

# 超音波加熱にもとづく非拘束な温覚提示の提案

## Remotely Provided Thermal Sensation Based on Ultrasonic Heating

○正 星 貴之 (名工大)

Takayuki HOSHI, Nagoya Institute of Technology, star@nitech.ac.jp

This study proposes a noncontact method to provide thermal sensation. It was observed that the plate is heated when slits on a plate are exposed by a high-amplitude ultrasound. There is a possibility to provide thermal sensation remotely by utilizing this phenomenon. Users' motion is not restricted by wires etc. Furthermore, arbitrary positions can be heated because our ultrasonic device has an ability to move a focal point of high-amplitude ultrasound. This paper gives an explanation of this phenomenon and experimental results.

**Key Words:** Tactile display, Ultrasonic heating, Focused ultrasound, Noncontact.

### 1. はじめに

触覚提示の研究は圧覚に着目したものが多く、冷温覚を提示する研究も行われている。例えば文献[1]では空間パターンを冷温覚として提示する装置が報告されている。また文献[2]では冷温の空間パターンにより生じる人間の錯覚を利用した冷温覚提示の高速化が試みられている。これらはペルチェ素子を用いた研究である。他に、冷水・温水を用いた冷温覚提示[3]も行われている。いずれの提示法においても、電気的配線あるいは液体を流すチューブが必要である。そのため装置は据え置き型か、装着型の場合には配線等によりユーザの動作が拘束されるものであった。また温覚に限れば、ハロゲンヒーターによる非拘束な提示[4]も試みられている。

筆者はこれまで集束超音波によって生じる音響放射圧を利用した非接触触覚（圧覚）提示の研究を行ってきた[5][6]。これは超音波焦点における音響放射圧を利用して皮膚表面に応力を与える触覚提示法であり、主に手のひらを対象としたものであった。学会やイベント等でデモ展示を行っていたところ、体験者から「超音波が指の隙間に当たると熱い/痛い」というコメントが得られた。筆者もこれを試し、指の隙間がかすかに温くなることを体感した。痛みについては、局所的な温度変化を錯覚したと考えられる。

本研究ではこの現象を利用し、ユーザが装着した受動デバイス（スリットを設けた板）に超音波を照射することによる非拘束な温覚提示を提案する（図 1）。配線等が不要であるため、ユーザの動作は拘束されない。本研究で用いる超音波装置は任意の位置に超音波を集束させることができるため、複数の部位を対象としたりユーザの動作に追従したりすることも可能となる。

本稿では提案する温覚提示法の基礎的検討を行う。超音波装置について紹介し、発熱原理について考察する。また発熱の様子を実験により観察する。

### 2. 超音波集束装置

文献[6]で製作した小型超音波装置を使用する。一辺 17 cm の矩形領域内に 285 個の超音波振動子（T4010A1、日本セラミック株式会社製、共振周波数 40 kHz、直径 1 cm）が配列されている。装置に内蔵された FPGA が焦点位置にもとづいて振動子間の適切な位相差を算出し、各振動子に応じた駆動信号を生成する。焦点における音圧の最大値は 2585 Pa RMS である。焦点位置は 0.5 mm 刻みで指定可能である。

矩形の振動子アレイを用いたとき、焦点面に生じる超音波の音圧分布はほぼ sinc 関数に従うことが理論的に導かれている[5]。メインローブ（焦点）の直径  $w$  [m] は次式で表される。

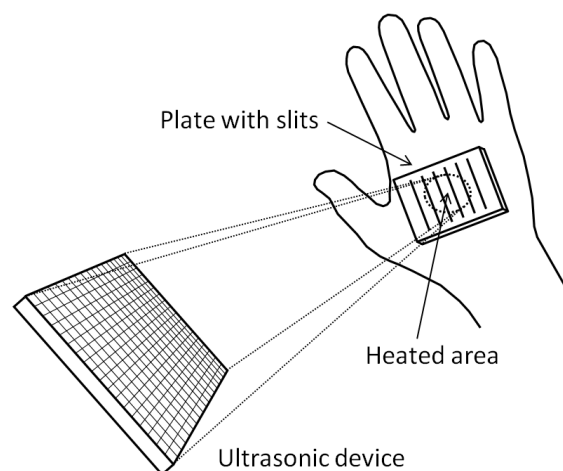


Fig. 1 Illustration of proposed method.

$$w = \frac{2\lambda R}{D} \quad (1)$$

ここで  $\lambda$  [m] は超音波の波長（40 kHz の場合 8.5 mm）、 $R$  [m] は焦点距離、 $D$  [m] は矩形振動子アレイの一辺の長さ（今回は 17 cm）である。例えば焦点距離  $R = 15$  cm のとき、焦点径  $w = 15$  mm。提案手法において、この範囲内が加熱領域となる。

### 3. 超音波加熱

スリットに集束超音波を照射すると熱が生じる現象は、熱音響現象[7]との関連が考えられる。これは音波が狭い空間内を伝搬するとき周囲との熱交換が行われたり、逆に熱により音波が発生したりする現象である。ただし熱音響現象の理論にもとづく説明の妥当性の評価や、適切なモデルを構築して解析を行うことは現時点では達成されておらず、今後の課題である。

### 4. 実験：発熱過程の観察

試料（スリットを設けた板）に集束超音波を照射し、赤外線サーモカメラ VT02（Fluke 社製、温度分解能 0.25 °C）を用いて観察した（図 2）。焦点距離は 15 cm に設定した。

試料は厚さ 5 mm のアクリル板にレーザー加工機で線を描くことにより作製した（図 3）。スリット間の間隔を 1 mm、スリットの太さを 0.4 mm、長さを 5 mm とした。これらは、加工時にアクリル壁が熱で湾曲しないよう配慮した値である。



Fig. 2 Experimental setup.

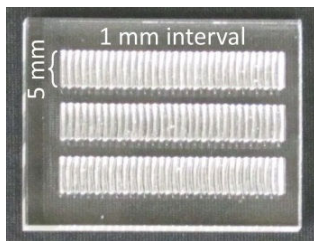
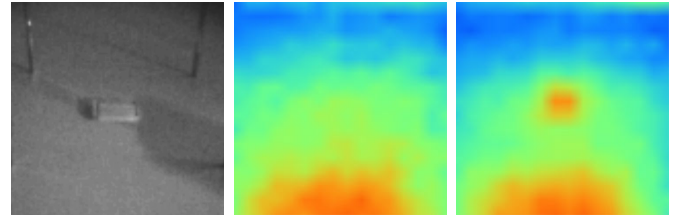


Fig. 3 Sample (acrylic plate with slits).



(a) photo (b) 0 sec. (c) 300 sec.

Fig. 4 Photo and thermal images of observed area.

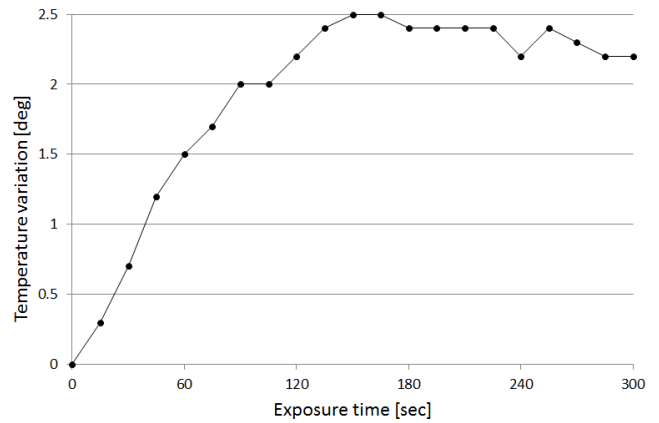


Fig. 5 Time series of temperature variation at sample.

図 4 (a) に試料が置かれた観察領域の写真を、図 4 (b) (c) に超音波照射前 (0 秒) と照射後 (300 秒) の熱画像を示す。試料の位置において温度上昇が見られる。また試料の位置における温度の時間変化を図 5 に示す。超音波照射直後から温度が上昇し始め、2 分半で 2.5 °C 変化したあと飽和する様子を読み取れる。

## 5. おわりに

本稿ではワイヤレスな温覚提示法を提案した。スリットを設けた受動デバイスを対象部位に設置し、集束超音波を照射することで発熱させる。熱音響現象を紹介し、スリット周囲の温度が上昇することを実験により確認した。

今後は理論と実験の両面から発熱現象について詳細に検討する。その後、人間の温度知覚に与える影響を調べる。

## 文 献

- [1] 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 論文集, pp. 723-728, 2012.
- [2] 佐藤克成, 前野隆司: 温・冷刺激の空間分割による高応答性温度提示ユニット, インタラクシオン 2012 論文集, pp. 923-928, 2012.
- [3] 坂口正道, 尾畑幸幸, 清水俊介: 温水と冷水を用いた高速温度提示システムの構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH2012) 講演論文集, 1P1-A01, 2012.
- [4] 松野祐典, 栗原一貴, 宮下芳明: 「その場」に熱い視線が届く生放送, インタラクシオン 2013 論文集, pp. 361-366, 2013.
- [5] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound, IEEE Transactions on Haptics, vol. 3, no. 3, pp. 155-165, 2010.
- [6] 星貴之: 空中超音波触覚ディスプレイの可搬性の向上, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH2012) 講演論文集, 1A1-A03, 2012.
- [7] 富永昭: 熱音響現象の理解とその応用, 日本物理學會誌, vol. 55, no. 5, pp. 326-331, 2000.