



# 輻射による非接触温度ディスプレイのデモシステムの製作

## Development of a Non-Contact Thermal Display Demonstration System Using Radiations

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

Yuichiro KUME and Tota MIZUNO

- 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:** より高度な VR や高臨場感の実現のために, 人体より高温と低温の輻射源を人体の近傍に配置して, 高温輻射源の温度を制御することにより体表に温冷感を非接触で連続的に生起できることを明らかにしている. この原理を実用的なシステムへ応用する場合, 遠赤外線輻射の制御や輻射源と体表との温度差を考慮したシステム設計が必要である. 実用性を確認するためのデモシステム製作したが, それに際して輻射源の特性を考慮し, シャッター制御や遠赤外線を反射によって導くフールドを検討し, その効果を測定して有効性を確認した.

**キーワード:** 温度ディスプレイ, 非接触, 輻射, 温覚・冷覚

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR)環境下では, 視聴覚に加えて力触覚などの体性感覚を再現する研究開発が盛んである. 体性感覚中の温覚と冷覚を生起する温度ディスプレイを VR システムに実装できれば, より高度な環境を提供できる.

我々は非接触式の輻射を用いた温度ディスプレイの開発に取り組んでいる[1-3]. これまで, 高温と低温の輻射源を人の手の周囲に配置し, それぞれの輻射制御により, 温覚から冷覚を連続的に生起できることを確認してきた[3].

これまでの原理の検証結果と得られた知見を基にして実際に体験が可能なデモシステムを試作し, 物理特性や心理評価による動作確認や問題点を抽出することが, より実用的なシステム開発のために必要である.

本研究ではこれまでの原理の検証結果と得られた知見を基にして, 温度情報提示デモシステムの設計と製作を行い, その特性について検討することを目的とした.

## 2. 設計方針

これまでの研究結果から得た知見[1-3]を基にして, 顔面へ温度情報提示するデモシステムを以下の点を考慮して設計した.

### 2.1 高温および低温輻射源

提案する非接触温度ディスプレイの基本原則として輻射源のエネルギー収支を考える. 人の体表, 高温および低温の輻射源の絶対温度をそれぞれ  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  として, これ

らの物体を黒体と仮定すれば, 放射発散度は Stefan-Boltzmann の法則により, それぞれ  $\sigma T_0^4$ ,  $\sigma T_1^4$ ,  $\sigma T_2^4$  となる[4]. ただし  $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数  $5.67 \times 10^{-8} (\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$  である. そして, 体表面におけるエネルギー収支  $I$  は以下の式で表せる[5].

$$I = \sigma (k_0 T_0^4 - k_1 T_1^4 - k_2 T_2^4) \quad (1)$$

ここで  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  はそれぞれの物体の大きさ, 形状, 位置, 光学特性に関わる定数である. 式(1)の  $I$  が正ならば体表からエネルギーを輻射し冷却され, 逆に負ならばエネルギーが入射して加温される.

人体の体表温は概ね 300K 強であり, 低温輻射源との温度差は高温輻射源との差より小さく, しかも輻射はその絶対温度の 4 乗に比例する. 放射発散度は単位面積・時間当たりのエネルギーなので, 冷却を効果的に行うために, 低温輻射源の面積を大きくした.

### 2.2 シャッター機構

高温・低温輻射源の温度を変化させる場合, 輻射源へのエネルギーを変化させても熱容量のため温度が定常状態に達するまで時間を要してしまう. また VR への応用を考えると瞬時の温度情報変化が必要となる場合もある. そのためシャッター機構による輻射の開閉を行った.

### 2.3 遠赤外線の導光

式(1)に基づいて遠赤外線の収支により加温と冷却を行う場合, 高低温の輻射源と人体の間で効率良く遠赤外線を

導く必要がある。特に体表と低温放射源の温度差が小さいため対応が必要である。しかし遠赤外線波長領域ではガラスの透過率は低くレンズとして利用できず、屈折光学系によるエネルギー密度や輻射方向の変換に利用できない。一方、金やアルミニウム等の特定の金属は遠赤外線に対しても反射率が高いため、それによる反射光学系を用いて遠赤外線を人体と輻射源の間で導いた。

## 2.4 刺激部位

低温と高温輻射源、温度情報を提示する人体部位の条件として、通常露出していること、温度変化に対して高感度であることが望ましい。この条件を満たす部位として顔面と手があるが[6]、本デモシステムでは顔面を刺激部位として製作した。

## 3. 製作したデモシステムの概要

図1に試作した温度ディスプレイのデモシステムの概略と外観写真を示す。

低温輻射源として、人の前面に保冷材(Logos GT-16°C)を左右2枚ずつ配置した。高温放射源として、正面には縦長のカーボンヒーター (TEKNOS CHI-309) を配置した。開口中央部と輻射源の距離は450mmとした。また低温輻射

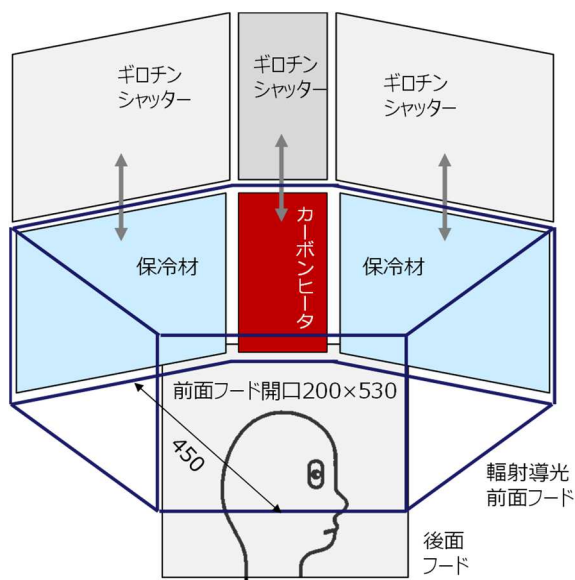


図1: 試作した温度ディスプレイのデモシステム

源の前面に断熱材(スタイロフォーム)を、高温輻射源には二重アルミ板を用いて、上下に移動するギロチンシャッターを設け、短時間で開閉する機構とした。

断熱材であるスタイロフォームでできた前面フードは輻射源からの遠赤外線を人の顔面へ導くように覆い、内面は遠赤外線の反射率が高い鏡面アルミホイルで覆った。

後面フードは前面フードの開口部で人に入射しなかった遠赤外線を反射させており、材料は前面フードと同じである。

カーボンヒーターの出力、シャッターの開閉は接続したPCで制御した。

## 4. フードの効果

フードの効果を測定するために、前面フード開口部の顔面の位置に0.2mm厚の鉛薄板を置いて、シャッター開閉時の温度変化をサーモパイルセンサ(SSC SST-NCM1835)で測定し、1s間隔でPCへ取り込んだ。鉛薄板の背面は20mm厚のスタイロフォームで断熱した。測定は人との温度差が小さくフードの効果が期待される低温輻射源について行った。測定開始時に保冷材の表面温度は-30°Cであった。また測定時の室温は約25°Cに保つようにした。

最初シャッターを閉じた状態で測定を開始し、開始3分後にシャッターを開き、その6分後に閉じた。その間の温度変化を調べた。

図2に前後フードの有無、輻射源に対して正面、裏面に向けた鉛薄板の温度変化を示す。前面フードの有無に対して温度変化の大きさの差は大きい。また後面フードがある場合、後に向けた鉛薄板も冷却されることが明らかになった。これらの結果より前後フードの効果が確認された。

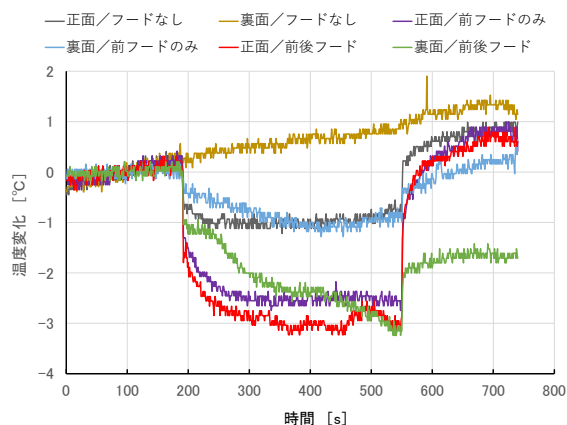


図2: 前後フードの有無、低温輻射源に対して正面および裏面の温度変化。

## 5. シャッターの効果

デモシステムのシャッターの効果を検証するために、低温輻射源のシャッターを開いたときの、鉛薄板の温度変化を測定した。測定方法はフード効果の検証実験と同じである。また非接触冷却方法である触覚閾値以下の微風による

強制対流と比較した。

輻射は低温輻射源を使用，低温微風は気化熱を使う冷風扇（吹出口で約 22℃）を用いて，風速を制御した．冷風扇はカーボンヒーターの位置に置いて定期的に運転し，シャッターで流れを開閉した．

図 3 に結果の一例を示す．輻射と微冷風では到達温度が異なるため，シャッターを開いてから 3 分経過した時点の値を -1 として規格化した．風速が 0.3 と 1.0m/s の微冷風と低温輻射の場合を比較した．1.0m/s の場合は触覚閾値上であり，風を皮膚の触覚で知覚できるが，0.3m/s の場合はほぼ閾値である[1]．またノイズの影響を抑えるためにグラフの曲線は 5s の移動平均値で示してある．

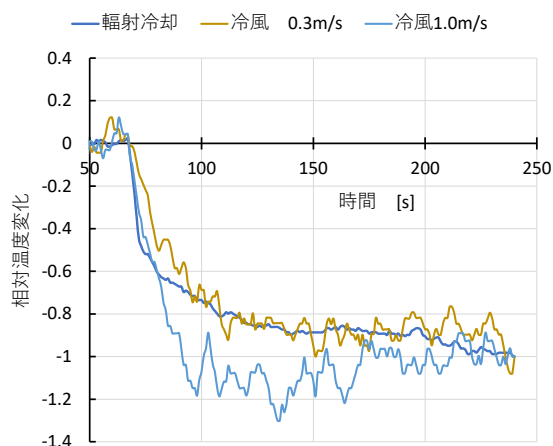


図 3：輻射冷却と冷風による鉛薄板の冷却

グラフよりシャッターを開いた直後は，輻射冷却と 1.0m/s の冷風の場合は鉛薄板の温度が下がるが，冷風の方が定常状態に達するまで短かった．一方触覚の閾値に近い 0.3m/s の微冷風の場合はシャッターを開いた直後の立下りが遅かった．

これによりシャッターは温冷の高速切替の効果と，触覚を刺激しない微風より速い温度変化を提示できることが明らかになった．

### 6. 冷却と加温

実際に人に提示するときと同様にして，低温輻射と高温輻射のシャッターの開閉による輻射の変化に対する温度変化をフードの有無と鉛薄板の方向の条件により測定した．図 4 は高温と低温の輻射のプロトコルを示す．加温と冷却はそれぞれの輻射源のシャッターを開いた状態を示

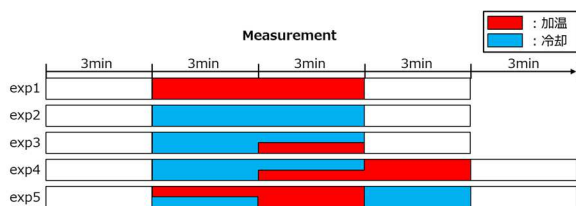
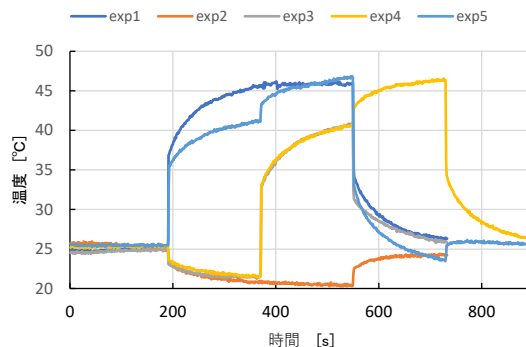
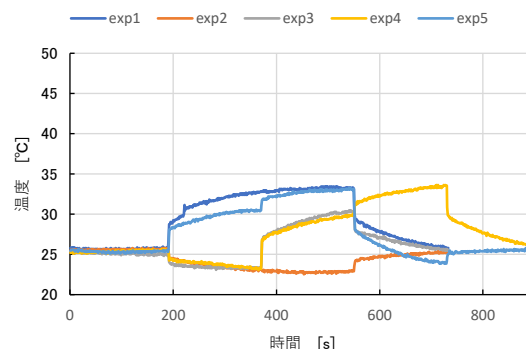


図 4：温度ディスプレイの特性測定用放射プロトコル



(b) 鉛薄板を前面に向けた場合



(b) 鉛薄板を後面に向けた場合

図 5：製作したデモシステムにおける温度変化特性

している．測定は鉛薄板が正面，すなわち輻射源を向いた場合と，後面を向いた場合について測定した．測定系はこれまでと同様，鉛薄板を顔面の位置に設置して背面はスタイロフォームで覆い，計測はサーモパイルセンサで行った．

図 5 に測定結果を示す．低温輻射源のみを開いたときは鉛薄板の温度が低下し，高温輻射源のみ開いたときは温度が上昇した．また両方を開いたときは，その中間の温度となっており，(1)式のモデルがおおよそ成り立っている．

鉛薄板の向きについては，前面に向けた場合は後面に向けた場合と比較して，輻射源と直接赤外線とのやり取りがあるため温度変化は大きくなっている．後面に向けた場合，輻射源と鉛薄板の間で，赤外線はフード内面で反射を繰り返している．アルミニウムは遠赤外線に対して反射率が高いものの，1.0 ではなく反射を繰り返すと吸収によってエネルギーは低下する．また今回使ったアルミホイルの表面は完全な鏡面ではなく，これによる損失もある．しかしながら温度変化は小さくなるものの，後面フードによって後面からの加温と冷却も可能であることが明らかになった．

### 7. むすび

高温と低温の輻射源を用いて温覚と冷覚を刺激する非接触温度ディスプレイのデモシステムを製作し，その物理的な特性を測定した．今後はこの結果に基づいて被験者を使った心理物理実験や主観評価を行う予定である．

またこれらの結果を基にして、さらに大きなシステム、例えば高臨場感シアター等への設計指針を検討したい。

## 参考文献

- [1] 齊藤芳英, 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, 39 巻, 11 号, pp.1-4, 2015.
- [2] 久米祐一郎, 石渡哲次: 放射冷却を用いた温度ディスプレイの検討, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1D3-05, 2017.
- [3] 久米祐一郎, 水野統太, 米澤李音: 高温・低温放射源を用いた非接触温度情報提示システム, 日本バーチャルリアリティ学会第 27 回大会論文集, 1F3-4, 2022.
- [4] 日本電熱協会 遠赤外線委員会: 遠赤外線加熱の原理と実際, オーム社, 1991.
- [5] 日本機械学会: 伝熱工学, 丸善出版, 2005.
- [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.