による本温度ディスプレイの原理についても確認できた。

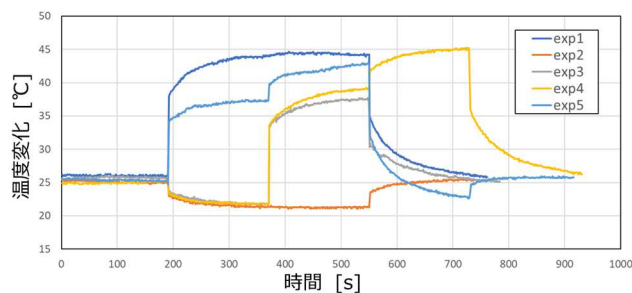


図 9 : 試作温度ディスプレイによる鉛薄板の温度変化

## 7. おわりに

高温および低温の放射源を用いる温度ディスプレイの可能性を検討し、対象物の加温冷却、温度制御が可能であること、人に温感、冷感を生起できることを明らかにした。

本研究の温度ディスプレイの目標は、バーチャル環境で人に対して非接触で、また温覚、冷覚を高速で生起せしめることである。そのために装置の改良と合わせて、赤外線の放射や入射に対する温度感覚特性の解明を進めていく予定である。そして火事や火山の映像に対応して加温したり、雪山や極地に対応して冷却したりする高臨場感ディスプレイの実現を目指したい。

## 参考文献

- [1] L. A. Jones: Perspectives on the Evolution of Tactile, Haptic and Thermal Displays, Presence, vol. 25, No. 3, pp.247-252, 2016.
- [2] 日本機械学会：伝熱工学，丸善出版，2005.
- [3] 斉藤芳英，久米祐一郎：非接触型温度情報提示装置の検討，映像情報メディア学会技術報告，Vol. 39, No. 11, pp. 1-4, 2015.
- [4] 久米祐一郎，石渡哲次：非接触式温・冷覚情報提示の検討，第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，pp.100-101, 2015.
- [5] 富永真琴：温度受容の分子機構—TRP チャンネル温度センサー—，日本薬理学雑誌，124, pp.219-227, 2004.
- [6] 多屋淑子：温度感覚，産業技術総合研究所人間福祉医学研究部門編，人間計測ハンドブック，朝倉書店，pp.201-206, 2003.