温度刺激点間における相互温度参照現象

○渡辺 亮[1)]，岡崎 龍太[1)]，梶本 裕之[1)2)]
1）電気通信大学　2）科学技術振興機構

Mutual Referral of Thermal Sensation between Two Thermal-tactile Stimulations

○Ryo WATANABE, Ryuta OKAZAKI and Hiroyuki KAJIMOTO
1) The University of Electro-Communications 2) JST

Abstract: When thermal stimulation is applied to one place and tactile stimulation is presented to the other place on the skin, we also perceive thermal sensation on the latter place. While this illusion, known as Thermal Referral, was well studied, there was little knowledge about the case when two contradictory thermal stimuli are presented, except Thermal Grill Illusion (TGI) when closely located hot and cold stimuli cause pain. We conducted an experiment to verify mutual interaction of thermal referral between thermal-tactile stimuli, and found that two separately located cold and hot stimuli on forearm produce pain especially on the body side, which is presumably caused by combination of thermal referral from distal side to body side, and thermal grill illusion between the migrated thermal sensation and physical thermal stimulation.

1. はじめに

触刺激と温度刺激を同時に異なる場所に提示した時，温度感覚が触刺激を提示した箇所に移動する現象が知られている．Green はこの錯覚現象を Thermal Referral と呼称した[1]. Thermal Referral は直訳すれば「温度の参照」であり，触刺激提示部の知覚温度決定の際に，別位置に提示された温度が参照されるということを意味する．

これまで Thermal Referral は主に手指，前腕で観察されてきた．初期の報告は手の人差し指と薬指の末節のみを温度提示素子に接した状態で， 中指の末節を常温の接触子に押し付けると，中指においても同様に温度を知覚するというものであった[1]．その後 Green は Thermal Referral は人差し指・中指・薬指の 3 指において両側に温度刺激を提示する場合のみではなく，人差し指と中指，中指と薬指など 2 指において一方にのみ温度刺激を提示した場合にも生じること，指先のみでなく前腕においても生起することを報告した[2]．手指，前腕ともに，刺激間の距離が Thermal Referral の生起率や知覚に影響を及ぼすことも報告されている[2][3].

また Green は人差し指・薬指に温刺激を，中指に冷刺激を同時に提示した場合，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（合成熱）が知覚されたことを報告した[1]. Synthetic Heat（以下 SN）とは，温刺激と冷刺激を皮膚上の近傍へ同時に提示した際に知覚される温度が，温刺激のみを提示した際の知覚温度よりも高くなるという錯覚現象である[4]．SN は Thermal Grill Illusion（略称 TGI）の別名をもって知られ，時として痛覚や灼熱感を生じる [5][6].

以上のように，これまでの Thermal Referral についての研究は，皮膚上のある定められた点の温度知覚が異なる点に提示された温度刺激によりどのように影響されるかという，いわば 1 方向的な作用の観察が主であった．Ho らは人差し指・薬指に同一の温度刺激を，中指に常温刺激を提示した際，中指に温度が知覚されるのみならず，外側 2 指に知覚される温度の強度が低下したことを報告した[7]．しかし複数の異なる温度刺激点，つまり温刺激点と冷刺激点の間における相互作用についてはほとんど論じられてこなかった．

仮に皮膚上の 2 温度刺激点 A，B を考える．Thermal Referral の性質に従えば，点 A では提示された温度刺激に加え，点 B の知覚に影響を受けることになる．点 B でも同様に，点 A の知覚に影響を受けると考えられる．点 A，B の間には知覚温度の相互参照，いわば Mutual Thermal Referral が行われるのではないだろうか．とすればその結果はどのような温度知覚をもたらすのだろうか.

本研究は，複数の温度刺激点の間で生起する Thermal Referral の機序を解明することを目的とする．本稿では前腕部の距離を隔てた 2 点に温度素子を接触し温度刺激を与えた際のそれぞれの点に生じた温度感覚を記録，検証した．

2. 実験

2.1 被験者

被験者は年齢 21～25 歳の日本人男性 6 名であり，うち 5 名は右利き，1 名は両利きであった．

2.2 実験システム

実験システムを Fig. 1 に示す．システムは 2 個の温度刺激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 個の温度刺激提示装置は 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[8].

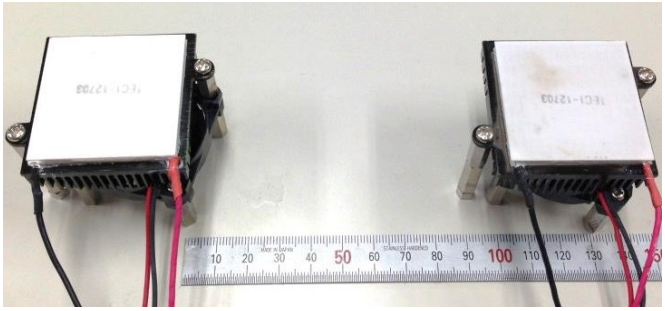

Fig. 1 Temperature stimulator

2.3 実験環境

実験は室温 28℃の環境下で行われた．

2.4 実験条件

各温度刺激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．

2.5 実験手続き

被験者は Fig. 2 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． 20 秒後右腕を装置から離し，2 つの温度刺激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．

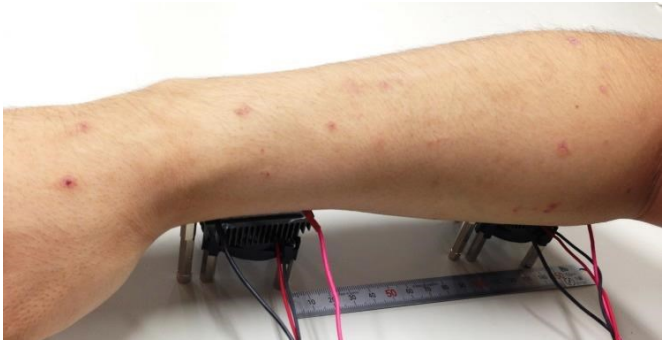

Fig. 2 Appearance of the experiment

3. 実験結果

実験結果を Fig. 3，Fig. 4，Fig. 5，Fig. 6 に示す．グラフの“o-o”は手首側，肘側に提示した温度刺激を表す（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 Fig. 3 が両装置から同一の刺激を提示した場合（“n-n”，“h-h”，“c-c”），Fig. 4 が肘側の装置のみ常温刺激を提示した場合（“h-n”，“c-n”），Fig. 5 が手首側の装置のみ常温刺激を提示した場合（“n-h”，“n-c”），Fig. 6 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．

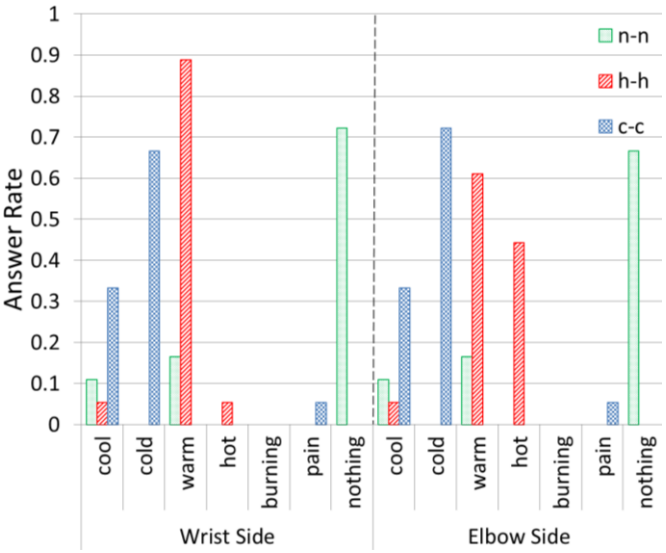

Fig. 3 Result of the experiment in which the same temperatures were presented to both sides

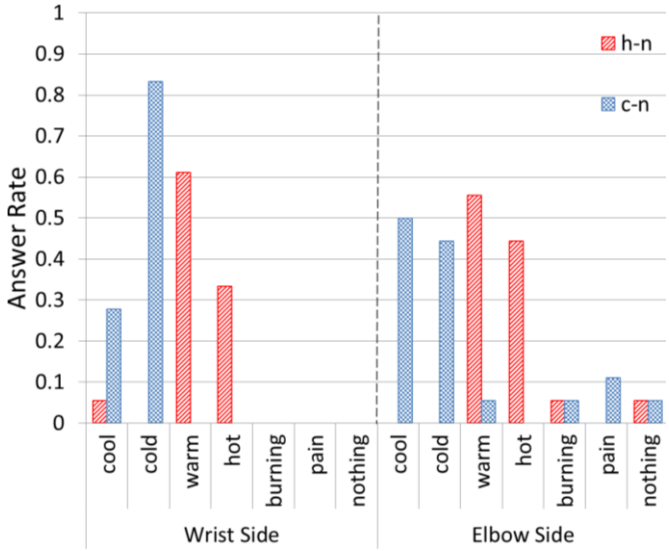

Fig. 4 Result of the experiment in which neutral temperature was presented to elbow side

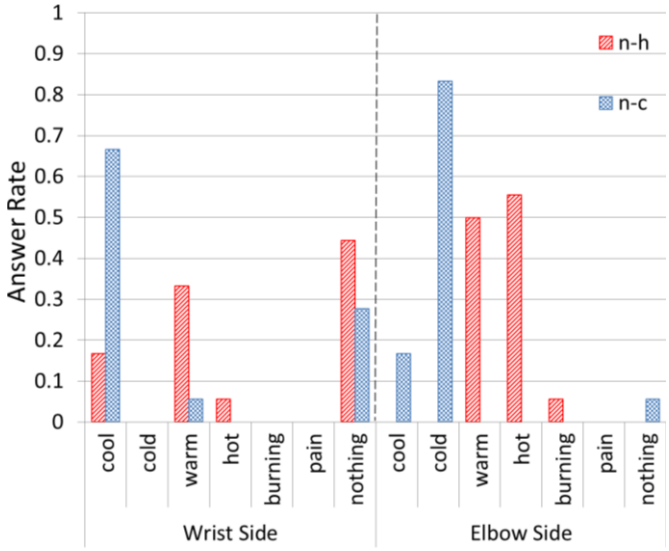

Fig. 5 Result of the experiment in which neutral temperature was presented to wrist side

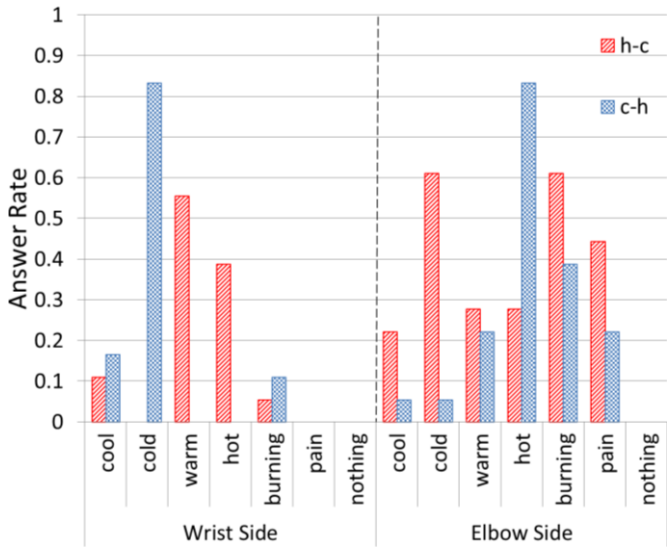

Fig. 6 Result of the experiment in which hot and cold temperatures were presented

Fig.3 では両側に同一の刺激を提示した場合には概ね提示刺激通りの知覚がなされたことがわかる．Fig. 4 では手首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肘側でも知覚されたことがわかる．一方 Fig. 5 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. Fig. 6 に示した温冷刺激を同時に提示した場合では，肘側で“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. 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 Thermal Referral 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刺激に加えて，Thermal Referral により手首側へ提示された温度刺激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，SN（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 Thermal Referral 生起率は手首側に温度刺激を行った

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 Thermal Referral の生起によりもたらされたと考えると，肘側を参照した手首側への Thermal Referral の生起率が低いということになる．以上は Thermal Referral 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を示唆している．

5. 結論

我々はこれまで問題とされてこなかった複数の温度刺激点の間における温度の相互参照現象，Mutual Thermal Referral の機序の解明を目的とした．本稿では前腕部の 2 点に温度素子を接触し温度刺激を与えた際のそれぞれの点に生じた温度感覚を記録，検証した．その結果，温刺激と冷刺激を同時に提示した際に SN（TGI)が生起可能であること，刺激位置によって Thermal Referral の生起率に偏りが生じる事が示唆された．

参考文献

[1] Green, B. G., “Localization of thermal sensation: An illusion and synthetic heat.” *Perception & Psychophysics*, Vol. 22 (4), pp. 331-337, 1977.

[2] Green, B. G., “Thermo-tactile interactions: Effects of touch on thermal localization.” In Sensory functions of the skin of humans, *Springer US*, pp. 223-240, 1979.

[3] Ho, H. N., Watanabe, J., Ando, H., & Kashino, M., “Somatotopic or spatiotopic? Frame of reference for localizing thermal sensations under thermo-tactile interactions.” *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(6), 1666-1675, 2010.

[4] Green, B. G., “Synthetic heat at mild temperatures.” *Somatosensory & motor research*, 19(2), pp. 130-138, 2002.

[5] Craig, A. D., and M. C. Bushnell. "The thermal grill illusion: unmasking the burn of cold pain." *Science*, Vol. 265, pp. 252-255, 1994.

[6] Bach, P., Becker, S., Kleinböhl, D., & Hölzl, R. “The thermal grill illusion and what is painful about it.” *Neuroscience letters*, 505(1), pp. 31-35, 2011.

[7] Ho, H. N., Watanabe, J., Ando, H., & Kashino, M. “Mechanisms underlying referral of thermal sensations to sites of tactile stimulation.” *The Journal of Neuroscience*, 31(1), pp. 208-213, 2011.

[8] 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.