

ペルチェ素子を利用した足底 AVA 冷却シューズ

2018SC099 山口晃生

指導教員：野田聡人

1 はじめに

近年夏などの外部温度が高いときに、携帯型扇風機や首掛けファン等を利用して涼しむ人が多くなっている。それらの製品の多くは顔や首を冷やすことを目的とされているが、近年では手のひらを冷やす製品が開発されている。

これは手のひらにある動静脈吻合 (Arteriovenous Anastomoses, 以下 AVA) 血管を冷やすことを目的とし、AVA 血管の冷却で効率的に体温を下げることで注目されている。そして Grahn らの実験 [1] より、手のひらだけでなく足底や顔の三つの部位を同時に冷却するとさらに深部体温を効率的に下げることができることを示した。

しかし日常生活の中で手のひらや顔の冷却を行う装置は見受けられるが、足を冷却する装置はまだないように見受けられる。本稿では、日常生活において使用できる足底の AVA 血管を冷却する冷却シューズを提案する。冷却シューズを使用した時のイメージを図 1 に示す。

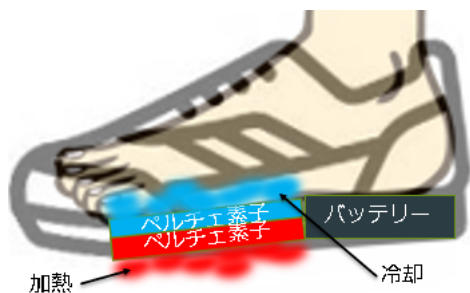


図 1 想定する使用イメージ

2 本研究の目標と課題

提案する冷却シューズは靴底内にペルチェ素子を内蔵し足底を充分冷却することを目的としている。充分な冷却とは、深部体温を下げる事をいう。上記で述べた Grahn らの実験 [1] では顔・手の平・足底の三つを冷却することで体温を 1.5K 程下げている。このことから本研究では Grahn の実験と同様に足底の冷却で体温を 1K 下げることが目標とする。課題は装置がどれほど稼働できるかである。シューズの靴底のスペースには限りがあり、そのため仮に靴底全体をバッテリーにしたとしても数分しかペルチェ素子を稼働できない可能性もある。以上のことより本稿では靴底全体をバッテリーにした時にどれほどペルチェ素子を稼働できるかを課題とし検討する。

3 血流が足底に送る熱量

本節ではユーザの身体からペルチェ素子にどれほどの熱量が送られ続けているのかを求め、冷却シューズはペルチェ素子と足底を直接接触させて使用する。従ってユーザからペルチェ素子に送られる熱の大部分が足底からの熱であり、その足底の熱の大部分が血流が足底に運ぶ熱であるとした。

そこでこの血流が足底に送る熱量を Pennes によって提唱された生体熱伝導方程式の第二項を用いて算出する。

下記に生体熱伝導方程式の第二項の式を示し、表 1 には方程式に用いる各パラメータの値を示す。

表 1 生体熱伝導方程式に用いる各パラメータ

記号	説明
Q_b [W/m ³]	血流が送る熱量
ρ_b [kg/m ³]	血液の密度
C_b [J/(kg·K)]	血液の比熱
ω_b [m ³ /(s·m ³)]	単位体積に流入する血液流量
T_a [K]	基礎体温
T [K]	組織の温度

$$Q_b = \rho_b C_b \omega_b (T_a - T) \quad (1)$$

今回は体温を 1K 下げることが目標とするため、血流の動脈部分から静脈部分を 1K 下げるのにどれほどの冷却負荷が必要か求める。上記の式の ω_b の値は竹森らが被験者のデータ計測から導いた式 [2] を用いて値を求める。AVA 血管を考慮した血流量を求めることができ、AVA 血管が最大まで拡張しているとすると $\omega_b = 5.0 \cdot 10^{-3}$ となる。

この ω_b の値に加えて横山の血液密度・比熱のモデル値 [3] $\rho_b = 1056$, $C_b = 3850$ を用いて血流の動脈部分から静脈部分を 1K 下げるときの Q_b の値は 20328[W/m³] となり、足部の体積 981cm³ としてこれを加えた値 Q_a は 19.9W、ユーザがペルチェ素子に送る熱量を求めることができた。

4 ペルチェ素子に求める吸熱量

本節では求めた熱量からペルチェ素子に必要な吸熱量を求める。

下記の図 2 のようにペルチェ素子の吸熱面は「身体から送られる熱」、「ペルチェ素子の加熱面から送られる熱」、そして「ジュール熱」によって加熱され、一方でペルチェ効果によって吸熱面の熱を加熱面に送り込む。従って、装置に必要な吸熱量は身体から送られる熱に加えて上記二つの熱を考慮して必要な値を求める必要がある。

以上のことを下記の等式にまとめ、この式からペルチェ素子に必要な吸熱量を求める。各パラメータも表 2 に示す。

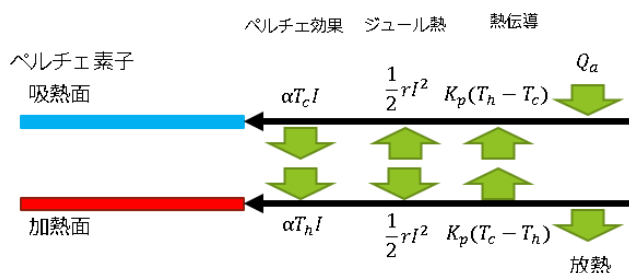


図 2 ペルチェ素子における熱収支図 [4]

表 2 足底表面の熱収支の式の各パラメータ

記号	説明
Q_c [W]	足底表面の蓄熱量
α [V/K]	ゼーベック係数
T_c [K]	ペルチェ素子吸熱面の温度
T_h [K]	ペルチェ素子加熱面の温度
K_p [W/K]	吸熱面-加熱面間の熱コンダクタンス
Q_a [W]	身体からペルチェ素子に送られる熱量
r [Ω]	ペルチェ素子の電気抵抗
I [A]	ペルチェ素子に流れる電流

$$Q_c = -\alpha T_c I + K_p(T_h - T_c) + \frac{1}{2} r I^2 + Q_a \quad (2)$$

式 (2) は足底表面の熱収支を表したものであり、 Q_c が 0 になるときはペルチェ素子の吸熱量とその他熱量が釣り合っている状態である。今回は $Q_c = 0$ のときペルチェ素子に必要な吸熱量 $\alpha T_c I$ の値を求めて、どれほどの吸熱量があると装置と身体からの熱量が釣り合う状態になるかを考察する。

まず加熱面から送られる熱量を求める。この時ペルチェ素子の吸熱面の温度は、体温 37.0°C から 1K 程下げたことを想定して吸熱面を 37.0°C とし、加熱面の温度は夏場のアスファルト等を考慮して 50°C とした。そして熱コンダクタンスは上原ら [4] と佐藤ら [5] の式、そしてペルチェ素子の半導体材料として一般的に利用される Bi_2Te_3 を利用した場合の温度特性係数を用いると、 $K_p = 1.61\text{S}/\text{H}$ となった。

そしてジュール熱は電気抵抗係数を先ほどの温度特性係数と佐藤ら [5] の式から求め、仮に装置に流す電流を 10.0A 以内に抑えると想定して、 10.0A をペルチェ素子に流したとすると、ジュール熱は $6.0 \cdot 10^{-4}\text{H}/\text{S}$ となる。

また、ペルチェ素子の厚さ・表面積を仮に FPH1-7107AC の 3.95mm 、 9.0cm^2 とし、求めたジュール熱、加熱面から送られる熱、そして身体から足底に送られる熱から、ペルチェ素子に必要な吸熱量は 20.27W となった。

5 装置の稼働時間

本節では求めた吸熱量から靴底全体をバッテリーにした時の装置稼働時間を求める。

今回は求めた吸熱量をもとにペルチェ素子を選定しペルチェ素子の消費電力を求める。本稿では FPH1-7107AC を選定した。このペルチェ素子の仕様書より、ペルチェ素子の加熱面が 50°C のとき、 3.6A の電流、 7V 以下の電圧で求める吸熱量が出せることが分かり、またペルチェ素子の冷却面が 37.0°C の時吸熱量が 20W 当りの値となる。ペルチェ素子に使用する電流・電圧をそれぞれ 3.6A 、 7V とすると消費電力は 25.2W となる。

靴底の体積は日本人の平均的な靴の足長とかかと幅の値、 24.3cm 、 6.4cm に加えて靴底の厚さ 3cm として計算する。このとき体積を全てリチウムポリマー電池にすると体積エネルギー密度 $520\text{Wh}/\text{L}$ からバッテリーの最大容量は 242.6Wh となり、ペルチェ素子が稼働できる時間は 9.62h となった。

6 まとめ

本稿では血流による熱量からペルチェ素子に必要な吸熱量を求め、この吸熱量から靴底全体をバッテリーにした時の装置稼働可能時間を求めた。結果は 9 時間以上となり、普段生活する上でも十分使用できる時間となった。

しかし提案する冷却シューズの開発には、ペルチェ素子の放熱やバッテリー重量などまだ検討すべき箇所が多く存在する。従ってシューズの実用化には今回の血流による熱だけでなく、装置の放熱、重量なども検討して進めなければならない。

参考文献

- [1] D. A. Grahn, Ph.D., J. L. Dillon, H. C. Heller, Ph.D: *Heat Loss Through the Glabrous Skin Surfaces of Heavily Insulated, Heat-Stressed Individuals.* J Biomech Eng, 2009.
- [2] 竹森利和, et al.: 「人体熱モデルの開発: 熱的快適性評価のための基本モデル開発。」 日本機械学会論文集 B 編 61.584 (1995).
- [3] 横山真太郎, et al.: 「生体内伝熱現象の基礎一部位別特性を考慮した体温調節モデルの開発をめぐって」 伝熱研究, vol.33, No.131, (1994).
- [4] 上原賢祐, et al.: 「ペルチェ素子を利用した生体用小型冷却装置の数学モデル中のパラメータに関する研究 (装置の冷却性能およびサイズの影響).」 日本機械学会論文集 83.849 (2017).
- [5] 佐藤航, et al.: 「熱回路モデルとデータ同化を利用したペルチェ素子の温度特性係数推定手法。」 日本機械学会論文集, 82.844, (2016).